

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie – kartografie



Jan Kalkus

**MOŽNOSTI HODNOCENÍ VARIABILITY ODTOKU V
EXPERIMENTÁLNÍCH POVODÍCH NA ŠUMAVĚ**

**POSSIBLE ASSESSMENT OF RUNOFF VARIABILITY AT
EXPERIMENTAL CATCHMENTS IN ŠUMAVA MOUNTAINS**

Bakalářská práce

Praha 2012

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Zdeněk Kliment, CSc.

Zadání bakalářské práce

Název práce

Možnosti hodnocení variability odtoku v experimentálních povodích na Šumavě

Cíle práce

Nalezení vhodného metodického nástroje k hodnocení odtokových poměrů v rozdílně situovaných experimentálních povodích

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Práce bude zahrnovat rešeršní a aplikační část. Rešeršní část bude věnována způsobům hodnocení variability časových řad odtoku, možnostem vzájemného porovnání odtoku v rozdílných geografických podmínkách. Práce bude obsahovat zamyšlení nad výběrem zájmových povodí z experimentální monitorovací sítě domácího pracoviště pro budoucí analýzy z hlediska charakteru území, dostupnosti a spolehlivosti naměřených dat. Aplikační část bude zaměřena na použití vybraných hodnotících metod na příkladu párových povodí v lokalitě Zbytiny v pramenné oblasti Blanice, popř. i se zahrnutím vybraných povodí v oblasti centrální Šumavy.

Datum zadání: 7. 12. 2011

Jméno studenta: Jan Kalkus

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Zdeněk Kliment, CSc.

Podpis vedoucího práce:

Jméno a příjmení autora: Jan Kalkus

Název bakalářské práce: Možnosti hodnocení variability odtoku v experimentálních povodích na Šumavě

Název v angličtině: Possible assessment of runoff variability at experimental catchments in Šumava Mountains

Katedra: fyzické geografie a geoekologie

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Zdeněk Kliment, CSc.

Rok obhajoby: 2012

Abstrakt

Hlavním cílem bakalářské práce je na základě rešerše vytvořit přehled možných ukazatelů variability odtoku a možností, jak pomocí nich vzájemně porovnat více povodí s různými vlastnostmi. Rovněž jsou zmíněny obecné informace o experimentálních povodích, o typech výzkumu v nich. Praktická část se zaměřuje na aplikaci vybraných metod pro povodí z oblasti centrální Šumavy (Ptačí potok, Rokytka) a horního toku Blanice (párová povodí Tetřívčího a Zbytinského potoka). Výsledky aplikační části potvrzují některé závěry dřívějších výzkumů ve stejných lokalitách.

Abstract

Main aim of the thesis is to make an outline of possible indicators of runoff variability and options how to use these indicators to compare catchments of different attributes, based on literature review. Further is mentioned general information about experimental catchments and sorts of researchers which were made there. Applicative part aims at application of selected methods for central Šumava catchment (Ptačí creek, Rokytka river) and upper reaches of Blanice river (paired catchments of Tetřívčí and Zbytinský creek). Results of this part confirm some of previous research results made in the same locations.

Klíčová slova

variabilita odtoku, srážko-odtokový režim, experimentální povodí, Šumava

Keywords

runoff variability, runoff regime, experimental catchment, Šumava Mountains

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval 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, 28. května 2012

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval RNDr. Zdeňku Klimentovi CSc. za cenné připomínky a rady. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli potřebná data pro bakalářskou práci, především Mgr. Václavu Královcovi. Zároveň děkuji všem, kteří mi při zpracování bakalářské práce poskytli pomoc, konzultace a podporu.

OBSAH

Úvod	8
1. Základní pojmy	9
1.1. Obecné charakteristiky povodí	9
1.2. Odtok.....	9
1.2.1. Popis a základní charakteristiky odtoku	9
1.2.2. Složky odtoku	10
1.2.3. Metody separace (složek) odtoku	10
1.2.4. Odtokový proces	10
1.2.5. Odtokový režim (režim odtoku)	11
2. Experimentální povodí	14
2.1. Typy experimentálních povodí.....	14
2.2. Studie v experimentálních povodích.....	15
2.3. Experimentální povodí v ČR	16
3. Variabilita odtoku.....	18
3.1. Metody a přístupy k hodnocení variability odtoku	18
3.2. Možné dělení ukazatelů variability	18
3.3. Základní charakteristiky datového souboru.....	19
3.3.1. Charakteristika polohy	19
3.3.2. Charakteristiky rozptylu	20
3.3.3. Charakteristika šikmosti	20
3.4. Vybrané ukazatele variability odtoku	20
3.4.1. Variační koeficient.....	21
3.4.2. Decilová odchylka.....	22
3.4.3. Kr koeficient	22
3.4.4. Index „prívalovosti“ - flashiness index	23
3.4.5. Metoda pulzace hydrogramu	26
3.5. Další ukazatele odtokového režimu	27
3.5.1. Pravděpodobnost překročení.....	27
3.5.2. Součinitel odtoku (odtokový koeficient)	28
3.5.3. Hodnocení vysokých průtoků.....	31
3.5.4. Hodnocení nízkých průtoků	34
3.5.5. Zpoždění odtoku	35
3.5.6. Metoda IHA (Indicators of Hydrologic Alteration)	37

3.5.7.	Shluková analýza	37
3.5.8.	Izotopová metoda	39
3.6.	Grafické vyjádření variability.....	41
3.6.1.	Hydrogram	41
3.6.2.	Čára překročení.....	46
3.7.	Dlouhodobá variabilita odtoků, analýza trendů.	47
3.8.	Shrnutí poznatků	48
4.	Materiál a metody zpracování	49
4.1.	Základní charakteristika zájmových území.....	49
4.2.	Zdroje dat	50
5.	Výsledky	53
6.	Diskuze	60
Závěr.....		62
Seznam tabulek a obrázků		63
Seznam literatury.....		65

ÚVOD

Rozkolísanost vodních toků je přirozeným jevem, který již v dávné historii významně ovlivňoval lidskou společnost. A to jak v podobě nebezpečných povodní, tak i nedostatku vody při nízkých vodních stavech. Proto se lidé vždy snažili o pochopení principu a zákonitostí v neustálých změnách výšky vodní hladiny, zejména pak o poznání faktorů, které tyto změny vyvolávají nebo ovlivňují. Tato snaha vedla na počátku minulého století k prvním výzkumům v nově vznikajících experimentálních povodích, které již byly zaměřeny na konkrétní cíle. Experimentálních a reprezentativních od té doby vznikla po celém světě celá řada a stala se základním zdrojem informací a poznatků při poznávání zákonitostí srážko-odtokových procesů. Každé povodí reaguje na určitou srážkovou událost odlišně, podoba výsledného odtoku je vždy ovlivněna mnoha faktory, jako například: intenzita a doba trvání srážky, morfologické vlastnosti povodí (rozloha, tvar, sklonitost apod.), vegetační a půdní poměry nebo způsob využití krajiny na území povodí. Právě míra vlivu jednotlivých faktorů na odtokový proces bývá obvyklým předmět výzkumu, velmi často se sleduje například variabilita odtoku v závislosti na změně krajinného pokryvu.

Stěžejní náplní práce je rešeršní část, jejímž hlavním cílem je vytvoření přehledu konkrétních, doposud používaných metod a přístupů pro zhodnocení odtokového režimu a jeho změn. V rámci obecné charakteristiky jednotlivých metod byla vždy snaha o uvedení konkrétních příkladů studií, které danou metodu využívaly, jejich stručný popis a zhodnocení dosažených výsledků.

V první části práce je nejprve zpracován teoretický úvod o odtokovém režimu, jednotlivých složkách odtoku apod., dále jsou popsány typy a metody výzkumu v experimentálních a reprezentativních povodích a poté následuje přehled konkrétních ukazatelů variability odtoku nalezených na základě rešerše základní hydrologické literatury a zejména jednotlivých případových studií. Ukazatele jsou rozděleny do dvou skupin. První tvoří ukazatele popisující pouze variabilitu naměřených dat, ve druhé jsou ukazatele popisující celkově charakter odtokového režimu.

Druhá část práce je zaměřena na samotnou aplikaci vybraných základních metod na data ze zájmových oblastí centrální Šumavy a povodí horní Blanice, kde se vyskytují experimentální povodí vybudovaná Katedrou fyzické geografie a geoekologie PŘF UK. Výběr povodí pro analýzu z oblasti centrální Šumavy byl ovlivněn zejména kvalitou dostupných dat a fyzicko-geografickými vlastnostmi povodí, nakonec byla vybrána povodí Rokytky a Ptačího potoka. Z oblasti horního toku Blanice byla pro analýzu použita párová experimentální povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka.

1. Základní pojmy

1.1. Obecné charakteristiky povodí

Povodí je podle autorů Duba a Němce (1969, s. 19) definováno jako „území po hydrologické stránce uzavřené, což znamená, že všechny srážky spadlé na jeho povrch odtékají jedním závěrovým profilem“. Znalost základních vlastností povodí je základním předpokladem pro tvorbu hydrologického rozboru. Povodí je charakterizováno geometrickými vlastnostmi, říční soustavou a ostatními fyzicko-geografickými vlastnostmi. Do skupiny geometrických vlastností patří zejména rozloha a tvar povodí, který lze vyjádřit poměrem P/L^2 , kde P=plocha povodí a L=délka toku (Dub 1963). Fyzicko-geografické vlastnosti povodí mají hlavní vliv na vznik, rozložení a průběh odtoku a podle (Duba 1963) sem patří tyto charakteristiky: zeměpisná poloha, orografické poměry, výškové a spádové poměry, průměrný sklon povodí, geologické a půdní poměry (ovlivňující propustnost a vsak vody), klimatické poměry (ovlivňující množství a rozložení srážek) a vegetační pokryv povodí. Velký význam hraje i faktor antropogenního ovlivnění, které může probíhat vědomě i omylem a mít jak pozitivní, tak negativní dopady. Mezi hlavní antropogenní vlivy patří úpravy toku, stavba vodních děl a změna vegetačních poměrů v povodí (Dub 1963).

1.2. Odtok

1.2.1. Popis a základní charakteristiky odtoku

Objem odtoku

Tato veličina podává informaci o absolutním objemu vody, která korytem řeky odeče z povodí za určitý časový úsek. Slouží například pro porovnání vodnatosti jednotlivých let (nebo sobě odpovídajících časových období)(Pechková 2009), ale je potřeba dát pozor, aby v povodí zůstaly zachovány stejné podmínky. V hydrologii se také často používá pojem **odtoková výška**, kterou Kemel a Kolář (1980) definují jako „tloušťku vrstvy vody, kterou by daný objem vytvořil na ploše odpovídající půdorysnému průmětu povodí.“ **Průtok** je vyjádřen jako objem vody, který proteče určitým profilem za jednotku času, tedy za sekundu. Je tedy vyjádřen v m^3/s , případně v l/s .

Specifický odtok

Kemel a Kolář (1980, s. 102) tuto charakteristiku popisují jako „objem vody, který v průměru odeče z plošné jednotky povodí za jednotku času“. Označuje se jako q , zpravidla bývá udáván v $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ (Kemel a Kolář 1980). Oproti průtoku nebo objemu odtoku je tato veličina

vztažena i k rozloze, proto je vhodnější pro vzájemné porovnání více povodí s podobnými podmínkami, ale odlišnou rozlohou.

1.2.2. Složky odtoku

Pro účely popisu odtokového režimu se celkový odtok z povodí nejčastěji dělí na tři základní složky, které ve své práci popisuje Maierová (2011) : základní odtok, označovaný též jako bazální. Je to část celkového odtoku tvořená dotací z podzemních vod a je vztahován k profilu na toku. Jeho hodnota je dlouhodobě poměrně konstantní a je nezávislý na výskytu srážek – tzn. i v delším období bez srážek je jeho hodnota téměř stejná. Druhou složkou je hypodermický odtok, který je podle normy ČSN 73 6530 (1983) definován jako voda, která stéká do koryta toku ve vrstvě bezprostředně pod povrchem, aniž by dosáhla hranice podzemní vody. Třetí složkou celkového odtoku je povrchový odtok, který je jednoduše definován jako část vody stékající po zemském povrchu (Kříž, 1983, cit. v Maierová 2011). Někdy je též nazýván jako Hortonovský odtok a vzniká ve chvíli, kdy je překročena infiltrační kapacita půdy a voda stéká přímo po povrchu.

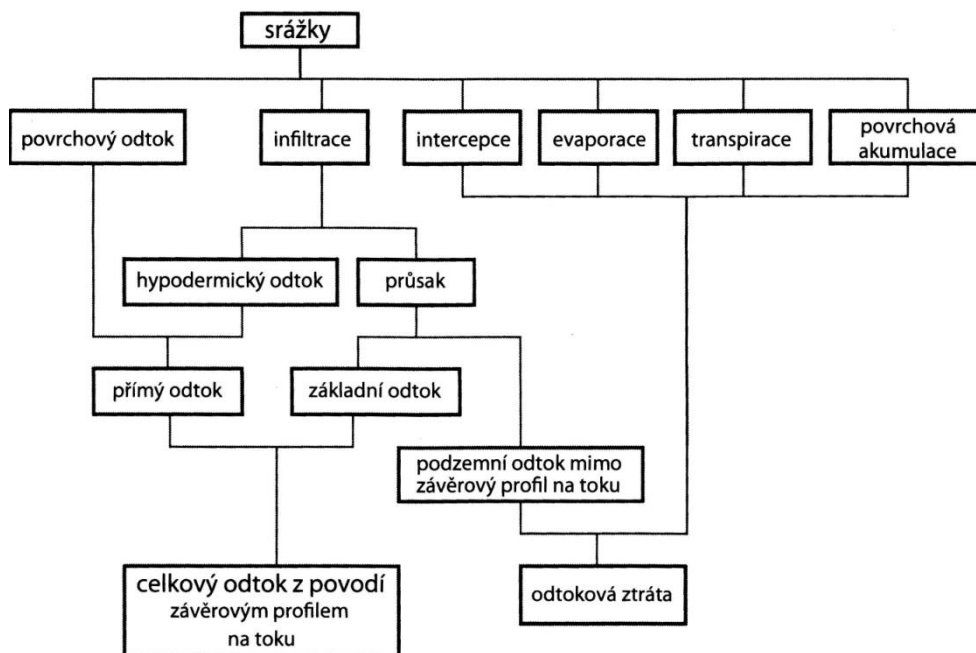
1.2.3. Metody separace (složek) odtoku

Vzájemné odlišení a stanovení hodnot jednotlivých složek celkového odtoku je důležité pro analýzu povodňových vln, pro rozpoznání přímého odtoku vyvolaného bezprostředně předcházející srážkou. Na základě hodnot základního odtoku můžeme mezi sebou rovněž porovnávat jednotlivá povodí z hlediska odlišných půdních či geologických podmínek. Metod pro oddělení jednotlivých složek odtoku existuje celá řada. Výběr a popis často používaných metod uvádí ve své práci Maierová (2011). Jsou to například: metoda Klinera a Kněžka, metoda nejnižších průtoků v povrchových tocích, metoda Killeho (minimálních měsíčních průtoků), metoda BFI (Base Flow Index), metoda separace hydrogramu (existuje více možností, některé jsou blíže popsány v práci (Blume, Zehe, Bronstert 2007), metoda digitálních filtrů a další.

1.2.4. Odtokový proces

Po dopadu srážky na zemský povrch existuje několik možností, co se s touto vodou stane dál, a to v závislosti na půdním typu a druhu, svažitosti terénu, dosavadní nasycenosti půdy apod. Souhrn dějů od vstupu vody do povodí až po jeho opuštění lze nazvat odtokovým procesem. Ve zjednodušené formě je znázorněn pomocí schématu na Obrázku 1.

Obrázek 1: Schéma odtokového procesu



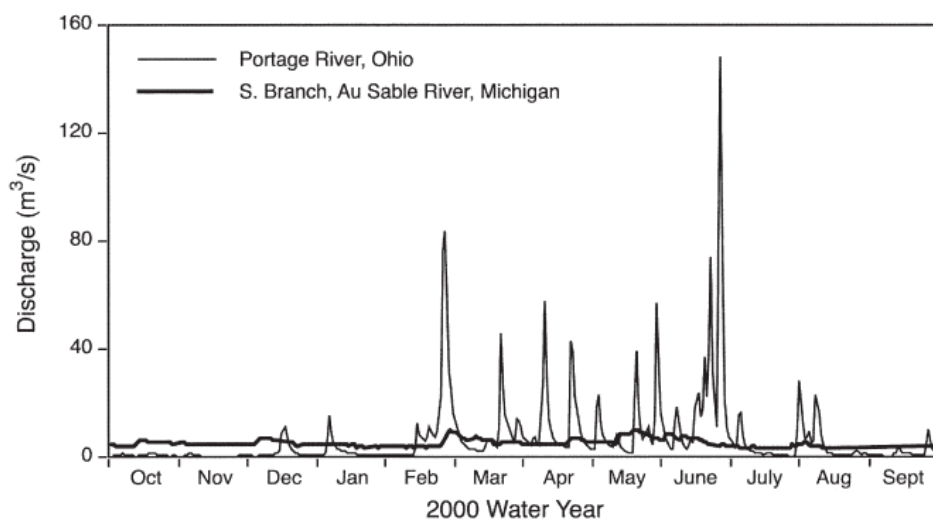
Zdroj: Královec 2011

1.2.5. Odtokový režim (režim odtoku)

Hodnota průtoku ve vodních tocích se v průběhu času neustále mění. Můžeme pozorovat jak změny krátkodobého charakteru, tzn. změny velikosti odtoku v rámci hodin nebo dní, tak dlouhodobého charakteru, tedy změny ročních nebo sezónních průměrných průtoků. Celkový soubor těchto změn můžeme označit jako odtokový režim daného toku. Kromě změn velikosti průtoku můžeme v rámci odtokového režimu hodnotit i další jevy, jako je např. frekvence a velikost povodňových nebo nízko-odtokových situací nebo rozložení jednotlivých hodnot průtoků během roku (Baker 2004).

Odtokový režim je výsledek současného působení mnoha faktorů, z nichž každý má svůj podíl na jeho výsledné podobě. Těchto faktorů existuje celá řada, podle Bakera (2004) jsou to například: klimatické podmínky (zejména množství srážek), topografické podmínky, geologická stavba, půdní typy, vegetační kryt, velikost a tvar povodí, z antropogenních faktorů potom využití vodního toku a okolní krajiny nebo budování vodních staveb. Že je režim odtoku ovlivněn více faktory dokládá na příkladu ročních hydrogramů dvou vodních toků v USA (Portage River v Ohio a Au Sable River v Michiganu), jež mají téměř stejnou plochu povodí i úhrny srážek, přesto je jejich odtokový režim naprosto rozdílný viz Obrázek 2.

Obrázek 2: Rozdílné hydrogramy toků se stejnou rozlohou povodí i srážkovými úhrny



Zdroj: Baker 2004

Bilanční rovnice

Pro základní představu o odtokovém režimu můžeme využít bilanční rovnici, která slouží k vyčíslení jednotlivých členů hydrologického cyklu daného povodí (Kyselová 2008). V nejjednodušší podobě jsou dány do souvislosti pouze srážky, odtok a výpar a bilanční rovnice je ve tvaru: $srážky = odtok + výpar$. Kemel a Kolář (1980) uvádí komplexnější bilanční rovnici pro hydrologický rok v následujícím tvaru:

$$H_S = H_O + H_V \pm H_r \pm H_u ,$$

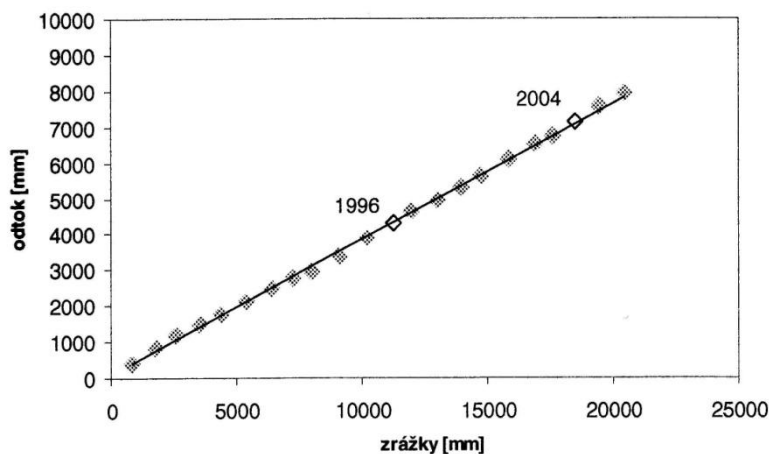
kde H_S = roční výška srážek, H_O = roční výška odtoku, H_V = roční výška výparu (evapotranspirace), H_r = roční výška odpovídající změně zásob vody v povodí (podzemní vody, akumulované ve sněhové pokrývce, v povrchových nádržích, půdě apod.), H_u = výška odpovídající přírůstku nebo úbytku vody výměnou se sousedním povodím (většina autorů ale tento člen neuvažuje). Hydrologický rok je určen tak, aby srážky (kapalné i pevné) otekly z povodí v ten samý rok, ve kterém spadnou. V České republice začíná hydrologický rok 1. 11. a končí 31. 10. Označuje se podle kalendářního roku, ve kterém končí (Kemel a Kolář 1980). Bilanční rovnice může být samozřejmě vypočítána pro libovolné časové období.

Významnost transpirace rostlin, jako jednoho ze členů bilanční rovnice, dokládá ve své práci Kyselová (2008). Studie se zaměřuje na posouzení hydrologických následků dvou větrných smrští, které přešli přes území horního Hronu (tzv. Horehroní) 8. 7. 1996 a 19. 11. 2004. Tyto velmi silné větrné bouře způsobily obrovské disturbance lesních ploch a silně tak narušily lesní ekosystémy. Na příkladu tří malých horských povodí – Bystrianky a Štiavničky (která leží v masivu

Nízkých Tater) a Osrblianky se autor pokusil ověřit vliv těchto disturbancí na odtokový režim vzhledem ke všeobecně potvrzenému významu lesa, tedy jeho retenční, akumulární, nebo retardační funkci (Mráček, Krečmer 1975, cit. v Kyselová 2008). Analýza proběhla pro období 1985 – 2006, použita a byl jednak průměrná roční data a pro hodnocení rozdílů mezi vegetačním a mimovegetačním obdobím i data měsíční.

