

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Studijní obor: Povrchová a podzemní voda



**Lucie Patzeltová**

Metodika stanovování základního odtoku

Methodology of baseflow assessment

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc.

Praha, 2021

## **Zadání bakalářské práce**

### **Název práce**

Metodika stanovování základního odtoku

### **Cíle práce**

Cílem bakalářské práce je podat rešeršní přehled o trendech stanovování základního odtoku jako jedné z významných složek vodní bilance. Práce se zaměří na historický vývoj domácích i světových názorů a koncepcí a to včetně nejmodernějších trendů využívajících výpočetní techniku. Jednotlivé metody porovná z hlediska použitých fyzikálních postupů a náročnosti na datové vstupy a z rešeršních dat vyhodnotí i jejich hlavní výhody i případná omezení. Druhá část práce bude zaměřena na metodické cvičení aplikace vybrané konkrétní metody na datech monitoringu z povodí Kamenice na profilu Hřensko. Dlouhodobé řady kvalitních dat a zájem jejich vlastníka SČVK o spolupráci je základem pro případné pokračování bakalářské práce v rámci práce diplomové.

Zadáno: 30. 11. 2020

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CS

.....

Student: Lucie Patzeltová

.....

### **Prohlášení**

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

V Praze dne .....

.....

## **Poděkování**

Ráda bych zde poděkovala svému školiteli doc. RNDr. Zbyňku Hrkalovi, CSc. za jeho laskavé vedení při psaní práce. Zároveň chci poděkovat mé mamince RNDr. Beatrici Patzeltové, PhD. za cenné rady ke kapitole o Kamenici.

## **Abstrakt**

Tato práce podává přehled o metodách stanovení základního odtoku jakožto jedné z významných složek vodní bilance. Informace o velikosti základního odtoku je důležitá pro stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemních vod a je jedním ze základních parametrů určujících možnosti jejich využití. Práce podává přehled o historickém vývoji v oblasti oceňování přírodních zdrojů podzemních vod a porovnává jednotlivé metody z hlediska náročnosti na datové vstupy a kvalitu výstupů. Je představeno několik případových studií zabývajících se aplikací vybraných postupů. Dále je představeno povodí Kamenice jakožto pilotní území a na základě jeho přírodních poměrů a podoby vstupních dat ze závěrového profilu Hřensko je zvolena vhodná metoda pro výpočet základního odtoku.

## **Abstract**

This thesis provides an overview of methods used for determining the baseflow as one of the essential components of Water balance. Knowledge of the baseflow is important for determining the size of natural groundwater resources, as it gives valuable information on the possibilities of their exploitation. The thesis provides an overview of the historical development of the methodology in this field. Selected methods are compared based on the difficulty of their application, data input requirements and the quality of outputs. Several case studies dealing with the application of selected procedures are presented. Furthermore, the Kamenice river basin is presented as a pilot area. Based on its natural conditions and the form of available data inputs from the Hřensko measurement profile, a suitable method for calculating the baseflow is chosen and applied.

## Obsah

1. ÚVOD .....	1
2. ZÁKLADNÍ ODTOK .....	1
3. VODNÍ BILANCE .....	2
4. VÝVOJ V OBLASTI OCENĚNÍ PŘÍRODNÍCH ZDROJŮ PODZEMNÍCH VOD .....	4
5. VÝVOJ METODIKY .....	5
6. PŘEHLED VYBRANÝCH METOD .....	6
6.1 Metoda hydrologické bilance .....	6
6.2 Metody rozčlenění hydrogramu .....	7
6.3 Metoda Klinera a Kněžka .....	8
6.4 Stanovení základního odtoku na základě nejnižších průtoků v povrchových tocích (Castanyho metoda) .....	10
6.5 Metoda minimálních měsíčních průtoků (Killeho metoda) .....	10
6.6 Metoda proudu .....	12
6.7 Metoda GROUND .....	13
6.8 Metoda MGPM .....	13
6.9 Eckhardtův filtr .....	14
6.10 Metoda postupných profilových průtoků .....	16
7. VYBRANÉ PŘÍPADOVÉ STUDIE .....	16
7.1 Základní odtok na území Československa (Krásný et al., 1982) .....	16
7.2 Modelové řešení uzavřeného hydrogeologického rajonu (Olmer et al., 2011) .....	18
7.3 Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů (Kulhavý et al., 2001) .....	20
7.4 Podzemný odtok v slovenskej časti Tatier (Fendeková et al., 2014) .....	21
8. VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ METOD .....	23
9. PŘÍPADOVÁ STUDIE POVODÍ KAMENICE .....	25
9.1 Charakteristika povodí Kamenice .....	25
9.1.1 Hydrologické a geomorfologické poměry .....	25
9.1.2 Klimatické a biogeografické poměry .....	26
9.1.3 Geologické poměry .....	26
9.1.4 Hydrogeologické poměry .....	27
9.1.5 Využití povrchových a podzemních vod .....	27
9.1.6 Vrtná a hydrogeologická prozkoumanost .....	28
9.2 Charakteristika vstupních dat .....	29
9.3. Výběr vhodných metod pro stanovení základního odtoku .....	29
9.4 Aplikace vybrané metody .....	30
9.6 Diskuze výsledků .....	31

10. ZÁVĚR.....	31
11. LITERATURA.....	33

### Seznam obrázků

Obr. 1: Různé způsoby rozčleňování hydrogramu. 1 – přímý odtok, 2 – základní odtok (Kříž, 1983) ..	8
Obr. 2: Ukázka separace základního odtoku metodou Klinera a Kněžka na příkladu Metuje (Uhlík et al., 2016).....	9
Obr. 3: Ukázka vyčlenění základního odtoku pomocí Killeho metody. a – vyrovnání přenosu exponenciální křivkou, b – přímkové vyrovnání v lineární soustavě (Krásný et al., 1983).....	11
Obr. 4: Ukázka separace základního odtoku pomocí Eckhardtova filtru v profilu Rozhrání. Q <sub>o</sub> – celkový odtok, Q <sub>z</sub> – základní odtok (Olmer et al., 2011) .....	15
Obr. 5: Isolinie specifického základního odtoku v l . s-1 . km-2 za období 1971 – 1990 (Kessler a Kněžek, 2000) .....	17
Obr. 6: Příklad separace základního odtoku (Q <sub>z</sub> ) z celkového drenážního odtoku (Q <sub>měř.</sub> ) metodami GROUND a MGPM pro data z experimentálního povodí Černíčí, Š2, 1996 (Kulhavý et al., 2001)21	
Obr. 7: Vývoj průměrného ročního základního odtoku v hodnocených povodích (Fendeková et al., 2014).....	22
Obr. 8: Povodí Kamenice (Sestaveno podle dat: Arcdata, Dibavod) .....	25
Obr. 9: Vyčlenění základního odtoku pomocí Killeho metody za období 1980 – 2019 ve vodoměrném profilu Hřensko.....	30

### Seznam tabulek

Tab. 1: Výsledky použitých metod pro data z profilu Rozhrání (Olmer et al., 2011).....	19
--	----

### Seznam použitých zkratk

S - sever

J - jih

Z - západ

V - východ

SZ - severozápad

JZ - jihozápad

PPP – postupné profilové průtoky

CHKO – chráněná krajinná oblast

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČGS – Česká geologická služba

SČVK – Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.

VÚV TGM – Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka

## 1. ÚVOD

Tato práce shrnuje poznání o metodice stanovování základního odtoku. Základní odtok je důležitým prvkem vodní bilance a dává informaci o možnostech využití podzemních vod, které představují přibližně 20% všech využívaných zdrojů vod a 45% odběrů pro zásobování pitnou vodou. Je součástí celkového odtoku, podle Kněžka (1988) tvoří základní odtok 30 – 50 % průměrného odtoku z povodí, v oblastech s výskytem dobře propustných křídových sedimentů to může být až 50 – 70 % (Krásný et al., 1982). Hlavním cílem práce je podat přehled o dané problematice a poskytnout informace potřebné pro volbu vhodné metody stanovení základního odtoku.

V průběhu let byla vyvinuta řada nepřímých postupů pro stanovení základního odtoku. Pro bližší představení byly zvoleny metody hydrologické bilance, rozčlenění hydrogramu, Klinera a Kněžka, minimálních měsíčních průtoků (Killeho), proudu, postupných profilových průtoků, stanovení na základě nejnižších průtoků v povrchových tocích (Castanyho), GROUND, MGPM a Eckhardtův filtr. Nejčastěji se základní odtok stanovuje vyčleněním z průběhu celkového odtoku. Většina postupů vychází z údajů o průtocích ve vodoměrných profilech a pozorování vodních stavů, jsou proto závislé na kvalitě a rozsahu měřených dat, rozmístění profilů a také užívání vody v povodí (Olmer et al., 2011). Výsledné hodnoty se v závislosti na pracovním postupu více či méně liší. Jednotlivé metody mají své nedostatky, mezi něž často patří subjektivita či nedostupnost potřebných dat. Proto byly v průběhu času upravovány a vyvíjeny nové. Rozvoj metodiky probíhá již přibližně od poloviny 20. století a souvisí s rozvojem v oblasti oceňování přírodních zdrojů podzemních vod. Metody byly aplikovány v řadě případových studií, z nichž několik je v této práci prezentováno. Prostor je věnován jak českým, tak zahraničním autorům.

Dalším cílem této práce je zhodnotit použitelnost vybraných metod a výběr vhodného postupu pro stanovení základního odtoku v povodí Kamenice. Povodí se nachází v severozápadní části české křídové pánve, přičemž horní tok spadá do hydrogeologického rajonu 4650 a dolní tok tvoří významnou část hydrogeologického rajonu 4660. Stanovení základního odtoku pro toto území má velký význam, neboť se jedná o vodárensky významnou oblast. Podle Herčíka et al. (1999) je hydrogeologický rajon 4460 z hlediska tvorby podzemních vod nejproduktivnějším rajonem v české křídové pánvi.

Práce má převážně rešeršní charakter. Podkladem pro získávání informací jsou publikace jak českých, tak zahraničních autorů. Především se jedná o studie zveřejněné ve vědeckých časopisech a sbornících nebo závěrečné zprávy prací zaměřených na hydrogeologický průzkum.

## 2. ZÁKLADNÍ ODTOK

Základní odtok (podzemní odtok, odtok podzemní vody) je součástí celkového odtoku z povodí. Jedná se o část celkového toku, která je tvořena příronem podzemní vody a účastní se tak celkového oběhu

vody v krajině. Jeho určování má velký význam, neboť základní odtok hraje roli při vodohospodářském bilancování, a zároveň při výpočtu přírodních zdrojů podzemní vody (Krásný et al., 1982).

Celkový odtok z povodí si lze představit jako průtok v závěrovém profilu hlavního toku v povodí. Zpravidla ho tvoří tři složky:

- a) Povrchový odtok (ron) – část vody stékající po atmosférické srážce po povrchu
- b) Hypodermický odtok – část vody stékající do toku ve vrstvě půdy bezprostředně pod povrchem, aniž dosáhne k hladině podzemní vody, odtok z pásma aerace
- c) Základní odtok – přiron podzemní vody do celkového odtoku, odtok z pásma nasycení

Základní odtok nelze měřit přímo, neboť jeho složka není dostupná přímému pozorování. K jeho výpočtu je obvykle třeba využití nepřímých metod (Kněžek, 1988). Nejčastěji se základní odtok určuje jeho vyčleněním z celkového odtoku. Vyčlenění samostatného povrchového odtoku a samostatného hypodermického odtoku je obtížné, proto se v praxi rozděluje celkový odtok pouze na dvě složky, a to na základní odtok a přímý odtok. Přímý odtok zahrnuje jak složku povrchového, tak složku hypodermického odtoku. Podíl jednotlivých složek na celkovém odtoku je v čase značně proměnlivý (Kříž, 1983). Základní odtok se v celkovém toku výrazně uplatňuje zejména při nízkých průtocích. Castany et al. (1970) předpokládá, že v době výskytu nejnižších průtoků je celkový odtok tvořen převážně základním odtokem. Působí tak jako vyrovnávací faktor (Krásný et al., 1982), a jeho znalost je tedy velmi významná pro vodohospodářské plánování.

Základní odtok je třeba chápat jako výslednici řady činitelů uplatňujících se v povodí (Kliner a Kněžek, 1974). Lacey a Grayson (1998) tvrdí, že podzemní odtok je funkcí mnoha faktorů, mezi něž patří topografie, geologie, půdní poměry, klimatické poměry a vegetace. Kněžek (1988) předpokládá, že dlouhodobý průměrný základní odtok lze pokládat za shodný s dlouhodobou průměrnou velikostí infiltrace srážek v regionálním měřítku.

Z hydrogeologického hlediska lze odtok podzemní vody ve víceletém průměru ztotožnit s přírodními zdroji podzemní vody a jejich režim pokládat za identický nebo alespoň velmi podobný (Prchalová a Olmer, 2001). Stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemních vod v jednotlivých hydrogeologických rajonech je nutným vstupním údajem pro hydrologickou bilanci (Olmer et al., 2011) a zároveň pro hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemní vody.

### **3. VODNÍ BILANCE**

Vedení vodní bilance patří k základním činnostem v oblasti zjišťování a hodnocení stavu podzemních a povrchových vod (zákon č. 254/2001 Sb. O vodách). Podle tohoto zákona se vodní bilance sestává

z hydrologické bilance a vodohospodářské bilance. Způsob sestavení vodní bilance je upraven ve vyhlášce Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb.

Hydrologická bilance porovnává přírůstky a úbytky vody a změny vodních zásob v území za daný časový interval. Jejím systematickým sestavováním se v České republice zabývá ČHMÚ od roku 2002. V rámci hydrologické bilance je bilancováno jak množství vody, tak také jakost vody. Od roku 2010 (novela zákona o vodách č. 150/2010 Sb.) je zpracovávána pro deset dílčích povodí. Kříž (1983) určuje vztah mezi jednotlivými prvky bilance, daný rovnicí:

$$H_s + O_z + O_p + H_r = O'_p + H_e + O'_z + H'_r, \quad (3.1)$$

kde:  $H_s$  – voda ze srážek

$H_e$  – výpar

$H_r$  – zásoby povrchové a podzemní vody na začátku uvažovaného období

$H'_r$  – zásoby povrchové a podzemní vody na konci uvažovaného období

$O_p$  – přítok povrchové vody

$O'_p$  – odtok povrchové vody

$O_z$  – přítok podzemní vody

$O'_z$  – podzemní (základní) odtok

Všechny členy se vztahují k uvažovanému území. Autoři zprávy o hydrologické bilanci (Vlnas, 2019) rozlišují dva typy prvků hydrologické bilance (bilančních veličin):

- a) Veličiny, které mají rozměr toků: atmosférické srážky, územní výpar, odtok z povodí (průtok v závěrovém profilu), základní odtok z povodí
- b) Veličiny, které mají rozměr zásoby: zásoba půdní vody v zóně aerace, zásoba vody ve sněhové pokrývce, zásoba podzemní vody, zásoba vody v tocích a nádržích

Bilance bývá často počítána pomocí hydrologického modelu. Pro model je podstatné stanovení časového průběhu základního odtoku a dotace podzemních vod, neboť se jedná o veličiny značně proměnlivé

v čase. Hydrologický model umožňuje i na základě kalibrace podle kratšího časového období odhad kolísání základního odtoku v podmínkách, které se během tohoto období nevyskytly, ale jejich výskyt je reálný. Odhad je možný díky dostupnosti dlouhodobých dat o srážkách a dalších meteorologických veličinách.

