

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4106 Zemědělská specializace

Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, Csc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Porovnání vybraných metod výpočtu základního odtoku na
malém povodí a zhodnocení vlivu základního odtoku na
koncentrace fosforu v celkovém odtoku**

Vedoucí diplomové práce: **Ing., Ph.D. Václav Bystřický**

Autor diplomové práce: **Bc. Eliška Švarcová**

České Budějovice, duben 2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Eliška ŠVARCOVÁ**
Osobní číslo: **Z11868**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Porovnání vybraných metod výpočtu základního odtoku na malém povodí a zhodnocení vlivu základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtoku.**
Zadávací katedra: **Katedra krajinného managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- Výběr vhodného povodí pro separaci základního odtoku.
- Výpočet základního odtoku ve vybraném povodí dle různých metod.
- Statistické vyhodnocení výsledků dosažených odlišnými metodami výpočtu.
- Analýza koncentrací fosforu v celkovém odtoku.
- Vyhodnocení vlivu základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtok.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **40 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Brutsaert, W. Hydrology: An introduction. Cambridge University Press, 2005, 605 s.

Kněžek, M. Podzemní složka odtoku. VÚV, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1988, 62 s.

Maidment, D.R. (ed.). Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.

Lepš, J., Šmilauer, P. Biostatistika. Biologická fakulta JU, České Budějovice, 1996, 166 s.

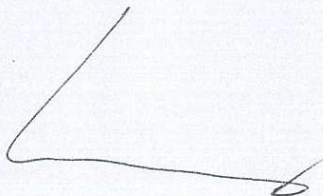
Manuály statistických programů, např. Statistika, R aj.

časopisy: Hydrological processes, Journal of hydrology, Physics and chemistry of the earth, Hydrological studies, atd.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Bystřický**
Katedra krajinného managementu

Datum zadání diplomové práce: **8. března 2012**

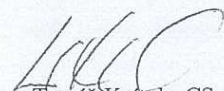
Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2013**



Ing. Karel Suchý, Ph.D.
proděkan pověřený vedením ZF

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice

L.S.



prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 15. března 2012

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval/a samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne:

.....
Eliška Švarcová

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především svému vedoucímu Ing., Ph.D. Václavu Bystřickému, a to nejen za odborné vedení při tvorbě práce, ale také za trpělivost a ochotu při pravidelných konzultacích.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na metody separace základního odtoku a jejich porovnání, analýzu koncentrací celkového fosforu v celkovém odtoku a vliv základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtoku.

Studovaným územím je subpovodí P52 v povodí Kopaninského toku. Subpovodí P52 je malé (64,93 ha), odvodněné zemědělsko-lesní povodí na Českomoravské vrchovině, s velkým zastoupením lesní plochy (64 % les a 31 % orná půda). Studovaným obdobím je hydrologické období 2009 – 2011. Pro získání potřebných výsledků jsou použity denní hodnoty průtoků, denní hodnoty koncentrací, denní srážkové úhrny ze srážkoměrné stanice Velký Rybník a měsíční srážkové úhrny ze srážkoměrné stanice ČHMÚ v Humpolci.

Pro separaci základního odtoku a porovnání metod bylo vybráno 5 metod:

- metoda digitálního filtru dle *CHAPMANA (1999)*,
- metoda UKIH navržená *INSTITUTE OF HYDROLOGY, (1980)*,
- metoda RDF navržená *LINE A HOLLICKEM (1979)*,
- metoda FUKIH navržená *AKOSYMA KOL. (2009)* a
- *KILLEHO* metoda (1970).

Všechny metody jsou jednoduché na provedení a nenáročné na vstupní data. Při porovnání metod je hlavním problémem, že výsledky dosažené různými metodami jsou značně rozdílné.

Dalším bodem práce je zhodnocení koncentrací celkového fosforu v celkovém odtoku. Zde je analyzována řada denních koncentrací celkového fosforu i průměrné měsíční a roční hodnoty koncentrací. Nízké i vysoké hodnoty koncentrací jsou porovnávány s hodnotami srážkových úhrnů a jsou hledány spojitosti mezi těmito hodnotami. Hlavním problémem je, že koncentrace fosforu nejsou závislé pouze na množství srážek.

Posledním bodem je řešení vlivu základního odtoku na množství celkového fosforu v toku. Zde je použit postup který popsal ve své práci *BYSTRICKÝ (2012)*. Jsou určeny hodnoty koncentrací typické pro základní odtok, pro rychlou složku odtoku a celkový odtok. Skupiny hodnot jsou mezi sebou testovány a porovnány. Z

výsledků vyplývá, že základní odtok není zanedbatelným přispívatelem fosforu do toku, ale pro dosažení přesnějších výsledků by bylo potřeba studovat delší časové období (např. 10 let) a porovnat výsledky s více různými povodími.

KLÍČOVÁ SLOVA: složky odtoku, základní odtok, celkový odtok, přímý odtok, srážkové úhrny, metody separace hydrogramu, koncentrace celkového fosforu.

ABSTRACT

This thesis is focused on the methods of separation of baseflow and comparing of these methods. It is analyzing concentrations of total phosphorus in the total runoff and influence of baseflow to concentrations of phosphorus in total runoff.

The studied area is subcatchment P52 in the catchment Kopaninský flow. Subcatchment P52 is small (64,93 hectares), drained agro-forestry catchment in Českomoravská vrchovina (Czech-Moravian highlands), with a large proportion of forest area (64% forest and 31% of arable land). Studied the period is hydrological period 2009 - 2011. To obtain the necessary results are used daily flow, daily concentrations, daily precipitation of rain gauge station Velký Rybník and monthly precipitation from rain gauge stations of the ČHMÚ (Czech Hydrometeorological Institute) in Humpolec.

For the separation of the baseflow and comparison of methods were selected five methods:

- method of digital filter according to CHAPMAN (1999),
- method UKIH designed by INSTITUTE OF HYDROLOGY (1980),
- method RDF proposed by LINE AND HOLLICK (1979),
- method FUKIH proposed by AKOSY AT. AL. (2009) and
- method of KILLE (1970).

All methods are simple to perform and not challenging to input data. When comparing methods, the main problem is that, the results obtained by different

methods are very different.

Another point of this work is to evaluate the concentrations of total phosphorus in the total runoff. Here is analyzed series of daily concentrations of total phosphorus and monthly and annual average concentrations. Low and high concentrations are compared with the values of precipitation and links are searched between these values. The main problem is that, the concentration of phosphorus are not dependent only on precipitation.

The last point is solution of influence of baseflow to the amount of total phosphorus in the runoff. Here is used the procedure which described BYSTRICKÝ in its work (2012). There are determined values concentrations typical of baseflow, for direct runoff and total runoff. Groups of values are mutually tested and compared. The results show that, the baseflow is negligible contributor of phosphorus to the total runoff, but to achieve more accurate results would be needed to analyse a longer time period (eg 10 years) and compare the results with several different river basins.

KEYWORDS: component of runoff, baseflow, total runoff, direct runoff, precipitation, hydrograph separation method, the concentration of total phosphorus.