Sestrojená dvojitá součtová čára ročních průtoků a srážek za sledované období (Obrázek 3) ukazuje, že nedošlo k žádné významné meziroční změně poměru srážek a odtoku a rozsáhlé lesní disturbance tak neměly na odtokový režim výrazný vliv. Autorka si to vysvětluje tím, že místo odumřelého nebo odtěženého dřeva velmi rychle vyrostla nová bylinná a keřová vegetace, které převzala vodohospodářské funkce lesa a to na základě tvrzení Eliáše a kol. (2002, cit. v Kyselová 2008), že na míru transpirace nemá při zachování vnějších podmínek druh vegetačního krytu vliv. Tento jev se projevuje i v případě kalamitního odlesnění Krkonoš, Krušných a Jizerských hor (Tesař, Šír, Zelenková, 2004) a výrazné druhové skladby lesa v Beskydských experimentálních povodích (Chlebek a Jařabáč 1994, cit. v Tesař, Šír a Zelenková, 2004).

Obrázek 3: dvojitá součtová čára ročních průtoků a srážek pro povodí Osrblianky



Zdroj: Kyselová 2008

Hlavní nevýhodou této studie je použití měsíčních dat, která poskytují pouze velmi hrubý přehled o odtokovém režimu. Pro detailní analýzu malých povodí, jak sám autor zmínil, by bylo potřeba použít data alespoň hodinová.

2. Experimentální povodí

Podle Holka (2006) započal rozvoj systematického zkoumání konkrétních povodí přibližně před sto lety, a to zejména z důvodů snahy o prohloubení poznatků o hydrologických procesech. Největší rozvoj v hydrologickém výzkumu začal v 60. letech 19. století, hlavně díky technickému pokroku. Objevují se nové měřicí přístroje a s tím spojené nové, propracovanější metody dávající lepší výsledky (Stricker a Warmerdam 2010). Rozvoj byl tak intenzivní, že v roce 1965 vyhlásila organizace UNESCO *International Hydrologic Decade – IHD* („mezinárodní hydrologické desetiletí“). Během trvání tohoto projektu bylo ve světě vybudováno velké množství experimentálních a reprezentativních povodí s různými cíly studia. V roce 1974 následovalo vyhlášení tzv. mezinárodního hydrologického programu (*IHP*). I přes úbytek výzkumných aktivit v 70. letech došlo k založení dvou významných organizací, a sice *FRIEND (Flow Regimes of International Experimental Network Data)* v roce 1985 a *ERB (Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins)* v roce 1986. Obě se až do současnosti různými způsoby stále snaží o co nejdokonalejší pochopení a popsání hydrologického režimu vodních toků. *FRIEND* se zaměřuje hlavně na použití statistické analýzy na data z co největšího počtu povodí, což považuje za lepší způsob než extrapolaci výsledků z několika povodí na povodí ostatní. Organizace *ERB* s dvaceti členskými státy obstarává síť evropských výzkumných povodí, stará se o vzájemnou kooperaci, sdílení výsledků výzkumu apod. (Stricker a Warmerdam 2010). Za Českou republiku do této sítě patří povodí Anenského potoka (povodí Želivky), Liz (povodí Otavy), Mokruvka (oblast Modravy) a Uhlířská v Jizerských horách. Povodí používaná pro výzkum lze podle Holka (2006) rozdělit na dva základní druhy, a to povodí reprezentativní a experimentální.

2.1. Typy experimentálních povodí

Reprezentativního povodí, jako jeden ze základních nástrojů hydrologického výzkumu, slouží zejména k všeobecnému studiu vodního režimu typického pro daný region nebo daný typ povodí. Je zvoleno tak, aby pro daný region bylo charakteristické, zejména z hlediska fyzicko-geografických podmínek (jako vegetační kryt, členitost, geologická stavba apod.) Pro co největší věrohodnost je potřeba pozorování v řádu desítek let, během této doby se podmínky v povodí cíleně nijak výrazně nemění. Rozloha reprezentativních povodí se pohybuje kolem 250 km² (výjimečně až 1000 km²)(Kříž a kol. 1998).

Pro řešení konkrétních otázek se v dnešní době častěji používají povodí experimentální. Zde se naopak předpokládá, že během období pozorování dojde v rámci výzkumu na ploše povodí k určitým změnám a změní se tím i odtokový režim. Právě vztah mezi těmito změnami bývá předmětem výzkumu. Podle Kříže a kol. (1998) jsou experimentální povodí malá území o rozloze

do 4km² s relativně homogenními fyzicko-geografickými vlastnostmi a jsou vhodně vybavená přístrojovou technikou pro měření či záznam požadovaných jevů. Používají se například pro sledování změn vodního režimu před a po cíleně provedenou změnou-zejména krajinného pokryvu.

2.2. Studie v experimentálních povodích

McCulloh a Robison (1993, cit. v Královec 2011) popisují tři typy studií v experimentálních povodích.

1. **srovnávací studie** – jsou založeny na porovnávání výsledků ze dvou nebo více povodí, které se výrazně liší jednou charakteristikou (např. půdními poměry nebo vegetačním pokryvem). V přírodních podmínkách ale neexistují dvě povodí, která by se lišila pouze v jednom ohledu, vždy existují i nějaké další rozdíly, ovlivňující výsledek. Výhodou je poměrně rychlá dostupnost výsledků. Do této kategorie můžeme zařadit například studii (Pavlásek, Máca, Ředinová 2008), viz kapitola 3.5.5.
2. **studie ve stejném povodí** – porovnávají data pouze z jednoho povodí, a to před a po umělém nebo přírodním zásahu, který výrazně změní některou z jeho charakteristik. Nevýhodou je, že během pozorování může dojít ke klimatické variabilitě a pozorovaná změna tak nemusí být pouze důsledkem uskutečněného zásahu. Příkladem může být studie (Stoof 2012), sledující vlivy uměle založeného požáru na odtokový režim nebo (Brown 2008), viz kapitola 3.6.2
3. **studie v párových povodích** – v podstatě jde o kombinaci dvou předchozích typů. Před zahájením výzkumu musí obě povodí mít co nejpodobnější charakteristiky (jak fyzicko-geografické, tak prostorové). Před výzkumem probíhá období kalibrace, během něhož se v obou povodích zaznamenávají hodnoty zkoumaných charakteristik (průtok, srážky, půdní vlhkost apod.). V průběhu výzkumu poté dojde v jednom z nich k umělému zásahu (např. do vegetačního krytu) a sleduje se závislost odtokového režimu na tyto změny na základě druhého, tzv. kontrolního povodí, které zůstalo nezměněno. Výzkum v párových povodích se velmi často používá pro zjištění vlivu změny krajinného pokryvu na odtokový režim. Ve svých studiích tento přístup využívají např. (Královec 2011) nebo (Watson a kol. 2001) a mnoho dalších.

2.3. Experimentální povodí v ČR

Na území České republiky bylo ze stejných důvodů jako v ostatních státech světa zřizováno množství experimentálních i reprezentativních povodí, a to průběžně od 1. poloviny 20. století až do současnosti. Některá samozřejmě již zanikla, ale jsou i taková, kde měření probíhá od jejich založení až dodnes a poskytují tak velmi užitečné datové soubory dlouhé několik desítek let. Experimentálních povodí různé rozlohy na našem území bylo a stále je celá řada, a protože jsou spravována množstvím různých institucí, je velmi obtížné vytvořit jejich kompletní seznam. O vytvoření co nejobsáhlejší databáze se pokusila Maierová (2011), která roztřídila povodí buď podle geografických oblastí, ve kterých se nachází, nebo podle institucí, které je spravují. Uvádím zde stručně základní přehled vybraných experimentálních povodí na území ČR:

- *experimentální povodí v Jizerských horách* – hydrologická základnu v Jizerských založil Český hydrometeorologický úřad (ČHMÚ), zejména z důvodů zkoumání vlivu silně poškozených lesů škodlivými exhalacemi a kyselými dešti na odtokový režim. Základna je tvořena sedmi malými povodími ve vrcholové oblasti Jizerských hor. Jsou to povodí: Uhlířská (součást evropské sítě ERB), Blatný rybník, Kristiánov, Jezdecká, Smědava I, Smědava II a Jizerka. Detailní popis těchto povodí je v práci Kulasové (2003).
- *experimentální povodí Volyňky* - jedno z nejstarších v ČR, založeno k příležitosti IHD v roce 1965. S rozlohou 383,2 km² se vymyká typické vlastnosti experimentálního povodí, tedy malé rozloze. Měření zde probíhá s určitými úpravami nepřetržitě dodnes.
- *experimentální povodí Liz a Albeřice* – dvě blízká povodí nacházející se ve Vimperské vrchovině v CHKO Šumava. Povodí Liz je součástí evropské sítě ERB.
- *experimentální povodí Modrava I, II, III* - byla založena na území NP Šumava v roce 1998 Katedrou vodního hospodářství a Katedrou biotechnických úprav Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity, a to zejména pro popis vlivu lesních porostů na odtokový režim.
- *Beskydská experimentální povodí* – jsou ve správě Výzkumného ústavu lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. a některá z nich byla založena již v roce 1927. V současné době jsou zde provozována povodí Malá Ráztoka a Červík.
- *experimentální povodí VÚMOP* – jsou ve správě Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd, v. v. i. (VÚMOP). Patří sem povodí Cerhovického potoka, Kopaninského potoka, Němčického potoka, Dehtáře a Žejbro.

- *povodí síť GEOMON* – nebo také Síť malých lesních povodí GEOMON, byla vytvořena Českou geologickou službou. Povodí jsou rozmístěna po celém území ČR, tak, aby pokrývala co nejvíc krajinných typů. Zpracování výsledků je centrálně koordinováno, aby bylo dosaženo co nejvíc nových poznatků. Kompletní výčet 14 obsažených povodí lze nalézt v práci (Maierová 2011)
- *povodí ve správě Katedry fyzické geografie a geoekologie (KFGG) PŘF UK* – jedná se o síť experimentálních povodí, nacházejících se v oblasti centrální Šumavy (Modravsko – pramenná oblast Otavy), v pramenné oblasti Blanice (povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka) a v Krušných horách (povodí Slatinného potoka, Zlatého potoka a Bystřice).

3. Variabilita odtoku

Již dlouho se lidé snaží o pochopení a předpověď chování jednotlivých vodních toků. K tomu je bezesporu potřeba poznání jejich odtokového režimu. Jak již bylo řečeno, odtokový režim je charakterizován souborem změn hodnot průtoků a právě proto je variabilita odtoku v hydrologii důležitým tématem.

3.1. Metody a přístupy k hodnocení variability odtoku

Popisem a zhodnocením odtokového režimu a jeho proměnlivosti, nebo také analýzou naměřených průtokových dat, se za různým účelem zabývá v současné době i v minulosti celá řada autorů. Velmi často je zkoumán například vliv změny vegetačního krytu (např. Lane 2005 nebo Brown a kol. 2003), klimatických podmínek, vliv zásahů člověka na změnu v odtokových poměrech nebo vliv variability odtoku na daný ekosystém (např. v Richter 1996). Velký počet provedených studií znamená i velký počet metod a přístupů použitých k analýzám a hodnocení.

Zatímco studie z dřívějších období se zaměřovaly na základní, jednodušší ukazatele variability, jako například průměrné průtoky a jejich změny, maxima průtoků, trvání povodňových stavů či rozložení průtoků v rámci roku, některé novější studie se zaměřují na tzv. multivariabilní přístup, tzn., snaží se hodnotit odtokový režim a jeho změny pomocí více charakteristik zároveň (Olden a Poff 2003).

3.2. Možné dělení ukazatelů variability

Jednotlivé ukazatele variability odtoku lze rozdělit podle velkého množství hledisek, např.: podle délky období, pro které je počítán (rok, měsíc, den, roční období atd.), podle časového rozlišení dat použitých pro výpočet (měsíční, denní, hodinová atd.) nebo podle toho, zda se jedná o jeden samostatný statistický ukazatel (např. průměrný průtok, medián, minimum, maximum apod.), či jednoduchý nebo složitější vztah nebo komplex více ukazatelů (variační koeficient, K_r koeficient apod.). Dělením ukazatelů z hlediska časového se zabývá ve své práci Bhat a kol. (2010), který mezi sebou porovnává dva druhy ukazatelů, a to zabývající se buď **roční** variabilitou, nebo variabilitou v rámci jednotlivých **srážkových** epizod, což je velmi častá varianta. Jinou možnost dělení ukazují např. Clausenn a Biggs (2000) a to na základní statistické ukazatele (průměr, medián, šikmost, variační koeficient atd.), ukazatele *vysokých průtoků* (*high-flow variables*) a ukazatele nízkých průtoků (*low-flow variables*). Dále je možné rozdělit metody podle toho, zda se výsledek prezentuje v číselné formě nebo grafické. Metody, jejichž výsledky jsou prezentovány v grafické podobě, jsou rovněž založeny na číselných výsledcích, ty jsou ale určitým způsobem a v určitém pořadí vynášeny do grafu, nebo jiného grafického vyjádření, z něhož lze poté zjistit další

výsledky a poznatky. Mezi takové metody patří například hydrogram nebo čára překročení. Grafického znázornění se také velmi často využívá při vyjadřování vzájemných závislostí různých ukazatelů, pro znázornění vývoje hodnot v čase nebo rozložení mezi jednotlivé části daného období, má totiž tu výhodu, že poskytne okamžitou a názornou informaci o vývoji nebo rozložení daného jevu.

Jak již bylo řečeno, bylo během posledních desítek let, díky zvýšenému zájmu o poznání fungování odtokového procesu a faktorů s ním spojených ta tímto účelem použito velké množství indexů či ukazatelů. Proto si autoři nově vznikajících studií musí poradit s výběrem vhodných ukazatelů, aby byly početně co nejjednodušší a zároveň vystihovaly všechny potřebné aspekty zkoumaného jevu. Touto problematikou se zabývá právě Olden a Poff (2003), který ve své práci porovnává a hodnotí 171 vybraných ukazatelů variability. Používá k tomu průměrné denní průtoky dlouhodobých časových řad ze 420 měřících stanic z celého území USA. Poukazuje zde na nadbytečnost takto velkého množství ukazatelů a poskytuje doporučení ohledně jejich vhodného výběru. Pro lepší orientaci rozděluje charakteristiky průtokových dat do pěti následujících kategorií podle zaměření: rozsah, frekvence, doba trvání, období výskytu a míra změny. Cílem práce bylo na základě vzájemné korelační analýzy všech 171 ukazatelů vybrat jednak ty, které jsou nadbytečné, tj. jsou například závislé na jiných nebo jsou jen obměnou dalších ukazatelů a zároveň určit několik z nich, které jsou pro popis odtokového režimu nejvhodnější. Seznam všech hodnocených ukazatelů i podrobné výsledky analýzy se nachází v jejich práci Olden a Poff (2003).

3.3. Základní charakteristiky datového souboru

Následující charakteristiky popisují základní vlastnosti jakéhokoliv souboru dat (popisující stejný jev). Díky nim, si můžeme poměrně rychle vytvořit prvotní představu o charakteru dat, konkrétně například o charakteru a změnách odtokového režimu.

3.3.1. Charakteristika polohy

Nejdůležitější charakteristikou polohy je *aritmetický průměr* daný známým výrazem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Nevýhodou aritmetického průměru je ale to, že je ovlivněn výskytem extrémních hodnot. Proto se častěji používá hodnota *mediánu*, což je hodnota nacházející se uprostřed sestupně seřazeného datového souboru (Dub a Němec 1969).

3.3.2. Charakteristiky rozptylu

Nejjednodušší charakteristikou rozptylu je *variační rozpětí*, které vyjadřuje rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty znaku v daném souboru. Tato hodnota ale opět může být velmi zkreslena extrémními hodnotami, proto se používá pouze pro hrubou představu. Nejcitlivějším a nejpoužívanějším ukazatelem rozptylu je *směrodatná odchylka*, vyjádřená rovnicí (Dub, Němec a kol. 1969):

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

3.3.3. Charakteristika šikmosti

O šikmosti dat neboli odchylce od symetrického rozložení, nejlépe informuje *součinitel asymetrie* vyjádřený rovnicí:

$$C_S = \frac{n}{(n-1) * (n-2)} * \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{s_x^3}$$

kde n představuje rozsah souboru (Dub, Němec a kol. 1969). Šikmost (asymetrie) je velmi často zkoumána při hodnocení tvaru hydrogramu povodňových vln. Pokud je šikmost kladná, jsou hodnoty rozprostřeny více na pravé straně, při záporné šikmosti na levé. Pokud je šikmost rovná nule, je tvar vlny zcela symetrický (Bartůňková 2010).

3.4. Vybrané ukazatele variability odtoku

Pro posouzení variability odtoku dvou toků použili Kocum a Jánský (2008) soubor různých ukazatelů, které mohou být považovány za základní ukazatele variability odtoku. Autoři porovnávají toky Vydru se závěrovým profilem Vydra-Modrava a Křemelnou se závěrovým profilem Křemelná-Stodůlky a zkoumají vliv různého poměru rašeliništních půd v povodí (38 % v povodí Vydry a 5 % v povodí Křemelné). Byla použita průměrná denní průtoková data pro hydrologické roky 2000 – 2006 získaná ze sítě vodoměrných stanic ČHMÚ. Použité ukazatele variability i výsledky pro obě povodí jsou uvedeny v tabulce na Obrázku 3.

Obrázek 3: Ukazatelé variability odtoku pro profily Vydra-Modrava a Křemelná-Stodůlky (1. 11. 1999 – 31. 10. 2006)

<i>profil</i>	<i>Vydra-Modrava</i>	<i>Křemelná-Stodůlky</i>
plocha povodí [km ²]	90,17	134,11
dlouhodobý průměrný průtok [m ³ .s ⁻¹]	3,483	3,722
minimální průměrný denní průtok [m ³ .s ⁻¹]	0,76	0,88
maximální průměrný denní průtok [m ³ .s ⁻¹]	55,1	64,6
specifický odtok [l/s/km ²]	38,5	27,8
min. specifický odtok [l/s/km ²]	8,5	6,6
max. specifický odtok [l/s/km ²]	611	482
roční objem odtoku [km ³]	0,1098	0,1174
odtoková výška [mm]	1218	875
Medián	2,03	2,41
Rozptyl	15,86	15,15
průměrná odchylka od střední hodnoty	2,471	2,405
směrodatná odchylka	3,982	3,893
decilová odchylka D (Q _d)	0,601	0,502
variační koeficient C _v (Q _d)	1,143	1,046
variační koeficient C _m (Q _m)	0,421	0,392
koeficient variability Kr (Q _m)	5,048	3,686

Zdroj: Kocum, Jánský 2008

I přes relativně krátkou dobu měření autor na základě výsledků autor označuje variabilitu v profilu Vydra-Modrava za mírně vyšší. A to zejména na základě hodnoty koeficientu (Kr), popisujícího variabilitu měsíčních průtoků a na základě poměru maximálního a minimálního průměrného měsíčního průtoky, který je vyšší pro profil Vydra-Modrava. Větší rozkolísanost tedy byla zjištěna u toku s větším zastoupením rašeliništních půd.

Nejvýznamnější a nejpoužívanější z uvedeného přehledu ukazatelů variability odtoku jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

3.4.1. Variační koeficient

Variační koeficient (C_v) je bezrozměrná veličina, je jím vyjádřen vztah směrodatné odchylky k průměru. Slouží k porovnání variability souborů s odlišnými hodnotami průměru (Zvára 2008) např. toků s nízkou a vysokou vodnatostí. Variační koeficient je jedním z nejdůležitějších ukazatelů v hydrologii. Základní vztah je tedy vyjádřen následovně:

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

pro hydrologii je vztah upraven do této podoby:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_d - Q_a)^2}{n}}}{Q_a},$$

kde Q_d je průměrný denní průtok, Q_a dlouhodobý průměrný průtok a n počet členů řady. Místo denních hodnot lze použít i průměrné průtoky měsíční. Čím je hodnota koeficientu vyšší, tím vyšší je variabilita dat v souboru, tj. průtoků za sledované období. Variační koeficient má vliv na podobu čáry překročení (viz kapitola 3.6.2): čím je jeho hodnota vyšší (tzn. kolísavější hodnoty průtoků), tím je křivka znázorňující čáry překročení strmější (obzvláště v počáteční a koncové části), a naopak (Dub 1963).

Královec (2010) ve své práci kromě variačního koeficientu používá také další statistické míry variability, konkrétně **poměr průměrné odchylky od mediánu k mediánu** a **koeficient S_{x10}** , vyjadřující „rozdíl odchylek 9. decilu od mediánu a 1. decilu od mediánu dělený součtem těchto odchylek, tj. rozdílem obou decilů“.

3.4.2. Decilová odchylka

Netopil a kol. (1984) definuje decilovou odchylku jako „průměr odchylek jednotlivých sousedních decilů, tj. hodnot průtoků, které rozdělují uspořádanou řadu denních průtoků na deset skupin o stejném počtu členů“. Označuje se D a výpočet vypadá následovně:

$$D = \frac{(Q_{30} - Q_{60}) + (Q_{60} - Q_{90}) + \dots + (Q_{300} - Q_{330})}{10},$$

po úpravě

$$D = \frac{(Q_{30} - Q_{330})}{10},$$

kde Q_{30}, \dots, Q_{330} představují hodnotu příslušných M -denních průtoků a číslo 10 vyjadřuje počet odchylek. Čím je hodnota D vyšší, tím vyšší variabilita souboru dat. Podle Netopila (1984) je při rozdílné vodnatosti toků vhodné použít relativní varianci, tj. podíl decilové odchylky (absolutní variance) a průměrného průtoků.