Výstupy takto zpracované hydrologické bilance jsou podkladem pro sestavení vodohospodářské bilance. Vodohospodářská bilance porovnává požadavky na odběry povrchové a podzemní vody s využitelnou kapacitou vodních zdrojů. Rovněž se zabývá požadavky na vypouštění odpadních vod. Vztahuje se k určitému území a času. Bilancováno je množství, jakost a ekologický stav vod. Vodohospodářská bilance podává obraz o stavu zdrojů vody a stupni jejich využití a tvoří základní podklad pro vodohospodářské plánování a hospodaření s vodou (Prchalová a Olmer, 2001).

#### **4. VÝVOJ V OBLASTI OCENĚNÍ PŘÍRODNÍCH ZDROJŮ PODZEMNÍCH VOD**

K poznání důležitosti znalosti základního odtoku vedlo bližší poznání srážkoodtokových vztahů. Hydrologové a hydrogeologové se zabývají jeho stanovováním přibližně od poloviny minulého století, od této doby došlo v oblasti oceňování velikosti přírodních zdrojů podzemních vod k významnému vývoji. Na tomto trendu se významně podílela i Československá odborná pracoviště. V 60. letech minulého století započal na území Československa program regionálního hydrologického průzkumu. Souběžně s ním se rozvíjela i metodika stanovování přírodních zdrojů podzemních vod. Význam má především regionální hydrogeologický průzkum, který byl realizován v letech 1966 – 1990 a stanovil zásoby podzemní vody. Počátkem 70. let se z důvodu rostoucích nároků na nové zdroje vody, zejména pro veřejné zásobení, přistoupilo k bilancování podzemních vod.

Metodika stanovení velikosti zdrojů podzemních vod byla publikována většinou ve vědeckých časopisech a v konferenčních sbornících (např. Vodohospodářský časopis, Sborník geologických věd ČGS, časopis VÚV TGM). Knižní publikaci s názvem Využití a ochrana podzemních vod k tomuto tématu vydal Kliner et al. (1978). Hodnocení podzemního odtoku na našem území bylo publikováno v práci Odtok podzemní vody na území Československa (Krásný et al., 1982). Kněžek (1988) ve své publikaci Podzemní složka odtoku shrnuje dosavadní úroveň poznání. Podává přehled metodiky pro určení základního odtoku a hodnotí československý přínos v této oblasti jako výrazný. Z vlastní zkušenosti doporučuje autor objektivní metody umožňující alespoň zčásti automatizovaný postup. Jako vhodnou metodu pro určení dlouhodobě průměrných charakteristik označuje Killeho metodu.

V okolních zemích byla metodika většinou součástí firemních postupů. Zveřejňována byla převážně v pracích vysokoškolských pedagogů (Domenico, 1972) nebo mezinárodních organizací (Kovalevsky, 2004). Postupy byly publikovány také v amerických vědeckých publikacích (Winter, 1998; Healy, 2007). Významný vývoj v oblasti určování přírodních zdrojů podzemních vod proběhl díky rozvoji

počítačové techniky. Nově bylo umožněno používání modelových řešení, pomocí kterých lze provádět simulace různých situací a jejich analýzu.

V roce 2010 byla zpracována studie pro další regionální hydrogeologický průzkum (Olmer et al., 2011). V této studii autoři podávají přehled o současné úrovni metod hodnocení základního odtoku a předkládají modelová řešení v různých hydrogeologických prostředích. V letech 2010 – 2016 probíhal projekt České geologické služby Rebilance zásob podzemních vod (Kadlecová et al., 2016), v rámci něhož byly hodnoceny přírodní zdroje v 58 hydrogeologických rajonech. Hodnoceny byly rajony, ve kterých je podzemní voda jediným zdrojem pro zásobování pitnou vodou, nebo ve kterých odběry z podzemní vody výrazně převažují odběry povrchové vody. Přírodní zdroje podzemních vod byly stanoveny s 50 % a 80 % zabezpečeností podle hydrologického, případně hydraulického modelu. Dlouhodobé využitelné zdroje mají úroveň zabezpečenosti 80 až 90 % a respektují minimální zůstatkové průtoky i udržitelný stav přírodních zdrojů podzemních vod.

## 5. VÝVOJ METODIKY

Jako jeden z prvních způsobů pro určení základního odtoku byla používána metoda rozčlenění hydrogramu. Ta spočívá v rozdělení celkového odtoku na jednotlivé složky na základě tvaru hydrogramu. Jednu ze základních variant tohoto postupu uvádí Makarenko (1948). Na jeho práci navázal Kudelin (1948) a popsal obecné situace, které mohou při rozčleňování hydrogramu nastat. Drobilová a Šimo (1955) se zabývali zhodnocením Kudelinových metod pro podmínky Československa a konstatovali, že výsledky těchto metod jsou do značné míry ovlivněny subjektivním přístupem. Protože jednoduché rozčlenění hydrogramu nemusí poskytovat objektivní výsledky, další autoři se zabývali možnostmi zpřesnění této metody (např. Foster, 1949; Wundt 1958; Natermann, 1951). Kliner a Kněžek (1974) využili předpokladu o vzájemné závislosti hladin povrchové a podzemní vody a klasickou metodu hydrogramu upravili na základě sledování hladiny podzemní vody. Podmínkou pro využití této úpravy je existence vhodného sledovacího objektu.

Castany et al. (1970) popsal metodu která stanovuje průměrný základní odtok jako aritmetický průměr nejnižších denních průtoků za určité období. Z podobných principů vyšel i Kille (1970) a vyvinul metodu založenou na zobrazení průměrných denních průtoků v pravouhlém souřadném systému. Na něho navázal Olmer et al. (1972) a použil tento postup pro určení základního odtoku na území povodí Labe, Moravy a Odry. Slepíčka (1962) zpracoval metodu postupných profilových průtoků (PPP). Čáry PPP graficky vyjadřují, jak se v průběhu toku mění průtok v závislosti na ovlivňujících faktorech. Díky ní lze určit rozložení základního odtoku v průběhu toku, a odhalit tak změny v hydrogeologické stavbě, především tektonické poruchy. Jain (1997) vyvinul další empirickou metodu, kterou nazval GROUND (separation of GROUNDwater runoff). Tato metoda je založena na zkušenostech autorů o separaci celkového odtoku na povodí o malé ploše a obsahuje pouze jeden proměnlivý vstupní parametr.

Lyne a Hollick (1979) navrhli použití digitální filtrace k rozdělení odtoku na rychlý a zpožděný (základní) odtok. Jejich metoda využívá poznatků o separaci elektrického signálu o rozdílné frekvenci. Odfiltrováním vysokofrekvenčního signálu tak lze oddělit povrchový odtok od základního. Tento postup používá filtrační parametr, který závisí na podmínkách povodí. Na původní autory navázali další, např. Nahthan a McMahon (1990), Arnold a Allen (1999) či Spongberg (2000). Chapman a Maxwell (1996) navrhli digitální filtr s použitím dvou parametrů. Podobně Eckhardt (2005) využil vlastní digitální filtr, který rovněž pracuje se dvěma parametry a poskytuje věrohodný průběh základního odtoku. Eckhardtův postup nahradil metodu Klinera a Kněžka jakožto hlavní metodu pro výpočet základního odtoku pro hydrologickou bilanci.

## 6. PŘEHLED VYBRANÝCH METOD

### 6.1 Metoda hydrologické bilance

Možným způsobem stanovení základního odtoku je jeho výpočet z hydrologické bilance. Základní odtok je primárně jejím vstupním členem, avšak např. pro hodnocení přírodních zdrojů a využitelného množství podzemních vod tato metoda může být využita. Její použití je vhodné, pokud se hodnocené hydrogeologické povodí kryje s hydrologickým.

Bilanční rovnice (3.1) má velké množství členů, jedná se především o srážky, evapotranspiraci, přítoky a odtoky povrchové a podzemní vody a zásoby vody v povodí. Jejich stanovení je však často komplikované, a nedostatečně přesné hodnoty jednotlivých členů mohou vést k chybným výsledkům. Je proto vhodné zvolit dostatečně dlouhé bilanční období, při němž je možné zanedbat členy rovnice blížíící se k nule.

K výpočtům z bilanční rovnice se v současné době používá hydrologických modelů, které počítají v konstantním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci. Model umožňuje popsat a ověřit základní vztahy mezi srážkami, evapotranspirací a celkovým odtokem a odhad dotace podzemní vody a základního odtoku, vypovídající hodnota však závisí na kvalitě vstupních údajů. Výstupy modelů pak podávají podklady potřebné pro hospodaření s podzemními vodami, např. vztah podzemních vod k povrchovým tokům, směry a rychlosti proudění podzemní vody, tlakové poměry a další.

Výhodou užití hydrologické bilance je relativní jednoduchost této metody. Nevýhodou je obtížné stanovení vstupních členů hydrologické bilance, problémem je především stanovení evapotranspirace (Olmer et al., 2011). Je nutné, aby se jednotlivé členy vztahovaly ke stejnému území a časovému období.

Vstupními daty jsou hodnoty jednotlivých členů hydrologické bilance.

## 6.2 Metody rozčlenění hydrogramu

Hydrogram je graf znázorňující změny průtoku v čase na určitém vodoměrném profilu. Jako rozčlenění hydrogramu (někdy bývá označováno také jako „separace hydrogramu“), se označuje vydělení celkového odtoku na jednotlivé složky podle jejich původu. Postupný pokles odtékajícího množství vody v čase vyjadřuje výtoková čára.

Způsobů rozčlenění hydrogramu bylo popsáno více (např. Wundt, 1958; Natermann, 1951; Kudelin, 1960). Metody vychází z předpokladu, že celkový odtok je zpravidla tvořen třemi přirozenými složkami: povrchovým odtokem, hypodermickým odtokem, a základním odtokem, přičemž podíl jednotlivých složek odtoku je časově i plošně velmi proměnlivý. Při rozčleňování hydrogramu se používá několik odlišných přístupů v závislosti na tom, ke kterým činitelům ovlivňujícím odtokový proces přihlížejí. Zásadní význam pro výsledky metody má výběr vhodného profilu na toku. Musí zde docházet k odvodňování podzemní vody do povrchového toku, a místo musí představovat základní erozní bázi pro danou oblast oběhu podzemní vody (Kněžek, 1980). Každý jiný profil poskytne chybné výsledky.

Vztahy pro výtokovou čáru analyzuje ve své práci Slepíčka (1970). Všechny metody separace hydrogramu vycházejí ze základního vztahu pro výtokovou čáru odvozeného Boussinesquem:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-at}, \quad (6.1)$$

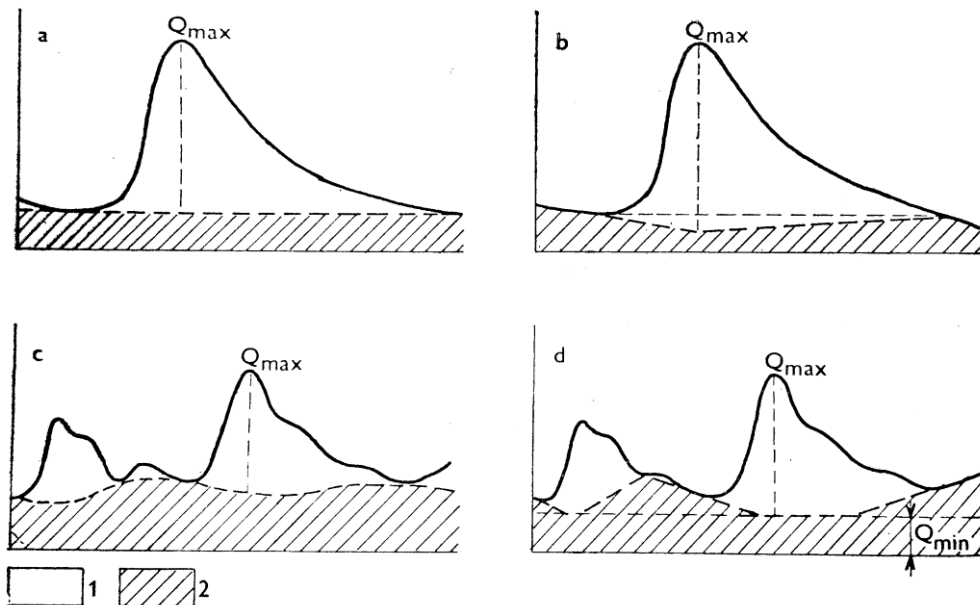
kde:  $Q$  – odtok v čase

$Q_0$  – počáteční odtok

$a$  – recesní konstanta

$t$  – čas

Nejjednodušším způsobem rozčlenění hydrogramu je rozdělení grafu čarou probíhající od počátku průtokové vlny, tj. přechodného zvětšení a následného poklesu průtoku, až po úsek výtokové čáry. Dalším způsobem je např. oddělení základního a přímého odtoku v pomoci čáry spojující měsíční minimální průtoky. Dělicí čára přihlíží i k tvaru průtokové vlny, ale má zpravidla obrácený průběh než tato vlna, což znamená, že v době nejvyššího přímého odtoku je základní odtok relativně nejnižší (Kříž, 1983).



Obr. 1: Různé způsoby rozčleňování hydrogramu. 1 – přímý odtok, 2 – základní odtok (Kříž, 1983)

Nevýhodou tohoto postupu je, že vyhodnocení je značně subjektivní. Problémem může být také posouzení dílčích poklesů v průtoku, které nemusí vždy znamenat pokles základního odtoku. Podle Klinera a Kněžka (1974) je proto v podmínkách střední Evropy, kde existuje poměrně nerovnoměrné rozložení srážek během roku, užití této metody poměrně obtížné. Z uvedených důvodů se v současné době klasické rozčleňování hydrogramu již prakticky nepoužívá (Olmer et al., 2011).

### 6.3 Metoda Klinera a Kněžka

Tato metoda vychází z předpokladu vztahu mezi pozorovanou úrovní hladiny podzemní vody a průtokem v hodnoceném vodoměrném profilu. Autoři (Kliner a Kněžek, 1974) na základě sledování hladiny podzemní vody upravili metodu rozčlenění hydrogramu a dospěli k jejímu zpřesnění. Úprava spočívá v odvození tvaru závislosti mezi průtokem podzemní vody a rozdílem úrovně hladiny podzemní vody a hladiny v toku.