OBSAH:

1. ÚVOD	10
2. LITERÁRNÍ PŘEHLED	12
2.1 Složky odtoku a jejich geneze	12
2.2 Základní odtok a index BFI	15
2.3 Přehled vybraných metod separace základního odtoku	17
2.3.1 Empirické metody	17
2.3.2 Metody založené na vztahu mezi průtoky v toku a stavy hladiny podzemní vody	21
2.3.3 Analytické metody	22
2.3.4 Metody vycházející z hmotnostní bilance vody (tracerové metody)	26
2.4 Porovnání metod separace základního odtoku	28
2.5 Koncentrace fosforu v podzemních vodách a základním odtoku	35
2.5.1 Výskyt fosforu ve vodách	35
2.5.2 Důsledky zvýšených koncentrací fosforu ve vodách	36
2.5.3 Zdroje zvýšených koncentrací fosforu v podzemních vodách	36
2.5.4 Řešení problému převodu fosforu základním odtokem do povrchových vod	38
3. MATERIÁL	40
4. METODY A DATA	44
4.1 Sběr dat	44
4.2 Metody separace odtoku	47
4.3 Statistické metody	51
5. VÝSLEDKY A DISKUZE	52
5.1 Separace základního odtoku vybranými metodami	52
5.2 Porovnání metod	57
5.3 Vyhodnocení výsledků separace základního odtoku	61
5.4 Koncentrace fosforu v celkovém odtoku	67
5.5 Koncentrace fosforu v základním odtoku	72
6. ZÁVĚR	76
7. SOUHRNY	78
7.1 Seznam literatury	78
7.2 Seznam obrázků	86
7.3 Seznam tabulek	88

1. ÚVOD

Voda v hydrosféře vlivem působení slunce, zemské gravitace a dalších činitelů, neustále cirkuluje a vytváří tak oběh vody. Celkové množství vody na zemi je téměř konstantní, tj. množství srážek spadlých na Zemi je rovno výparu z povrchu Země (*ŘEHÁNEK A KRÍŽ, 2002*). Přírodní oběh vody je snad nejmohutnějším a nejvelkolepějším látkovým koloběhem vůbec. Tím, že lidé vodu „základ života“ odedávna využívají nejen k pití a vaření, ale pro nejrůznější další účely, ovlivňují tento přírodní koloběh. (*MOLDAN A KOL., 1989*). Z hospodářského hlediska je mimořádně důležitá podzemní voda. Podzemní vody vzhledem ke svým nenahraditelným vlastnostem patří všeobecně k nejcennějším složkám přírodního bohatství a zároveň zdravého životního prostředí (*ČERVENÝ A KOL., 1984*). Podzemní voda má zpravidla lepší fyzikální vlastnosti a chemické složení než voda povrchová. Je tedy významným a někdy nenahraditelným zdrojem vody pro zásobování obyvatelstva. Podzemní vody znamenají zhruba pro třetinu světové populace zdroj vody, na němž je zcela závislá. Např. pro sub-saharské oblasti Afriky tvoří podzemní voda dokonce 75% veškerých (lepších) bezpečných zdrojů pitné vody. V ČR představují podzemní vody zhruba jednu třetinu potřeby vody pro obyvatele (*SKLENIČKA, 2003; MILEHAM A KOL., 2008;*). Využívání podzemní vody k různým účelům a ochrana jejích zdrojů vyžaduje znalosti jejího výskytu i oběhu (*KRÍŽ, 1983*).

Základní odtok je důležitou vývojovou součástí celkového odtoku, která pochází z uložených podzemních vod, nebo jinak zadržovaných zdrojů (mělké podpovrchové vzdušné vody, jezera, tání ledovců, atd.). Přes většinu suchých ročních období, se soustředěný odtok skládá výhradně ze základního odtoku. Ve vlhkém období, je průtok tvořen základním odtokem a okamžitým odtokem, který představuje přímou reakci povodí na srážkové události (*SMAKHTIN, 2001*).

Bylo navrženo mnoho metod, empirických i hydrologicky zdůvodněných, jak separovat přímý odtok od odtoku základního. Většina z nich je založena na grafické nebo početní analýze hydrogramu, tj. grafu závislosti průtoku nebo specifického odtoku na čase (*KULHAVÝ A KOL., 2001*). Separace základního odtoku z hydrogramu celkového odtoku je již dlouho předmětem zájmu v hydrologii, protože

křivka recese základního odtoku sama o sobě obsahuje cenné informace o vlastnostech zvodnělých vrstev povodí. Velký počet stávajících technik a vysoká úroveň subjektivity v separaci základního odtoku z celkového soustředěného odtoku ukazuje, že problém není zcela objasněn (*SZILAGYI A PARLANGE, 1998*).

Kontaminace podzemní vody je do značné míry způsobena zemědělstvím. Nepříznivé afekty zemědělství na podzemní a podpovrchové vody jsou do značné míry způsobeny erozí a vyplavováním látek nebo přívalovými vodami. Jakákoliv kontaminace podzemních, ale i povrchových vod může způsobit riziko pro člověka i pro zvířata a může poškodit akvatické biocenózy. Z tohoto důvodu jsou zhoršující se podmínky životního prostředí, především kvalita podzemních i povrchových vod, předmětem výzkumného šetření v mnoha státech světa. (*SAMSONOVÁ A KOL., 2005*).

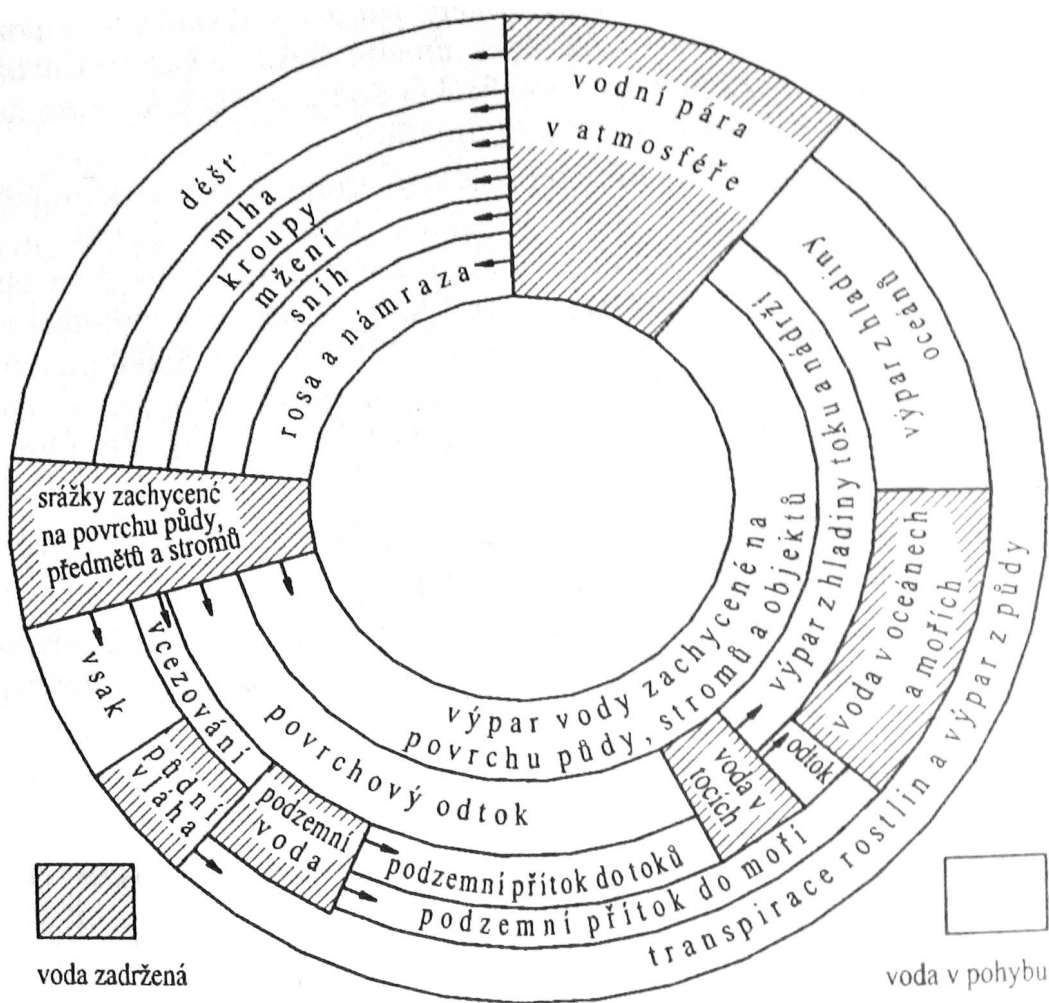
Cílem této diplomové práce je separace základního odtoku různými metodami a následně jejich porovnání. Dále jsou zde vyhodnoceny výsledky dosažené vybranou metodou separace základního odtoku. V neposlední řadě je provedena analýza koncentrací fosforu v celkovém odtoku a následně vyhodnocení vlivu základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtoku.