3.4.3. Kr koeficient

Neboli koeficient rozkolísanosti odtoku. Výpočet podle Kemela (1996) vypadá následovně:

$$K_r = \frac{Q_1}{Q_{99}},$$

kde Q_1 , resp. Q_{99} jsou hodnoty průtoků překročené v 1 %, respektive 99 % případů (zjištěné např. při tvorbě čáry překročení). Pokud tyto hodnoty neznáme, lze použít následující vzorec pro zjištění vyrovnanosti měsíčních průtoků, který uvádí například Netopil (1970) :

$$K_r = \frac{\sum |p_i - 8,3|}{8,3},$$

kde p_i je procentuelní podíl každého z měsíců na ročním průtoku a hodnota 8,3 představuje průměrný podíl každého z měsíců na ročním odtoku (tzn. $100/12=8,3$). Při použití tohoto vzorce koeficient nabývá hodnot 0 – 22, přičemž s rostoucí hodnotou roste rozkolísanost toku. Podle koeficientu K_r lze toky rozdělit do tří kategorií, uvedených i s rozpětím hodnot v Tabulce 1.

Tabulka 1: Klasifikace toků podle hodnoty koeficientu K_r

hodnota K_r	klasifikace toku
0 – 3	velmi vyrovnaný vysokohorský tok
3 – 6	průměrně vyrovnaný vodní tok
6 – 22	nevyrovnaný vodní tok

Zdroj: Kemel, Kolář 1980

3.4.4. Index „prívalovosti“ - flashiness index

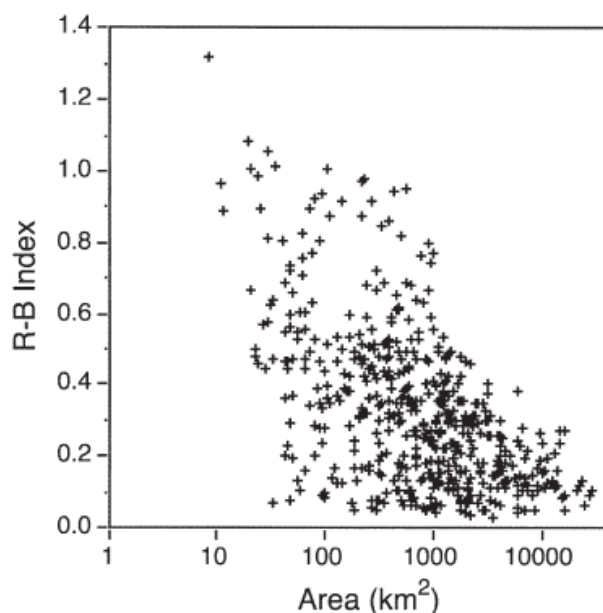
Pro výraz flashiness, slovensky „prívalovosť“ lze těžko hledat český ekvivalent, dal by se vyjádřit jako „výrazná krátkodobá rozkolísanost“ Jedná se o další z ukazatelů sloužících k charakteristice odtokového režimu, vyjadřující krátkodobé oscilace odtoku. Pro výraz „prívalovosť“ neexistuje jednotná definice, lze ho však popsat jako frekvenci a rychlost krátkodobých změn průtoků (Holko, Kostka 2008). Míra této charakteristiky je vyjádřena tzv. „flashiness indexem“ (FI), který ve své práci stanovil Baker (2004). Jedná se o bezrozměrnou veličinu, může nabývat hodnot 0 – 2, přičemž 0 znamená absolutně konstantní průtok a s rostoucí hodnotou FI roste rozkolísanost toku. (Fongers 2007, cit. v Holko a kol. 2011). Jeho hodnota nám vlastně udává, o kolik procent se změnil průtok mezi dvěma časovými jednotkami, z nichž je index počítán (nejčastěji den) a spočítá se podle rovnice (Holko a kol. 2011) :

$$FI = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i},$$

kde q je průměrný průtok nebo objem odtoku (použití obou hodnot dává stejný výsledek) a i je pořadové číslo dne, v případě, že FI je počítán z denních průměrných průtoků. Pro detailnější

analýzu kratšího období lze dosadit i data s kratším časovým krokem, například hodinovým. Jak již bylo řečeno, jako první použil *FI* ve své studii Baker (2004), který ho označuje jako Richards - Baker Flashiness Index ($R - B$ Index). Hodnotí zde průtoková data z 515 měřících stanic šesti států USA z oblasti Středozápadu (Illinois, Indiana, Iowa, Michigan, Ohio a Wisconsin). Doba měření byla na všech stanicích 27 let (1974 – 2001) a jednalo se o hydrologické roky, které jsou v tamních podmínkách zvoleny od začátku října do konce září. Rozlohy povodí jsou velmi různorodé: od 8,5 km² až do 28 813 km² a autor upozorňuje, že ne všechny výsledky jsou nezávislé, některé stanice totiž leží na stejném toku. Na většině území převažuje orná půda (pouze na území Michiganu a Wisconsinu převažují lesy). Pro vybrané toky byly pro detailnější analýzu použity kromě denních dat i data hodinová. Vypočítané hodnoty $R - B$ Indexu poté byly zhodnoceny z různých hledisek a v závislosti na dalších charakteristikách, rovněž byly sledovány jeho změny a trendy. Díky vysokému počtu posuzovaných toků a dlouhému období výzkumu bylo celkové rozpětí zjištěných hodnot $R - B$ Indexu poměrně široké – od 0,03 do 1,32 (tzn., že ze dne na den se hodnoty průtoku měnily od 3 % až do 132 %). Hlavní závěry z této studie jsou následující: hodnota $R - B$ Indexu roste se zvyšující se frekvencí a rozsahem extrémních srážkových událostí a klesá se zvětšující se plochou povodí (viz Obrázek 4) a podílem bazálního odtoku, intenzita a četnost výskytu srážek nemá vliv na změnu krátkodobé rozkolísanosti toků, nárůst krátkodobé rozkolísanosti není vázán pouze na městské oblasti, ale je zaznamenán i na územích pokrytých ornou půdou nebo lesy a vyskytuje se v oblastech s nízkou i vysokou hodnotou $R - B$ Indexu. Jako jedno z možných použití tohoto ukazatele uvádí autor (Baker 2004) nástroj kontroly efektivity nově vyvinutých přístupů ve využívání krajiny, založených například na změně vegetačního krytu.

Obrázek 4: Obrázek 2: graf závislosti hodnoty R-B Indexu na ploše (Area) povodí pro vybraná povodí USA



Zdroj: Baker 2004

V oblasti střední Evropy provedl výzkum, ve kterém použil R – B Index (Holko a kol. 2011). Konkrétně se jednalo o 122 horských povodí, 91 v Rakousku (oblast Alp) a 31 na Slovensku (Západní Karpaty). Výzkum probíhal v letech 1976 – 2001 a byla použita data denních průměrných průtoků. Rozloha povodí se pohybovala mezi 19 km² a 9770 km². Průměrná hodnota ročního srážkového úhrnu byla v Rakouských povodích přibližně 1300 mm, ve Slovenských pak 1000 mm a průměrná roční odtoková výška byla 800 mm, respektive 500 mm. Výsledné hodnoty R – B Indexu se pohybovaly mezi 0,06 a 0,43, tedy v menším rozpětí než u první, výše zmíněné studie. Stejně jako v předešlém případě byla zkoumána korelace R – B Indexu s dalšími charakteristikami a autor došel k následujícím výsledkům: potvrdila se záporná korelace s velikostí povodí (koef.= -0,79 ve Slovenských povodích), průměrnou nadmořskou výškou povodí (což je ale ovlivněno hlavně odlišnými geologickými poměry v různých výškách) a poměrem lesů na ploše povodí. Rovněž bylo zjištěno, že vysoká hodnota „*prívalovosti*“ nepodmiňuje častější výskyt bleskových povodní („*flash floods*“). V 29 případech byl zjištěn ve sledovaném období významný trend hodnot R – B Indexu, ve většině případů to bylo zapříčiněno lidským faktorem – vybudováním vodních děl v daném povodí.

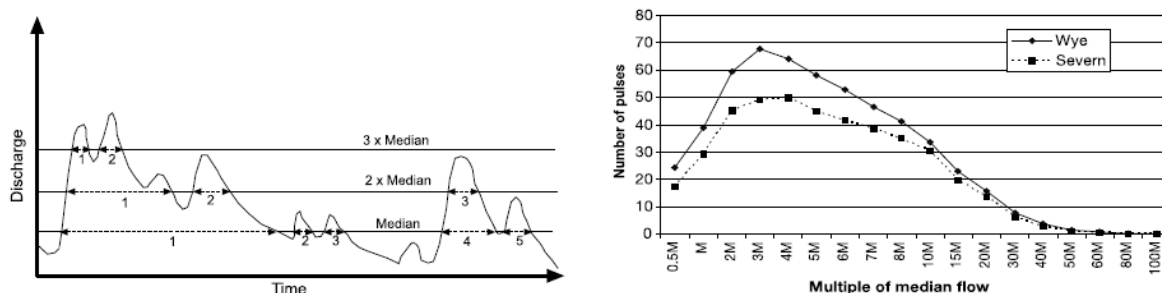
FI index, jakožto poměrně nový ukazatel rozkolísanosti odtoku, je za účelem popisu odtokového režimu nebo porovnání vlastností více povodí v současnosti stále více používán. Mezi jeho hlavní výhody patří poměrně nízká variabilita výsledných hodnot, což znamená, že není

potřeba tolik hodnot pro určení trendu, jako v případě jiných ukazatelů. Kromě výše popsaných příkladů použila FI index ve své studii i řada dalších autorů. Holko a kol. (2011) uvádí například studie autorů: De Girolamo a kol. (2007) a Oueslati a kol. (2010) v oblasti Středozemního moře, Dow (2007) v USA ve státě New Jersey nebo Holka a Kostky (2008) ve vybraných Slovenských povodích.

3.4.5. Metoda pulzace hydrogramu

Tato metoda, blíže popsaná v práci Archera (2007) nebo Archera a Newsona (2002) je založena na zkoumání frekvence a doby trvání tzv. pulsů – situací, při nichž dojde k překročení určité prahové hodnoty průtoku. Prahové hodnoty představují násobky mediánu časové řady průtoků. Doba trvání jednoho pulsu je určena jako doba mezi překročením prahové hodnoty a následným poklesem pod danou hodnotu. Archer (2007) použil tuto metodu při posuzování vlivu změny krajinného pokryvu na odtokový režim. Výzkum byl proveden v párových povodích řek **Severn** o rozloze 8,7 km² a **Wye** o rozloze 10,55 km², nacházejících se na západních svazích masivu Plynlimon v centrálním Walesu. Povodí spolu sousedí a mají tak stejné topografické, geologické i půdní podmínky. Leží v nadmořské výšce mezi 330 a 740 m n. m. a dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek činí 2478 mm pro Severn a 2570 pro Wye. Největší odlišnost obou povodí je ve vegetačním krytu. Povodí Severn lze považovat za lesnaté. Je pokryto lesem přibližně z 67 %, v průběhu pozorování došlo k pokácení a opětovnému zalesnění téměř poloviny této rozlohy, takže současný les je věkově různorodý. Povodí Wye slouží po celou dobu jako pastviny, je tedy lučního charakteru. Aby bylo pokryto celé variační rozpětí naměřených průtoků, analýza se byla provedena pro násobky mediánu 0,5M – 100M (0,5M, 1M, 2M, 3M, 4M, 5M, 6M, 7M, 8M, 10M, 15M, 20M, 30M, 40M, 50M, 60M, 80M a 100M). Kolísání hodnot průtoku je vždy z části ovlivněno i změnou klimatických podmínek. Aby byl tento vliv odlišen od vlivu změny krajinného pokryvu, byla provedena korelační a regresní analýza postupně mezi ročním úhrnem srážek a: ročním počtem pulsů, celkovou dobou trvání pulsů, průměrnou dobou trvání pulsů. Hlavním cílem této práce bylo: posoudit vliv odlesnění a zalesnění na odtokový proces, zhodnotit vysoké a nízké průtoky a zhodnotit srážko-odtokový režim jako takový. Na Obrázku 5 je ukázka možného znázornění některých výsledků – vlevo je znázorněn průběh odtoku (discharge) s vyznačenými prahovými hodnotami, vpravo je porovnání celkového počtu (number of pulses) jednotlivých pulsů (multiple of median flow) za celé sledované období.

Obrázek 5: Ukázka výsledků metody pulzace hydrogramů - průběh průtoku (vlevo) a celkový počet pulsů (vpravo)



Zdroj: Archer 2007

Jako další použili tuto metodu například Climent - Soler a kol. (2009) v jihozápadní Anglii na řece River Axe, nebo Královec (2010) v párových experimentálních povodích Zbytiny. Královec (2010) došel k následujícím poznatkům: v případě malých průtoků (do hodnoty 3M) je větší variabilita zaznamenána v lučním povodí (Zbytinský potok). Pro nejmenší průtoky je variabilita až 6krát vyšší. Nadprůměrně vodné roky 2009 a 2010 ukázaly, že při vyšších průtocích nepatrně více kolísá naopak lesního povodí Tetřivčího potoka. Znamená to, že ve vodných obdobích reaguje lesní povodí na srážky citlivěji.

3.5. Další ukazatele odtokového režimu

3.5.1. Pravděpodobnost překročení

Pravděpodobnost překročení ročního průtoku Q_r nám slouží k posouzení vodnosti toku v daném roce (Šedivá 2011). Určuje se na základě empirické křivky překročení, v současnosti nejčastěji podle vzorce Čegodajeva (Kemel, Kolář 1980):

$$P\% = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} * 100,$$

kde m je pořadové číslo Q_r seřazených sestupně a n celkový počet členů řady. V Tabulce 2 jsou uvedeny jednotlivé kategorie vodnatosti toku v daném roce podle vypočítané pravděpodobnosti překročení.

Tabulka 2: Vodnatost toku podle pravděpodobnosti překročení

$p \%$	označení míry roční vodnatosti toku	
0 – 10	mimořádně vodný rok	MV
11 – 40	vodný rok	V
41 – 60	průměrně vodný rok	P
61 – 90	málo vodný rok	S
91 – 100	mimořádně málo vodný rok	MS

Zdroj: Netopil a kol. 1984

Přesnost a spolehlivost empirické křivky, respektive vypočtených hodnot pravděpodobnosti překročení, je tím větší, čím delší je řada pozorování (Kemel, Kolář 1980). Netopil (1984) považuje za minimální délku časové řady 50 – 100 členů, aby bylo dosaženo dobré spolehlivosti. Pro krátká období pozorování (jež máme v hydrologii často k dispozici) není empirická křivka příliš spolehlivá. Určujeme proto tzv. teoretickou křivku překročení, která nám na základě výpočtů umožňuje extrapolaci křivky i do oblasti velmi nízkých i vysokých pravděpodobností překročení.

3.5.2. Součinitel odtoku (odtokový koeficient)

Podle jednoduché definice Merze a kol. (2006) nebo Matoušek (2010) součinitel odtoku udává, jaká část spadlých srážek se změní v přímý odtok. Bývá označován C a udává se buď v procentech, nebo jako index o hodnotě 0 – 1. Matoušek (2010) uvádí, že pokud odtokový koeficient dosáhne hodnoty 0,95, je povodí vodou již zcela nasyceno a veškeré srážky se mění v povrchový odtok. Jedná se o jeden ze základních způsobů, jak mezi sebou porovnat několik povodí a jak zjistit jejich odtokové vlastnosti, přesto lze v odborné literatuře nalézt rozdílnosti, a to jak v metodologii, tak v terminologii. Autoři Bulme, Zehe, Brontstert (2007) uvádí například názvy *response factor* nebo *runoff ratio*. Součinitel odtoku je ovlivněn zejména vegetačním krytem a předchozí nasyceností povodí. Podle časového období, pro které je tvořen, uvádí dva druhy součinitele odtoku, a to buď za celý rok nebo za jednu srážkovou epizodu (tzv. *event-based runoff coefficient*).

Právě porovnáváním součinitelů odtoku, označovaných C_R , jednotlivých srážkových epizod se ve své práci autoři Bulme, Zehe, Brontstert (2007) zabývají. V tomto přístupu je primárním úkolem určení a oddělení jednotlivých epizod z průběžného měření. Při použití různých metod separace totiž pro stejná data mohou vyjít značně rozdílné výsledky. Nejobtížnější je určit konec srážkové události, tedy najít na poklesové větvi hydrogramu bod (čas), od kterého přestává

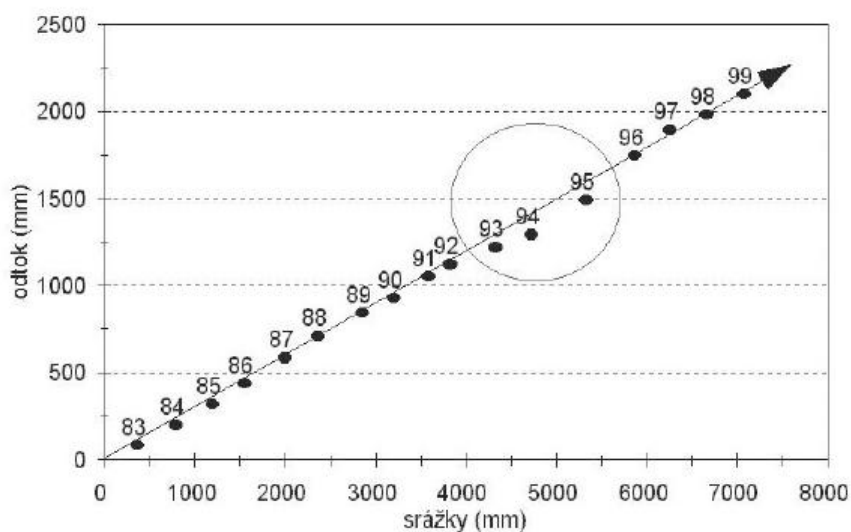
převažovat povrchový odtok nad bazálním (základním). Výzkum je situován do jižního Chile, do povodí Tres Arroyos na jižním svahu sopky Volcán Lonquimay v nadmořské výšce 1080 – 1860 m n. m. Povodí má rozlohu 5,93 km², z 80 % je pokryto původním lesem a průměrný sklon činí 40 %. Je charakteristické výskytem mladých, vysoce porézních vulkanických půd. Roční srážky se pohybují mezi 2000 – 3000 mm. Výška hladiny (podle konzumpční křivky později přepočítána na průtok), byla měřena v 3 – 10-ti minutových intervalech. Výzkum byl proveden s daty za období od ledna 2004 do března 2005. Autor v této studii porovnává nově vymyšlenou metodu, jak separovat jednotlivé epizody, se čtyřmi staršími, běžně používanými metodami prováděnými graficky za pomoci hydrogramu. Tato nová metoda (nazývána jako „*the constant – k method*“) je založena na výpočtu poklesového koeficientu k pro všechny body poklesové části hydrogramu podle rovnice:

$$k = -\frac{dQ}{dt} * \frac{1}{Q(t)} .$$

Koncem epizody lze nazvat bod (čas) t_e , od kterého je k přibližně rovno nule (přibližně proto, že průtok není nikdy zcela konstantní). Analyzováno bylo nakonec 19 jednotlivých srážkových epizod, pro každou z nich byl spočítán součinitel odtoku každou z pěti odlišných metod separace. Výsledné hodnoty považuje autor za překvapivě nízké, u většiny epizod byl $C_R < 3$ % a dále upozorňuje na rozdíly ve výsledcích při použití různých metod separace, a to zejména u hodnot vyšších než 3 %, kdy se výsledky lišily o několik procent, v krajních případech i o více než 10 %.

Koeficient odtoku má vztah k dvojitě součtové čáře roční hodnoty průtoku a srážek. Pokud se jeho roční hodnota výrazně nemění, tak má tato dvojitá součtová čára v dlouhodobém průběhu charakter přímky (Šír, Tesař, Lichner 2004). Téměř neměnné hodnoty ročního koeficientu odtok byly od roku 1983 pozorovány v experimentálním povodí Liz (Vimperská pahorkatina). To platilo až do roku 1991, v letech 1992 se na dvojitě součtové čáře ročních průtoků a srážek objevila výchylka a až do roku 1996 je ve vegetační sezóně narušen jinak ustálený poměr odtoku a srážek. Od roku 1997 se vrací tento poměr k hodnotám dosahovaným před rokem 1992 (Obrázek 4).

Obrázek 4: Dvojitá součtová čára ročních průtoků a srážek povodí Liz s vyznačenou anomálií v hydrologickém cyklu



Zdroj: Šír, Tesař, Lichner 2004

Podle autora měla tato neobvyklá výchylka výraznou externí příčinu. Usuzuje tak proto, že v povodí Liz nedošlo v tomto období k žádným výrazným změnám fyzicko-geografických podmínek a zejména proto, že podobná anomálie se vyskytla ve stejném období i ve velmi vzdálených experimentálních povodích v Západních Tatrách a v Rakousku. Za příčinu byla označena erupce sopky Mount Pinatubo na Filipínách dne 15. 6. 1991. Díky tomu se do atmosféry dostalo velké množství sopečných hmot, které ovlivnily globální cirkulaci atmosféry.