Autoři vychází z předpokladu, že pokud existuje hydraulická spojitost mezi podzemními vodami a povrchovým tokem, musí nutně existovat i závislost hladin podzemních a povrchových vod. Za předpokladu trvalého sklonu hladiny podzemní vody směrem k toku je možné tento sklon charakterizovat rozdílem hladiny v povrchovém toku a hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu. Rozdíl odpovídá dotaci podzemní vodou, neboli základnímu odtoku. Změny rozdílu hladin vod odpovídají změnám ve velikosti základního odtoku.

Autoři metody vycházejí z Boussinesqovy rovnice pro jednorozměrné rovinné proudění s volnou hladinou. Na základě předpokladu o závislosti hladin povrchových a podzemních vod odvodili zjednodušený vztah pro určení příronu podzemní vody, resp. základního odtoku:

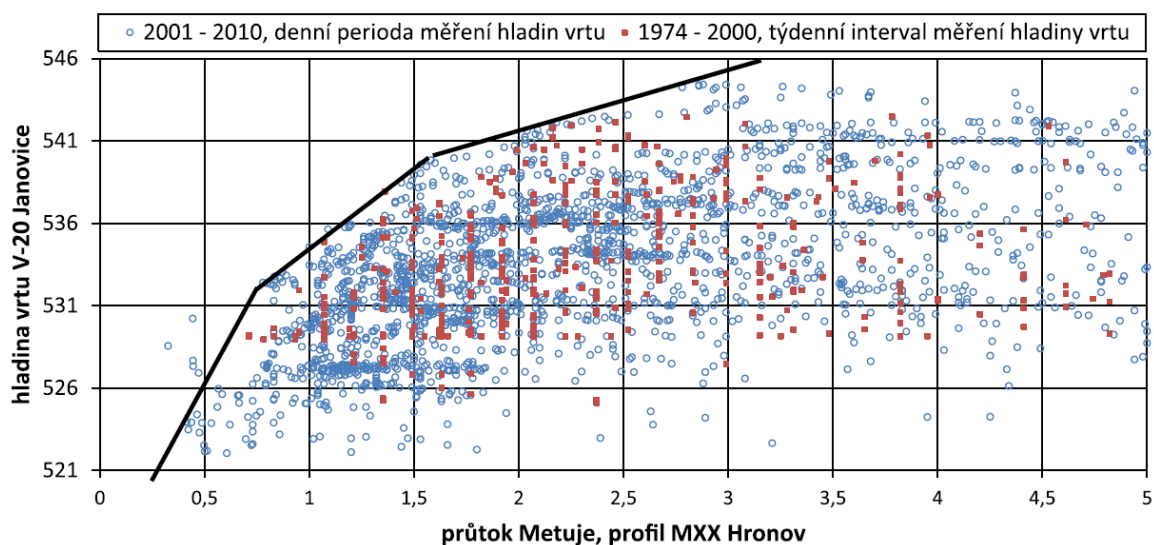
$$Q_{\text{podz}} = f \cdot \varepsilon \cdot \Delta H^n, \quad (6.2)$$

kde:  $Q_{\text{podz}}$  – základní odtok

$\varepsilon$  – koeficient zahrnující konstanty vlivu prostředí

$\Delta H$  – rozdíl hladin v pozorovacím vrtu a v povrchovém toku

Řešení rovnice je třeba vždy stanovit empiricky. Pro grafické znázornění je vhodné využít bilogarithmické soustavy. Do soustavy se vynášejí odpovídající si dvojice průtoku a rozdílu hladin v povrchovém toku a v pozorovacím vrtu. V obdobích, kdy je celkový odtok tvořen pouze základním odtokem, budou body tvořit přímkovou závislost. Naopak v obdobích smíšeného celkového odtoku bude určitému rozdílu hladin odpovídat větší průtok. Do soustavy se vynášejí všechny naměřené dvojice, a výslednou závislost představuje následně vykreslená obalová čára. Obalová čára udává nejmenší hodnoty podzemního odtoku, které odpovídají příslušnému rozdílu hladin. Základní odtok potom lze zpětně určit pomocí takto získané závislosti jeho vyčíslením podle hydrogramu kolísání hladiny podzemní vody (Olmer et al., 2011).



Obr. 2: Ukázka separace základního odtoku metodou Klinera a Kněžka na příkladu Metuje (Uhlík et al., 2016)

Metoda Klinera a Kněžka spojuje jak prvky experimentálního, tak statistického zpracování. Díky tomu je více objektivní než klasická metoda rozčlenění hydrogramu. Výhodou je možnost chronologického stanovení základního odtoku (Kněžek, 1988). Aby bylo možné postup použít, je však zapotřebí existence reprezentativního pozorovacího objektu hladiny podzemní vody. Je třeba, aby tento pozorovací objekt charakterizoval daný režim podzemních vod v hodnoceném povodí.

Vstupními daty jsou údaje o průtocích ve vodoměrném profilu a údaje ze sledování hladiny podzemní vody.

#### **6.4 Stanovení základního odtoku na základě nejnižších průtoků v povrchových tocích**

##### **(Castanyho metoda)**

Autoři tohoto postupu Castany et al. (1970) vychází z předpokladu, že v době výskytu nejnižších průtoků jsou vodní toky napájeny převážně podzemními vodami. Metoda je vhodná spíše pro jednoduchý odhad základního odtoku z dlouhodobého hlediska.

Hodnocení základního odtoku probíhá ve dvou krocích. Hodnotitel vybere období třiceti po sobě jdoucích dnů v rámci jednoho roku, během kterých bylo dosaženo nejnižšího celkového odtoku. Aritmetický průměr hodnot celkového odtoku představuje nejnižší roční odtok. Z takto získaných údajů za jednotlivé roky se poté vypočítá medián, který představuje hledaný základní odtok. Aby bylo možné získat spolehlivé výsledky, je podle autorů třeba provádět měření alespoň 10 let. Druhou variantou užití této metody je, že hodnotitel vybere vždy nejnižší průměrný měsíční průtok za rok. Aritmetický průměr těchto hodnot za minimálně 10 po sobě jdoucích let je opět hledaný průměrný základní odtok.

Castanyho metoda slouží pro určení průměrné hodnoty základního odtoku za delší časové období. Výhodou je možnost rychlého a jednoduchého odhadu základního odtoku a nenáročnost na vstupní data. Kněžek (1988) však uvádí, že tento způsob postrádá genetický rozbor průtokového režimu toku a lze ho použít pouze pro hrubý odhad podzemního odtoku. Podle autorů metody se výsledky liší od skutečných hodnot o 10 – 20 %, pokud je plocha uvažovaného povodí větší než 500 km<sup>2</sup> (Kouřil, 1975).

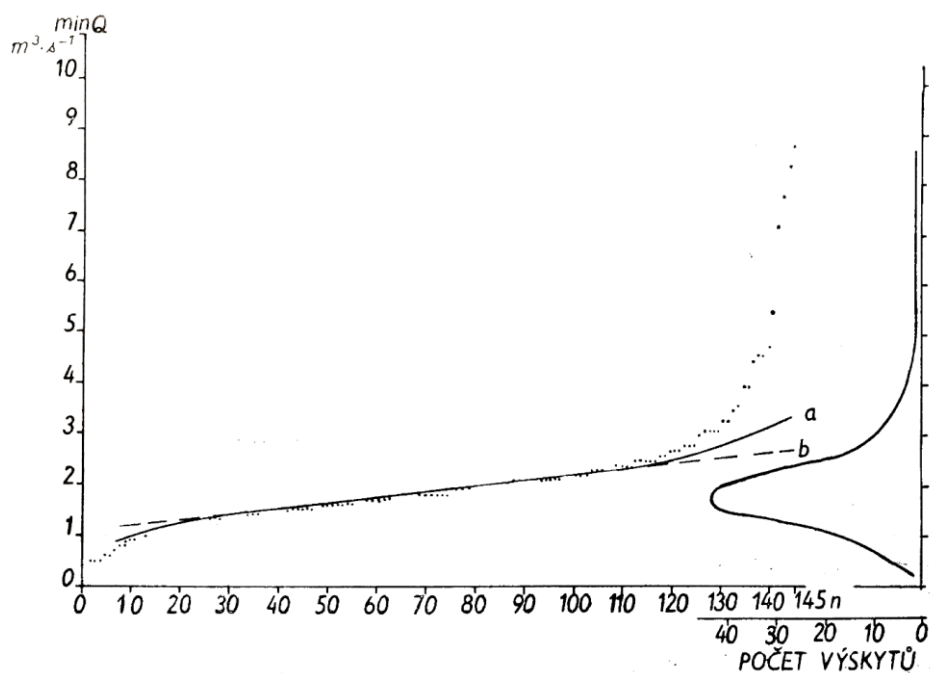
Vstupními daty jsou údaje o průměrných denních nebo měsíčních průtocích za časové období alespoň 10 let.

#### **6.5 Metoda minimálních měsíčních průtoků (Killeho metoda)**

Killeho metoda (Kille, 1970) minimálních měsíčních průtoků vychází ze stejného předpokladu jako předcházející postup, tedy že v době výskytu nejnižších průtoků je průtok v tocích tvořen převážně podzemním odtokem. Principem je zobrazení minimálních průměrných denních průtoků po jednotlivých

měsících do pravoúhlého souřadného systému. V rámci Československa se jednalo o jeden z nejpoužívanějších způsobů pro určení základního odtoku (Fendeková a Fendek, 1999). Použil ji např. Krásný et al. (1982) v práci Odtok podzemní vody na území Československa, protože je vhodná pro hodnocení dlouhodobě průměrných hodnot základního odtoku v regionálním měřítku.

Hodnotitel nejprve určí pro jednotlivé měsíce nejmenší průměrné denní průtoky. Tyto hodnoty se seřadí ve vzestupném pořadí a vyznačí se v semilogaritmické síti. Výsledná křivka se nazývá čára překročení minimálních měsíčních průtoků. Množina bodů tvořící přímou část křivky je následně aproximována přímkou, kterou je možné považovat za čáru oddělující podzemní odtok. Po přenesení této přímky do lineárního zobrazení vznikne exponenciála, která vymezuje spolu s osami celkové množství odteklé podzemní vody. Z této hodnoty lze získat průměrný podzemní odtok za měřené období, přičemž toto období by opět mělo být dlouhé alespoň 10 let. Pokud není podmínka desetiletého období splněna, lze využít znalostí o jiném povodí s podobnými přírodními podmínkami, kde měření probíhá již dostatečně dlouho (Olmer et al., 2011).



Obr. 3: Ukázka vyčlenění základního odtoku pomocí Killeho metody. a – vyrovnání přenosu exponenciální křivkou, b – přímkové vyrovnání v lineární soustavě (Krásný et al., 1983)

Jednodušší variantou tohoto postupu je vynesení seřazených hodnot nejmenších denních průtoků přímo do lineárního zobrazení. Spodní a střední část množiny bodů je proložena přímkou, která představuje linii oddělující podzemní odtok od celkového. Z plochy ležící pod přímkou lze následně vypočítat průměrný základní odtok za hodnocené období.

Výhodou Killeho metody je snadná dostupnost dat a jednoduchost jejich zpracování (Kessl a Kněžek, 2000). Díky tomu je omezena možnost subjektivního přístupu a je minimalizováno riziko, že dva hodnotitelé dojdou k výrazně odlišným výsledkům (Fendeková a Fendek, 1999). Způsob zpracování také omezuje vliv počátečních a koncových dat hodnocené časové řady. Nevýhodou je, že touto metodou lze získat pouze dlouhodobé hodnoty základního odtoku. Při relativně malé vodnosti výsledky tohoto postupu nezohledňují změny způsobené rozdíly v rozložení atmosférických srážek a vlastností kolektorů (Olmer et al., 2011). Rovněž nelze s úplnou jistotou tvrdit, že získané hodnoty obsahují pouze podzemní odtok (Krásný et al., 1982).

Vstupními hodnotami jsou data o průměrných denních průtocích za delší časové období.

## 6.6 Metoda proudu

Metodu proudu navrhli Krásný a Kněžek (1977) původně pro oblasti hydrogeologického masivu, kde se základní odtok tvoří v přípovrchové zóně. Jedná se o nenáročný způsob odhadu základního odtoku vhodný pro oblasti s jednoduchými homogenními poměry. Dobré výsledky podává metoda proudu především v horských oblastech s relativně stálou srážkovou dotací podzemních vod (Kněžek, 1988).

Autoři pro určení regionálního základního odtoku vycházejí z úpravy Darcyho filtračního zákona:

$$Q = T \cdot L \cdot I, \quad (6.3)$$

kde: Q – základní odtok

T – transmisivita

L – délka profilu, kterým protéká podzemní voda

I – hydraulický sklon

Za hodnotu transmisivity lze považovat průměrnou průtočnost pro jednotlivé typy hydrogeologických masivů. Jako hydraulický sklon je možno považovat charakteristiku sklonu terénu, především průměrný sklon údolních svahů. Délku profilu, kterým protéká podzemní voda, lze ztotožnit s délkou stálých vodních toků v hodnocené oblasti.

Nevýhodou metody proudu je její použitelnost pouze pro oblasti s jednoduchou geologickou stavbou a jednoduchými okrajovými podmínkami. Na větších územích nebo v oblastech hydrogeologického masivu je obtížné určit reprezentativní hodnotu transmisivity, stálý hydraulický sklon i délku

průtočného profilu, proto může být výsledek zatížen značnou chybou (Kněžek, 1988). Výhodou je, že hodnotitel nepotřebuje detailně znát okrajové podmínky ani podmínky tvorby zásob podzemní vody.

Vstupními daty jsou regionálně platné průměrné hodnoty transmisivity, hydraulický sklon a délka průtočného profilu.

## 6.7 Metoda GROUND

Metoda GROUND (separation of GROUNDwater runoff) empirická metoda, vytvořená tak, aby bylo možné separovat základní odtok na základě hydrogramů z povodí o ploše v řádu jednotek km<sup>2</sup>. Základním předpokladem je pomalá reakce složka odtoky se zpožděním jednoho časového kroku (obvykle jednoho dne). Metodu vyvinul Jain (1997) pro možnost separace základního odtoku z celkového drenážního odtoku. Drenážní odtok definuje Kulhavý et al. (2001) jako vodu vytékající ze systémů podpovrchového odvodnění půd a rozlišuje u něj dvě hlavní složky: základní a přímou (hypodermickou).