2. LITERÁRNÍ PŘEHLED

2.1 SLOŽKY ODTOKU A JEJICH GENEZE

Koloběh vody

V rámci koloběhu vody v přírodě nemůže voda na Zemi nikdy a nikde existovat bez pohybu. Koloběh vody je podrobně znázorněn v obr. č. 1. Základními složkami tohoto oběhu jsou výpar, srážky, povrchový a podpovrchový odtok a voda zadržaná v nádržích (PLECHÁČ, 1989; JANDORA A KOL., 2002). Půdní a podzemní vody jsou jednou z nejvýznamnějších složek oběhu vody v přírodě, protože podmiňují existenci rostlinstva, potažmo živočichů včetně člověka (NETOPIL, 1972).



Obr. č. 1: Koloběh vody v přírodě.

Zdroj: (NYPLA KURÁŽ, 1992)

Hydrologická bilance

Nejobecnějším řešením vzájemných vztahů všech složek zúčastňujících se koloběhu vody je zpracování hydrologické bilance. Podle stupně poznání jednotlivých jejích činitelů je možno rozepsat řadu bilančních rovnic, a to od nejjednodušších porovnávajících srážky s odtokem a ztrátovou složkou např. *PONCE A SHETTY (1995)*, po rovnice uvažující kromě jednotlivých odtokových složek i změny zásob vody, skrytou komunikaci vody, rozčlenění ztrátové složky na jednotlivé druhy výparu, případně i transpirace rostlin (*KNĚŽEK, 1988*). Základní bilanční rovnice odtoku je (*URBÁNEK, 1970*):

$$O = S - E \pm \Omega, \quad (1)$$

kde: O je celkový odtok,
 S jsou srážky,
 E je evapotranspirace a
 Ω je množství vody, které zvýšilo, nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody.

Rozdělení odtoku na jednotlivé složky

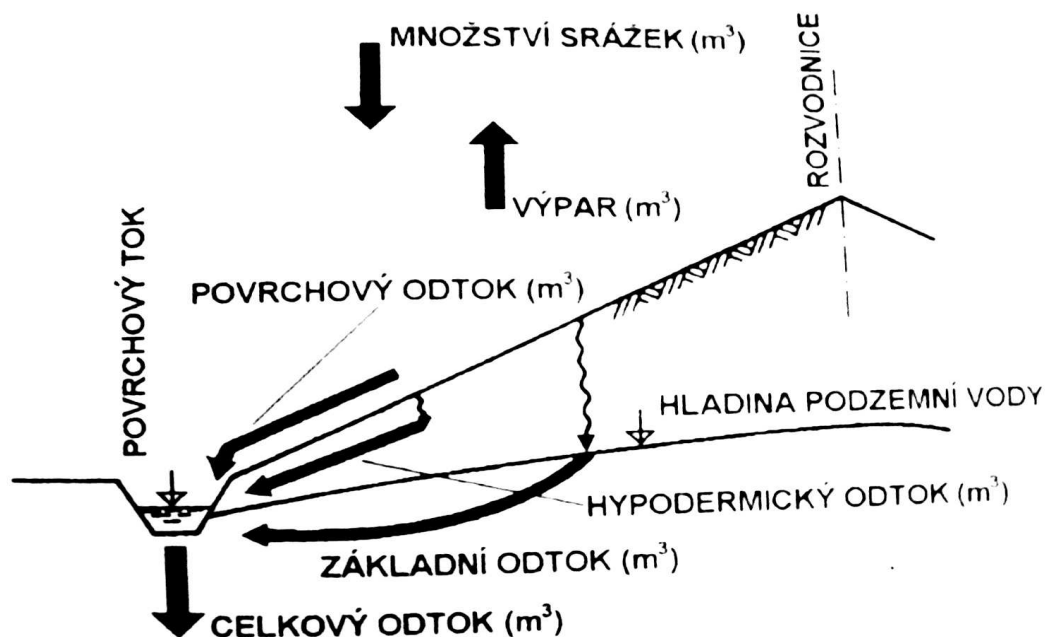
Odtokem nazýváme množství vody odtékající z dané plochy za určité časové období. Odtok rozdělujeme na jednotlivé složky podle času, za který se srážková voda do povrchových toků dostane, a podle způsobu jakým se do povrchových toků dostává (*POKORNÁ A ZÁBRANSKÁ, 2008; HUBAČÍKOVÁ, 2002; KRÍŽ, 1983*).

- Příímý odtok je ta část celkového odtoku vody, která se do povrchových toků dostává už během trvání deště. Příímý odtok je hlavní příčinou povodní i vodní eroze půdy. Povrchový odtok představuje tu část vody z celkového odtoku, která odtéká po povrchu terénu.
- Hypodermický odtok je ta část vody, která se do toku dostane ještě bezprostředně po skončení deště. Voda odtéká pod povrchem terénu, ale není v kontaktu s hladinou podzemní vody. Jedná se o podpovrchový odtok v pásmu provzdušněném.

- Základní odtok je ta část celkového odtoku vody, která se po skončení deště dostává do povrchových toků až po určitém čase a povrchový tok zásobuje i v období, kdy se v povodí srážky nevyskytují. Základní odtok je tvořen přítokem podzemní vody ze zvodnělých vrstev hornin (z pásmy nasycení) do vodních toků. Tohoto odtokového procesu se zúčastňuje určitá část podzemních vod, která se podílí na napájení řek a tím i na celkovém oběhu vody v krajině.

Geneze složek odtoku

Voda ze spadlých srážek a působením gravitace vytváří na zemském povrchu nejdříve na malých plochách plošný odtok, pak se vlivem členitosti povrchu koncentruje ve stružkách, struhách, rýhách, potocích a tocích a vytváří soustředěný povrchový odtok (HUBAČÍKOVÁ, 2002). Část vody ze srážek se infiltrací dostává pod zemský povrch a odtéká půdou a mělkými povrchovými útvary bezprostředně pod povrchem jako tzv. hypodermický odtok. Další část infiltrované vody prosakuje horninami a po dosažení hladiny podzemní vody pokračuje ve svém oběhu horninovým prostředím k místu odvodnění. Tato část celkového odtoku se nazývá odtok podzemní vody, neboli základní odtok (ŠILAR, 1996). Geneze složek odtoku je znázorněna na obr. č. 2.



Obr. č 2: Složky odtoku vody z povodí.