Hodnocením reakce povodí na srážkovou událost, respektive odtokovým koeficientem, se ve své práci zabývá i Latron (2008). Na příkladu malého středomořského povodí ukazuje nelinearitu vztahu srážky-odtok, kdy velikost odtoku nemá lineární vztah s velikostí srážek, ale má velmi výrazný sezónní charakter. Výzkum se uskutečnil v povodí Cal Rodó ve Španělsku, 130 km severovýchodně od Barcelony. Rozloha povodí je 4,17 km² a leží v nadmořské výšce 1104 – 1643 m n. m. a z většiny je pokryto travním porostem. Na příkladu měsíčních hodnot odtokového koeficientu a úhrnu srážek za osmileté období 1995 - 2002 ukazuje autor velkou variabilitu odtokové odezvy, když například pro měsíce červen, červenec a říjen s téměř stejným průměrným úhrnem srážek cca 70 mm dosahoval jejich odtokový koeficient hodnot 4, 15, respektive 35 %. Stejný jev, i když s jinými hodnotami, ukazují i měsíce srpen, září, listopad. Autor popisuje dvě hlavní příčiny této nelinearity. První je odlišný počet deštivých dní v měsíci (počet dní s více než 1 mm srážek) při dosažení stejného celkového úhrnu, kdy měsíce s menším počtem deštivých dní vykazují větší hodnoty odtokového koeficientu. Druhou a nejdůležitější příčinou je aktuální

hodnota evapotranspirace, což je všeobecně pro středomořská povodí zcela zásadní faktor. Co se týká sezónního rozložení, tak nejvyšších hodnot dosahoval koeficient na podzim a v zimě, tedy v době vegetačního klidu. Dále se autor zabýval hodnocením samostatných výrazných srážkových událostí, označovaných jako bouřkových („*storm events*“) v období let 1995 – 1998. Pro analýzu bylo vybráno 57 povodňových událostí, z nichž 23 bylo v letním období a 17 na jaře. Pro jednotlivé události byly spočítány hodnoty odtokového koeficientu a poté byla zjišťována jejich závislost na hodnotě průtoku, úhrnu srážek, maximální dvacetiminutové intenzitě deště a hodnotě základního odtoku. Opět byla zjištěna poměrně výrazná nelinearita a ani korelační analýza neukázala žádnou významnou závislost. Autor několikrát zmiňuje, že jevy zjištěné v této studii byly prokázány i jinými autory v dalších povodích stejného charakteru.

V hydrologickém výzkumu je odtokový koeficient často používaným ukazatelem pro porovnání více povodí. Ve většině studií se jeho hodnota počítá pro vybrané srážko-odtokové epizody, což umožňuje dobře zkoumat případný vliv rozdílných fyzicko-geografických podmínek na odtokový režim jednotlivých povodí. Při tomto přístupu je nutné podle Norbiata a kol. (2009) dát pozor, aby jednotlivé epizody byly jednoznačně časově odděleny a aby mezi epizodami byl co nejméně zastoupen povrchový odtok.

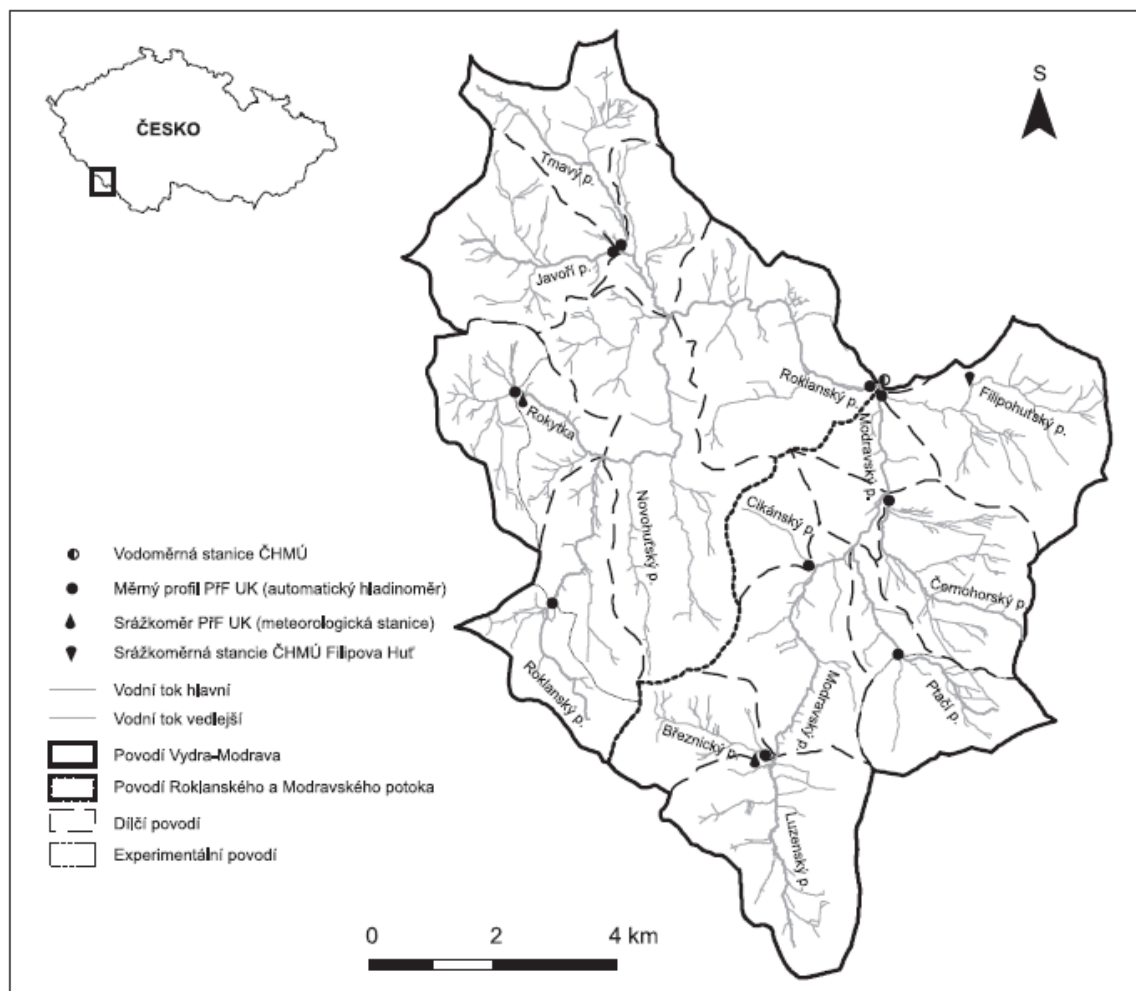
3.5.3. Hodnocení vysokých průtoků

Je jedna ze skupin dělení ukazatelů podle (Clausen a Biggs 2000), který ve své práci dělí 32 různých ukazatelů do tří kategorií, jak bylo uvedeno v kapitole 3.2. Jak vyplývá z názvu, jedná se o sledování a hodnocení situací týkajících se zvýšeného vodního stavu, respektive průtoku. Hodnocením vysokých průtoků se ve své studii zabývají například (Archer, Newson (2002), viz kapitola 3.4.5) nebo Clausen, Biggs (2000). Oba využívají stejného principu, a to hodnocení na základě překročení určité hranice, konkrétně vybraných násobků hodnoty mediánu.

V České republice se analýzou povodňových stavů zabývá například Čurda, Janský, Kocum (2011). Studie, situovaná do oblasti centrální Šumavy, konkrétně povodí dvou zdrojů řeky Vydry – Modravského a Roklanského potoka, má několik cílů, těmi hlavními jsou jednak bližší poznání charakteru odtokového režimu v zájmové oblasti, posouzení vlivu fyzicko-geografických faktorů apod. a rovněž analýza vybraných povodňových událostí, tj. zkoumání mechanismu jejich vzniku, porovnání míry extremity apod. Zájmové území, jak již bylo řečeno, je tvořeno povodími zdrojnic řeky Vydry (Modravský a Roklanský potok) v oblasti tzv. Modravských plání, jeho celková rozloha je 89,675 km² a závěrovým profilem je vodoměrná stanice Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) pod názvem Vydra - Modrava, nacházející se přibližně 100 m pod soutokem Modravského a Roklanského potoka. Síť toků a jejich rozvodnic je znázorněna na Obrázku 5.

Území se nachází v nadmořské výšce 977 – 1373 m n. m. a patří díky tomu do chladné klimatické oblasti. Srážkově je velmi bohaté, pro lokalitu Březník jsou udávány průměrné roční úhrny 1300 – 1600 mm. Podrobná charakteristika území je popsána v rámci článku Čurda, Janský, Kocum (2011).

Obrázek 5: Mapa zájmového území a rozmístění měřících stanic



Zdroj: Čurda, Janský, Kocum (2011)

ČHMÚ poskytl průměrná denní data průtoků z vodoměrné stanice Vydra-Modrava pro základní analýzu vlastností odtokového režimu a povodňového mechanismu za období 1. 11. 1930 – 31. 12. 2008 (bez období 1. 11. 1940 – 31. 10. 1948, kdy stanice byla mimo provoz). Pro detailnější průzkum a lepší možnosti pochopení dané problematiky vybudovala Katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (KFGG PřF UK) postupně od roku 2006 na vybraných tocích síť jedenácti automatických měřících stanic. Bližší popis této měřicí sítě je v kapitole 4.2. Jedním z hlavních cílů práce bylo posouzení extremity povodňových průtoků. K tomu byla použita metoda spočívající v porovnání variačního koeficientu před povodňovou

situací (Cv1) a během povodně (Cv2). Hodnota (Cv2) vyjadřuje míru variability oproti průtoku, který by byl dosažen, kdyby se povodeň nevyskytla. Toto srovnání nám tedy dává informaci o extremitě povodňové události vzhledem ke stavu před jejím nástupem. Kvůli odstranění vlivu doby trvání kulminačního průtoku a délky povodňové vlny, byl ještě spočítán tzv. *index extremity povodňového průtoku* (I_{EKP}). Ten je roven podílu maximálního desetiminutového průtoku za období jeden den před kulminací až den kulminace (KP) vůči průměrnému průtoku za období před vzestupem povodňové vlny (PP). Povodňové události pro tuto analýzu byly vybrány z období 1. 11. 2006 – 16. 7. 2009 na základě dosažení jednoletého průtoku $Q_1=29 \text{ m}^3/\text{s}$ (stanoveno ČHMÚ) v profilu Vydra-Modrava (suma hodnot průtoků z vlastních stanic Modravský a Roklanský potok těsně nad soutokem). Celkově byly v daném období nalezeny 4 takové situace. Výsledky výše uvedené analýzy pro povodňovou situaci 10. – 18. 4. 2009 jsou uvedeny v tabulce 3 Symboly D-8 až D-1 vyjadřují počet dní před dnem výskytu kulminace označeným DD.

Tabulka 3: Hodnoty ukazatelů variability ve vybraných profilech

Tok	<i>Cv1</i>	<i>Cv2</i>	<i>PP</i>	<i>KP</i>	<i>I_{EKP}</i>
	Variabilita D-8 až D-2 (10. 4. – 16. 4.)	Variabilita D-1 až DD (17. 4. – 18. 4.)	Průměrný průtok D-8 až D-2 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Maximální dosažený prů- tok D-1 až DD ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	<i>KP/PP</i>
Březnický p.	0,29	0,31	0,637	1,243	2,0
Ptačí p.	0,14	0,43	0,459	1,072	2,3
Černoohorský p.	0,14	0,36	0,516	1,278	2,5
Cikánský p.	0,12	1,12	0,251	1,168	4,7
Rokytká	0,25	0,69	0,505	1,607	3,2

Zdroj: Čurda, Janský, Kocum (2011)

Zjištěné hodnoty sloužily jako vstupní data další analýzy, a to zjištění vlivu fyzicko-geografických podmínek povodí na extremitu povodně na základě vzájemné korelace. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Hodnoty korelačního koeficientu pro vybrané fyzicko-geografické charakteristiky

Ukazatel extremity	Podíl rašelinišť (%)	Lesnatost (podíl %)	Charakteristika povodí (α)	Plocha povodí (km ²)	Délka toku (km)	Střední sklon toku (‰)	Průměrný sklon svahů povodí (stupně)	Hustota (km/km ²)
<i>Cv1</i>	-0,150	-0,756	-0,461	-0,100	-0,250	0,178	0,189	0,265
<i>Cv2</i>	0,962	0,655	0,904	-0,690	-0,591	-0,842	-0,602	-0,692
<i>I_{EKP}</i>	0,943	0,748	0,862	-0,596	-0,482	-0,828	-0,658	-0,630

Zdroj: Čurda, Janský, Kocum (2011)

Autoři ukazují zejména na silnou korelaci s výskytem rašelinišť v povodí. Vzhledem ke krátké době měření je ale výsledky nutné brát s rezervou a v budoucnu všechny domněnky potvrdit nebo vyvrátit. V této oblasti probíhá výzkum i v současné době.

3.5.4. Hodnocení nízkých průtoků

Na rozdíl od vysokých průtoků, jejichž výskyt je podle Searcyho (1959) ovlivněn zejména klimatickými, fyzicko-geografickými a vegetačními poměry, jsou nízké průtoky výrazně více ovlivněny geologickými podmínkami povodí. Nízké průtoky se většinou vyskytují v době, kdy ustává na delší čas povrchový odtok (např. díky absenci srážek) a začnou se vyčerpávat zásoby podzemní vody. Problematikou nízkých průtoků (tzv. *low-flow variables*) se ve své práci detailně zabývá Smakhtin (2001). Nejprve uvádí možnosti určení tzv. „horní hranice“ nízkého průtoky, tedy hodnoty, která nesmí být překročena, aby průtok mohl být označen jako nízký. Může to být například hodnota průměrného ročního průtoky nebo hodnota mediánu z roční časové řady. Použití mediánu považuje autor za vhodnější, protože vzhledem ke kladné šikmosti, kterou průtoková data často mívají, má medián menší hodnotu než průměr. Rozdíl mezi nimi se ještě zvětšuje s kratším časovým krokem použitých dat. Pro naše zeměpisné podmínky považují Dub a Němec (1969) za hranici nízkého průtoky nejčastěji hodnotu Q_{355} nebo Q_{364} , obecně při této hodnotě musí být ještě udržována biologická rovnováha toku.

Smakhtin (2001) pro hodnocení nízkých průtoků využívá čáru překročení (viz kapitola 3.6.2). Za horní hranici považuje hodnotu mediánu řady průtokových dat, neboli hodnotu průtoky, která je dosažena nebo překročena v 50 % ze sledovaného období. Část křivky, vymezená touto hranicí podává na základě svého tvaru informaci o přítoku podpovrchové vody. Čím je křivka ve své koncové části strmější, tím je přítok podpovrchové vody menší nebo rozkolísanější. Jako další možný ukazatel variability nízkých průtoků uvádí Smakhtin (2001) nebo De Girolamo a kol. (2007) poměr Q_{50}/Q_{90} (hodnota průtoky překročená v 50 %, respektive 90 % sledovaného období).

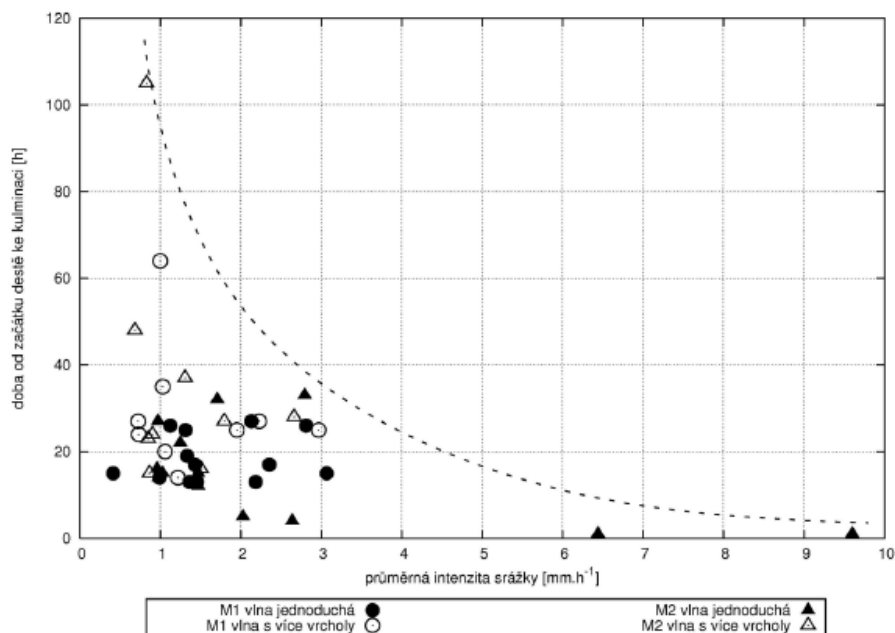
Na rozdíl od vysokých průtoků, jejichž výskyt je podle Searcyho (1959) ovlivněn zejména klimatickými, fyzicko-geografickými a vegetačními poměry, jsou nízké průtoky výrazně více ovlivněny geologickými podmínkami povodí.

3.5.5. Zpoždění odtoku

Zpoždění odtoku, označované také jako *lag time*, nebo doba zdržení, vyjadřuje dobu mezi začátkem nebo maximem srážek a kulminací průtoků, jehož hodnota vzrostla díky těmto srážkám (Pavlásek, Máca, Ředinová 2006). Tato doba může být ovlivněna různými faktory, podle Bakera (2004) jsou to zejména vlastnosti půdy a zastavěnost povodí, neboť komunikace a zastavěné objekty brání vsaku vody do půdy a vyvolávají tak povrchový odtok, který je rychlejší než podpovrchový. Dalšími faktory mohou být např. geomorfologický charakter povodí, vegetační kryt, předchozí nasycenost povodí a v neposlední řadě také intenzita srážek. Doba zpoždění lze poměrně dobře pozorovat například z hydrogramu, ve kterém je kromě průtoků znázorněn i vývoj srážek ve stejném časovém měřítku (viz Obrázek 6).

Právě vlivem intenzity srážek na zpoždění odtoku se ve své práci zabývá (Pavlásek, Máca, Ředinová 2006). Mimo jiné zde pomocí jednotlivých povodňových epizod zkoumá závislost doby od začátku deště do kulminace na průměrné intenzitě srážek. Výzkum probíhá na dvou experimentálních povodích – Modrava 1 a Modrava 2, vytvořených Katedrou vodního hospodářství a Katedrou biotechnických úprav krajiny Fakulty lesnické a environmentální České zemědělské univerzity v roce 1998 v okolí Modravy na Šumavě. Povodí Modrava 1 o rozloze 0,1 km² je pokryto odumřelým lesem, Modrava 2 s rozlohou 0,16 km² pasekou. Data byla měřena v hodinovém kroku. Z výsledků vyplývá, doba od začátku deště ke kulminaci se zkracuje s rostoucí intenzitou srážek, což je podle autora způsobeno navýšením povrchového (rychlejšího) odtoku. Rozdíly mezi oběma povodími téměř nejsou, delší doba do kulminace je zaznamenána u povodňových situací s více než jedním vrcholem, přerušovanou čarou jsou naznačeny předpokládané limitní hodnoty.

Obrázek 6: Závislost doby od začátku deště ke kulminaci na intenzitě srážek pro povodí Modrava I (M1) a Modrava II (M2)



Zdroj: Pavlásek, Máca, Ředinová 2006

Autor se rovněž domnívá, že zkrácení doby může být významně ovlivněno půdní vlhkostí na počátku srážkové události, tato domněnka však nebyla prokázána, protože povodí nejsou přístrojově vybavena pro měření této charakteristiky.

Kromě přístrojového měření půdní vlhkosti lze určit nasycenost povodí před srážkou i z empirických vztahů, často je k tomu využíván například **koeficient API30** (Antecedent Precipitation Index), který vyjadřuje nasycení povodí srážkami spadlými v období 30 dnů před danou epizodou (Bartůňková 2010). Udává se v milimetrech a lze ho vypočítat podle následující rovnice:

$$API30 = \sum_{i=1}^n H_{Si} * c^i,$$

kde H_s je výška srážek, index i je pořadové číslo dne a c je evapotranspirační konstanta, která pro naše poměry má hodnotu 0,93.

Zjišťování zpoždění odtoku pomocí hydrogramu a hyetogramu povodňové má výhodu ve své jednoduchosti, kdy se pouze sleduje rozdíl mezi dobou maximální intenzity srážek a vrcholem hydrogramu, pro získání přesných výsledků je však potřeba mít data s dostatečným časovým rozlišením, zejména pro intenzivní přívalové deště a pro menší toky v experimentálních povodích (pro takové případy nejlépe data desetiminutová, maximálně hodinová). Rovněž je nutné brát

v úvahu předchozí nasycenost povodí, jejíž rozdílná hodnota může způsobit různé výsledky pro dvě srážkové události se stejnými vlastnostmi.

3.5.6. Metoda IHA (Indicators of Hydrologic Alteration)

Další možností, jak zhodnotit změny v odtokovém režimu je tzv. metoda *Indicators of Hydrologic Alteration* (zkráceně *IHA*). Hlavním cílem této metody je posouzení stavu toku nebo říčního ekosystému z biologického hlediska, i přesto nám ale podává informace o variabilitě odtokových poměrů. Vyvinul ji Richter a kol. (1996) a je blíže popsána v jeho díle. Metoda *IHA* posuzuje vliv zásahů člověka (jako stavba vodních děl, čerpání podzemní vody, rozsáhlé změny ve využívání krajiny v povodí apod.) na odtokový režim povrchové i podzemní vody. Využívá k tomu 33 jednotlivých ukazatelů, jejichž hodnoty jsou vzájemně porovnávány pro období před a po určitém lidském zásahu. Těchto 33 ukazatelů bylo vybráno, vzhledem k výše uvedenému účelu této metody, tak, že mají určitý vliv na zdravotní stav toku. Jejich celkový výčet můžeme nalézt v práci Richter a kol. (1996). Autor ve své práci rovněž uvádí postup při použití *IHA* metody: a) definování dostupných dat; b) spočítání všech 32 ukazatelů pro každý rok zkoumaného období před i po zásahu; c) pro každý ukazatel určit střední hodnotu (průměr nebo medián) a charakteristiku rozptylu (např. variační koeficient) zvlášť za obě období; d) vzájemné porovnání jednotlivých hodnot z období před a po zásahu. Výsledek se udává jako procentuální vyjádření hodnoty po zásahu vzhledem k hodnotě téhož ukazatele před zásahem. V 90. letech byl organizací *The Nature Conservancy* vyvinut software, který celý proces *IHA* metody zautomatizoval.