Vstupním parametrem metody je koeficient přírůstku základního odtoku, jehož empiricky zjištěná hodnota pro povodí o velikosti plochy v řádu jednotek km<sup>2</sup> je 0,075. Vnitřními parametry jsou přírůstek základního odtoku a logická proměnná. Začátek vyhodnocovaného období by měl připadnout do takového období, které je málo vodné, a průtok nekolísá. Vstupními hodnotami je řada středních denních odtoků, případně to může být i řada středních odtoků naměřených s jiným konstantním časovým krokem. Výstupem jsou dvě řady středních denních průtoků. První řada představuje přímý odtok, a druhá základní odtok z povodí. Princip metody spočívá v tom, že aplikace v každém dni porovná střední průtok s průtokem ve dni předchozím. Předpokládá se, že během prvního dne nenastala povodňová situace, první člen řady je tedy považován za základní odtok a přímý odtok v prvním dni je nulový. Dále se postup odvíjí podle toho, zda z předchozích dnů přetrvává nějaká povodňová situace a zda se zvyšuje či nezvyšuje průtok.

Metoda GROUND je vhodná spíše pro separaci přímého odtoku od zbytku toku, neboť základní odtok nemusí reagovat na odtok způsobený atmosférickými jevy hned (Kulhavý et al., 2001). Výhodou je, že tento postup lze použít i tehdy, pokud je datová řada relativně krátká. Rovněž je využitelný i v případě, kdy v datové řadě není žádná dobře vyvinutá odtoková vlna.

Vstupními daty jsou data o středních denních průtocích.

## 6.8 Metoda MGPM

Metoda MGPM (Modifikovaná Graficko-Početní Metoda) spočívá v rozčlenění hydrogramu podle předpokladu, že každá zřetelná odtoková vlna má příčinu v příslušné srážkové epizodě. Metoda využívá

algoritmus, jehož úkolem je separovat tu část odtoku, která je přímou odezvou na příčinnou srážku. Výchozí myšlenkou je, že základní odtok je tlumen horninovým prostředím, má plynulý průběh, kolísá jen pozvolna a závisí na vývoji dlouhodobé hydrologické bilance v povodí. Kulhavý et al. (2001) vyvinul tento postup pro možnost separovat základní odtok z celkového drenážního odtoku na malém povodí.

Pro celý datový soubor středních denních průtoků vypočte hodnotitel směrnice úseků v jednotlivých intervalech (první derivace podle času). Poté se vyhodnotí celá posloupnost takto vypočtených směrnic a intervaly se roztrídí do pěti kategorií podle znaménka směrnice. Cílem algoritmu je najít a určit uzlové body průběhu základního odtoku. Základní odtok se poté aproximuje parabolickou přechodovou křivkou.

Nevýhodou tohoto postupu je místy nadměrná reakce i na menší podružné odtokové vlny (Kulhavý et al., 2001). Naopak výhodou metody MGPM spočívá v její použitelnosti i v případech, kdy je k dispozici pouze relativně krátká datová řada, nebo pokud v se v datové řadě nenachází dobře vyvinutá a izolovaná odtoková vlna.

Vstupními daty jsou data o středních denních průtocích.

## 6.9 Eckhardtův filtr

K rozdělení odtoku na rychlý a zpožděný (základní) odtok lze využít digitální filtrace. Digitální filtry umožňují separaci elektrického signálu o rozdílné frekvenci, takže odfiltrováním vysokofrekvenčního signálu lze oddělit povrchový odtok od základního. V minulosti bylo navrženo několik takových filtrů (Lyne a Hollick, 1979; Nathan a McMahon, 1990; Arnold a Allen, 1999; Chapman a Maxwell, 1996). Tyto filtry mají jeden parametr. Eckhardt (2005) vychází z předpokladu, že výtok z kolektoru je přímo úměrný velikosti zásob podzemní vody. Navrhnul obecnou formu digitálního filtru, který má dva parametry.

Na základě Boussinesqovy rovnice odvodil Eckhardt vztah pro separaci základního odtoku:

$$Q_{zi} = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot a \cdot Q_z(i-1) + (1 - a) \cdot BFI_{max} Q_{oi}}{1 - a \cdot BFI_{max}}, \quad (6.4)$$

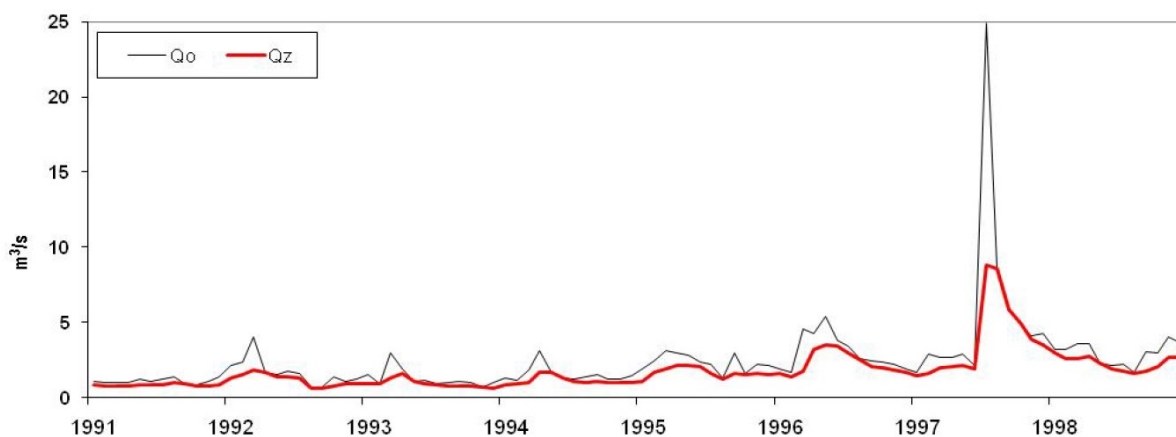
kde:  $Q_{zi}$ ,  $Q_{oi}$ ,  $Q_z$  – základní odtok

$a$  – recesní konstanta

$BFI_{max}$  – maximum indexu základního odtoku

Parametr  $a$  představuje recesní koeficient, který lze objektivně odvodit z analýzy výtokových čar v obdobích nízkých průtoků. Za tímto účelem byl v prostředí R sestaven program `recess`, který vyhledá poklesové větve hydrogramu s minimálním trváním 40 dnů. Následně tyto úseky program vytřídí tak, aby jejich spodní části tvořily obalovou křivku. Střední část zlogaritmované obalové křivky se proloží přímkou, jejíž směrnice představuje po odlogaritmování parametr  $a$ .

Druhým parametrem je maximální hodnota indexu základního odtoku  $BFI_{max}$ , která je určována na základě definovaných hodnot podle hydrologických, hydrogeologických a morfologických charakteristik uvažovaného povodí. V praxi bývá stanovován odhadem, anebo laděn manuálně. Jeho hodnota se pohybuje od 0,2 pro puklinové prostředí až po 0,8 pro průlinové prostředí.



Obr. 4: Ukázka separace základního odtoku pomocí Eckhardtova filtru v profilu Rozhrání.  $Q_o$  – celkový odtok,  $Q_z$  – základní odtok (Olmer et al., 2011)

Výhodou Eckhardtova filtru je časové rozlišení, lze jím získat dlouhou časovou řadu podzemního odtoku (Olmer et al., 2011). Metoda umožňuje objektivní separaci hydrogramu podle automatických algoritmů a poskytuje opakovatelné výsledky. Nevýhodou může být jisté podhodnocení základního odtoku v období minim v tocích s velmi dynamickým chodem toku, typicky v povodích s malou zásobou podzemní vody a s převážně puklinovým systémem zvodnění (Vlnas, 2011).

Vstupními daty jsou údaje o průměrných denních průtocích.

## **6.10 Metoda postupných profilových průtoků**

Metodu postupných profilových průtoků (PPP) vyvinul Slepíčka (1962) pro potřebu prostorového rozložení základního odtoku. Díky ní je možno řešit vztah mezi povrchovými a podzemními vodami v průběhu toku. Metoda rozlišuje úseky na povrchovém toku, ve kterých dochází k příronu podzemní vody do toku, a tedy k základnímu odtoku, a úseky na povrchovém toku se ztrátami, charakterizované naopak infiltrací do podzemních vod. Olmer et al. (2011) uvádí, že tato metoda patří ke standardním postupům při průzkumu podzemních vod.

Autor metody vychází ze základní představy, že v určitém profilu toku je průtok výsledkem úhrnného vlivu všech činitelů, které se uplatňují v hydrologickém režimu zkoumaného území. Metoda spočívá v grafickém zpracování vztahu mezi absolutními nebo specifickými průtoky a příslušnými délkami povodí, případně příslušnými velikostmi ploch povodí. Grafický záznam (čáry PPP) vyjadřuje změnu průtoku v průběhu toku v důsledku ovlivňujících faktorů a udává tak intenzitu příronu či ztrát. Rozborem čar PPP lze určovat povahu a velikost těchto změn. Pokud bude existovat ideální rovnoměrné prostorové rozložení ovlivňujících faktorů, čáry PPP se budou jevit téměř jako přímky s narušením pouze v místech ústí přítoků. V reálných tocích je však vývoj průtoků nerovnoměrný, proto mají čáry PPP nepravidelný tvar.

Na utváření anomálií v odtokovém režimu povrchových toků má významný vliv hydrogeologická stavba území, především tektonické poruchy (Kněžek, 1988). Vhodným umístěním postupných měrných profilů lze změny v hydrogeologické stavbě odhalit. V případě zkoumání anomálií se používají údaje o průtocích z dlouhých bezesrážkových období, kdy je průtok tvořen převážně základním odtokem. Použití údajů z bezesrážkových období je výhodné, neboť v takovém období lze zanedbat řadu jindy ovlivňujících faktorů (Olmer et al., 2011).

Nevýhodou tohoto postupu je náročnost jeho provedení, neboť vyžaduje opakovaná expediční terénní měření. Rovněž je nezbytná dobrá znalost terénu a hydrogeologických poměrů zkoumaného území. Výsledky metody jsou závislé na volbě postupných měrných profilů a na přesnosti měření průtoků. Pokud jsou k dispozici výsledky z období o různých vodnostech, lze jejich srovnáním získat i časové charakteristiky základního odtoku, případně infiltrace do podzemních vod (Kněžek, 1988).

Vstupními daty jsou údaje o průtocích na dílčích vodoměrných profilech.

## **7. VYBRANÉ PŘÍPADOVÉ STUDIE**

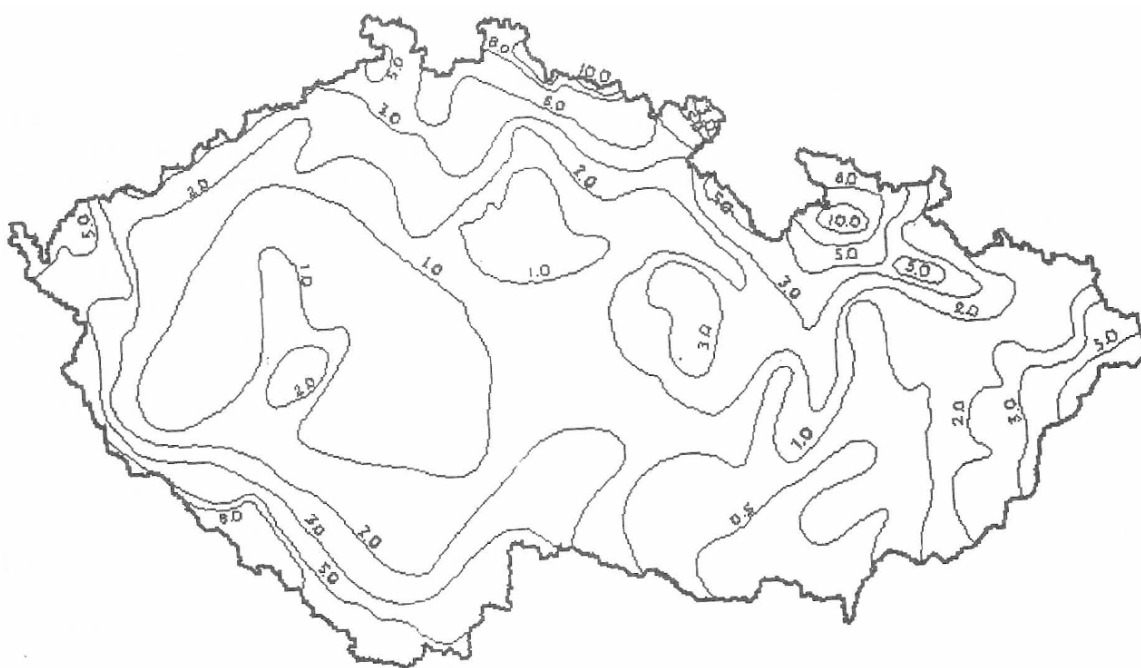
### **7.1 Základní odtok na území Československa (Krásný et al., 1982)**

Regionální přehled a hodnocení podzemního odtoku na našem území bylo publikováno v práci Odtok podzemní vody na území Československa. Výsledky hodnocení charakterizují různé hydrogeologické

celky a oblasti s odlišnými klimatickými a morfologickými poměry. Součástí práce je mapa podzemního odtoku v měřítku 1 : 1 000 000.

Pro účel zhodnocení regionálního dlouhodobého průměrného odtoku na většině území Československa autoři konstatovali, že je vhodné použít některou z metod, která vychází z průtokových dat naměřených na vodoměrných profilech povrchových toků. Autoři vycházeli z podkladů pro přibližně 250 vodoměrných stanic, volených tak, aby výsledky reprezentovaly odlišná hydrogeologická prostředí. Byla zvolena metoda Killeho a to z následujících důvodů: vstupní data jsou snadno dostupná a nevyžadují žádné doplňkové údaje, zpracování je poměrně jednoduché a zároveň objektivní a výsledky charakterizují rozsáhlé území, díky čemuž je umožněno regionální ocenění.

Výstupy Killeho metody autoři srovnávali se závěry dosaženými za použití jiných postupů, a konstatovali dostatečnou shodu. Mezi metodou Killeho a rozčlenění hydrogramu rozdíly nepřekračovaly 12 %, dobrou shodu rovněž autoři konstatovali i u výsledků metody proudu, která využívá transmisivity a morfometrických charakteristik. Castanyho metodou byly získány hodnoty nižší až o několik desítek procent. V deseti ze dvanácti povodí, ve kterých byla porovnány metody rozčlenění hydrogramu a Klinera a Kněžka, nebyl rozdíl ve výsledcích větší než 10 %.