Zdroj: (HUBAČÍKOVÁ, 2002)

2.2 ZÁKLADNÍ ODTOK A INDEX BFI

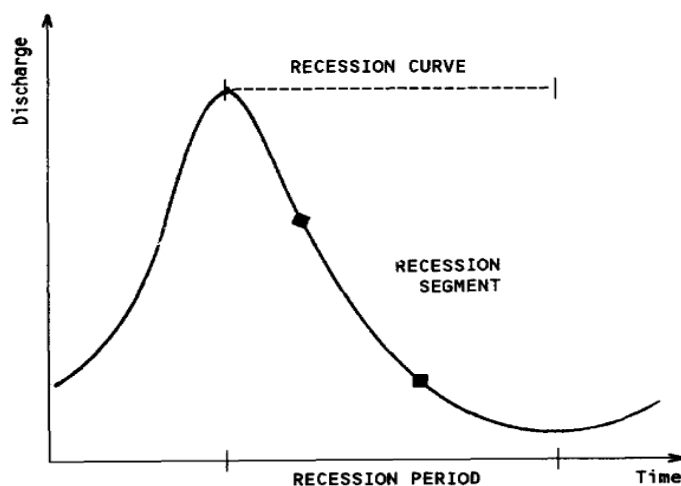
Základní odtok byl definován mnoha způsoby, které nejsou všechny rovnocenné. V jedné z definic je například základní odtok definován jako ta část toku, která pochází z podzemních vod nebo jiných opožděných zdrojů (*HALL, 1968*). *WARD A ROBINSON (1990)* se domnívají, že základní odtok je tvořen součtem podzemních odtoků a opožděných průtoků. V jiné definici je zase základní odtok popsán jako pomalu se měnící tok v období bez deště (*CHOW A KOL., 1988*). V této práci bude základní odtok uvažován, jako odtok vody z podzemních zdrojů, který nezahrnuje odtok hypodermický, jak je uvedeno dle *NATHANA A McMAHONA (1990)*. Tuto teorii základního odtoku používá ve svých studiích mnoho autorů jako např. *WITTENBERG A SIVAPALAN (1999)*, *PETERSE A VAN LANENEN (2005)* a další.

Hodnota odtoku podzemní vody je závislá na vydatnosti pramenů a velikosti plynulého příronu podzemní vody do povrchového toku. Odtok podzemní vody lze obvykle ještě rozdělit na podzemní odtok dotovaný z oblastí ležících těsně u povrchového toku (údolní náplavy) a podzemní odtok dotovaný podzemní vodou s hlubším oběhem, vznikající v horních částech povodí (*URBÁNEK, 1970*). Základní odtok je funkcí velkého počtu proměnných, které obsahují topografické, geologické, půdní, vegetační a klimatické faktory (např. plocha povodí, délka říční sítě, střední výška povodí, hustota odvodnění, sklon povodí a další) (*LACEY A GRAYSON, 1998*; *NATHAN A KOL., 1996*).

Základní odtok je jednou z nejdůležitějších charakteristik nízkých průtoků. Analýzy nízkých průtoků řek byly v posledních letech stále více využívány. Jejich znalost je důležitá z mnoha důvodů, jako např. rozvoj strategií hospodaření s vodou, zejména pro podmínky v období sucha, dále pro odhad nízkých a středních průtoků, pro management kvality vody a růst řas, pro stanovení limitních hodnot pro různé vodní aktivity, při řešení otázek jako např. zásoby vody, zavlažování a další. (*LACEY A GRAYSON, 1998*; *TALLAKSEN, 1995*).

Postupný pokles průtokového množství během období s nízkými nebo žádnými srážkami je graficky prezentován jako křivka recese (obr. č. 3). Křivka recese obsahuje cenné informace týkající se vlastností odtoku a charakteristik

podzemní vody. Analýza recese je tedy užitečná v předpovídání nízkých průtoků za účelem plánování a řízení vodohospodářství, jako např. zavlažování, zásobování vodou a vodních elektráren, v matematickém modelování pro kalibraci nebo vstup do srážko-odtokových modelů, v analýzách hydrogramů pro grafické oddělení jednotlivých složek odtoku, ve frekvenčních analýzách pro odhad statistiky nízkých průtoků, v regionálních studiích nízkých průtoků pro indexování retenční kapacity povodí a další. (TALLAKSEN, 1995)



Obr. č. 3: Křivka recese.

Zdroj: (TALLAKSEN, 1995)

Zásadní význam pro studie minimálních průtoků má indexu základního odtoku (BFI). Toto pojetí bylo nejprve představeno L'VOVICHEM (1972) a pak vyvíjeno v Hydrologickém ústavu Spojeného království (INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980). BFI je někdy také uváděný jako 'index spolehlivosti'. Tento bezrozměrný index je definován jako poměr objemu základního odtoku v časovém intervalu k poměru celkového objemu soustředěného odtoku ve stejném časovém intervalu (nebo alternativně jako poměr mezi průměrným průtokem základního a celkového odtoku získaného v rámci separace hydrogramu). BFI lze odhadnout pro jednotlivé dny, měsíce, roky nebo pro celá dlouhá období. V povodích s vysokým příspěvkem podzemní vody do povrchového toku, se může BFI pohybovat kolem jedné a pro dočasné toky je roven nule. Některé zdroje uvádějí charakteristické hodnoty BFI pro řadu toků v určitých regionech. Bylo zjištěno, že BFI je dobrým ukazatelem vlivu geologie na nízké průtoky, a proto je široce používán u mnoha regionálních studiích nízkých průtoků (SMAKHTIN, 2001).

2.3 PŘEHLED VYBRANÝCH METOD SEPARACE ZÁKLADNÍHO ODTOKU

Oddělení jednotlivých složek odtoku je základním nástrojem který nám pomáhá pochopit, odkud voda a koncentrace živin v ní obsažené pocházejí (DOLEŽAL A KVÍTEK, 2004). Podzemní odtok se velmi podstatně podílí na celkovém odtoku v povrchových tocích, jak je patrné ze skutečnosti, že vodní toky v klimatických poměrech České republiky obvykle nevysychají ani za delších suchých období bez srážek. Podzemní odtok se však nedá přímo měřit, protože podzemní voda je nepřístupná přímému pozorování. Lze jej měřit až po té, co se podzemní voda vývěrem na zemský povrch stane vodou povrchovou jako např. vydatnost pramenů. Veliká část podzemního odtoku však vyvěrá na zemský povrch skrytě mimo prameny a je zahrnuta v celkovém odtoku, který lze měřit jako průtok v povrchových tocích. Při stanovení podzemního odtoku se proto vychází nejčastěji z analýzy celkového odtoku a z jeho členění do jednotlivých složek. Separace základního odtoku je důležitá pro získání rozhodujících parametrů pro hydrologické modely (ŠILAR, 1996). Jelikož měřit přímo hodnoty základního odtoku je obtížné a většinou to vůbec není možné, bylo vyvinuto a testováno již mnoho technik pro separaci základního odtoku. Tyto metody mohou být obecně rozděleny do tří kategorií: analytické, empirické a metody hmotnost bilance (ZHANG A KOL., 2012).

2.3.1 EMPIRICKÉ METODY

V praxi, empirické metody jsou pravděpodobně nejpoužívanější metody pro oddělení základního odtoku. Empirické metody jsou obvykle vyvinuty na základě kalibrace hypotetického modelu s měřením hodnot v terénu nebo jen na základě zkušeností. Dva hlavní typy empirických metod jsou digitální filtr a grafické metody (ZHANG A KOL., 2012).