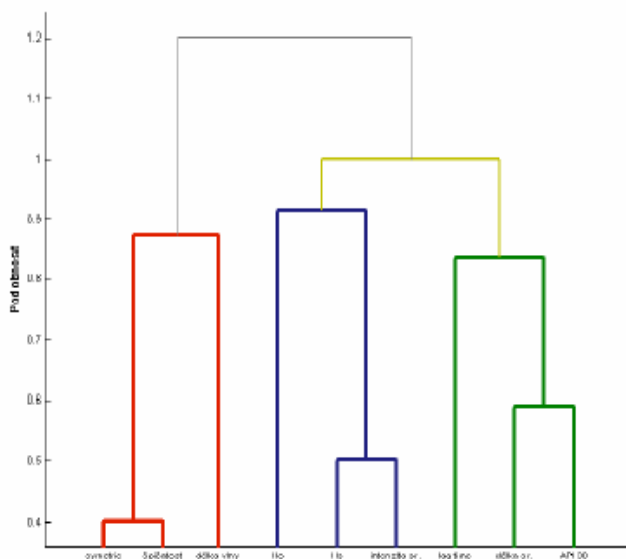
Předností této metody by měl být vhodný a promyšlený výběr 33 jednotlivých ukazatelů, jejichž výsledky nám při hromadné interpretaci poskytují informace o stavu ekosystému po změně odtokových poměrů v důsledku výše popsaných lidských vlivů, jak ale říkají Olden a Poff (2003), ne všechny jsou vybrány zcela vhodně, protože několik ukazatelů je na sobě vzájemně závislých a jejich výsledky se navzájem ovlivňují.

3.5.7. Shluková analýza

Pro vzájemné porovnání hodnot z většího množství povodí se dobře hodí metoda **shlukové analýzy** (nebo také klastrové analýzy, z anglického *cluster analysis*, *CLU*). Metoda je založena na vyšetřování podobnosti vícerozměrných objektů a jejich seskupování do tříd, neboli shluků, na základě zjištěné podobnosti. Podle způsobu shlukování se dělí na hierarchické a nehierarchické (Meloun, Militký 2002). Je možné sledovat jak podobnost jednotlivých objektů, tak i podobnost proměnných. Výsledky lze přehledně graficky znázornit pomocí tzv. dendrogramu, neboli stromu shluků, který odhaluje skupiny objektů nebo proměnných, které vykazují nejsilnější korelační vazby (Bartůňková 2010).

Metodu hierarchického shlukování ve své práci použila Bartůňková (2011). Tato práce je zaměřena na zkoumání vlivu lesních disturbancí na odtokový režim na příkladu sedmi povodí z oblasti centrální Šumavy. Shluková analýza byla provedena pomocí programu *Matlab* a byla zvolena metoda průměrová. Podrobný popis metodiky lze nalézt v práci (Meloun, Militký 2002). Autorka rozdělila aplikaci shlukové analýzy na několik částí. Nejprve byly hledány nejvíce a nejméně sobě podobné skupiny povodí, v druhé fázi byla snaha o porovnání vybraných srážko-odtokových epizod a posouzení vlivu zdravotního stavu lesa na odtok. Byly vybrány ty epizody, kdy hodinový úhrn srážek přesáhl 10 mm a kdy srážky zasáhly celé území, nebo alespoň dvě povodí s rozdílným zdravotním stavem lesa, celkem bylo zanalyzováno pět epizod. Na závěr byla pomocí shlukové analýzy provedena analýza proměnných, kdy byla hledána podobnost a vzájemné vazby ukazatelů – fyzicko-geografických, zdravotního stavu lesa, příčinných srážek a odtokové odezvy. Z této poslední části byly zjištěny následující výsledky. Jeden shluk spolu vytvořily symetrie, špičatost a délka povodňové vlny, tyto ukazatele spolu tedy bezesporu souvisí. Další shluk tvořily výška a intenzita srážek, na další hierarchické úrovni se k nim přidává výška odtoku a v posledním shluku je vykreslena závislost délky srážky, indexu API 30 a doby zdržení odtoku (lag time). Z toho vyplývá, že délka srážky a předchozí nasycení povodí ovlivňují velikost zdržení maximálního odtoku za maximální srážkou. Na Obrázku 7 je ukázka grafického vyjádření výsledků popsané analýzy.

Obrázek 7: Ukázka dendrogramu shluků vytvořeného metodou shlukové analýzy



Ukazatel	Shluk
Výška odtoku - Ho	2
Délka vlny	1
Symetrie	1
Špičatost	1
Lag time	3
Výška srážky - Hs	2
Délka srážky	3
Prům.intenzita	2
API 30	3

Zdroj: Bartůňková, 2011

Shlukovou analýzu použil i (Královec 2011) ve svém výzkumu v párových experimentálních povodích Zbytiny. Pomocí této metody autor provedl detailnější analýzu příčinných proměnných a závislých proměnných, odvozených z hydrogramu a hietogramu. Rozbor byl proveden pro 28 vybraných významných (povodňových) srážko-odtokových epizod. Kritéria pro výběr událostí byly následující: k dispozici byly kompletní a přesné údaje o srážkách a průtocích v desetiminutovém kroku, jednalo se pouze o jednoduchou povodňovou vlnu, srážky měly v obou povodích velmi podobný celkový úhrn a časové rozložení během epizody. Z příčinných závislých byly pro analýzu použity: výška, trvání a průměrná intenzita srážek a ukazatel předchozích srážek API30. Z proměnných závislých bylo vybráno sedm ukazatelů, a to: doba trvání vzestupné a poklesové větve hydrogramu, celková doba od počátku srážky do konce poklesové větve, dobu od počátku a maxima srážky ke kulminaci, hodnotu specifického kulminačního průtoku a objem povodňové vlny. Pomocí shlukové analýzy pak byly určeny typy příčinných podmínek, při kterých prokazatelně dochází v povodí k navýšení průtoku v reakci na spadlé srážky. Výsledky ukázaly v povodí Tetřívčího i Zbytinského potoka tři typy příčinných podmínek, pouze pro Zbytinský potok ještě jeden typ navíc. Typy příčinných podmínek jsou následující:

1. První skupinu tvoří kratší, intenzivnější ale méně vydatné srážky spadlé na nenasycené povodí. Hodnoty kulminačního průtoku jsou nízké a objem povodňové vlny malý. Reakce na srážky je pro obě povodí stejně rychlá, ale luční povodí (Zbytinský potok) dosahuje rychleji kulminačního průtoku (cca o 20 min)
2. Druhý typ je charakterizován nadprůměrně intenzivními a trvajícimi srážkami s nadprůměrným úhrnem, dopadajících na nadprůměrně nasycené povodí. Tento typ tak vede k největším povodním. Kulminační specifický průtok je pro Zbytinský potok v průměru 26krát větší než průměrný specifický odtok, pro Tetřívčí potok dokonce 41krát.
3. Třetí společný typ je dán nadprůměrnou dobou trvání srážek, průměrným úhrnem, podprůměrnou intenzitou a průměrnou nasyceností povodí. Vznikají tak dlouhotrvající středně velké povodně. Při tomto dosahuje naopak dříve kulminace více zalesněný Tetřívčí potok, což lze podle autora vysvětlit odlišnými půdními podmínkami obou povodí.

3.5.8. Izotopová metoda

Tato metoda, nazývána např. **metoda stabilních izotopů**, je založena na sledování obsahu stabilních, tj. neradioaktivních izotopů kyslíku a vodíku ve vodě (označovaných jako *stopovače*). V případě studií v menších experimentálních povodích se v naprosté většině případů používají stabilní izotopy ^{18}O a ^2H (tzv. deuterium), a to hlavně z několika důvodů: nepodléhají radioaktivnímu rozpadu, jsou konzervativní (na rozdíl od rozpuštěných pevných látek nebo plynů)

a především je jejich vstup do povodí prostřednictvím srážek závislý na faktorech, které jsou poměrně snadno měřitelné, zejména na teplotě vzduchu (Šanda a kol. 2011). Zimní srážky obsahují méně těžších izotopů než srážky letní. Díky tomu lze na základě odebraných vzorků vody z jednotlivých srážek sledovat od dopadu na zemský povrch až do chvíle, kdy opustí povodí závěrovým profilem. S rozvojem techniky má tato metoda v hydrologii stále více možností využití, zásluhu na tom má hlavně nová možnost využití laserové spektroskopie. Oproti doposud používané hmotnostní spektroskopii je tato varianta výrazně levnější, snáze proveditelná a se stejnou kvalitou výsledků. Umožňuje tak vytvářet obsáhlejší soubor dat, který více přispívá k novým poznatkům o tvorbě odtoku. Proměnlivost množství ^{18}O a ^2H ve vodě je popsána jako relativní úbytek těžších izotopů vůči standardu a je vyjádřena pomocí tzv. delta hodnot ($\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$). Jako standard byl zvolen „Standard Mean Ocean Water“ (V-SMOW), určený Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni (IAEA) (Šanda a kol. 2011). Dvě hlavní využití metody stabilních izotopů jsou podle Šandy a kol. (2011) separace složek odtoku a určení doby zdržení vody v povodí (doba od dopadu srážek na povrch do jejího opuštění povodí závěrovým profilem). V rámci České a Slovenské republiky dochází ke kontinuálnímu měření obsahu stabilních izotopů například v těchto povodích: Uhlířská, Jezdecká, Bílá Smědá a Velká jizerská louka v Jizerských horách, Jalovecký potok v Západních Tatrách a Červík v Beskydech. Charakteristika těchto povodí a zejména některé základní výsledky jsou uvedeny rovněž v práci (Šanda a kol. 2011).

Pro určení doby zdržení vody v povodí, jinak také izotopového datování, použil sledování stabilních izotopů například (Holko a kol. 2008). Cílem práce bylo určit průměrnou dobu průchodu vody povodím v různě velkých povodích v Slovenské a České republice. Použil k tomu postup založený na aproximaci koncentrací stopovače ve srážkách a v odtoku. Tato metoda využívá faktu, že koncentrace stopovače v odtoku jsou oproti koncentracím ve srážkách fázově posunuté a mají menší amplitudu. Průměrnou dobu průchodu vody lze spočítat buď na základě poměru amplitud:

$$\tau_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{f^2} - 1}}{2\pi}$$

nebo na základě fázového posunu:

$$\tau_r = \frac{tg\alpha}{2\pi},$$

kde τ_r je průměrná doba průchodu, f je poměr amplitudy koncentrace stopovače v odtoku k amplitudě ve srážkách a α je fázový posun mezi oběma sinusoidami. Při použití měsíčních nebo denních dat se místo 2π dosazuje $2\pi/12$, respektive $2\pi/365$. Ve studii byly použity obě rovnice.

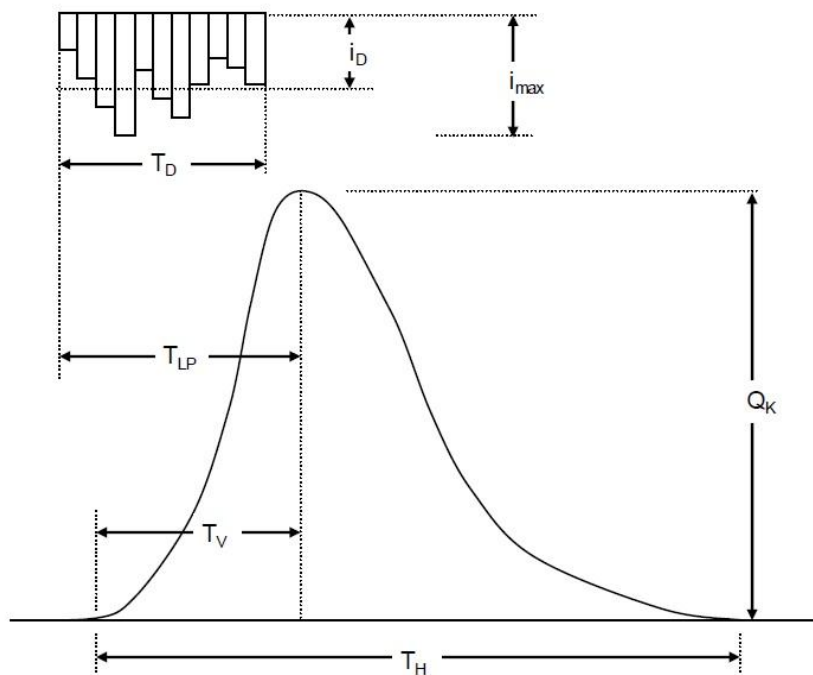
Konkrétně šlo o výzkum v subpovodích horního Váhu a v povodí Uhlířská v Jizerských horách. V oblasti horního Váhu to byly povodí horské části Jaloveckého potoka (22,2 km²), celé povodí Jaloveckého potoka (45 km²) a celé povodí horního Váhu po Liptovský Mikuláš (1095 km²), povodí Uhlířská má rozlohu 1,78 km² a zastupuje tak ve výzkumu kategorii malých povodí. Použity byly pro všechna povodí údaje od roku 2005. Nejkratší průměrná doba průchodu byla zjištěna v povodí Uhlířská, pro Váh po Liptovský Mikuláš 14 měsíců, pro celé povodí Jaloveckého potoka 17 měsíců a pro jeho horskou část 19 měsíců. Autor poukazuje na zkracující se dobu průchodu s rostoucí velikostí povodí v případě slovenských a rovněž upozorňuje, že pro horskou část povodí Jaloveckého potoka byly různými jinými metodami zjištěny hodnoty 13 i 32 měsíců, tedy značně odlišné. Podotýká proto, že pro zpřesnění výsledků je nutná co nejděší řada pozorování umožňující použití složitějších metod a že je nutno brát v potaz i přírodní poměry povodí a konfrontovat výsledky s poznatky z jiných postupů.

3.6. Grafické vyjádření variability

3.6.1. Hydrogram

Hydrogram, neboli čára průtoků je jedním z prostředků, jak vyjádřit velikost odtoku a zároveň podává velmi názornou informaci o jeho proměnlivosti (Netopil 1970). Jedná se o graf, znázorňující závislost velikosti průtoku (osa y) na čase (osa x). Může být vytvořen pro jakkoliv dlouhé časové období (například jedna povodňová epizoda, jeden rok apod.), je proto vhodný pro porovnání povodí s nanejvýš dlouhou dobou měření a jeho hlavním významem je grafické vyjádření změn průtoku v čase (Trizna 2004). Ukázka ročního hydrogramu dvou toků je na obrázku 8 v kapitole 1.2.5. Hojně se hydrogram využívá například pro charakteristiku povodňových vln, kdy se často do grafu vyjádří i množství a časový průběh srážek – tzv. **hyetogram**. Takto upravený hydrogram poskytuje komplexnější informaci o dané srážko-odtokové, popřípadě povodňové epizodě. Na ukázce z práce (Pavlásek, Máca, Ředinová 2006) v Obrázku 8 můžeme vidět, jaké veličiny lze z takového hydrogramu například vyčíst: velikost srážkového úhrnu (H_s), doba trvání srážkové události (T_D), maximální intenzita srážky (i_{max}), průměrná intenzita srážky (i_d), výška odtoku (H_O), doba trvání hydrogramu (T_H), kulminační průtok odtokové vlny (Q_K), doba trvání vzestupné větve hydrogramu (T_V), doba od začátku deště ke kulminaci (T_{LP}).

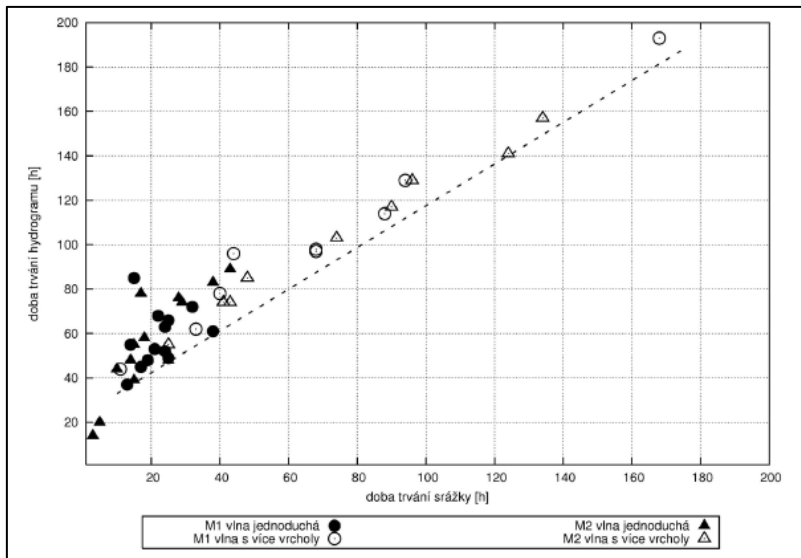
Obrázek 8: Ukázka hydrogramu a hyetogramu jedné srážko-odtokové epizody



Zdroj: Pavlásek, Máca, Ředinová 2006

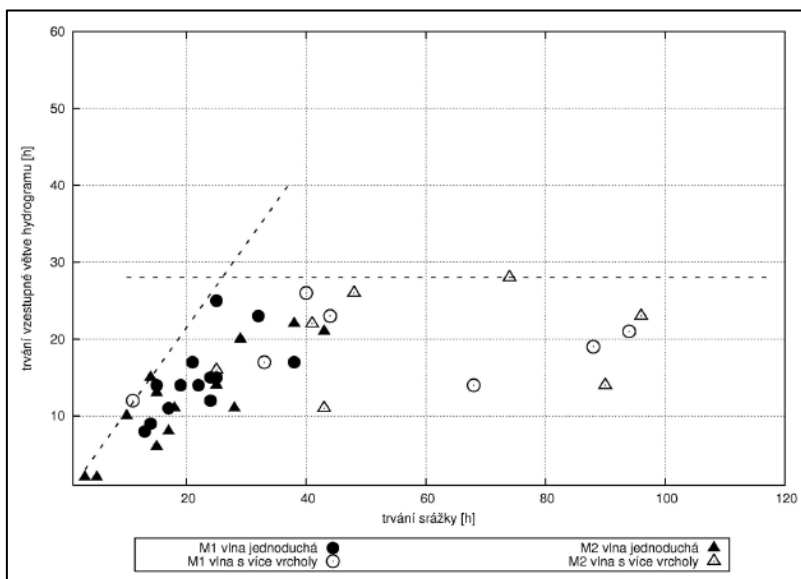
Hydrogram průtokové vlny můžeme rozdělit na vzestupnou větev, vrchol (nejvyšší průtok) a sestupnou větev. Podle strmosti obou větví si můžeme vytvořit určitou představu o reakci povodí na srážky z hlediska časového. Z tvaru hydrogramu je dobře patrná i povaha koeficientu asymetrie (viz kapitola 3.3.3), můžeme poznat, zda je šikmost dat (tedy odchylka od symetrického rozložení) kladná, nebo záporná. Hydrogram odtokové vlny na Obrázku 8 je mírně více protáhlý na pravé straně, koeficient šikmosti by tedy byl kladný. Souvislosti a vazby mezi některými vlastnostmi hydrogramu a hyetogramu zkoumá pomocí shlukové analýzy (Královec 2010). Stejně tak je zkoumána závislost některých proměnných v práci autorů Pavlásek, Máca, Ředinová (2006) pro povodí Modrava I (M1) a Modrava II (M2). Přerušovanou čarou jsou opět znázorněny předpokládané limitní hodnoty. Doba trvání hydrogramu rostla úměrně s dobou trvání srážek (Obrázek 9), zatímco doba trvání vzestupné větve se zvyšovala s rostoucí délkou trvání srážek jen do určité hodnoty, tzv. doby rovnovážného stavu (Dingman, 2002, cit. v Pavlásek, Máca, Ředinová 2006) a dále tato hodnota zůstávala téměř stejná, viz Obrázek 10. Z Obrázku 11 lze vyčíst, jaký minimální srážkový úhrn může způsobit kulminační průtok dané velikosti a zároveň můžeme zjistit minimální hodnotu kulminačního průtoku (znázorněno přerušovanými čarami).