Obr. 5: Isolinie specifického základního odtoku v  $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$  za období 1971 – 1990 (Kessl a Kněžek, 2000)

Průměrný specifický základní odtok označuje velikost základního odtoku vztaženou na jednotku plochy. Krásný et al. (1982) uvádí podzemní odtok větší než  $7 l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$  pro většinu našich horských oblastí

se srážkovými úhrny 800 – 900 mm. Extrémně vysoký odtok podzemní vody nad  $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  lze očekávat v horských oblastech se srážkovými úhrny 1000 – 1200 mm. V oblastech s nižší nadmořskou výškou a nižšími srážkovými úhrny lze očekávat specifický odtok 0,5 až  $2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

V oblastech permokarbonských sedimentů Českého masivu autoři charakterizují specifický odtok jako nízký až zvýšený, s tím, že mezi jednotlivými pánevemi nejsou příliš velké rozdíly. V české křídové pánvi mají na velikost základního odtoku zásadní vliv geologické a hydrogeologické poměry. K vysokému základnímu odtoku dochází v územích s výskytem kolektorů tvořených převážně písčitémi sedimenty, zatímco v málo propustných slínovcích je specifický odtok velmi nízký. Vůbec nejnižších hodnot dosahuje základní odtok v oblastech, kde se nevyskytují faktory vedoucí k jeho zvýšení. Jedná se např. o severočeské neogénní pánve, kde převládají jílovité horniny, terén je plochý, srážky jsou nízké a teplota je relativně vyšší. Ve flyšovém pásmu západních Karpat ovlivňují velikost základního odtoku jak geologické, tak klimatické faktory. Hodnoty se tak odvíjí podle množství srážek a propustnosti hornin. Extrémně vysoké hodnoty specifického odtoku se mohou vyskytovat v krasových oblastech.

Autoři jmenují čtyři hlavní faktory, které se podílí na velikosti základního odtoku: geologickostrukturní, hydrogeologické, geograficko-morfologické a klimatické. Různá míra jejich vlivu způsobuje různé hodnoty základního odtoku. V oblasti Českého masivu autoři konstatují přímou závislost podzemního odtoku na nadmořské výšce a srážkovém úhrnu. Dobré podmínky pro plynulou tvorbu základního odtoku poskytují za předpokladu dostatečného množství srážek oblasti s vyšší nadmořskou výškou a vertikální členitostí terénu.

## **7.2 Modelové řešení uzavřeného hydrogeologického rajonu (Olmer et al., 2011)**

Olmer et al. (2011) uvádí modelové řešení uzavřeného hydrogeologického rajonu 4232 Ústecká synklinála v povodí Svitavy. Oblast je zdrojem pitné vody pro Brno, v roce 2010 zde bylo pro vodárenské účely odebíráno až 1300 l/s. Ze závěrového profilu Rozhrání jsou dostupné údaje z dlouhodobého sledování průtoků. Autoři zde aplikují několik vybraných metod stanovení základního odtoku a porovnávají jejich výsledky.

Území hydrogeologického rajonu 4232 je tvořeno výběžkem české křídové tabule a představuje strukturu se čtyřmi samostatnými zvodněnými kolektory. Jedná se o cenoman (A), spodní turon (B), střední turon (C) a coniak (D). Kolektory jsou odděleny izolátory tvořenými slínovci a jílovci. Příznivé hydrogeologické podmínky umožnily vznik významné akumulace podzemních vod, díky tomu odsud může být čerpáno velké množství pitné vody. Pro vodárenskou exploataci jsou využívány především kolektory B a C. Oběh podzemní vody je významně ovlivněn systémem puklin tektonického původu. Doplnění zásob podzemní vody probíhá především infiltrací srážek, přičemž zásadní význam zde mají sněhové srážky. Při delším trvání sněhové pokrývky dochází k přerušení doplňování, a při tání

naopak dochází k postupné infiltraci a doplnění zásob. Vliv jarního tání se projevuje se zpožděním přibližně 4 až 6 měsíců.

Pro stanovení základního odtoku, resp. přírodních zdrojů podzemních vod autoři zvolili osm postupů. Prvním z nich je metoda hydrologické bilance. Podzemní odtok byl vypočítán z hydrologické bilance díky znalosti ostatních členů, přičemž některé členy mohly být díky dostatečně dlouhému období pozorování zanedbány. Podmínkou užití tohoto postupu je, aby se hydrogeologické povodí shodovalo s hydrologickým, což zde bylo splněno. Dále byla aplikována metoda Killeho, rozčlenění hydrogramu, proudu, Eckhardtův filtr a metoda Plotnikova, která využívá průměrnou velikost atmosférických srážek a odhad velikosti jejich infiltrace na ploše bilanční jednotky. Mezi ostatní výpočty byla pro porovnání výsledků zařazena i metoda Castanyho, přestože lepší přesnosti je dosahováno dle Kouřila (1985) pro povodí o ploše větší než 500 km<sup>2</sup> a modelové povodí má výrazně menší rozlohu (225,17 km<sup>2</sup>).

Tab. 1: Výsledky použitých metod pro data z profilu Rozhrání (Olmer et al., 2011)

Použitá metoda	výsledná hodnota přírodních zdrojů podzemních vod l/s
Metoda hydrologické bilance	544
Castanyho metoda	314
Killeho metoda	540
Grafická separace hydrogramu	476
Separace hydrogramu Eckhardtovým filtrem	627
Metoda proudu (a)	443
Metoda proudu (b)	589
Plotnikovova metoda	1588

Pro zvolené území autoři konstatují dobrou shodu mezi metodou hydrologické bilance a Killeho metodou a tyto výsledky považují za reprezentativní. Eckhardtův filtr poskytuje vyšší hodnotu, protože v tomto zpracování dochází k rozšíření základního odtoku v průběhu průtokových vln. Castanyho metoda základní odtok podhodnocuje a výsledky rozčlenění hydrogramu mohou podávat subjektivní výsledky, proto je zde jejich význam především srovnávací. Výsledky metody proudu se vztahují jen k vybranému kolektoru a jsou použitelné pouze u vrstev s jednoduchými okrajovými podmínkami a geologickou stavbou.

Závěrem autoři uvádí, že záznamy z vodoměrného profilu Rozhrání jsou dlouhodobě ovlivněny vodárenskou exploatací, která výrazně ovlivňuje odtokové poměry v oblasti. Pokud metody vycházejí z dat z ovlivněného období, představují výsledky pouze zbývající část podzemního odtoku.

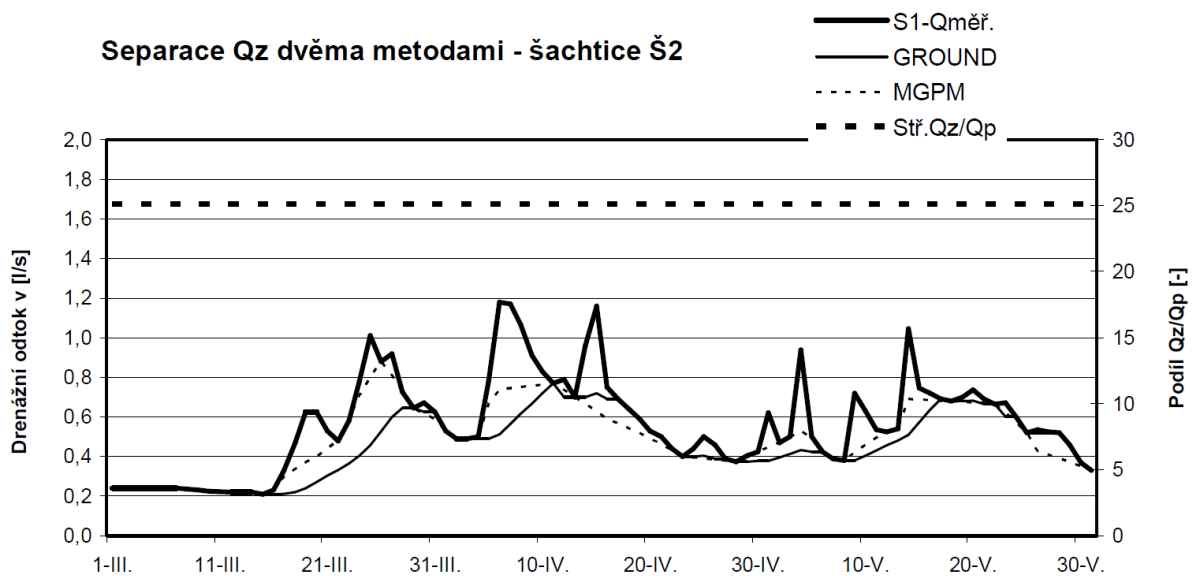
### 7.3 Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů (Kulhavý et al., 2001)

Autoři se v této práci zabývají separací základního odtoku jakožto jedné ze složek drenážního odtoku. Drenážní odtok je zde definován jako voda vytékající ze systémů podpovrchového odvodnění půd. Pokud je správně interpretován, lze jeho pomocí hodnotit krajinně-vodohospodářský potenciál. Poměr průměrného základního odtoku k průměrnému celkovému drenážnímu odtoku, označovaný jako poměrný základní odtok, může dle autorů charakterizovat typ zamokření pro určité období na určité lokalitě.

Experimentálními lokalitami jsou povodí Cerhovický potok, Černičí a Ovesná Lhota. Jedná se o. Jejich plochy se pohybují od 0,66 – 7,31 ha, nadmořské výšky jsou mezi 390 – 550 m, průměrné srážky se pohybují v rozmezí 617 – 722 mm. V případě Cerhovického potoka je matečnou horninou krystalická břidlice, v druhých dvou případech převládá pararula. Povodí byly pro potřeby práce rozděleny do čtyř drenážních skupin: Š7 (Cerhovický potok), Š1 (Černičí), Š2 (Černičí) a ŠCH6 (Ovesná Lhota), přičemž drenážní skupina Š2 se vyznačuje výrazným zamokřením s pramennými vývěry. Dlouhodobý průměrný průtok na povodích je 0,1 – 4,9 l/s. K dispozici byla data průměrných denních průtoků, pro Ovesnou Lhotu za období 1979 – 1991, pro Černičí a Cerhovický potok za období 1994 – 1999.

Pro stanovení základního odtoku autoři zvolili metodu GROUND a metodu MGPM. Jejich vhodnost zdůvodňují tím, že se jedná o postupy použitelné i tehdy, pokud se v datové řadě nenachází dobře vyvinutá a izolovaná odtoková vlna. Lze je navíc aplikovat i pokud nejsou k dispozici žádná další data kromě průtoků a datová řada není dostatečně dlouhá pro použití jiné, např. Killeho metody. Použití jiného postupu zde není vhodné, neboť velikosti drenážních skupin jsou příliš malé a z dat průměrných denních průtoků v těchto případech nelze docílit vhodného tvaru hydrogramu.

Pomocí metod GROUND a MGPM byly zpracovány čtyři řady průměrných denních drenážních průtoků. Byly vypočteny průměrné hodnoty základního a přímého odtoku pro jednotlivé lokality a drenážní skupiny, a to jak pro jednotlivé roky, tak i celkově za celé vyhodnocované období. Autoři konstatují proměnlivý poměr základního odtoku vůči celkovému drenážnímu odtoku v rámci jednotlivých let i pro tutéž jednu lokalitu. Při nižších průtocích převažuje složka základního odtoku. Lze vyvodit trend, že poměrný základní odtok je ve vodnějších letech menší. Poměrný základní odtok je zde zřejmě více ovlivněn rozložením srážek během daného roku než jejich celkovým úhrnem. Poměrný základní odtok z drenážní skupiny Š1 je výrazně nižší než poměrný základní odtok ze skupin Š2 a ŠCH6, což indikuje jiný typ zamokření v této lokalitě.



Obr. 6: Příklad separace základního odtoku ( $Q_z$ ) z celkového drenážního odtoku ( $Q_{měř.}$ ) metodami GROUND a MGPM pro data z experimentálního povodí Černiči, Š2, 1996 (Kulhavý et al., 2001)

Autoři práce zhodnotili výsledky obou metod jako relevantní, avšak poukazují na některé nedostatky. Základní odtok podle metody GROUND nabíhá pomaleji a ignoruje podružné odtokové vlny, po kulminaci celkového odtoku však dále neúměrně stoupá. Metoda MGPM lépe opticky odřezává vrcholy vln, ale nadměrně reaguje na podružné odtokové vlny. Na prvním povodí poskytuje MGPM o 5 – 10 % vyšší hodnoty základního odtoku, u druhého povodí naopak nižší hodnoty. Výsledky obou použitých postupů se celkově liší přibližně o 5 %, což dle autorů umožňuje prohlásit, že výsledky jsou dostatečně konzistentní a vedou ke stejným kvalitativním závěrům.

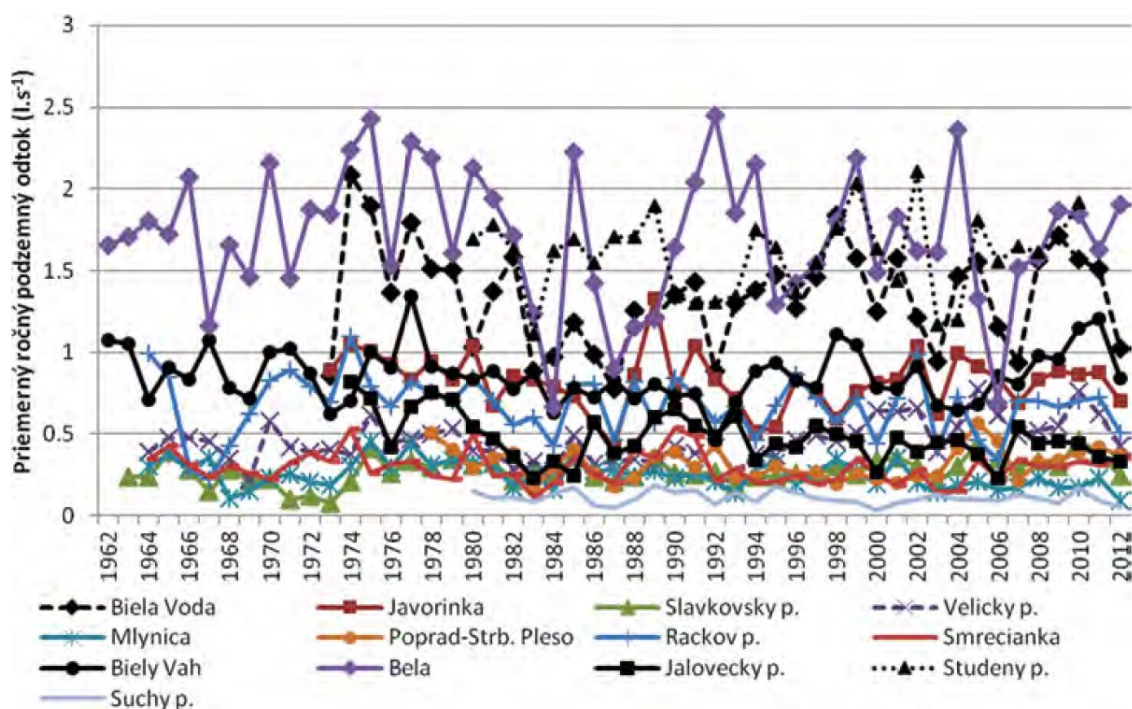
#### 7.4 Podzemní odtok v slovenskej časti Tatier (Fendeková et al., 2014)

Hodnocením základního odtoku v slovenské části Tater za období 1981 – 2010 se zabývá Fendeková et al. (2014). Cílem bylo stanovení velikosti podzemního odtoku, porovnání s dosud známými hodnotami v této oblasti a charakterizování jeho časového vývoje. Vývoj je hodnocen především za účelem zjištění vlivu změny klimatu na množství podzemní vody. Základní odtok byl hodnocen na třinácti vybraných povodích na území slovenských Tater. Vybrána byla ta povodí, ve kterých byla k dispozici alespoň dvacetiletá, většinou však třicetiletá období s daty o pozorování průtoků.