Grafické metody

Nejjednodušším způsobem vyčlenění podzemního odtoku je spojení

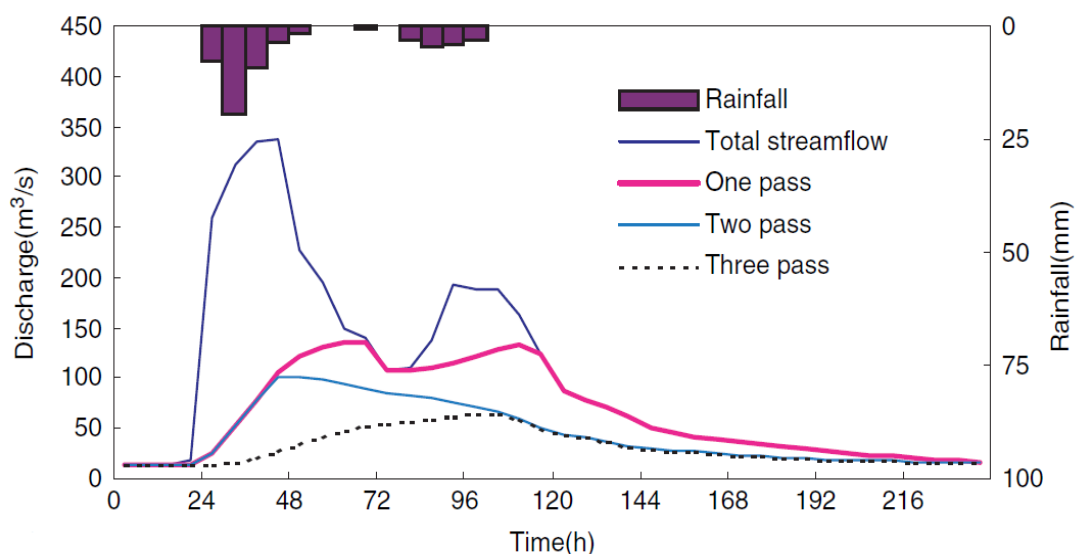
typických bodů na čáře průtoků, tj. nejnižších bodů začátku a konce průtokové vlny, vodorovnou přímkou. Vychází se tedy z předpokladu, že podzemní odtok je v průběhu celé průtokové vlny konstantní. Je zřejmé, že předpoklad značně zjednodušuje skutečný stav a metodu můžeme přijmout jen pro přibližné určení, respektive odhad (KNĚŽEK, 1988). Obecně platí, že grafické přístupy nejsou jednoznačné během srážkových událostí kdy celkový odtok vzrůstá, a doby vrcholu základního odtoku se od ostatních metod značně odlišují. Grafické přístupy s různými pravidly dávají významně odlišné odhady hodnot základního odtoku i při použití stejného datového souboru průtoků. Například, různí autoři používají rozdílná pravidla týkající se začátku a konce povrchového odtoku (LIN A KOL., 2007). Vzhledem k těmto skutečnostem grafické přístupy z hlediska stanovení základní složky odtoku nejméně vyhovují a byly vyvíjeny jiné metody (KNĚŽEK, 1988).

Metody digitálních filtrů

Metoda rekurzivního digitálního filtru (dále jen RDF) je upravena z teorie zpracování signálu (LINE A HOLLIC, 1979; NATHAN A MCMAHON, 1990; CHAPMAN, 1999; ECKHARDT, 2005). V metodě RDF, je povrchový odtok považován za vysokofrekvenční signály, zatímco základní odtok se považuje za nízkofrekvenční signály. Díky odfiltrování vysokofrekvenčního signálu (povrchový odtok) z celkového odtoku, mohou být odhaleny nízkofrekvenční signály (základní odtok). Výsledek je do značné míry závislý na některých specifických podmínkách povodí. Tyto podmínky vstupují do metod v podobě jednoho nebo více filtračních parametrů. Metoda by proto měla být kalibrována pomocí jiné metody, nejlépe metody založené na přímých měřeních hodnot, potřebných k určení základního odtoku jako např. výška hladiny podzemní vody, chemické složení vody, elektrická vodivost vody a další. Tato data jsou bohužel vzácná a většinou nejsou k dispozici, proto jsou v praxi tyto parametry často určovány libovolně (ZHANG A KOL., 2012; SMAKHTIN, 2001; ECKHARDT, 2005).

Prvními představiteli digitálního filtru byli LINE A HOLLIC (1979) (tato metoda je blíže popsána v kapitole 4.2). Filtr byl dále použit např. NATHANEM A MCMAHONEM (1990), kde byly získány nejpříjemnější výsledky při filtračním parametru v rozmezí 0,90 až 0,95 s optimální hodnotou 0,925 a při třech průjezdech

filtru. Časová řada je filtrována ve třech krocích: vpřed, vzad a znovu vpřed. Stejně tak byl filtr použit *ARNOLDEM A KOL. (1995)*. Filtr dle Lineho a Hollicka použili také *MUGO A SHARMA (1999)*, ale při relativně vysoké hodnotě filtračního parametru 0,977 a jediném průjezdu vpřed. *SPONGBERG (2000)* navrhl filtrační parametr 0,9 - 0,975 pomocí přesně dvou průchodů filtru. Filtr byl také přeformulován *CHAPMANEM A MAXWELLEM (1996)* za použití dvou filtračních parametrů na místo jednoho a následně ještě *CHAPMANEM (1999)* zjednodušen (Chapmanův digitální filtr je blíže popsán v kapitole 4.2). Dalším představitelem digitálního filtru je například *BOUGHTON (1993)*, který používá také dva filtrační parametry na místo jednoho. Výsledky získané metodou digitálního filtru jsou tedy značně závislé na velikosti filtračního parametru a počtu a směru průchodu filtru po časové řadě průtoků. Na obr. č. 4 jsou zobrazeny výsledky jednoho, dvou a tří průchodů filtru přes řadu průtoků, při hodnotě filtračního parametru 0,9 jak bylo použito ve studii *LINEHO A KOL. (2007)*.



Obr. č. 4: Separace hydrogramu jedním, dvěma a třemi průchody digitálního filtru, při použití filtračního parametru 0,9. Zdroj: (*LINA KOL., 2007*)

Metoda UKIH

Další oblíbenou metodou pro svou jednoduchost a nenáročnost na vstupní údaje je separace základního odtoku metodou UKIH, která byla navržena

INSTITUTE OF HYDROLOGY, (1980). Metoda se provádí na řadě po sobě jdoucích průměrných denních průtoků a základem metody je identifikace a interpolace lomových bodů, vybíraných z nepřekrývajících se pětidenních bloků (metoda je podrobně popsána v kapitole 4.2). Metoda byla hodnocena a rozvíjena v mnoha dalších studiích autory jako např. *PIGGOTT A KOL. (2005)*, *AKOSY A KOL. (2009)*, *KOKSELO A KOL. (2012)* a *PETERSEM A VAN LANENEM (2005)*. Na podobném principu funguje také například metoda HYSEP. Jedná se o počítačový program, který napodobuje tři metody ručního dělení hydrogramu (*SLOTO A CROUSE, 1996*). Program je založen na výběru pevných a posuvných intervalů a předpokládá se, že minimální hodnoty v každém intervalu popisují základní odtok v celém intervalu (*ECKHARDT, 2008*).

Metoda minimálních měsíčních průtoků

Principem další metody je stanovení podzemního odtoku na základě nejnižších průtoků v povrchových tocích. Jde o jednoduchý způsob, který vychází z předpokladu, že v době výskytu nejnižších průtoků jsou vodní toky napájeny převážně podzemními vodami (*KŘÍŽ, 1983*). *KILLEHO* metoda (*1970*) vychází z minimálních průměrných denních průtoků v jednotlivých měsících za celé nejméně desetileté období. Metoda je z větší části empirická a je podrobně popsána níže v kap 4.2. Výhodou metody je, že data potřebná k zpracování jsou snadno dostupná a nevyžadují žádné doplňkové údaje, zpracování je poměrně jednoduché a rychlé a proces zpracování, ve srovnání s jinými empirickými metodami, je relativně objektivní a téměř neposkytuje prostor pro subjektivní přístup do té míry, aby např. dva zpracovatelé stejných dat dospěli k výrazněji odlišným výsledkům (*SOMMER, 1985*).