Obrázek 9: Závislost doby trvání hydrogramu na době trvání srážek



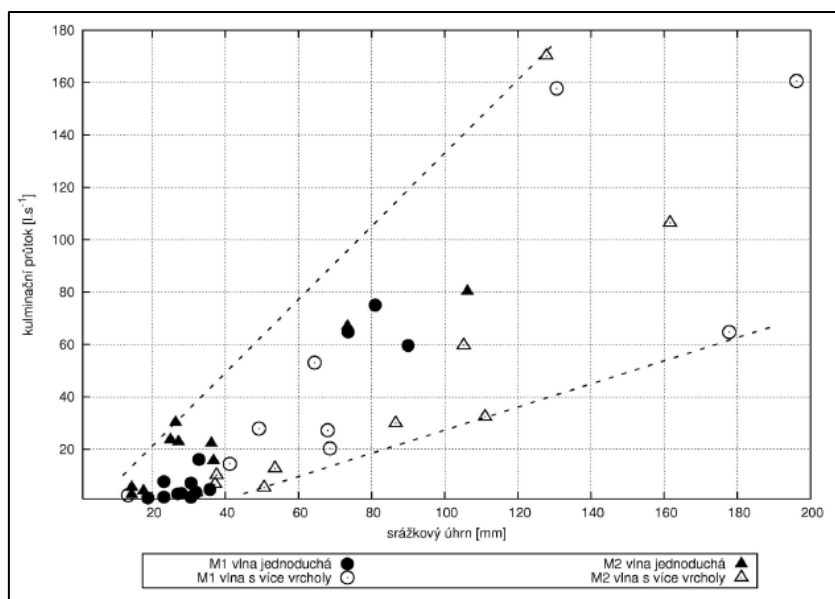
Zdroj: Pavlásek, Máca, Ředinová 2006

Obrázek 10: Závislost doby trvání vzestupné větve hydrogramu na době trvání srážek



Zdroj: Pavlásek, Máca, Ředinová 2006

Obrázek 11: Závislost velikosti kulminačního průtoku na velikosti srážkového úhrnu



Zdroj: Pavlásek, Máca, Ředinová 2006

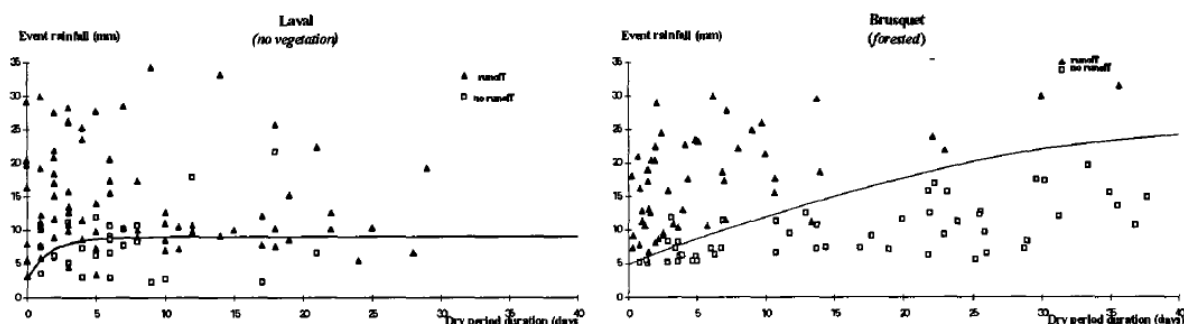
Jedno z dalších možných využití hydrogramu je odlišení složky bazálního odtoku od odtoku povrchového při krátkodobých srážko-odtokových epizodách. Příklad čtyř takových metod je uveden v práci autorů Blume, Zehe, Bronstert (2007), dnes jsou ale často nahrazovány metodami modernějšími a přesnějšími, například metodou stabilních izotopů (viz kapitola 3.5.8) V idealizovaném případě se v době před a po srážkové epizodě průtok rovná bazálnímu odtoku a je vyjádřen téměř rovnou linií, při srážkové epizodě je průtok navýšen o odtok povrchový zapříčiněný srážkami.

Některé ze způsobů grafického vyjádření použil ve své práci Mathys a kol. (1995), který se jako jeden z mnoha zabývá posouzením vlivu lesa odtokový režim. Porovnává mezi sebou dvě malá povodí s velmi odlišným vegetačním pokryvem. Jedná se o povodí Laval (0,86 km²; 78 % území bez vegetace) a Brusquet (1,08 km²; 13 % území bez vegetace, zbytek převážně lesy) nacházející se na jihovýchodě Francie. Průměrný dlouhodobý roční úhrn srážek pro obě povodí činí 850 mm, dvě hlavní období srážek jsou duben-květen a září- říjen. Výzkum probíhá na základě hodnocení jednotlivých srážko-odtokových epizod, nikoliv celého datového souboru (způsob výběru jednotlivých epizod není v práci blíže popsán) v období 1987 - 1993. Povodí jsou označena jako středomořská a vyznačují se velmi nízkou hodnotou základního odtoku, proto ho nelze použít jako ukazatel stavu povodí před srážkovou epizodou.

Nejprve autor vytvořil tzv. „křivku srážkové odezvy“, pomocí které porovnával, jaká je potřebná výška srážek vzhledem k předcházejícímu období sucha, aby se změnila hodnota průtoku. Výsledný graf je pro ilustraci znázorněn na Obrázku 12. U povodí Laval (převážně bez

vegetace) si můžeme všimnout, že od výšky srážek přibližně 9 mm se vždy změní velikost odtoku, bez ohledu na délku předešlého období bez deště.

Obrázek 12: : Ukázka křivky srážkové odezvy povodí Laval (vlevo) a Brusquet (vpravo)



Zdroj: Mathys a kol. 1995

Pozn.: symbol čtverce představuje nezměněný odtok, trojúhelník znamená změnu velikosti odtoku

Dále autor porovnává při stejném úhrnu srážek tvar hydrogramů a maximální průtoky obou povodí. Hydrogram povodí Laval, které je téměř bez vegetace, ukazuje větší citlivost na intenzitu srážek, má více vrcholů podle měnící se intenzity. Oproti tomu hydrogram povodí Brusquet má výrazně vyrovnanější tvar. Doba koncentrace (doba, za kterou voda povrchově doteče z nejvzdálenějšího místa povodí do závěrového profilu (Matoušek 2010) je v povodí Laval 0,5 – 1 hodina, v případě Brusquet jsou to 1 – 2 hodiny, přestože obě povodí mají téměř stejný tvar i sklonitostní poměry. Maximální průtoky dosahují při stejném úhrnu srážek výrazně vyšších hodnot v povodí Laval. Ve všech z 21 posuzovaných případů dosahuje maximální průtok povodí Laval alespoň dvojnásobku hodnoty z povodí Brusquet, v 16 případech pětinasobku a v 8 případech dokonce desetinásobku.

Při porovnání hodnot odtokového koeficientu autor dospěl k následujícím výsledkům. Ve všech povodňových epizodách dosahuje povodí Laval hodnot kolem 0,9, kdežto povodí Brusquet pouze kolem 0,4. I v případech, kdy obě povodí měla stejný úhrn srážek, dosahovalo povodí Brusquet 10 – 40 % hodnoty koeficientu povodí Laval.

Z této studie lze tedy vyvodit, že zalesněnost povodí zásadně ovlivňuje povodňový režim - snižuje hodnoty maximálních i celkových povodňových průtoků, prodlužuje dobu koncentrace a snižuje rozkolísanost průtoku v závislosti na intenzitě srážek.

3.6.2. Čára překročení

Čára překročení neboli histogram kumulativních četností, je další ze způsobů, jak graficky vyjádřit variabilitu odtoku. Křivka nám dává informaci o hodnotách průtoku ve sledovaném období, respektive kolikrát za dané období byla určitá hodnota průtoku dosažena či překročena – jinými slovy je to vztah mezi rozsahem a frekvencí hodnot průtoku (Smakhtin 2001). Jedná se o graf, ve kterém je na ose x vyjádřena vzestupně doba překročení, a to buď absolutně (počet dní, hodin apod.), nebo relativně (určitá část sledovaného období v procentech) a na ose y hodnoty průtoku. Čára překročení může být vytvořena z dat s různým časovým rozlišením (roční, měsíční, denní), čím kratší časový interval, tím podává křivka detailnější informace. Stejně tak může být tvořena z nestandardních m-denních nebo m-měsíčních dat, taková data musí být nejprve vytvořena pomocí klouzavého průměru (Smakhtin 2001). Nejčastěji je čára překročení konstruována pro jeden rok s použitím průměrných denních průtoků. Chceme-li při porovnávání různých povodí odstranit vliv odlišné rozlohy povodí, můžeme hodnoty průtoků (na ose y) vydělit plochou povodí, stejně tak při odlišných ročních průměrných průtocích můžeme průtoky převést na procentuální část z ročního průměru. Po takovýchto úpravách můžeme mezi sebou porovnávat i toky s odlišnou rozlohou a vodnatostí (Netopil 1970). Z výsledného grafu poté můžeme odečíst hodnotu **M-denních průtoků**, tedy průtoků, které jsou dosaženy nebo překročeny M dní v roce a zároveň počet dní, po které byl daný průtok překročen. Nejčastěji se hodnoty uvádí v 30-ti denních intervalech, nebo v procentuálním vyjádření sledovaného období. Tvar křivky je ovlivněn zejména srážkovými poměry v povodí, jeho velikostí a fyzicko-geografickými podmínkami, ale také stáří.

Na základě tvaru čáry překročení lze odvodit některé charakteristiky odtokového režimu daného povodí. Čím je tvar křivky na celém svém průběhu strmější, tím je vyšší variabilita toku a převládá odtok povrchový. Naopak čím má křivka rovnější průběh, tím je odtok vyrovnanější a ovlivněný bazálním odtokem. Další vlastnosti lze vyvodit z tvarů křivky na jejích koncích. Sklon křivky na jejím dolním konci nám může dát základní představu o zásobách podpovrchové vody v povodí. Čím má tato část rovnější průběh, tím větší můžeme předpokládat zásoby podpovrchové vody, neboť v případě nízkých průtoků (v suchých obdobích), dokáže povodí vyrovnávat odtok právě z těchto zásob. Naopak při nedostatečných zásobách během období sucha průtok rychle klesá a křivka má svém dolním konci strmější tvar (Searcy 1959). Strmý tvar horního konce křivky svědčí o výskytu malého množství velmi vysokých hodnot průtoku. Kromě základního hodnocení odtokového režimu uvádí Searcy (1959) i další účely použití, a to například ve studiích o vlivu geologického podloží, ve studiích o hydro-energetickém potenciálu toků nebo o kvalitě vody.

Čáru překročení, neboli *Flow duration curve (FDC)*, používá ve své práci např. Brown a kol. (2005). Na příkladu dvou odlišných povodí ukazuje možnost využití čáry překročení pro hodnocení vlivu změny krajinného pokryvu na variabilitu odtoku, respektive na odtokový režim. Prvním příkladem je povodí Red Hill ve státě Nový Jižní Wales (Austrálie) ve kterém došlo k vysazení borovic na původní pastviny. Jedná se o povodí s velmi nízkými průměrnými denními průtoky, kde může tok i zcela vyschnout. Porovnává zde dvě roční čáry překročení-první po jednom roce od zalesnění, druhou po osmi letech. Ukazuje se, že s klesající hodnotou průtoků se obě čáry více a více liší, nejvíce v oblasti nízkých průtoků. Zatímco po jednom roce od zalesnění je minimální průtok překročen po celý rok, po osmi letech už pouze v necelých 45 % a ve zbylé části roku je tok vyschlý. Ve druhém případě se jedná o povodí Wights ve státě Západní Austrálie. Zde došlo naopak ke změně z původního lesa na pastviny. Výsledek je velmi podobný prvnímu případu. V době, kdy bylo povodí zalesněné, přes 30 % roku byl tok vyschlý, po změně na pastviny tento podíl klesl na nulu a naopak se zvětšila hodnota průtoků, která byla dosažena nebo překročena po celý rok.

Za stejným účelem, tedy posouzení vlivu změn krajinného pokryvu na odtokové poměry, používá čáry překročení ve své práci i Kulasová a kol. (2006). Jedná se o výzkum v 7 malých (1,9 – 10,6 km²) experimentálních povodích v Jizerských horách v letech 1982 – 2005. V průběhu 80. let došlo na cca 60 – 80 % území k odlesnění z důvodu velkého imisního poškození lesního porostu. Byly vytvořeny a porovnány čáry překročení pro dvě desetiletá období (1982 – 1991 a 1992 – 2001). Oproti výše zmíněnému výzkumu byl však výsledek odlišný: obě křivky měly téměř stejný průběh a změna odtokového režimu tak nebyla prokázána.

Smakhtin (2001) označuje čáru překročení, respektive hodnoty z ní odvozené, jako jeden z nástrojů pro hodnocení nízkých průtoků (viz kapitola 4.5.4), pro hodnocení celkové variability odtoku zmiňuje poměr Q₂₀/Q₉₀ (hodnota průtoků překročená ve 20 %, respektive 90 % ze sledovaného období). De Girolamo (2007), který prováděl výzkum v oblasti jižní Itálie upozorňuje na nevhodnost použití tohoto poměru pro toky, které mohou v průběhu roku vysychat.

3.7. Dlouhodobá variabilita odtoků, analýza trendů.

Všechny doposud popsané metody a přístupy mohou být použity pro hodnocení variability odtoku z krátkodobého hlediska (denní, měsíční, sezónní, meziroční) a nejsou striktně vázány na minimální délku doby pozorování. Pro úplnost je ještě třeba uvést, že variabilitu odtokových poměrů lze hodnotit také z hlediska dlouhodobého. Jedná se zejména o zjišťování trendů určitých veličin, identifikaci cyklů či period průtokových dat apod. Použití dlouhodobého hodnocení dat je ale nezbytně podmíněno – jak z názvu vyplývá – měřením dat po delší časové období. Jaká je

minimální doba měření není jasně stanoveno, většina autorů hovoří o 20 – 30 letech. Problematikou dlouhodobých změn odtokového režimu se v České republice i v zahraničí zabývá celé řada autorů. V České republice jsou to například studie Fialy (2008) nebo Klimenta a kol. (2011), na Slovensku pak například Pekárové (2003) a ze zahraničních autorů například Zongxue (2010), Sahoo a Smith (2009) a celá řada dalších. Z velké množství různých metod je velmi často pro určení trendu používán Mann-Kendalův test, případně různé formy t-testů. Pro detekci změny ve srážko-odtokovém režimu se často sestavují podvojně čáry průtoků a srážek.

3.8. Shrnutí poznatků

Na základě poznatků provedené rešerše lze přibližně určit skupiny spojující účely výzkumu a použité metody. Pro komplexní charakteristiku byla nejčastěji používána bilanční rovnice (např. ETZENBERG a kol. (2006) nebo BALONISHNIKOVA (2004)). Autoři sledovali změny jednotlivých členů rovnice a posuzovali jejich možné vzájemné vazby a trendy. Pro co nejlepší vypovídající hodnotu je potřeba dostatečně dlouhá doba pozorování. Právě tato podmínka limituje použití výpočtu bilanční rovnice pro zájmová povodí v oblasti Šumavy. Hrozí totiž, že všechny roky mohou patřit do srážkově nadprůměrně bohatých (nebo chudých) a interpretace výsledků by tak mohla být zkreslená.

Vliv změn krajinného pokryvu (nejčastěji odlesnění nebo zalesnění) bývá ve většině případů posuzován na základě sledování reakce odtoku na spadlé srážky. K tomu se velmi dobře hodí součinitel odtoku (C), který mnoho autorů (např. Merz (2006)) pro studie tohoto zaměření používá. Většinou se jeho hodnota počítá pouze pro jednotlivé srážko-odtokové epizody (*event-runoff coefficient*), což má oproti použití jeho dlouhodobých hodnot výhodu v tom, že může být posuzována reakce povodí na konkrétní hodnotu srážkového úhrnu. Někteří autoři totiž tvrdí, že do určitého úhrnu srážek má les na hodnotu průtoku zmírňující účinek, po přesažení této hranice je však les hodnotu průtoku naopak zvyšuje. Při použití tohoto přístupu je potřeba se zaměřit na správný výběr metody určení konce a začátku epizody. Použití tohoto přístupu je v zájmových povodích v oblasti Šumavy docela dobře možné, protože se zde nachází poměrně hustá síť srážkoměrných i hladinoměrných stanic. V aplikační části této práce se ovšem srážková data neuvažují, proto tento ukazatel nebyl počítán.

Pro zjištění celkové variability průtokových dat byla často používána čára překročení a různé poměry určitých M-denních průtoků z této křivky zjištěné. I ostatní popsané ukazatele však byly poměrně hojně používány. Některé z nich budou použity i pro data ze zájmových území, včetně Flashiness indexu, což je poměrně nový ukazatel, jehož použití jsem v žádné publikované studii z území České republiky nenašel.

4. Materiál a metody zpracování

Cílem aplikační části této práce je použití vybraných metod hodnocení odtokového režimu popsaných v rešeršní části a následné zhodnocení zjištěných výsledků. Vybrány byly metody, které nejsou náročné na délku časové řady vstupních dat a zároveň které nezahrnují ve svých výpočtech data srážková.

4.1. Základní charakteristika zájmových území

Jednotlivé metody budou použity pro dvě dvojice povodí z odlišných oblastí. První dvojici tvoří povodí Ptačího potoka a Rokytka, nacházejících se na Modravsku, v pramenné oblasti Otavy a druhá dvě povodí jsou párová povodí Zbytínského a Tetřívčího potoka v podhůří Šumavy, v pramenné oblasti Blanice. Všechna čtyři povodí byla zřízena KFGG PŘF UK, která rovněž zajišťuje provoz jednotlivých měrných profilů. Povodí Rokytka a Ptačího potoka byla vybrána pro analýzu z několika důvodů. Mají odlišný charakter vegetačního krytu, poměrně podobnou rozlohu, jejich měrné profily jsou vydlážděny, takže se téměř nemění tvar profilu a hydrometrická měření nejsou v takové míře zatěžována chybami z nepravidelného dna koryta a v porovnání s některými z dalších povodí v oblasti bylo provedeno relativně velké množství hydrometrických měření, proto jsou jejich konzumpční křivky přesnější oproti některým dalším profilům. V následující části bude stručně představena charakteristika jednotlivých povodí.

experimentální povodí Rokytka

Rokytka je levostranným přítokem Roklanského potoka. Je význačná velkým podílem ploch horských vrchovišť, plocha zrašeliněných a rašelinistních půd zaujímá přibližně 55 % rozlohy povodí. V horní části sledovaného území se nachází rozsáhlý komplex tzv. Rokyteckých slatí (Kocum, Jánský 2008). Plocha povodí je 3,72 km², střední nadmořská výška 1150 m a délka toku je 5,45 km.

experimentální povodí Ptačího potoka

Ptačí potok pramení na západních svazích Černé hory a je pravostranným přítokem Modravského potoka. Rozloha povodí po závěrový profil činí 5,507 km². Jedná se o oblast, která byla zasažena kůrovcovou kalamitou a následně byla v této oblasti povolena těžba dřeva.

experimentální párová povodí Zbytínského a Tetřívčího potoka

Tato párová povodí se nachází na horní části povodí Blanice, v podhůří Šumavy, mezi městy Volary a Prachatice. Výzkumnou lokalitu „Zbytínský potok“ tvoří povodí malého vodního toku VI. řádu, ústící v obci Zbytiny jako levostranný přítok do Zbytínského potoka. Experimentální povodí

„Tetřívčí potok“ je rovněž tokem VI. řádu a je povodím pravostraného přítoku Tetřívčího potoka (Malý 2009). Protože se jedná o párová povodí, jsou si obě povodí z hlediska fyzicko-geografických, morfometrických a hydrografických poměrů velmi blízká – základní srovnání je v tabulce 5.

Tabulka 5: Vybrané charakteristiky experimentálních povodí Zbytinský a Tetřívčí potok (květen 2006 - říjen 2010)

Vybrané charakteristiky povodí	Zbytinský potok	Tetřívčí potok
Rozloha [km ²]	1,55	1,62
Střední nadmořská výška[m n. m.]	811	851
Délka údolnice [m]	1933	2158
Sklon povodí [°]	9,71	9,59
Průměrný specifický odtok [l/s/km ²]	13,93	11,21

Zdroj: Královec 2010

Hlavní rozdíl obou povodí spočívá v odlišném vegetačním krytu. V povodí Zbytinského potoka jsou nejvíce zastoupeny sečené louky (55,6 %), lesy zaujímají 34,7 % rozlohy. Oproti tomu v povodí Tetřívčího potoka převažuje les (67,4 %), zbytek připadá na přirozené (zarůstající) a sečené louky (Malý, 2009). Jako pozůstatek zemědělského hospodaření je 28 % povodí Zbytinského potoka odvodněno trubkovou drenáží, která se ale již dlouhou dobu neudrzuje. V povodí Tetřívčího potoka se nachází hustá síť uměle vytvořených příkopů z historické doby, sloužící jako občasné vodoteče. Již dlouhou dobu ale není udržovaná a příkopy často bývají zahrazeny nánosy dřeva (Královec 2010). Obě experimentální povodí vznikla v roce 2006 (viz kapitola 4.1). Měrný profil povodí Zbytinského potoka je od začátku vybaven ultrazvukovým automatickým hladinoměrem, profil Tetřívčího potoka je spolu s ultrazvukovým hladinoměrem vybaven i měrným přelivem typu Thomson-Poncelet (Malý 2009).

4.2. Zdroje dat

Od letního období roku 2006 byla postupně v oblasti centrální Šumavy a pramenné oblasti Blanice budována Katedrou fyzické geografie a geoekologie PŘF UK síť měrných profilů na vybraných tocích. V oblasti centrální Šumavy se jedná o profily: Antýgl, Cikánský potok, Roklanský potok, Rokytky, Černo-horský p., Javoří p., Tmavý p., Ptačí p., Černý p., Slatinný p., Březnický p., Modravský p., Zhůřecký p. a Prášilský p. V pramenné oblasti Blanice jsou to profily Zbytinský a Tetřívčí potok. Profily jsou vybaveny automatickými měřícími jednotkami, které pomocí

ultrazvukového nebo tlakového snímače měří v desetiminutovém kroku výšku hladin s přesností na 1 mm. Pomocí GSM jednotky jsou tato data odesílána sítí GPRS na server. Údaje o výšce hladiny jsou převáděny na hodnoty průtoku podle konzumpčních křivek. Pro co nejlepší přesnost parametrů konzumpční křivky je zapotřebí jednak neměnného měrného profilu a zejména co největšího množství provedených měření, pokrývajících co nejširší rozpětí výšek hladin. Hlavně hydrometrické měření za vysokých vodních stavů je obtížné, neboť výrazné průtokové epizody malých horských povodí mají rychlý průběh, takže je těžké je zachytit a zároveň při příliš vysokých vodních stavech mohou být měření z technických a bezpečnostních důvodů neproveditelná. V roce 2012 získala KFGG PŘ UK nový měřicí přístroj ADCP („Acoustic Doppler Current Profiler“), který umožňuje měření i za extrémně vysokých průtoků. Díky tomu by se mohly parametry konzumpčních křivek v budoucnosti zpřesnit.

Dostupná a použitá data

Pro analýzu byla jako základ použita data výšek hladin, měřena v desetiminutových intervalech, která byla následně na základě konzumpčních křivek převáděna na hodnoty průtoku. Úplnost a spolehlivost časových řad výšek hladin, stejně jako přesnost parametrů měrných křivek se v jednotlivých povodích poměrně výrazně liší. Nepřesnosti v naměřených výškách hladiny jsou způsobeny buď technickou závadou na měřicí stanici a v zimním období často rovněž námrazou nebo sněhovou pokrývkou v prostoru čidla (Malý 2009). Projevují se buďto náhlými, velmi výraznými rozdíly dvou po sobě jdoucích hodnot nebo jejich úplnou absencí. Takové chybné hodnoty je potřeba, pokud je to možné, zpětně doplnit nebo opravit.