Převážná část území slovenských Tater je budována krystalickými horninami (granitoidy a krystalické břidlice) s puklinovou propustností. Velikost zvodnění těchto hornin závisí na charakteru rozpukání. Na povrchu se nachází glaciální a glacifluviální čtvrtohorní sedimenty, které mají velký hydrogeologický význam, neboť jsou příznivé jak pro infiltraci srážek, tak pro tvorbu podzemního odtoku. Dále se zde

vyskytují oblasti tvořené karbonáty s puklinovo-krasovou propustností. Teploty jsou závislé na nadmořské výšce, pohybují se v průměru od 4 – 6 °C v podhůří až po záporné hodnoty ve výškách nad 2000 m. Srážkové úhrny rovněž závisí na nadmořské výšce, pohybují se od 800 mm v podhůří až po 2000 mm ve vrcholových částech pohoří. Sněhová pokrývka zde přetrvává 100 až 200 dní v roce.

Jako vstupní data byly použity časové řady průměrných denních průtoků za období 1981 – 2010. Pro stanovení základního odtoku byly zvoleny dva způsoby, metoda Killeho a metoda lokálního minima. Metoda lokálního minima (Institute of Hydrology, 1980) je založena na separaci minimální hodnoty průtoku z N-denního časového úseku. Tato minimální hodnota je vynásobena korekčním faktorem a porovnává se s hodnotou získanou v předcházejícím a následujícím časovém kroku. Pokud je hodnota nižší nebo rovná oběma srovnávaným hodnotám, stává se bodem, kterým je následně vedená separační čára. Separační čára odděluje základní odtok od celkového. Testovány byly hodnoty N s délkou 15, 20, 25 a 30 dní. Výsledkem metody lokálního minima bylo získání velikosti podzemního odtoku v denním kroku. Byly vypočítány průměrné desetileté hodnoty, které byly porovnány s výsledky Killeho metody. Získané výsledky byly porovnané vzájemně pro jednotlivé profily i pro různá desetiletí v rámci jednoho profilu.



Obr. 7: Vývoj průměrného ročního základního odtoku v hodnocených povodích (Fendeková et al., 2014)

Autoři konstatují, že získané hodnoty základního odtoku za všechny tři hodnocené dekády jsou poměrně vyrovnané. Ve slovenské části Tater tedy za hodnocené období nedocházelo k výraznému poklesu

základního odtoku. V některých povodích byl dokonce zaznamenán mírně rostoucí trend, který však nebyl statisticky významný. Velikost podzemního odtoku závisí na nadmořské výšce a velikosti srážek. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v oblastech, kde je část povodí tvořena karbonáty. Naopak nejnižší hodnoty vycházely v oblastech s minimálním kvartérním pokryvem.

## 8. VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ METOD

Původní metody rozčlenění hydrogramu jsou jednoduchým způsobem určení základního odtoku. V současnosti se však již prakticky nepoužívají (Olmer et al., 2011) a mají spíše srovnávací význam, protože mohou poskytovat značně subjektivní výsledky. Rozčlenění celkového odtoku na jednotlivé složky závisí na přístupu hodnotitele, a dva hodnotitelé proto mohou dospět k výrazně odlišným výsledkům. Kněžek (1988) uvádí, že rozdíly ve výsledcích stanovení základního odtoku mezi jednotlivými způsoby rozčlenění hydrogramu jsou až 25 – 30 %. Kliner a Kněžek (1974) tvrdí, že užití metody je v podmínkách střední Evropy poměrně obtížné z důvodu nerovnoměrného rozložení srážek během roku.

Metoda Kliner a Kněžka byla původně užívána ČHMÚ pro výpočet hydrologické bilance. Lze pomocí ní provést výpočet i pro kratší časové období, což je pro každoroční bilanci důležité. Podmínkou jejího použití je existence takového objektu pro pozorování podzemních vod, který dostatečně reprezentuje režim podzemních vod v celém hodnoceném povodí. Reprezentativnost objektu je často diskutabilní, neboť např. použití pramene a vrtu v tom samém území může poskytnout jiné výsledky. Přibližně 75 % území České republiky bylo pokryto touto metodou (Vlnas, 2011), avšak v některých povodích nebylo možné vhodný objekt nalézt, nebo neměl dostatečně dlouhé období pozorování. Obecně však lze říci, že metoda Kliner a Kněžka za předpokladu existence reprezentativního objektu pro pozorování podzemních vod poskytuje velmi věrohodné výsledky (Vlnas, 2011).

Dosud používanou metodu Kliner a Kněžka nahradil ve výpočtu základního odtoku pro hydrologickou bilanci Eckhardtův filtr. Byl podroben rozsáhlému testování a výsledky byly porovnávány s hodnotami zjištěnými předchozím způsobem. Vlnas (2011) konstatuje, že výsledky těchto dvou postupů se liší v rozmezí do 10 % vzhledem k celkovému odtoku. Větší rozdíly byly zaznamenány tam, kde se nevyskytoval vhodný objekt pro pozorování podzemních vod. Zde Eckhardtův filtr poskytuje vyrovnanější výsledky bez neadekvátních extrémů. Poskytuje fyzikálně věrohodný průběh základního odtoku na vzestupné i sestupné větvi hydrogramu.

Castanyho metoda je výhodná pro svou nenáročnost na vstupní data. Dle Kněžka (1988) je však vhodná pouze pro hrubý odhad základního odtoku, neboť postrádá genetický rozbor průtokového režimu toku. V důsledku zjednodušení může často poskytovat podhodnocené výsledky základního odtoku (Olmer

et al., 2011). Aby bylo možné získat věrohodné výsledky, je třeba měření provádět dostatečně dlouhou dobu.

Metoda minimálních měsíčních průtoků (Killeho metoda) je rovněž výhodná pro nenáročnost na vstupní data, která jsou obvykle snadno dostupná. Oproti předchozímu způsobu však díky postupu výpočtu do značné míry omezuje možnost subjektivního přístupu. Je vhodná pro rozsáhlá území a dovoluje regionální hodnocení. Z těchto důvodů byla použita při hodnocení základního odtoku na území Československa (Krásný et al., 1982). Kessl a Kněžek (2000) porovnají Killeho metodu s metodou Klinera a Kněžka a konstatují, že výsledky se mohou lišit o 15 – 20 %, celkově však obě metody poskytují relevantní výsledky.

Použitelnost metody proudu je omezena pouze na oblasti s jednoduchými homogenními poměry. Tato metoda nevychází z průtokových dat jako většina ostatních. Je především vhodná pro odhad odtoku podzemní vody tam, kde jiné postupy nejsou použitelné. Jedná se o např. oblasti umělého odvodnění odtokového režimu odběry nebo hospodařením v nádržích (Kněžek, 1988). Dle Krásného a Kněžka (1977) je metoda proudu vhodná pro použití v horských oblastech s relativně stálou srážkovou dotací vod.

Metodu GROUND a metodu MGPM srovnává ve své práci Kulhavý et al. (2001). Autoři práce zhodnotili výsledky obou postupů jako relevantní, výsledné hodnoty se liší přibližně o 5 %. Užití těchto postupů je vhodné především pro území, jejichž plocha je příliš malá a nelze proto docílit vhodného tvaru hydrogramu. Rovněž je lze aplikovat, pokud není k dispozici dostatečně dlouhá časová řada pro aplikaci jiné metody.

Metoda postupných profilových průtoků je výhodná pro prostorovou analýzu hydrogeologických poměrů, potažmo základního odtoku. Lze pomocí ní vymezit úseky na toku, kde dochází k drenáži podzemních vod, a úseky, kde dochází k infiltraci. Je však náročná na provedení, neboť vyžaduje opakovaná expediční terénní měření a dobrou znalost zkoumaného území. Výhodou je možnost určování vlivu tektonických poruch na průtok (Kněžek, 1988).

Užití metody hydrologické bilance je vhodné tam, kde nelze základní odtok stanovit jinými metodami. Určení vstupních členů rovnice je obtížné a podmínkou užití je shoda hydrogeologického povodí s hydrologickým. Za předpokladu dostatečně přesného určení vstupních členů však metoda podává reprezentativní výsledky.

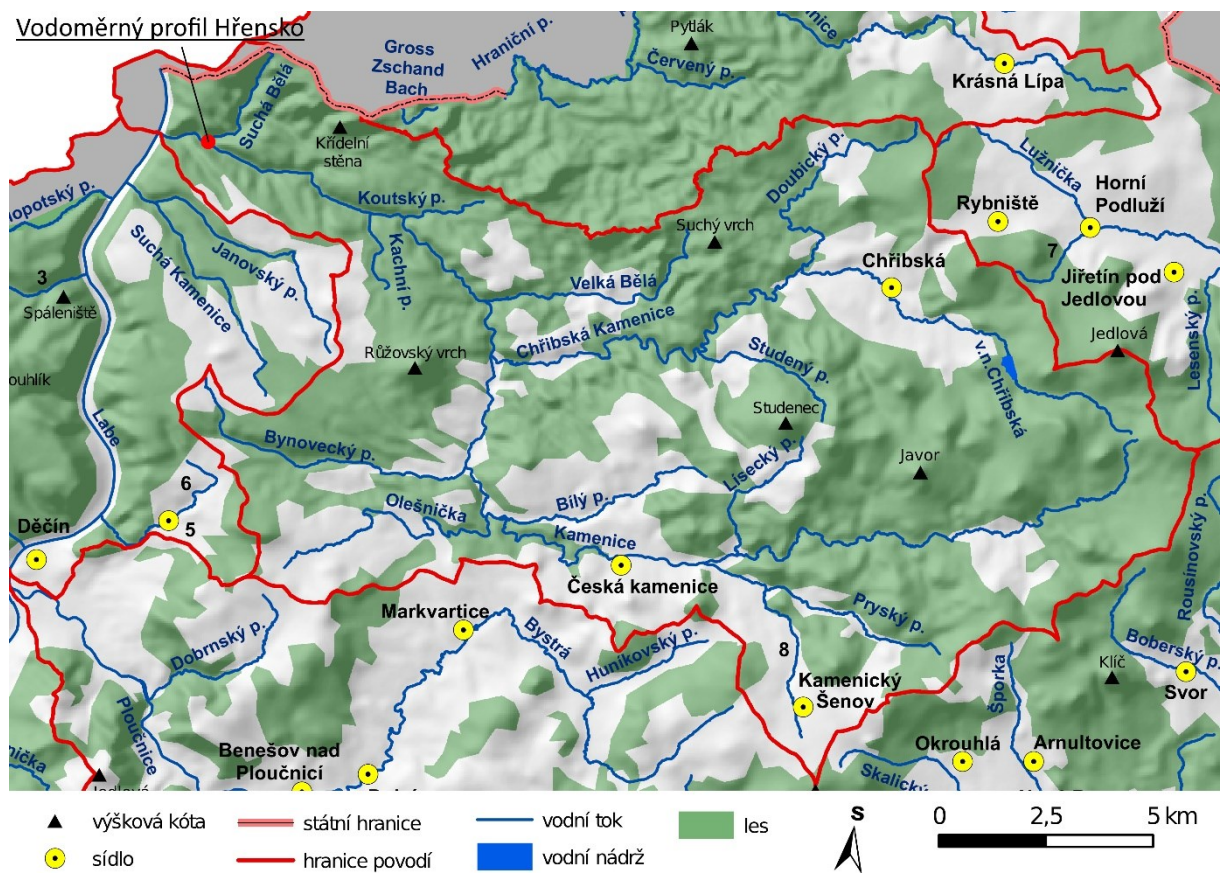
## 9. PŘÍPADOVÁ STUDIE POVODÍ KAMENICE

### 9.1 Charakteristika povodí Kamenice

#### 9.1.1 Hydrologické a geomorfologické poměry

Povodí Kamenice se nachází v severních Čechách a zasahuje do okresů Děčín a Česká Lípa. Povodí má celkovou rozlohu 216,8 km<sup>2</sup> a je odvodňováno řekou Kamenicí s celkovou délkou 35,6 km. Průměrný průtok v závěrové stanici je 2,62 m<sup>3</sup>/s. Kamenice má jeden výrazný pravostranný přítok, a to Chřibskou Kamenicí. Z dalších přítoků lze jmenovat např. Jetřichovickou Bělou, Olešničku, Lísecký potok, Luční potok a Bělou. Na toku Chřibské Kamenice se nachází Chřibská přehrada, vodní dílo, jehož hlavním účelem je zásobení Šluknovského výběžku pitnou vodou.

Kamenice pramení v Lužických horách nedaleko Nové Hutě ve výšce 595 m. n. m. a teče směrem na severozápad. Ve své pramenné oblasti má tento tok charakter horského potoka (Pacl et al., 2013), postupně pak přechází v mělké údolí (Pechková, 2009). Pod soutokem s Chřibskou Kamenicí protéká řeka Děčínskou vrchovinou, která je charakteristická velmi členitým reliéfem a vytváří několik pater. Typická jsou hluboká údolí a skalní města (Culek et al., 2013). Ve svém závěrovém profilu se Kamenice ve výšce 116 m. n. m. vlévá do Labe jako jeho pravostranný přítok.



Obr. 8: Povodí Kamenice (Sestaveno podle dat: Arcdata, Dibavod)

### *9.1.2 Klimatické a biogeografické poměry*

Dle Atlasu podnebí Česka (Voženílek et al., 2007) se průměrná roční teplota vzduchu v rámci zájmového území pohybuje mezi 6 a 9 °C. V hlubších údolích (např. soutěsky Kamenice v Národním parku České Švýcarsko) se výrazně projevuje klimatická inverze (Patzeltová, 2002). Průměrný roční úhrn srážek činí 700 – 800 mm v dolní části povodí, v horní části povodí v oblasti Lužických hor činí 800 – 1000 mm.

Větší část zájmového území je pokryta jehličnatým, listnatým i smíšeným lesem. Většina nelesní půdy je využívána jako louky nebo pastviny. Obdělávaná pole se vyskytují jen minimálně. Osídlení je spíše řídké, sídlištní aglomerace mají povětšinou charakter vesnické a rekreační zástavby. Mezi větší sídla se řadí především Česká Kamenice (5200 obyvatel), dále Chřibská (1400 obyvatel) a Huntířov s 800 obyvateli (Český statistický úřad, 2020). Povodí se rozkládá na území dvou chráněných krajinných oblastí: CHKO Labské Pískovce a CHKO Lužické hory. Dolní tok Kamenice protéká Národním Parkem České Švýcarsko.