Metoda GROUND

Metoda GROUND byla vypracována *JAINEM (1997)* pro potřebu urychleně a přibližně separovat přímý a základní odtok z malého povodí z datové řady středních denních průtoků v uzávěrovém profilu. Jedná se o jednoduchý koncepční model nenáročný na vstupní data. Je to metoda empirická, odladěná tak, aby separované hydrogramy středních denních odtoků z povodí o ploše 1 km² vypadaly

při posuzování pouhým okem věrohodně. Jeho základním předpokladem je, že pomalá složka odtoku reaguje se zpožděním jednoho časového kroku (obvykle jeden den) při vzestupu celkového odtoku. Začátek vyhodnocovaného období by měl připadnout do málo vodného období, kdy průtok nekolísá. Metoda obsahuje jediný proměnlivý vstupní parametr, koeficient přírůstku základního odtoku. Vstupem je řada denních průtoků a výstupem jsou dvě řady denních průtoků, v pořadí, přímý a podpovrchový odtok z povodí. Metoda je krok po kroku popsána *KULHAVÝM A KOL. (2001)* a je vhodná spíše pro separaci přímého odtoku od zbytku toku (základní a hypodermický), než pro separaci samostatné složky základního odtoku, protože základní odtok sám nemusí okamžitě reagovat na odtok způsobený atmosférickými jevy (*KULHAVÝ A KOL., 2001; DOLEŽAL A KVÍTEK, 2004*).

Metoda MGPM

Metoda MGPM („modifikovaná graficko-početní metoda“), vznikla z potřeby rozčlenit dlouhodobé datové řady středních denních průtoků na složky základního a přímého odtoku při nedostatku doplňujících měření, obvykle k těmto účelům využívaných. Stejně jako u předchozí metody jde o rozčlenění hydrogramu podle zásady, že každá zřetelná odtoková vlna má příčinu v určité srážkové epizodě, přičemž ovšem dílčí příčinné deště na sebe mohou libovolně navazovat. Úkolem algoritmu je separovat tu část odtoku, která je přímou odezvou na příčinnou srážku. Vychází se z toho, že základní odtok má mít plynulý průběh a má kolísat jen pozvolna v závislosti na vývoji dlouhodobé hydrologické bilance povodí. Může být maximálně roven celkovému odtoku v závěrovém profilu (*KULHAVÝ A KOL., 2001*).

2.3.2 METODY ZALOŽENÉ NA VZTAHU MEZI PRŮTOKY V TOKU A STAVY HLADINY PODZEMNÍ VODY

Metody založené na principu jednoduchého rozčlenění hydrogramu i naopak poměrně složitěho hodnocení hydraulického spojení mezi povrchovou a podzemní vodou mají své nedostatky, které mohou být příčinou nesprávného stanovení

velikosti podzemního odtoku. Byly hledány možnosti znamenající zpřesnění výsledků. Jeden ze způsobů úpravy metod rozčlenění hydrogramu je založen na předpokladu, že v případě hydraulické spojitosti mezi povrchovou a podzemní vodou musí být i vzájemná závislost jejich hladin (*SOMMER, 1985*). Proto např. *KLINER A KNĚŽEK (1974)* při rozdělování čáry průtoků na jednotlivé složky přihlíží i k průběhu hladiny mělké podzemní vody v nejbližším vhodném pozorovacím vrtu. *PETERS A VAN LANEN (2005)* navrhli nový filtr, který odhaduje nepřetržité hodnoty základního odtoku, nejen na základě pozorování hladiny podzemních vod ale přihlíží i ke srážkám a celkovému průtoku ve sledovaném uzávěrovém profilu. Jiný způsob rozčlenění hydrogramu spočívá ve využití výsledků měření vydatnosti pramenů, které se nacházejí v povodí toku. Podle průběhu vydatnosti těchto pramenů, jakož i rozdělení srážek se vyznačuje v hydrogramu čára, která jej rozčleňuje na dvě základní složky odtoku (*KŘÍŽ, 1983*).

Změna velikosti plynulého příronu podzemní vody do toku závisí podle Darcyho rovnice ne změnách sklonu hladiny podzemní vody, protože ostatní veličiny v rovnici se v čase nemění. Lze tedy na základě studia kolísání hladiny podzemní vody a průtoků v povrchovém toku za bezsrážkových období, kdy se dá předpokládat, že průtok v toku je tvořen pouze odtokem podzemních vod, sestavit vztah mezi hladinami podzemní vody a průtoky (*URBÁNEK, 1970*). Je patrné, že podzemní odtok je snadnější stanovit pro delší období bez srážek a obtížněji pro období se srážkami, které v územích mírného humidního klimatu jsou časté. Aby bylo možno stanovit podzemní odtok i pro období se srážkami, kdy v celkovém odtoku je zahrnut i odtok povrchový, vynesou se hodnoty podzemního odtoku pro období sucha do korelačního diagramu spolu s odpovídajícími stavy hladiny podzemní vody, ve vhodně zvoleném pozorovacím objektu nebo lépe, několika pozorovacích objektech, tj. pozorování ve vhodně vystrojených vrtech nebo pozorování vydatností pramenů (*ŠILAR, 1996*).

2.3.3 ANALYTICKÉ METODY

Analytické metody jsou obvykle počítány na základě teorií o toku podzemní a

povrchové vody. Příklady těchto teorií je analytické řešení Boussinesqovi rovnice. Separaci základního odtoku analytickými metodami lze snadno provést automaticky. Nicméně analytické metody jsou obvykle založeny na předpokladech ideálních podmínek, které nemusí být vždy pravda (ZHANG A KOL., 2012).

Rozčlenění hydrogramu pomocí čar poklesu průtoků

Výtoková čára je definována jako klesající čára průtoků v období bez srážek, kdy tok je napájen pouze podzemními vodami. Sestrojením typických výtokových čar lze určit průběh odtoku podzemní vody i v období zvýšených povrchových průtoků a provést tak poměrně přesně separaci podzemního a povrchového odtoku. Při tomto postupu provádíme jednak extrapolaci poklesové řady průtoků až k bodu, který leží pod kulminačním bodem povodňové vlny a zpětnou extrapolaci výtokové čáry této povodně až k bodu, který opět leží pod jejím kulminačním bodem. Vzniklý skok, daný zvýšením podzemního odtoku pod kulminačním průtokem, nahradíme vzestupem v čase, volíme jeden i více dní podle charakteru povodí (DUB A KOL., 1969). Graficko-početní způsob sestavení výtokové čáry vychází z dlouhodobých pozorování průtoků. Po analýze bezsrážkových období se vyberou poklesové řady průtoků. Zvolíme vhodně intervaly pro průtok a v jednotlivých průtokových intervalech získáme součtovou čáru, která je průměrnou výtokovou čarou, pro povodí uzavírající se k vyšetřovanému profilu (URBÁNEK, 1970).