Pro povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka byla pro analýzu použita již převedená průtoková data za roky 2007 – 2011 (pokud není uvedeno jinak, jedná se o roky hydrologické). Desetiminutová data jsem si podle Malého (2009) následně ještě upravil na hodinová, respektive denní. Kvalita časových řad z obou povodí je na dobré úrovni, chybná data byla průběžně v celém průběhu pozorování doplňována nebo opravována. Přesnost parametrů konzumpční křivky je negativně ovlivněna zejména nedostatkem hydrometrických měření za vyšších vodních stavů.

V povodích z oblasti centrální Šumavy (Ptačí potok a Rokytka) byla kvalita, časové rozlišení i délka časové řady dostupných dat výrazně horší. Pro povodí Ptačího potoka, kde je měrný profil rovněž v provozu od roku 2006, byla použita data pouze za roky 2009 a 2011. Ve zbývajících letech je v časových řadách příliš velké množství chybějících i nepřesných dat, která se mi nepodařilo zpětně opravit. V roce 2009 bylo z důvodu chybějících dat vynecháno období 15. 10. – 21. 10., v roce 2011 pak ze stejných důvodů období 1. 1. – 16. 1., 12. 7., 8. 10. – 9.10.

Pro povodí Rokytka byla k dispozici již upravená data pro období 2009 – 2011, ale pouze v denním rozlišení. Měrný profil je rovněž v provozu již od roku 2006, nicméně až do roku 2008 obsahují desetiminutová data opět příliš velké množství chybějících a nepřesných hodnot. Přehled použitých dat pro jednotlivá povodí je v Tabulce 6.

Tabulka 6: Přehled dostupných dat pro jednotlivá povodí

povodí	celé roky s dostupnými daty	nejpodrobnější dostupná data
Zbytinský potok	2007 – 2011	10 minut
Tetřívčí potok	2007 – 2011	10 minut
Ptačí potok	2009, 2011	1 hodina
Rokytka	2009, 2010, 2011	1 den

Zdroj: vlastní zpracování

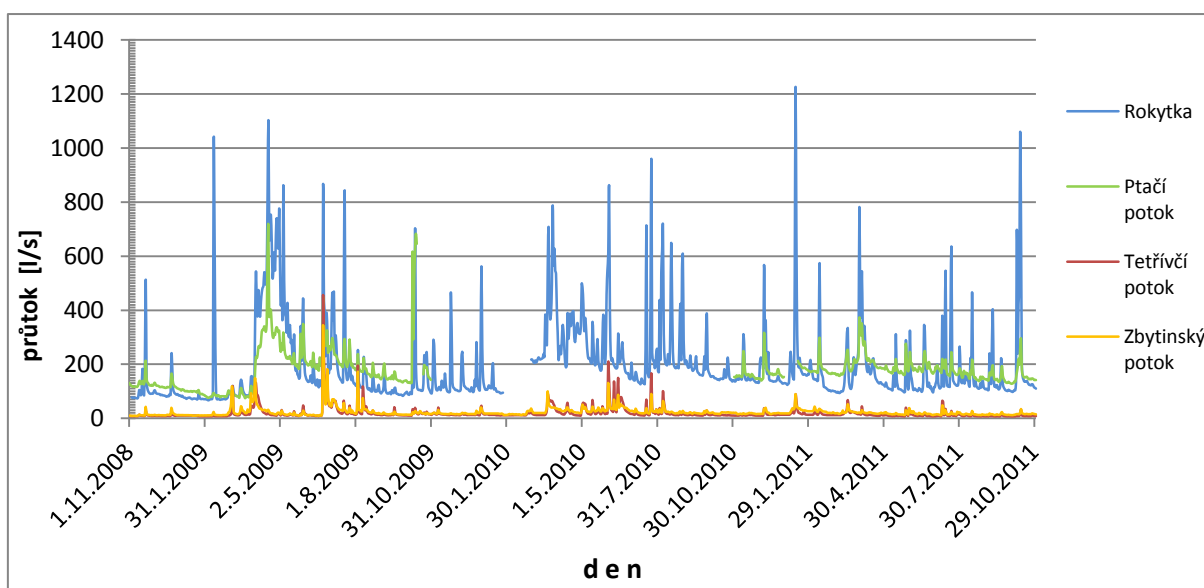
5. Výsledky

V následující části bude provedena ukázka použití vybraných základních nástrojů pro zhodnocení variability průtokových dat, které byly představeny v první části této práce. Byly vybrány metody, které nejsou příliš náročné na provedení ani na potřebná data. Při hodnocení výsledků je nezbytné brát v potaz chyby a nedostatky v používaných datech, jejichž nejčastější příčiny byly popsány výše. Tyto nepřesnosti se samozřejmě promítají i do jednotlivých výsledků. I tak by ale mělo být možné určit základní charakter průběhu sledovaných dat a povodí.

Hydrogram

Pomocí hydrogramu můžeme jednoduše znázornit změny hodnot průtoku pro libovolně dlouhá období. Pro základní porovnání všech čtyř vybraných povodí byl na základě průměrných denních průtoků vytvořen hydrogram pro období 2009 – 2011 (Obrázek 13). Chybějící části křivky jsou způsobeny nedostupností dat.

Obrázek 13: Hydrogram průtoku zájmových povodí pro období 2009 - 2011

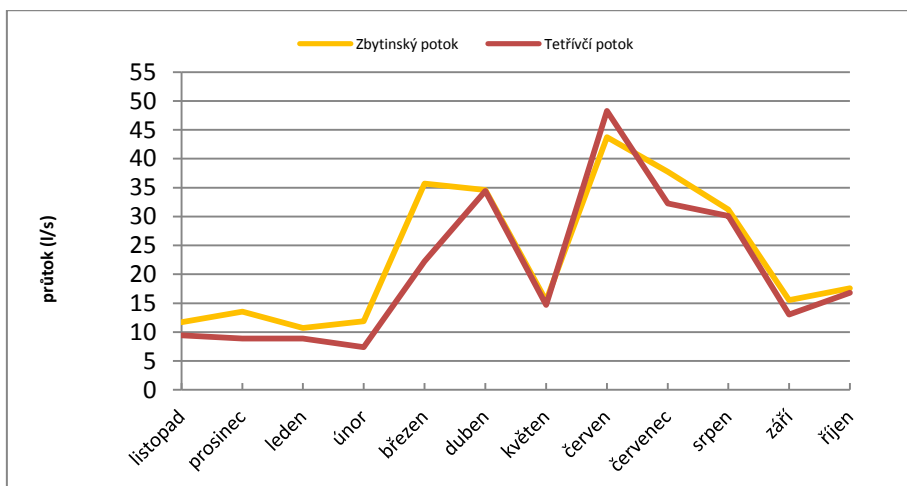


Zdroj: vlastní zpracování

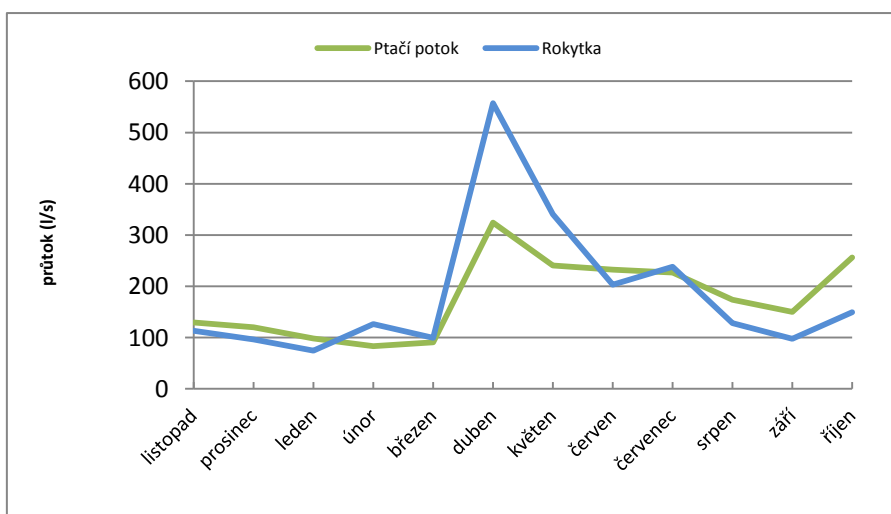
I přes zdánlivou nepřehlednost, lze z hydrogramu vyčíst určité jevy. Absolutní vodnatost toků se mezi oběma dvojicemi poměrně liší. Zejména v určitých částech je ale vidět velmi podobný charakter nárůstu a poklesu průtoků ve všech povodích zároveň. Největší rozkolísanost ukazuje povodí Rokytka, na konci ledna 2001 je vidět výrazná výchylka průtoku Rokytka, při které se průtok Ptačího potoka téměř nezměnil. Vzhledem k tomu, že se jedná o zimní období, kdy je výskyt výrazné lokální povodně velmi nepravděpodobný, mohlo by se v tomto případě jednat o chybu měření. To je ukázka toho, že při hodnocení výsledků je třeba být obezřetný.

Následující obrázky ukazují pro obě dvojice povodí zvlášť chod průměrných měsíčních hodnot průtoku za roky 2009 (Obrázek 14 a 15) a 2011 (Obrázek 16 a 17). Z těchto hydrogramů si lze udělat představu o rozložení celkového ročního průtoku do jednotlivých částí roku.

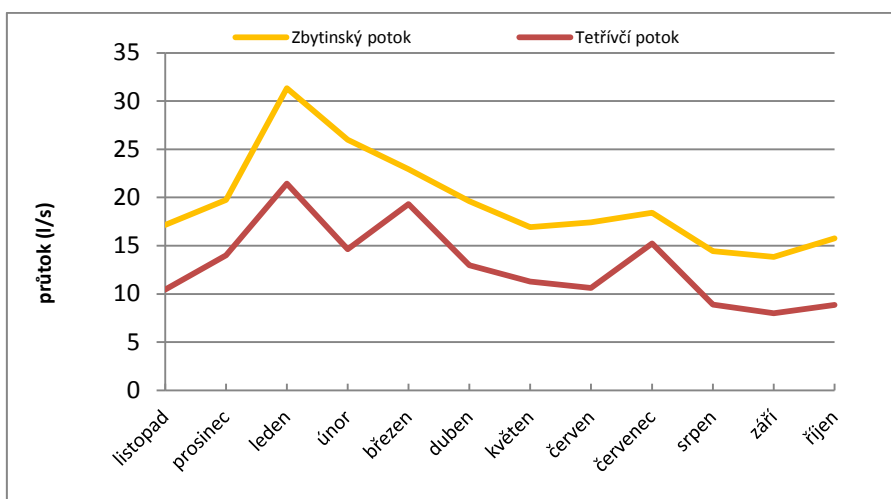
Obrázek 14: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2009



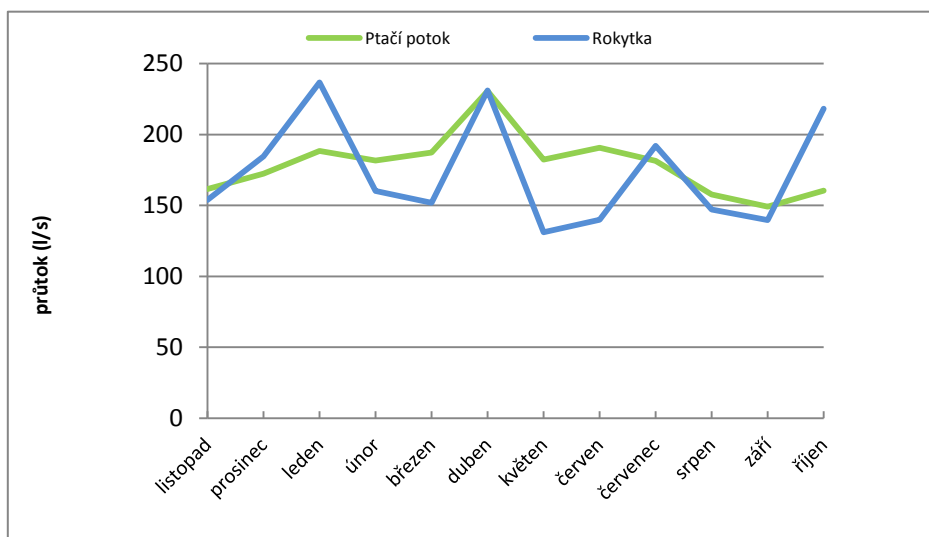
Obrázek 15: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2009



Obrázek 16: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2011



Obrázek 17: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2011



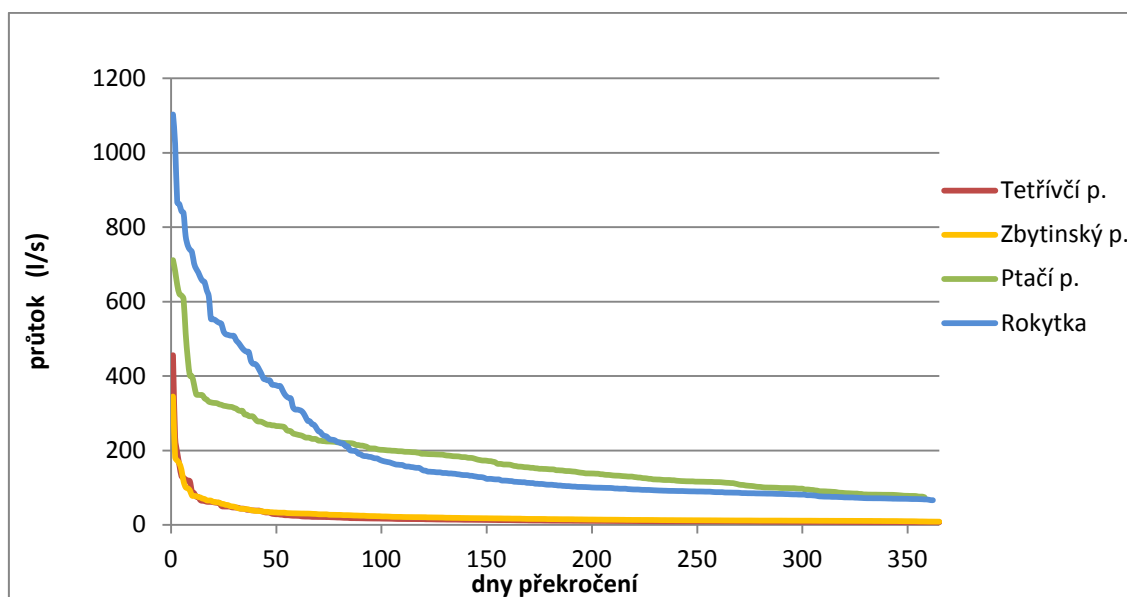
Zdroj: vlastní zpracování

V obou případech je patrné odlišné rozložení průtoku v rámci roku. Zatímco v roce 2009 vykazovaly toky, zejména Zbytinský a Tetřívčí potok, poměrně výraznou rozkolísanost a byla jasně patrná období s maximálním průtokem, tak v roce 2011 byly průtoky během roku výrazně vyrovnanější.

Čára překročení

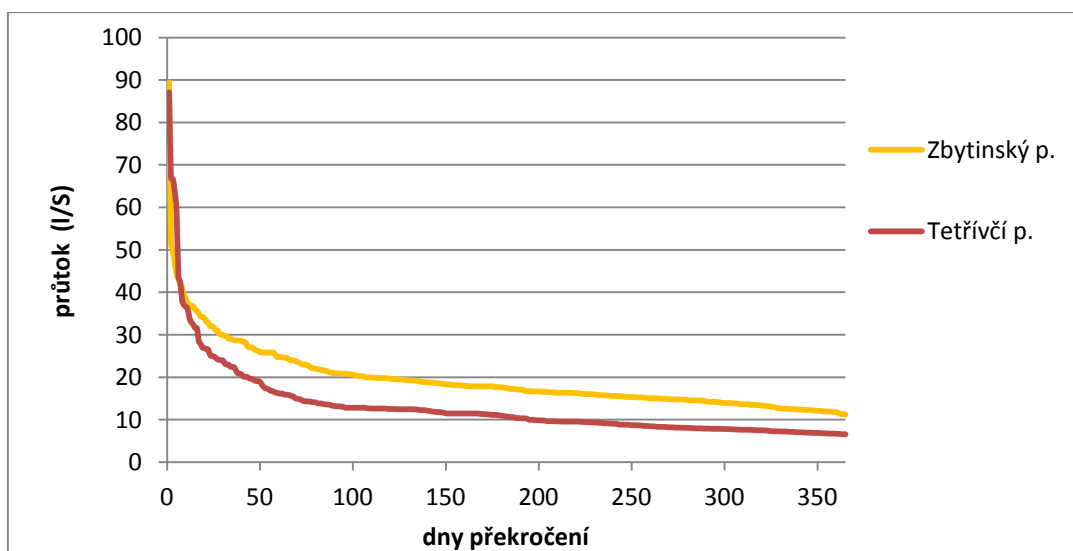
Čáry překročení nejprve pro celkové porovnání vytvořena pro všechna čtyři povodí za rok 2009 (Obrázek 18) a poté ještě za rok 2011 pro obě dvojice zvlášť (Obrázky 19 a 20). Za rok 2011 byly čáry překročení pro obě dvojice vytvořeny zvlášť proto, aby rozdílné celkové vodnosti neměly vliv na podrobnost grafu. Použita byla denní data.

Obrázek 18: Čáry překročení pro rok 2009

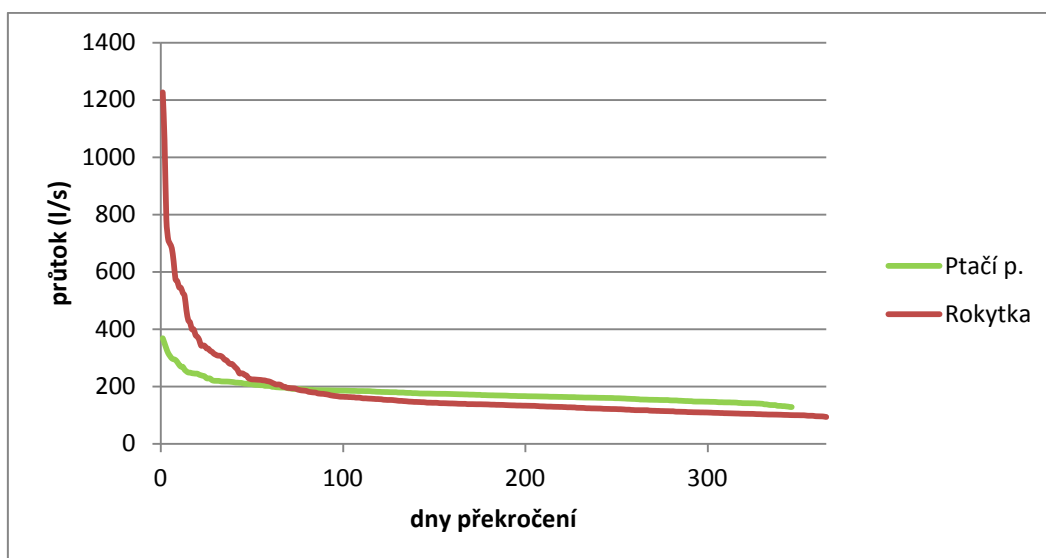


Z tohoto grafu je opět patrná celkově vyšší vodnost Rokytky a Ptačího potoka. Oproti Ptačímu potoku dosahuje Rokytká vyšších maximálních průtoků, ale poté její křivka strměji klesá, což značí nižší celkovou vyrovnanost ročních průtoků. Podobný jev je patrný i v případě Zbytinského a Tetřívčího potoka – v obou případech bylo dosaženo vysokých maximálních průtoků, převážnou většinu roku se však průtoky pohybovaly kolem podobně nízkých hodnot.

Obrázek 19: Čáry překročení pro rok 2011



Obrázek 20: Čáry překročení pro rok 2011



V roce 2011 čáry překročení Zbytinského a Tetřívčího potoka, stejně jako jejich hydrogramy, podporují jeden ze závěrů studie Královce (2010), provedené dříve na stejném území, která tvrdí, že luční povodí Zbytinského potoka vykazuje celkově vyšší hodnoty odtoku (dokládá to i výpočtem koeficientu odtoku). Rokytka v roce 2011 oproti Ptačímu potoku vykazuje výrazně vyšší maximální hodnoty průtoků, což může být způsobeno chybou měření, ale zároveň to může poukazovat na vyšší variabilitu.

V žádném z uvedených příkladů nedochází na dolním konci křivky ke změně jejího tvaru, což jednak znamená, že se nevyskytují žádná výrazně suchá období s nízkými průtoky a podle (Lane 2005) z toho lze i soudit, že jsou v povodích dostatečné zásoby podpovrchové vody, která vyrovnává průtok v obdobích bez srážek.

Dále byly provedeny výpočty některých základních ukazatelů variability odtokových dat, a to opět pouze pro roky 2009 a 2011, tak, aby mohla být do hodnocení zahrnuta všechna povodí. Rovnice pro výpočty jednotlivých ukazatelů jsou vždy uvedeny v první části této práce v příslušné kapitole. Všechny výsledky jsou pro přehlednost v Tabulce 6, pro každý ukazatel byla zvýrazněna nejvyšší spočítaná hodnota. Variabilita průtoků byla hodnocena pomocí následujících ukazatelů:

„Flashiness index“ (FI)

Tento poměrně nový index nachází v zahraničních výzkumech stále častější využití, nicméně v rámci České republiky jsem se s jeho použitím v žádné studii nesetkal. Při pohledu na zjištěné hodnoty lze potvrdit tvrzení (Baker 2004) o nízké variabilitě jeho hodnot.