### *9.1.3 Geologické poměry*

Povodí Kamenice se nachází v oblasti české křídové pánve. Výplň pánve je budována sedimenty svrchní křídy, tedy pískovci, prachovci a slínovci. Sedimentace zde s výjimkou hranice cenoman – turon trvala kontinuálně 11 - 12 milionu let (Voigt et al., 2008). Výplň je rozdělena na souvrství a vrstvy, které jsou definovány obsahem sedimentů a vúdčými fosiliemi. Střídají se vrstvy tvořené hrubozrnnými a jemnozrnnými pískovci, případně prokřemenělými pískovci s různou propustností. Březenské souvrství je tvořeno nepropustnými slínovci. Mocnost zachovalých sedimentů dosahuje od několika set metrů až po více než 1 km, maximálních mocností až 1200 m nabývá výplň pánve v blízkosti Lužického zlomu (Valečka, 1979). Převážně ve východní části povodí prostupují na povrch také terciérní vulkanity, většinou v podobě sopouchů a ukloněných žilných těles (Patzeltová, 2002).

V kvartéru se v důsledku střídání chladných a teplých období se vytvořily akumulace čtvrtohorních sedimentů. V rámci zájmového území jsou zastoupeny v podobě reliktních spraší a sprašových hlín, dále reliktních terasových uloženin a nivních sedimentů. V širších částech údolí Kamenice a Chřibské Kamenice jsou vyvinuté štěrkopísčité a jílovitopísčité náplavy s mocností do 10 m. Působením říční eroze docházelo během spodního a středního pleistocénu k etapovitému zahlubování do sedimentů svrchní křídy (Mrázová et al., 2020) a vznikly tak soutěsky Kamenice nebo kaňon Labe, místy zahloubené až do krystalinického podloží (Vařilová et al., 2020).

Zájmové území bylo významně postiženo saxonskou tektonikou (Malkovský, 1979). Ta se projevila pohyby na starých tektonických zónách a vznikem množství zlomů převážně SV-JZ a SZ-JV orientace.

#### *9.1.4 Hydrogeologické poměry*

Povodí Kamenice leží na území dvou hydrogeologických rajonů. Dolní tok Kamenice spadá do hydrogeologického rajonu 4660 Křída Dolní Kamenice a Křínice. Zde zájmové povodí tvoří převážnou část rajonu. Horní tok Kamenice spadá částečně do SZ části hydrogeologického rajonu 4650 Křída Dolní Ploučnice a Horní Kamenice.

Bazální kolektor A (cenomanská zvodeň) je tvořen sedimenty perucko-korycanského souvrství, jehož báze je považována za nepropustnou (Herčík et al., 1999). Shora je omezen izolátorem bělohorského souvrství, který je do určité míry propustný. Dosahuje mocnosti 40 – 70 m, směrem na sever k lužickému zlomu mocnost roste a může dosahovat až 140 m (Mrázová et al., 2020). Propustnost je průlinově-puklinová. Kolektor BC (turonská zvodeň) je tvořen střední a svrchní částí bělohorského souvrství a jizerským souvrstvím. Mocnost kolektoru se pohybuje od několika desítek m až po 510 m u lužického zlomu, jedná se o největší mocnosti kolektoru BC v rámci celého Českého masivu (Herčík et al., 1999). Propustnost kolektoru je průlinově-puklinová. Báze kolektoru BC je tvořena spodní částí bělohorského souvrství. Místy, převážně mimo zájmové území směrem na JZ, je tato vrstva tektonicky porušena, a dochází k propojení s kolektorem A. Vzniká zde spojený kolektor ABC, případně AB. Při lužické poruše je mocnost báze bělohorského souvrství zmenšena na několik metrů, díky tomu se zde v úzké zóně vytváří spojený kolektor ABCD o mocnosti až 750 m. Kolektor D je v rámci zájmového území vázán na křemenné pískovce teplického a březenského souvrství. Vyskytuje se nesouvisle, souvisleji pokrývá hlavně oblast horního toku Kamenice, tedy oblast Lužických hor. Propustnost je průlinově-puklinová.

Převážná část zdrojů podzemních vod v rámci zájmového území vzniká v oblasti podél lužického zlomu. Křídové sedimenty jsou zde budované pískovci, díky tomu je umožněna infiltrace srážek celým křídovým souvrstvím až do bazálního kolektoru A. Odtud se podzemní voda pohybuje směrem k Z až JZ. K odvodňování kolektoru dochází v dolní části toku Kamenice, v menší míře také v údolí Labe. Vliv srážek na kolísání hladiny v turonské zvodni se projevuje s několikaměsíčním až několikaletým zpožděním, v závislosti na zakleslosti hladiny podzemní vody. Množství srážek má přímý vliv na kolísání hladiny v údolních nivách vodních toků, kde hladina podzemní vody je mělko pod povrchem (oblasti odvodňování turonské zvodně). Režim kolísání hladin podzemních vod v oblasti je též ovlivňován dlouhodobým odebíráním vody pro vodárenské účely.

#### *9.1.5 Využití povrchových a podzemních vod*

Pro vodárenské účely je využívána přehrada Chřibská na horním toku Chřibské Kamenice. Původně byla přehrada vybudována jako retardační nádrž pro povodňové vlny, nyní slouží jako zdroj pitné vody pro Šluknovsko.

Podzemní voda je odebírána především v lokalitě Hřensko. Tyto odběry slouží pro zásobování severočeské vodárenské soustavy, zejména pro Děčínsko. V současnosti je zde čerpáno okolo 70 l/s, na začátku 90. let to bylo až 130 l/s (Mrázová et al., 2020). Další významnější odběry podzemní vody se týkají především zásobování různých vícekapacitních rekreačních a turistických zařízení (Mezná, Vysoká Lípa). Tyto odběry mají řádově nižší čerpané množství – v desetinách l/s. Ostatní odběry za účelem individuálního zásobování jsou vzhledem k odběrům realizovaným SČVK zanedbatelné (Patzeltová, 2002).

#### *9.1.6 Vrtná a hydrogeologická prozkoumanost*

V rámci zájmového území se dle dat ČGS nachází desítky hydrogeologických vrtů. Jedná se o vrty z regionálních a jiných průzkumů, vodárenské vrty a pozorovací vrty ČHMÚ s hloubkou většinou desítky metrů až okolo 100 m. Dále se zde nachází blíže neurčený počet jímacích vrtů pro individuální zásobování vodou o hloubce první desítky metrů. Byly zde budovány také vrty uranového průzkumu, které jsou většinou realizované až do podloží křídových vrstev a mají hloubku i několik set metrů. Předpokládá se, že většina těchto vrtů je již zlikvidována (Patzeltová, 2002).

Hydrogeologický rajon 4660, jehož významnou část tvoří povodí Kamenice, je z hlediska tvorby podzemních vod nejproduktivnějším rajonem v české křídové pánvi (Herčík et al., 1999). Pro mimořádnost vodohospodářského významu zde bylo za několik posledních desítek let provedeno množství průzkumů a studií. V 60. – 80. letech minulého století v oblasti probíhaly regionální průzkumy pro zhodnocení zásob podzemních vod a možností vodárenského využití (Jetelová, 1972). Regionální průzkumy byly provedeny pro povodí dolní Kamenice (Žitný, 1973; Brožek, 1980; Nakládal, 1973). V 80. letech byly prováděny průzkumy zabývající se stavbou a hydrogeologií české křídové pánve. Výsledky byly zpracovány v Hydrogeologické syntéze české křídové pánve (Herčík et al., 1987).

Kromě vrtných průzkumů zde od konce 90. let probíhají práce zaměřené na monitoring podzemních vod (např. Patzeltová, 2002; Pacl, 2013). Firmou AQUATEST a.s. zde byly od konce 90. let prováděny průzkumy hraničních vod. V letech 2010 – 2016 proběhla rozsáhlá práce s názvem Rebilance zásob podzemních vod (Burda et al., 2016), zaměřená na geologické a hydrogeologické poměry v hydrogeologickém rajonu 4660. Došlo k vyhotovení tří nových průzkumných vrtů, bylo provedeno režimní pozorování hladin podzemních vod, vyhodnoceny přírodní zdroje podzemních vod a jejich využitelné zásoby. V letech 2016 – 2020 probíhal další regionálně pojatý projekt ResiBil – Bilance vodních zdrojů ve východní části česko-saského pohraničí a hodnocení možnosti jejich dlouhodobého využívání (Hrkal et al., 2020; Mrázová et al., 2020). Jedná se o mezinárodní projekt zaměřený na společnou ochranu podzemních vodních zdrojů v této příhraniční oblasti, jehož hydrogeologická část byla výstupem VÚV TGM. Dlouhodobě v této oblasti probíhá sledování hladin podzemní vody v rámci státní pozorovací sítě ČHMÚ.

## 9.2 Charakteristika vstupních dat

Dostupná vstupní data mají podobu průměrných denních průtoků za období listopad 1980 – prosinec 2019. Data byla zveřejněna na webových stránkách ČHMÚ (www.chmi.cz – Historická data – Hydrologie – Denní data – Denní data dle z. 13/1998 Sb.) a jsou dostupná v podobě tabulky Microsoft Excel. ČHMÚ v souladu se zákonem 123/1998 Sb. o právu na informace o životním prostředí zpřístupnil hydrologická data denních průtoků vyhodnocených ve všech vodoměrných stanicích s aktuálním pozorováním ve své správě. Pro povodí Kamenice jsou dostupná data z vodoměrného profilu Hřensko. Jedná se o řadu průměrných denních průtoků získaných během 39 let v období od 1. 11. 1980 do 31. 12. 2019. Soubor obsahuje 14 305 hodnot s časovým krokem jeden den. Průměrný denní průtok vody je vyhodnocen z pozorovaných vodních stavů na základě vztahu mezi vodním stavem a průtokem. Průtok je uveden v m<sup>3</sup>/s.

Vodoměrný profil Hřensko splňuje podmínku závěrového profilu povodí, data z něj tedy lze použít jako vstupní data pro stanovení základního odtoku. Řada průměrných denních průtoků za období 39 let představuje kvalitní datový vstup.

## 9.3. Výběr vhodných metod pro stanovení základního odtoku

Na pilotní lokalitě je možné určení podzemního odtoku na základě klasické separace hydrogramu. Výsledky nicméně mohou být subjektivní a lišit se významně od skutečnosti, proto je zde její aplikace vhodná pouze za účelem srovnání výsledků. Metodu Klinera a Kněžka nelze v tomto případě možné použít, neboť pro tuto práci nebyla zajištěna data z pozorování hladin podzemních vod. Za předpokladu existence reprezentativního pozorovacího objektu hladin podzemních vod by bylo užití metody vhodné, neboť umožňuje stanovení chronologických hodnot.

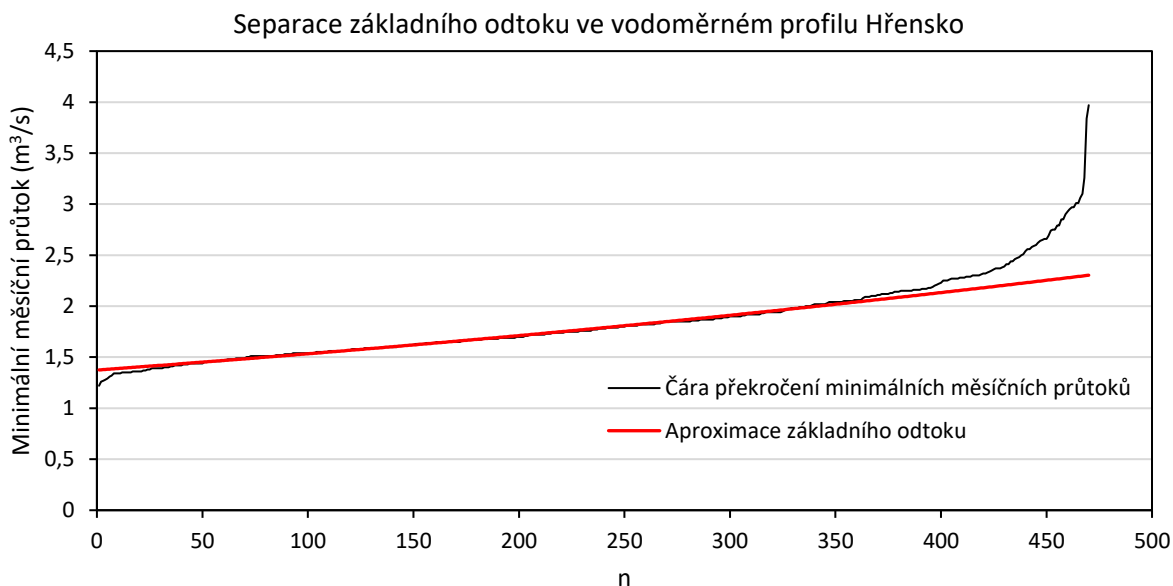
Metoda proudu se hodí pro oblasti s jednoduchou geologickou stavbou a okrajovými podmínkami, nicméně možnost jejího využití zde není vyloučena. S výhodou lze použít metodu Castanyho a Killeho metodu. Oba postupy poskytují možnost rychlého a jednoduchého odhadu základního odtoku. Sledované časové období je dostatečně dlouhé, aby mohly být metody aplikovány. Poskytují však pouze dlouhodobé hodnoty. Castanyho metoda poskytuje spíše přibližné hodnoty, proto je zde její aplikace rovněž vhodná spíše za účelem srovnání výsledků. Killeho metoda je osvědčeným, relativně jednoduchým a objektivním způsobem stanovení základního odtoku. Byla testována v řadě výzkumných prací, jejichž autoři obvykle konstatují dobrou shodu s jinými postupy.

Objektivní hodnocení podzemního odtoku je zde možné i za použití Eckhardtova filtru, výhodou je možnost získání dlouhé časové řady výsledných hodnot. Možné je z hlediska vstupních dat použít i metody GROUND a MGPM, nicméně rozloha povodí dovoluje užít i jiné postupy. Metodu postupných

profilových průtoků využít nelze, neboť pro tuto práci jsou k dispozici průtoková data pouze ze závěrového profilu povodí. Rovněž nelze aplikovat metodu hydrologické bilance, neboť nejsou k dispozici hodnoty vstupních členů rovnice.

#### 9.4 Aplikace vybrané metody

Pro metodické cvičení aplikace vybrané metody byla zvolena metoda Killeho. Z řady průměrných denních průtoků byla pro každý měsíc vybrána nejnižší hodnota denního průtoků. Tyto vybrané hodnoty byly seřazeny podle velikosti a následně vypočítán jejich logaritmus. Hodnoty byly vyneseny do semilogaritmické sítě, přičemž x-ová osa má lineární, a y-ová osa má logaritmické měřítko. Výsledkem je čára překročení minimálních měsíčních průtoků. Množina bodů, která tvoří přímou část křivky (přibližně pro  $23 < n < 235$ ) byla aproximována přímkou, která byla prodloužena i do vyšších hodnot. Tuto přímku je možné považovat za linii oddělující základní odtok. Y-ové souřadnice přímkou byly následně přepočítány na jejich přirozené hodnoty, a vyneseny do lineárního grafu minimálních měsíčních průtoků. Výsledkem je exponenciála, která představuje redukované minimální měsíční průtoky a společně s osami vymezuje plochu představující celkové odtoklé množství podzemní vody. Ze sumy redukovaných minimálních měsíčních průtoků byla následně vypočítána průměrná hodnota základního odtoku za měřené období.