Metoda založená na Boussinesqem odvozené rovnici

Základní nelineární diferenciální rovnice pro nestacionární proudění z rozsáhlých vodonosných vrstev k vodnímu korytu toku, byla prezentována např. BOUSSINESQUEM (1877) a MAILLETEM (1905). Rovnice je platná v idealizovaných podmínkách, to znamená bez předpokladu evapotranspirace a ztrát či přibývání vody. Podstatou metod vycházejících z analýzy poklesu průtoků je Boussinesqem odvozená rovnice pro výtokovou čáru ve tvaru:

$$Q_t = \begin{cases} [Q_0^{1-b} - (1-b)at]^{1/(1-b)} & b \neq 1 \\ Q_0 \exp(-at) & b = 1 \end{cases} \quad (2)$$

kde: Q_0 je počáteční hodnota celkového průtoku

a a b jsou koeficienty

Od Boussinesqovi rovnice byla odvozena široká škála teoretických rovnic pro odtok vody ze zvodnělé vrstvy mnoha dalšími autory jako např. *TALLAKSENEM (1995)* a *HUYCKEM A KOL. (2005)*. *SZILAGYI A PARLANGE (1998)* navrhli techniku pěti kroků pro separaci základního odtoku, která vychází z analytického řešení Boussinesqovi rovnice založené na hodnotách pozorovaného průtoku pro jednotlivá povodí. Pro rostoucí část základního odtoku hydrogramu je pro zjednodušení předpokládána lineární funkce. Navrhovaná metoda je založena na řídicí rovnici pro proudění v nasyceném porézním prostředí a na rozdíl od empirických vztahů snižuje počet subjektivních prvků.

Metoda nelineární nádrže

Často jsou dělány jednoduché předpoklady, že základní odtok může být jako odtok ze dvou nebo více paralelních (tj. nezávislých) lineárních nádrží (*LINE A HOLLICK, 1979; BOUGHTON, 1993*). Uplatnění Darcyho vztahu na vodonosnou vrstvu a numerické analýzy recese soustředěného odtoku ukázaly, že vztah mezi akumulací a odtokem je nelineární, kdy v ideálním případě je odtok úměrný druhé mocnině akumulování podzemních vod. Toto je v rozporu s tradičním pojetím metody lineárních nádrží, která byla poprvé představena *MAILLETEM (1905)*, a je vzhledem ke snadné matematické manipulaci i v budoucnu široce používána. Ve většině toků je však nepravděpodobné, že dynamické podzemní vody mohou být rozděleny tak "úhledně" na samostatné akumulární zóny a tím pravděpodobnější je složení z prostorově proměnného systému hydraulicky komunikujícího póry nebo puklinami. Proto je použití jediné, ale nelineární nádrže považováno za reálnější. Algoritmy nelineární nádrže byly navrženy a zkoušeny na velkém počtu povodích na celém světě (*WITTENBERG, 1999; LIN A KOL., 2007*).

Rovnice recese křivky k určení základního odtoku dle *WITTENBERGA (1999)* je:

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{1/(b-1)} \quad (4)$$

Kde: Q_t je hodnota základního odtoku v čase t

Q_0 je počáteční hodnota celkového průtoku (počátek by měl být stanoven v bezsrážkovém období)

a je koeficient s dimenzí $m^{3-3b} s^b$ nebo $mm^{1-b} d^b$

b je bezrozměrný exponent

Hodnoty parametrů a a b jsou kalibrovány interační metodou nejmenších čtverců z vybraných hodnot recese (WITTENBERG A SIVAPALAN, 1999). Výpočet začíná na poslední hodnotě časové řady a postupuje zpět podél časové osy. Základní odtok v čase $t - \Delta t$ se určí ze základního odtoku v čase t podle rovnice (5), odvozené od rovnice (4).

$$Q_{t-\Delta t} = \left[Q_t^{b-1} + \frac{t(b-1)}{ab} \right]^{1/(b-1)} \quad (5)$$

Kde: Δt je interval jednoho časového kroku (obvykle 1 den)

Metoda založená na infiltrační kapacitě Horton křivky

Mnoho rovnic bylo navrženo pro odhad velikosti infiltrace jako např. HORTONEM (1940) a LINEM A KOL. (2007). Většina z těchto metod je založena na předpokladu, že intenzita deště překročí infiltrační kapacitu a některé vyžadují vysoce specifické místní údaje, které jsou obtížně získatelné. Nejznámější a nejpoužívanější metoda pro výpočet infiltrační kapacity půdy je pomocí modelu Horton. LIN A KOL. (2007) navrhly a odzkoušeli novou separační metodu hydrogramu základního odtok, založenou na schopnosti infiltrační kapacity Horton křivky. Byly odvozeny matematické výrazy tří parametrů z hlediska srážkových a odtokových dat: průměrné infiltrační kapacita Horton křivky v povodí, interval

zpoždění efektivních srážek v nenasycené zóně, a rovnice směru proudění podzemních vod. Výhody navrhované metody jsou, že infiltrační kapacita Horton křivky používá pouze tři parametry pro stanovení základního odtoku, proto je snadno použitelná. Metoda také může snížit některé subjektivní aspekty pro rostoucí větve hydrogramu základního odtoku. Navrhovaná metoda je v souladu s hydrologickými fyzikálními procesy a je srovnatelná s posledními dostupnými metodami separace hydrogramu, a je užitečná pro analýzu jednotky hydrogramu a pro studium srážko-odtokového vztahu.

2.3.4 METODY VYCHÁZEJÍCÍ Z HMOTNOSTNÍ BILANCE VODY (TRACEROVÉ METODY)

Metody hmotnostní bilance vody jsou založeny na předpokladu, že základní odtok má zpravidla odlišné chemické vlastnosti ve srovnání s povrchovým odtokem z důvodu různých průtokových cest těchto dvou typů toků. Díky měření základních koncentrací ve vodě je možné jednotlivé složky odtoku oddělit. Metody hmotnostní bilance tedy vyžadují kromě údajů o průtocích také skutečné hodnoty koncentrací, které nejsou běžně k dispozici, a to zejména po dobu delších období. Navíc potřeba sbírat a analyzovat koncentrace ve vodě také značně zvyšuje náklady spojené se separací složek. Z tohoto důvodu je použití těchto metod pro dlouhá období nebo velká území nepraktické (ZHANG A KOL., 2012). Běžně se ke zkoumání odtoku a dalších procesů v povodí používají přirozeně se vyskytující stopovací látky. Pro stanovení původu odtokových složek jsou používány například různé hydrochemické stopovací látky, pH vody, elektrická vodivost vody nebo koncentrace různých aniontů a kationtů (HOEK A KOL., 2000).

Jako chemické stopovací látky mohou být použity ionty, které buď nejsou obsaženy v dešťové vodě, nebo se v ní vyskytují jen v malých koncentracích, např. SiO_2 , D, Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} a další (PEKÁROVÁ A PEKÁR, 1996). Například chemické složení odtokových složek může být také závislé na okyselení povrchových vod. Kyselosti, které nakonec dosáhne celkový odtok závisí na zředění

vody povrchové vodou podzemní (*HOEK A KOL., 2000*).

Možnost separace základního odtoku analýzou obsahu přírodních izotopů (radioaktivních i stabilních) ve srážkách, v půdní a podzemní vodě i v odtoku je velmi účinná, ale nákladná. Přírodní izotopy jako $\delta^{18}\text{O}$ a δD - deuterium jsou stále více používány k separaci zvýšeného průtoku na složku způsobenou srážkovou událostí (příp. táním) a složku dotovanou základním odtokem, za účelem objasnění zdrojů cest a doby zdržení vody v povodích (*BUTTLE A KOL., 1995*). Tyto metody separace jsou využívány mnoha dalšími autory jako např. *GIBSON A KOL. (2000)*, který provedl tří - komponentní separaci hydrogramu pomocí dvou stopovacích prvků $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$. *LION A KOL. (2009)* použili pro tří - komponentní separaci $\delta^{18}\text{O}$ a δD . *CAREY A QUINTON (2005)* provedli dvou – komponentní separace hydrogramu pomocí $\delta^{18}\text{O}$ a tří – komponentní pomocí izotopů a hydrochemických stopovacích látek $\delta^{18}\text{O}$ – DOC a $\delta^{18}\text{O}$ – SpC. Jedná se o kombinaci přírodního izotopu a chemické stopovací látky. Např. *HEOK A KOL. (2000)* ve své studii rozdělili odtok do tří různých odtokových složek také pomocí kombinace $\delta^{18}\text{O}$ a rozpuštěného křemene CO^2 .