Decilová odchylka (D)

Při výpočtu tohoto ukazatele se vyskytl problém v podobě velmi odlišné vodnosti mezi oběma dvojicemi povodí. Vypočtené hodnoty se pak mezi sebou jen těžko porovnat. Pro odstranění tohoto vlivu doporučuje (Netopil 1984) hodnoty vydělit průměrným ročním průtokem. Výsledné hodnoty (ve sloupci označeném „D/Qt“), lze již vzájemně srovnávat, nicméně v porovnání s ostatními ukazateli se mi tento zdá nejméně přesný, použitá hodnota průměru totiž může být výrazně ovlivněna vysokými odlehlými hodnotami, a to se promítne do celého výpočtu.

Variační koeficient (Cv)

Variační koeficient byl počítán pouze pro Zbytinský a Tetřívčí potok, protože k jeho výpočtu je potřeba dlouhodobý průměrný odtok a jen tyto dva toky mají kompletní řadu měření alespoň za posledních šest let. Hodnoty variačního koeficientu (na rozdíl od decilové odchylky vydělené průměrem) mají stejný charakter jako hodnoty Flashiness indexu, neboli dávají jednotlivým tokům a rokům stejné pořadí podle míry variability.

Kr koeficient (Kr)

Jako jediný z použitých ukazatelů byl spočítán na základě měsíčních, nikoliv denních dat. Rozdělení do kategorií podle (Kemal, Kolář 1980) je rovnoměrné – třikrát byl zjištěn velmi vyrovnaný tok ($Kr=0 - 3$), stejně tak třikrát vyrovnaný tok ($Kr=3 - 6$) a dvakrát tok nevyrovnaný ($Kr=6 - 22$)

Tabulka 6: Přehled výsledků

povodí, rok	FI	D	D/Qt	Cv	Kr	
Zbytinský p.	2009	0,30	3,83	0,16	1,35	5,73
	2011	0,13	1,72	0,09	0,38	2,29
Tetřívčí p.	2009	0,40	3,93	0,19	2,05	6,31
	2011	0,23	1,67	0,13	0,59	3,05
Ptačí p.	2009	0,11	23,23	0,13		4,46
	2011	0,07	8,03	0,05		1,04
Rokytky	2009	0,26	43,54	0,23		6,45
	2011	0,28	20,85	0,12		2,23

Vypočítané hodnoty ukazatelů variability potvrzují i souvislost s čarou překročení – čím jsou hodnoty pro jednotlivé toky mezi sebou více odlišné, tím více se v daném roce liší i průběh jejich čar překročení. Dokládá to porovnání výsledků Ptačího potoka a Rokytky. Pokud mezi sebou srovnáme ve všech povodích roky 2009 a 2011 zjistíme, že každý ukazatel ve všech tocích určil poměrně výrazně větší variabilitu v roce 2009 (s výjimkou hodnoty FI v povodí Rokytky). Z toho je

možné se domnívat, že v dané oblasti byl rok 2009 srážkově bohatší, což ostatně několikrát zmiňuje i Královec (2010).

Na základě výše použitých metod je možné potvrdit i některé další poznatky z dříve provedených výzkumů v těchto oblastech. Například Kocum a Janský (2008) na základě naměřených dat uvádí, že povodí s velkým zastoupením rašeliništních půd mají vysokou variabilitu odtoku, což tato kapitola potvrzuje na příkladu Rokytky (cca 55 % rozlohy pokryto rašeliništními půdami). Její vysoká rozkolísanost je patrná jak z dlouhodobého hydrogramu, nebo čar překročení, tak i z výsledků uvedených v Tabulce 6.

6. Diskuze

Problematikou odtokového režimu, respektive snahou o pochopení jeho principů, se lidé zabývali již v dávné minulosti. Výzkum v této problematice se zintenzivnil se zakládáním reprezentativních a experimentálních povodí, které započalo přibližně před 100 lety. To znamenalo automaticky i postupně větší počet publikovaných studií. Největší nárůst výzkumných aktivit nastal pravděpodobně v 60. letech 20. století v rámci probíhajícího *IHD (International Hydrology Decade)*. Lze tedy konstatovat, že informačních zdrojů v podobě různých studií nebo metodických příruček, týkajících se výzkumu v experimentálních povodích, je dostatek. Poměrně často jsem se ale setkával s problémem, že ve studii bylo detailně rozebráno, co bylo zkoumáno a jaké byly výsledky, konkrétní metodika výzkumu však byla popsána velmi stroze a nekonkrétně. To vzhledem k náplni této práce představovalo významný nedostatek.

Během rešerše jsem zjistil, že jeden z nejčastějších typů výzkumu je zaměřen na porovnávání vlivů vegetačního krytu na změnu odtokového režimu. Konkrétně pak vliv zalesnění nebo odlesnění, popřípadě lesních disturbancí. Zajímavé je, že i když výzkumů na toto téma bylo po celém světě provedeno velké množství, výsledky jsou dodnes poměrně nejednoznačné. Někteří autoři vliv lesa na odtokový režim zamítají (jako například Kyselová a kol. v případě hodnocení vlivů větrné kalamity na v oblasti Horehroní na Slovensku), naopak například Bartůňková (2010), vliv lesních disturbancí na změnu odtokového režimu potvrzuje, byť na základě krátkodobého pozorování. Vliv zalesnění potvrzuje i Brown a kol. (2005), který na příkladu studie z Austrálie tvrdí, že po vysazení lesa se významně snížil celkový odtok.

Za poměrně přínosné lze považovat nalezení informací *Flashiness indexu*, což je poměrně nový ukazatel krátkodobé rozkolísanosti dat. V zahraničních studiích je od roku 2004 využíván stále častěji, naopak ve studiích prováděných v České republice jsem se nikde neseťkal s jeho použitím, o tom svědčí i fakt, že jsem nenašel český význam pro výraz *koeficient přivalovosti*, který se používá na Slovensku, kde už byl tento ukazatel v několika studiích použit.

Aplikační část této práce ukazovala výsledky několika jednoduchých vybraných metod aplikovaných na naměřená data. Analýza byla provedena pro párová povodí Tetřívčího a Zbytinského potoka a pro dvě vybraná povodí z oblasti centrální Šumavy. Výběr byl limitován zejména délkou časové řady naměřených dat a také požadovanou kvalitou těchto dat. Vybrána byla nakonec povodí Ptačího potoka a Rokytky. Při zpracovávání dat pro analýzu se ukázalo, že právě kvalita dat je v této oblasti poměrně velkým problémem. Data jsou měřena automatickými stanicemi po deseti minutách a ukládána na server, při měření ale může docházet k chybám. Nejčastěji se vyskytují dva typy chyb. Prvním jsou chyby technického charakteru, kdy přístroj buď

neměří vůbec a data zcela chybí, nebo je jeho čidlo nějak ovlivněno (například námrazou) a pak jsou zaznamenávány výrazně chybné hodnoty. Takové nepřesnosti v časových řadách je třeba zpětně opravovat. Upravená data jsem měl k dispozici jen pro povodí Rokytky od roku 2009, ostatní časové řady obsahovaly velké množství nepřesností, proto musela být určitá období zcela odebrána, zejména pro povodí Ptačího potoka. Myslím si, že do budoucna by bylo velmi prospěšné, kdyby byla kvalita dat sledována a průběžně opravována, tak aby mohl být naplno využit potenciál, který má tato poměrně hustá měřicí síť pro různé typy povodí v malé oblasti. Problém byl i s převodem dat výšek hladin na hodnoty průtoků, z důvodu nedostatečného počtu hydrometrických měření pro zjištění parametrů konsumpčních křivek. Data z povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka byla opravena, časové řady desetiminutových dat pro hydrologické roky 2007 – 2011 byly kompletní a tak se s nimi dalo bez problému dál pracovat. I tato data jsou ale zatížena chybou vzniklou při jejich převodu.

Pro různá časová období byly vytvořeny hydrogramy a čáry překročení a pro roky 2009 a 2011 spočítány hodnoty vybraných ukazatelů variability. Výsledky potvrdily některá tvrzení ze starších studií v daném území jako například Kocuma a Janského (2008) o vlivu rašelinišť na odtokový režim, nebo Královce (2010), který poukazuje na celkově vyšší hodnoty průtoků v lučním povodí Zbytinského potoka oproti více zalesněnému povodí Tetřívčího potoka.

ZÁVĚR

Hlavním cílem předložené práce bylo na základě rešerše uvést přehled metod a ukazatelů používaných v hydrologických výzkumech pro hodnocení variability odtoku a pro popis odtokového režimu jako takového. Nejprve byl popsán teoretický úvod do daného tématu se zaměřením na obecný popis experimentálních povodí. Poté následovala hlavní rešeršní část, kde byly charakterizovány jednotlivé metody a ukazatele. Ve většině případů byl uveden jeden nebo více příkladů použití i s popisem výzkumné lokality a výsledků výzkumu, popřípadě doplněné vzájemné srovnání jednotlivých studií. Často se v literatuře, které bylo pro dané téma dostatek, vyskytl problém s nedostatečně popsanou metodikou daného výzkumu. Kromě běžných ukazatelů variability, uvedených i v základní hydrologické literatuře, byly přidány i některé novější nebo ne zcela běžně používané ukazatele, určené například pouze pro konkrétní účely.

Druhá část práce se zaměřila na aplikaci vybraných metod na data ze zájmových území. Ty představovala povodí Ptačího potoka a Rokytky v oblasti centrální Šumavy a párová povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka na horním toku Blanice, u obce Zbytiny. Při zpracování dat z šumavských povodí se vyskytly komplikace v podobě často chybějících nebo špatně změřených dat. Při interpretaci výsledků je třeba brát na vědomí i odchylky vzniklé převodem dat pomocí konsumpčních křivek s nepřesnými parametry. Většina výsledků z použitých ukazatelů do jisté míry potvrdila některé dříve zjištěné výsledky ve stejné oblasti. Pro lepší možnosti budoucího výzkumu by bylo potřeba jednak zpřesnit parametry konsumpčních křivek a zejména v pro šumavská povodí zlepšit kvalitu měřených dat pomocí častěji prováděných korekcí.

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 1: Klasifikace toků podle hodnoty koeficientu K_r

Tabulka 2: Vodnatost toku podle pravděpodobnosti překročení

Tabulka 3: Hodnoty ukazatelů variability ve vybraných profilech

Tabulka 4: Hodnoty korelačního koeficientu pro vybrané fyzicko-geografické charakteristiky

Tabulka 5: Vybrané charakteristiky experimentálních povodí Zbytinský a Tetřívčí potok (květen 2006 - říjen 2010)

Tabulka 6: Přehled výsledků

Obrázek 1: Schéma odtokového procesu

Obrázek 2: Rozdílné hydrogramy toků se stejnou rozlohou povodí i srážkovými úhrny

Obrázek 3: Ukazatelé variability odtoku pro profily Vydra-Modrava a Křemelná-Stodůlky (1. 11. 1999 – 31. 10. 2006)

Obrázek 4: Dvojitá součtová čára ročních průtoků a srážek povodí Liz s vyznačenou anomálií v hydrologickém cyklu

Obrázek 5: Mapa zájmového území a rozmístění měřících stanic

Obrázek 6: Závislost doby od začátku deště ke kulminaci na intenzitě srážek pro povodí Modrava I (M1) a Modrava II (M2)

Obrázek 7: Ukázka dendrogramu shluků vytvořeného metodou shlukové analýzy

Obrázek 8: Ukázka hydrogramu a hyetogramu jedné srážko-odtokové epizody

Obrázek 9: Závislost doby trvání hydrogramu na době trvání srážek

Obrázek 10: Závislost doby trvání vzestupné větve hydrogramu na době trvání srážek

Obrázek 11: Závislost velikosti kulminačního průtoku na velikosti srážkového úhrnu

Obrázek 12: : Ukázka křivky srážkové odezvy povodí Laval (vlevo) a Brusquet (vpravo)

Obrázek 13: Hydrogram průtoku zájmových povodí pro období 2009 - 2011

Obrázek 14: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2009

Obrázek 15: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2009

Obrázek 16: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2011

Obrázek 17: Hydrogramy měsíčních průtoků pro rok 2011

Obrázek 18: Čáry překročení pro rok 2009

Obrázek 19: Čáry překročení pro rok 2011

Obrázek 20: Čáry překročení pro rok 2011

SEZNAM LITERATURY

- ARCHER, D., (2007): The use of flow variability analysis to assess the impact of land use change on the paired Plynlimon catchments, mid-Wales. *Journal of Hydrology*, 347, s. 487 – 496.
- ARCHER, D., NEWSON, M. (2002): The use of indices of flow variability in assessing the hydrological and instream habitat impacts of upland afforestation and drainage. *Journal of Hydrology*, 268, č. 1 – 4, s. 244 – 258.
- BAKER, D. B. (2004): A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 40, č. 2, s. 503 – 522.
- BARTŮŇKOVÁ, K. (2010): Vliv lesních disturbancí na dynamiku odtoku v oblasti centrální Šumavy. Diplomová práce, KFGG PŘF UK, Praha, 116 s.
- BHAT, S. a kol. (2010): A comparison of storm-based and annual-based indices of hydrologic variability: a case study in Fort Benning, Georgia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 167, č. 1 – 4, s. 297 – 307.
- BLUME, T., ZEHE, E., BRONSTERT, A. (2007): Rainfall runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal* 52, č. 5, s. 843–862.
- BLUME, T., ZEHE, E., BRONSTERT, A. (2007): Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal*, 52, č. 5, s. 843 – 862.
- BROWN, A. E. A kol. (2005): A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310, č. 1 – 4, s. 28 – 61.
- CLAUSEN, B., BIGGS, B. J. F. (2000): Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance. *Journal of Hydrology*, 237, č. 3 – 4, s. 184 – 197
- CLIMENT-SOLER, D., HOLMAN, I. P., ARCHER, D. R. (2009): Application of flow variability analysis to identify impacts of agricultural land-use change on the River Axe, southwest England. *Hydrology Research*, 40, č. 4, s. 380 – 393.
- ČSN 73 6530 Názvosloví hydrologie, 1983.
- ČURDA, J., JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2011): Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí vydry. *Geografie – Sborník ČGS*, 116, č. 3, s. 335 – 353.

- DE GIROLAMO, A. L. a kol. (2007): Hydrological regime characterization of a small semi-arid watershed. *Die Bodenkultur*, 62, č. 1 – 4, s. 39 – 44.
- DUB, O. (1963): *Hydrologia, Hydrografia, Hydrometria*. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry. 528 s.
- DUB, O., NĚMEC, J. (1969): *Hydrologie*. SNTL, Praha, 378 s.
- FIALA, T. (2008): Statistical characteristics and trends of mean annual and monthly discharges of Czech Rivers in the period 1961 – 2005. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56, č. 2, 133 – 140.
- HOLKO a kol. (2008): Priemerná doba prechodu vody v povodiach s roznoú veľkosťou. In: Šír, M., Tesař, M. (ed): *Hydrologie malého povodí 2011*, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Praha, s. 107 – 113.
- HOLKO, L. (2006): Hydrologický výskum v experimentálnych a reprezentatívnych povodiach Českej a Slovenskej republiky. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 54, č. 2, s. 81 – 82.
- HOLKO, L. a kol. (2011): Flashiness of mountain streams in Slovakia and Austria, *Journal of Hydrology*, 405, č. 3 – 4, s. 392 – 401.
- HOLKO, L., KOSTKA, Z. (2008): Analýza režimu odtoku pomocou indexu privalovosti, *Acta Hydrologica Slovaca*, 9, č. 2, s. 262 – 268.
- KEMEL, M., KOLÁŘ, V. (1980): *Hydrologie*. ČVUT, Praha, 292 s.
- KLIMENT, Z. A kol. (2011): Trend analysis of rainfall-runoff regimes in sselected headwater areas of the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 59, č. 1, s. 36 – 56.
- KOCUM, J., JANSKÝ, B. (2008): Dynamika hydrologického režimu v pramenných oblastiach vodních toků. In: Langhammer, J. (ed.): *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*. PŘF UK, Praha, 2008, s. 72-82.
- KODÁDKOVÁ, I. (2010): Hodnocení srážko-odtokového režimu v pramenné oblasti Blanice se zřetelem na významné epizody. *Bakalářská práce, KFGG PŘF UK, Praha*, 61 s.
- KRÁLOVEC, V. (2010): Změny srážkoodtokových poměrů v povodí horní Opavy. *Diplomová práce, KFGG PŘF UK, Praha*, 125 s.
- KRÁLOVEC, V. (2011): Metody hodnocení rozdílného vlivu krajinného pokryvu na odtokový proces v pramenných oblastiach. 23. mezinárodní konference mladých hydrologů, Bratislava.
- KŘÍŽ, V. a kol. (1998): *Hydrometrie*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 176 s.

- KULASOVÁ, A. (2006): Experimentální hydrologická základna Jizerské hory. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 54, č. 2, s. 163 – 182.
- KYSELOVÁ, D. a kol. (2008): Vetrná kalamita na Horení a jej vplyv na odtokový režim vybraných malých horských povodí. In: *Hydrologie malého povodí 2008*, čl. str. 191
- LANE, P. N. J. a kol. (2005): The response of flow duration curves to afforestation. *Journal of Hydrology*, 310, č. 1 – 4, s. 253 – 265.
- LATRON, J. (2008): Spatial and temporal variability of the hydrological response in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Hydrological Processes*, 22, č. 6, s. 775 – 778.
- MAIEROVÁ, M. (2011): Metody separace základního odtoku a trendy koncentrací dusíku v tomto odtoku. Bakalářská práce, Katedra Krajinového managementu, Zemědělská fakulta, Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 62 s.
- MALÝ, A. (2009): Vliv rozdílného využití krajiny na srážko-odtokový proces v experimentálních povodích Zbytiny. Diplomová práce, KFGG PŘF UK, Praha, 151 s.
- MATHYS, N. a kol. (1996): The forest effect on floods in small mountainous catchments: some results from the experimental catchments of Draix, France. In: Viville, D., Littlewood, I. G. (ed.): *Ecohydrological processes in small basins*
- MATOUŠEK, V. (2010): Poznávání odtokových vlastností malých povodí za regionálních dešťů. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 103 s.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J. (2002): Komentář statistického zpracování dat: Metody a řešené úlohy včetně CD. Academia, Praha, 764 s.
- MERZ, R. a kol. (2006): Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, 331, č. 3 – 4, s. 591 – 604
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. (2009): A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. *Water Resources Research* 45, 19 s.
- NETOPIL, B. (1970): Základy hydrologie povrchových a podpovrchových vod. Universita J. E. Purkyně. Brno, 220s.
- NETOPIL, B. A kol. (1984): Fyzická geografie 1. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 273 s.
- NORBIATO, D. a kol. (2009): Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps. *Journal of Hydrology*, 375, s. 312–325.
- OLDEN, J. D., POFF, N. L. (2003): Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19, č. 1, 101 – 121.

- PAVLÁSEK, J., MÁČA, P., ŘEDINOVÁ, J. (2006): Analýza hydrologických dat z Modravských povodí. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 54, č. 2, s. 207 – 216
- PECHKOVÁ, J. (2009): Hydrologická specifika řeky Kamenice. Diplomová práce, KFGG PŘF MU, Brno, s. 95.
- PEKÁROVÁ, P. (2003): Identifikácia dlhodobých trendov a fluktuácií hydrologických radov. Časť II. Výsledky. *J. Hy-drol. Hydromech.*, 51, č. 2, s. 97 – 108.
- RICHTER, B. D. a kol (1996): A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10, č. 4, s. 1163 – 1174.
- SAHOO, D., SMITH, P. K. (2009): Hydroclimatic trend detection in a rapidly urbanizing semi-arid and coastal river basin. *Journal of Hydrology*, 367, č. 3 – 4, s. 217 – 277.
- SEARCY, J. K. (1959): Flow-Duration Curves: Methods and practices of the Geological Survey. *Manual of Hydrology: Part 2 Low – Flow Techniques*, United States government printing office, Washington, s. 33.
- SMAKHTIN, V. U. (2001): Low Flow Hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, č. 3 – 4, s. 147 - 186.
- STOOF, C. R. a kol. (2012): Hydrological response of a small catchment burned by experimental fire. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, č. 2, s. 267 – 285.
- STRICKER, H., WARMERDAM, P. (2010): Fundamental hydrological research results drawn from studies in small catchments, In: Herrmann, A. , Schumann, S. A. (ed.): *Status and perspectives of hydrology in small basins*
- ŠANDA, M. a kol. (2011): Využití stabilních izotopů vodíku a kyslíku v hydrologii malých experimentálních povodí České a Slovenské republiky. In: Šír, M., Tesař, M. (ed): *Hydrologie malého povodí 2011, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Praha, s. 411 – 417.*
- ŠEDIVÁ, K. (2011): Charakteristika srážko-odtokového režimu pramenné oblasti ostrovské Bystřice. *Bakalářská práce, KFGG PŘF UK, Praha, 41 s.*
- ŠÍR, M., TESAŘ, M., LICHNER, L. (2004): Klimatická anomálie 1992–1996 na šumavském povodí Liz jako důsledek výbuchu sopky Pinatubo v roce 1991. *Aktuality šumavského výzkumu*, č. 2, s. 74 – 78
- TESAŘ, M., ŠÍR, M., ZELENKOVÁ E. (2004): Vliv vegetace na vodní a teplotní režim tří povodí ve vrcholovém pásmu Šumavy. *Aktuality šumavského výzkumu*, č. 2, s. 84 – 88.
- TRIZNA, M. (2004): *Klimageografia a hydrogeografia. Geo-grafika, Bratislava, 154 s.*
- WATSON, F. A kol. (2001): Improved methods to assess water yield changes from paired catchment studies: application to the Maroondah catchments. *Forest Ecology and Management*, 143, č. 1 – 3, s. 189 – 204.

- ZONGXUE, X. (2010): Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years. *Journal of Arid Environments*, 74, č. 2, s. 256 – 267.
- ZVÁRA, K. (2003): *Biostatistika*. Karolinum, Praha, 213 s.