Obr. 9: Vyčlenění základního odtoku pomocí Killeho metody za období 1980 – 2019 ve vodoměrném profilu Hřensko

## 9.6 Diskuze výsledků

Zjištěná hodnota průměrného základního odtoku za období 1980 – 2019 je 1,80 m<sup>3</sup>/s. Specifický odtok pro celé povodí Kamenice pak vychází 8,30 l · s<sup>-1</sup> · km<sup>-2</sup>. Tato hodnota odpovídá poznatkům uváděným Jetelovou a Urbánkem (1974) pro povodí Kamenice a Křinice (8 až 9 l · s<sup>-1</sup> · km<sup>-2</sup>). Herčík et al. (1999) uvádí velikost přírodních zdrojů podzemní vody 1851 l/s pro hydrogeologický rajon 4660. Tato hodnota se rovněž shoduje s výsledky Killeho metody.

Kamenice má značně vyrovnané průtoky. Díky tomu a díky dlouhému období měření je průběh množiny minimálních měsíčních průtoků velmi pravidelný. Šlo by proto použít i zjednodušenou verzi Killeho metody, kde je přímková aproximace provedena rovnou v lineárním grafu. Plocha pod takovou přímkou je v tomto případě téměř totožná s plochou pod exponenciálou vytvořenou v semilogaritmickém grafu.

Jako zajímavá se jeví možnost porovnat průtoky s údaji o srážkových úhrnech v této oblasti, neboť velikost základního odtoku souvisí s velikostí infiltrace srážek. Vyrovnané průtoky mohou navíc být podmíněny odvodňováním rozsáhlých pánevních kolektorů v oblasti. Navazující práce se může zaměřit na porovnání hodnoty základního odtoku s srážkovými daty a posoudit, které další faktory zde mají na podzemní odtok významný vliv. Dalším možným pokračováním této práce je aplikace více vybraných metod na povodí Kamenice a diskuze jejich výsledků. Zajímavé výsledky může poskytnout metoda proudu. Přestože optimální oblastí pro použití tohoto postupu jsou především horské oblasti s intenzivnější infiltrací, jeho aplikace pro jiná území není vyloučena. Metoda proudu využívá poměrně náročných výpočtů založených na výškových intervalech mezi vrstevnicemi, délce vrstevnic a délce všech přírodních toků v rámci určité plochy. V současnosti lze však k těmto výpočtům s výhodou využít geografické informační systémy.

## 10. ZÁVĚR

Metodika stanovování podzemního odtoku je podrobně popsána a demonstrována v množství vědeckých prací, které jsou většinou dobře dostupné. Komplexní rešerše této literatury dává možnost kvalifikované volby vhodného postupu pro určení základního odtoku v různých situacích. Reprezentativnost výsledků je však třeba posoudit. Volba metody závisí na podobě a kvalitě vstupních dat, roli hrají také klimatické, morfologické a hydrogeologické faktory. V současné době jsou k dispozici průtoková data ze všech vodoměrných stanic ve správě ČHMÚ s aktuální pozorováním, která představují kvalitní vstup pro použití většiny metod zmiňovaných v této práci.

Výsledky jednotlivých postupů se mezi sebou více či méně liší a nelze s jistotou tvrdit, který je nejvhodnější. Cílem je, aby se výsledné hodnoty co nejméně lišily od skutečnosti. Z rešerše literatury vyplývá, že některé z metod poskytují relativně méně přesné výstupy, proto je vhodná jejich aplikace spíše za účelem srovnání. Jedná se o metodu Castanyho a klasické metody separace hydrogramu. Snahou

je nyní využívat postupy, které omezují subjektivitu hodnocení. V pracích zaměřených na stanovování základního odtoku jsou často užívány metody Killeho, Klinera a Kněžka a nově také Eckhardtův filtr. Jejich výsledky jsou obecně hodnoceny jako reprezentativní. Užití metody postupných profilových průtoků je výhodné především pro určení příronových a infiltračních úseků v průběhu toku.

Volba vhodné metody byla ukázána na příkladu povodí Kamenice. Na základě dostupných hydrologických dat z monitoringu v povodí byla provedena úvaha o možnosti využití jednotlivých vybraných postupů a byla zvolena metoda Killeho. Byla vytvořena čára překročení minimálních měsíčních průtoků a získán průměrný podzemní odtok za hodnocené období.

## 11. LITERATURA

- ARCDATA PRAHA (2021): Arc ČR 500 verze 3.3. Dostupné online: <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arc-cr-500> [cit. 2021-04-23]
- 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.
- Brožek, P. (1980): Zpráva o hydrogeologickém průzkumu v povodí dolní Kamenice. Stavební geologie, Praha.
- Burda, J., Bruthans, J., Kadlecová, R. et al. (2016): Rebilance zásob podzemních vod. Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon. 4660 - Křída dolní Kamenice a Křinice. Závěrečná zpráva. Příloha 2/44. ČGS, Praha. 162 s.
- 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., Maxwell A. (1996): Baseflow Separation – Comparison of Numerical Methods With Tracer Experiments. In: 23rd Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Hobart, s. 539 – 545.
- Culek, M., Grulich, V., Laštůvka, Z., Divíšek, J. (2013): Biogeografické regiony České republiky. Masarykova univerzita, Brno, 447 s. ISBN 978-80-210-6693-9.
- Český hydrometeorologický ústav (2021): Denní data dle zákona 123/1998 Sb. Praha. Dostupné online: [https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni\\_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb](https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb) [cit. 2021-04-14]
- Český statistický úřad (2020): Počet obyvatel v obcích - k 1.1.2020. Praha. Dostupné online: <https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-k-112019> [cit. 2021-04-13]
- Domenico, P. A. (1972): Concepts and models in groundwater hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Drobilová L., Šimo E. (1955): Podiel podzemných vod na celkovom odtoku Váhu v období 1931 – 1940. *Vodohospodářský časopis*, roč. 3, č. 1 – 2.
- Eckhardt, K. (2005): How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, roč. 19, s. 507 – 515.
- Fendeková, M., Fendek, M. (1999): Killeho metóda – Teória a prax. *Podzemná voda*, roč. V, č. 2, SAH, Bratislava, s. 77 – 87.
- Fendeková, M., Fendek, M., Danáčová, Z. (2014): Podzemný odtok v slovenskej časti Tatier. *Vodní hospodářství*, roč. 64, č. 8, s. 9 – 13. ISSN 1211-0760.
- Foster, E. E. (1949): Rainfall and Runoff, *The Geographical Journal*, JSTOR, roč. 114, č. 4/6, 215 s.
- Healy, R. W., Winter, T. C., LaBough, J. W., Franke, O. L. (2007): Water Budgets: Foundations for effective water-resources and environmental managements. *US Geological Survey Circular*, č. 1308, Reston.
- Herčík, F., Herrmann, Z., Nakládal, V. (1987): Hydrogeologická syntéza České křídové pánve. MS Stavební geologie, Praha.
- Herčík, F., Herrmann, Z., Valečka, J. (1999): Hydrogeologie české křídové pánve. ČGÚ, Praha.
- Hrkal, Z., Rozman, D., Eckhardt P. (eds.) (2020): Hydrogeologie česko-saské křídové pánve mezi Krušnými horami a Ještědem. VÚV TGM, Praha, 80 s. ISBN 978-80-87402-88-7.

- Institute of Hydrology (1980). Low flow studies. Research Report 1, Institute of Hydrology, Wallingford, 50 s.
- 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.
- Jetelová J. (1972): Závěrečná zpráva o regionálním hydrogeologickém průzkumu v povodí Ploučnice, Kamenice a Křinice. MS Geofond, Praha.
- Kadlecová, R. et al. (2016): Rebilance zásob podzemních vod. Rozšířený abstrakt, ČGS, 18. s. Dostupné online: <http://www.geology.cz/rebilance/rebilance-abstrakt.pdf> [cit. 2021-04-21]
- Kessl, J., Kněžek, M. (2000): Metody výpočtu základního odtoku. In 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 Gesellschaft für Geowissenschaften, s. 89 – 95.
- 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. et al. (1978): Využití a ochrana podzemních vod. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Krásný, J. et al. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. ČHMÚ, Praha, 50 s.
- Kněžek, M. (1980): Některé úkoly hydrologie podzemních vod. In: Sborník konference Hydrologické dny 1980, Dům techniky ČVTS, Brno, s. 141 – 145.
- Kněžek, M. (1988): Podzemní složka odtoku. Práce a studie VÚV TGM, seš. 171, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 61 s.
- Kouřil, Z. (1975): Stanovení přírodních zdrojů podzemních vod podle metody G. Castanyho. In: Výpočty využitelného množství podzemních vod, Dům techniky ČVTS, Brno.
- Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P., Rushton, K. R. (2004): Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations. IHP-VI, Series on groundwater, No. 3, UNESCO, Paris.
- Krásný, J., Kněžek, M. (1977): Regional estimate of ground-water run-off from fissured rocks on using transmissivity coefficient and geomorphologic characteristics. Hydrological Sciences Journal, Vol. 4, č. 2, s. 149 – 159.
- Kříž, H. (1983): Hydrologie podzemních vod. Academia, Praha, 292 s.
- 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.
- Kudelin, B. I., (1960): Principy regional'noj ocenki estestvennykh resursov podzemnykh vod. Izdat Moskovskogo Universiteta, Moskva.
- Lacey, G. C., Grayson, R. B. (1998): Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. Journal of Hydrology, Vol. 204, s. 231 – 250.
- 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.
- Makarenko, F. A., (1948): O podzemním pitánii rek. Trudy Laboratorii Gidrogeologicheskikh Problem, AN SSSR 1, Moskva, s. 67 – 72.

- Malkovský, M. (1979): Tektogeneze platformního pokryvu Českého masívu. ÚÚG, roč. 53, Praha, 176 s.
- Mrázová, Š., Tomanová Petrová, P., Krentz, O. (eds) (2020): Geologie česko-saské křídové pánve mezi Krušnými horami a Ještědem. ČGS, Praha, 100 s. ISBN 978-80-7075-971-4.
- Nakládal, V. (1973): Hydrogeologický průzkum v povodí horní Kamenice. MS Geofond, Praha
- Natermann, E., (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflusslinie (TWL). Wasserwirtschaft 41, Sonderheft 12 – 14.
- Nathan, R. J., McMahon, T. A. (1990): Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. Water Resources Research, roč. 26, s. 1465 – 1473.
- Olmer, M., Kadlecová, R. et al. (2011): Oceňování velikosti zdrojů podzemních vod. Sborník geologických věd, řada HIG. ČGS, Praha, 77 s. ISBN: 978-80-7075-656-X.
- Olmer, M., Zajíčková, L., Hlavatá, J., Svobodová, M. (1972): Podzemní odtok v povodí Labe, Moravy a Odry. In: Kněžek M. et al.: Výzkum metod členění složky podzemních vod v povrchovém odtoku. Závěrečná zpráva, VÚV TGM, Praha.
- Pacl, A., Charvát, P., Mixa, M. et al. (2013): Hydrogeologický monitoring českoněmeckých hraničních vod v povodí kamenice a Křinice. Závěrečná zpráva 2012/2013, AQUATEST a.s., Praha, 67 s.
- Patzeltová, B. (2002): Monitorování podzemních vod v oblasti NP České Švýcarsko, přilehlé části CHKO Labské pískovce a oblasti OP VZ Všemily. Zpráva za rok 2002, Brtníky.
- Pechková, J. (2009): Hydrologická specifika řeky Kamenice. Diplomová práce, KFGG PřF MU, Brno, 95 s.
- Prechalová, H., Olmer, M. (2001): Bilance podzemních vod jako nástroj vodohospodářského plánování. Sborník geologických věd, řada HIG. ČGS, Praha, s. 55 – 62.
- Slepička, F. (1962): Geohydraulické příčiny hysterezí v prostorovém režimu oběhu vody a vyčleňování jejich účinku v malém povodí. Sborník hydrologické konference, ÚHH-SAV, Smolenice.
- Slepička, F. (1970): Proces přírodního odvodňování nádrží podzemních vod. Závěrečná zpráva, VÚV TGM, Praha.
- Spongberg, M. E. (2000): Spectral analysis of base flow separation with digital filters. Water Resources Research, roč. 36, s. 745 – 752.
- Uhlík, J. et al. (2016): Bilancování množství podzemní vody při využití hydraulických modelů. Vodní hospodářství, roč. 64, č. 8, s. 9 – 13. ISSN 1211-0760.
- Valečka, J. (1979): Paleogeografie a litofaciální vývoj severozápadní části české křídové pánve. Sborník geologických věd, Geologie, roč. 33., s. 47 – 81.
- Vařilová Z. (ed) et al. (2020): Geologie Českosaského Švýcarska. Správa Národního parku České Švýcarsko, Muzeum města Ústí nad Labem a Ústecký kraj, Ústí nad Labem a Krásná Lípa. ISBN 978-80-88140-31-3.
- Vlnas, R. (2011): Návrh metodiky stanovení přírodních zdrojů podzemních vod z průtoků povrchových toků. Výstup projektu SP/2E1/153/07, ČHMÚ, Praha.
- Vlnas, R., Pecha, M., Sosna, V. et al. (2019): Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky 2019. ČHMÚ, Praha, 265 s.
- Voigt, S., Uličný, D., Čech, S. et al. (2008): Cretaceous. In: McCann, T. (ed.): Geology of Central Europe, Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic. The Geological Society, London. 592 s. ISSN 1479-0963.

Voženílek, V., Tolasz, R., Míková, T., Valeriánová, A. (2007): Atlas podnebí Česka. Univerzita Palackého v Olomouci, ČHMU, Olomouc, 255 s. ISBN 978-80-244-1626-7.

VÚV TGM (2021): Digitální Báze Vodohospodářských Dat. Dostupné online: <https://dibavod.cz/index.php?id=27> [cit. 2021-04-23]

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., Alley, W. M. (1998): Ground water and surface water: A single resource. US Geological Survey Circular, č. 1139, Reston.

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

Žitný L. (1973): Zhodnocení regionálního průzkumu dolní Kamenice. I. etapa. MS Vodní zdroje, Praha.

Vyhláška č. 431/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva zemědělství o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci

Zákon č. 123/1998 Sb.: Zákon o právu na informace o životním prostředí

Zákon č. 150/2010 Sb.: Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 200/1990 Sb., o přestupcích, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)