Další populární metodu hmotnostní bilance použil *ZHANG A KOL. (2012)* a to metodu elektrické vodivosti vody. Specifická vodivost celkového průtoku vody je komplexním indexem složení chemických látek ve vodě. Obecně platí, že vodivost podzemní vody je podstatně větší než vody povrchové, proto může být vodivost použita jako přírodní ukazatel zdrojů toků. Teoreticky má povrchový odtok nižší vodivost než základní protože voda prosakující půdou a podložím hromadí vyšší koncentrace iontů. Metoda oddělení základního odtoku pomocí elektrické vodivosti vody je považována za objektivní, protože je založena na specifických fyzikálních procesech probíhajících v povodí. Protože kontinuální měření vodivosti průtoku je obtížné, nejsou dlouhodobé záznamy vodivosti k dispozici. Tato skutečnost omezuje použití této metody metody pro dlouhá období.

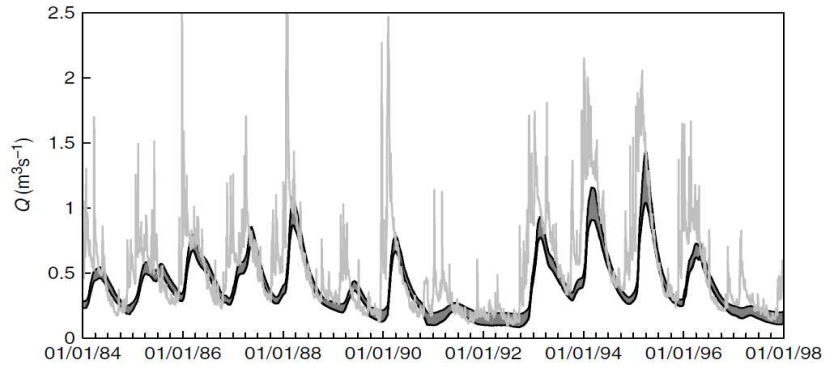
2.4 POROVNÁNÍ METOD SEPARACE ZÁKLADNÍHO ODTOKU

Separace odtoku na dvě nebo více složek s sebou nese problémy. Za prvé, definovat jednotlivé složky odtoku (základní, hypodermický a přímý, případně odtok podpovrchový a povrchový) není jednoduché (NATHAN A MCMAHON, 1990; CHAPMAN, 1999; PETERSEM A VAN LANENEM, 2005). Někteří autoři definují základní odtok jako součást soustředěného odtoku, kterou neovlivňují přímé srážkové události (celkový odtok mínus rychlá složka odtoku). Často je však základní odtok interpretována jako odtok podzemní vody a nezahrnuje odtok hypodermický (NATHAN A MCMAHON, 1990; WITTENBERG A SIVAPALAN, 1999). Druhým problémem, který vzniká při separaci základního odtoku je, že mnoho metod je založeno na analýze recesí toku, pro které jsou velmi těžko odhadnutelné konstatnty. Tyto poklesy toku jsou ovlivněny mnoha aspekty, např. evapotranspirace, akumulace, výskyt několika akumulčních zón namísto jedné, zadržení v nenasycené zóně, zvýšení hladiny podzemních vod, změny v podzemním proudění vody, infiltrace srážek a další. Při rozčleňování hydrogramu na dvě hlavní složky se používá několik odlišných metod, které však přihlížejí pouze k některým činitelům ovlivňujícím odtokový proces (KŘÍŽ, 1983; TALLAKSEN, 1995; PETERSEM A VAN LANENEM, 2005). ECKHARDT (2008) provedl souhrnné srovnání indexů základního odtoku na 65 povodí Severní Ameriky, které byly vypočteny sedmi různými metodami oddělení základního odtoku, ale vzhledem k tomu, že skutečné hodnoty indexu základního odtoku nejsou známy, nelze říci která z metod poskytuje nejlepší odhady.

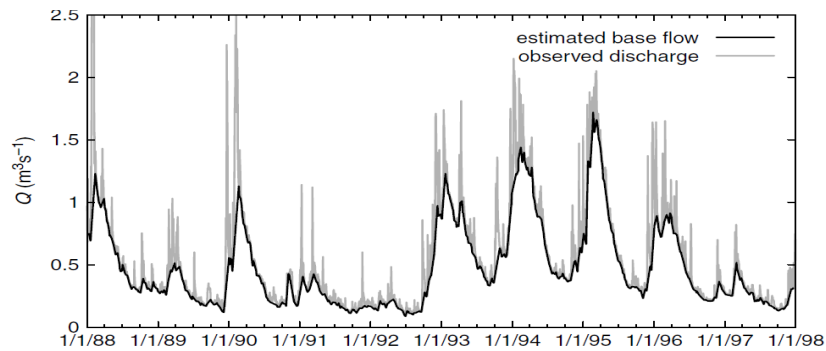
Porovnání dvou metod přihlížejících a dvou nepřihlížejících k hladině podzemních vod

PETERSEM A VAN LANENEM (2005) byla navržena nová metoda separace základního odtoku založená na vztahu mezi průtoky v toku a hladinou podzemních vod (viz kapitola 2.3.2). Metoda byla porovnána se třemi dalšími metodami v povodí Pang, v Oxfortu, ve Spojeném království.

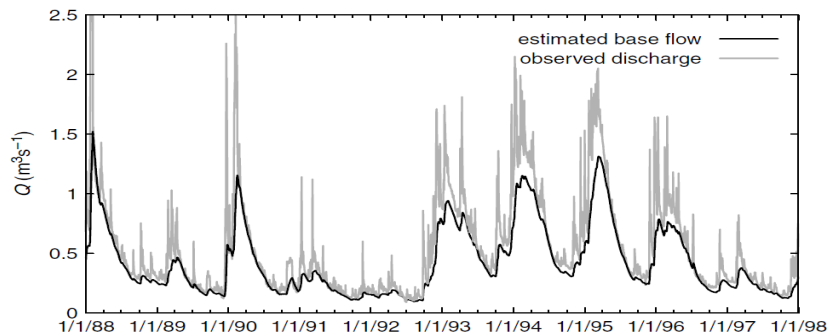
Metoda *PETERSE A VAN LANENA* (2005): **BFI = 67,3 – 77,4 %**



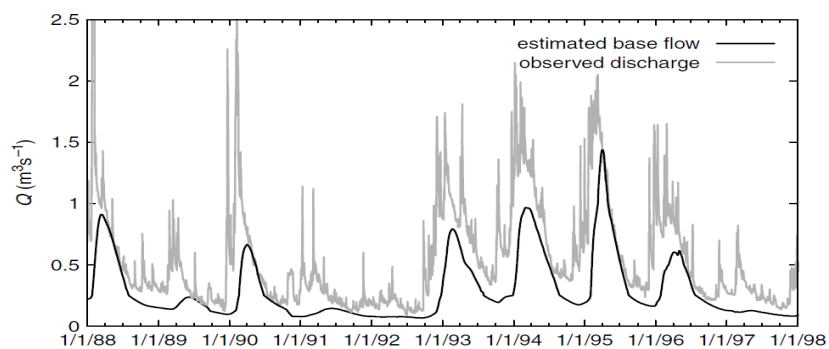
Metoda *UKIH (INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980)*: **BFI = 87,0 %**



Metoda *BOUGHTONOVA* digitálního filtru (1993): **BFI = 77,5 %**



Metoda *KLINERA A KNĚŽKA* (1974): **BFI = 54,8 %**



Obr. č. 5: Separace základního odtoku pomocí dvou metod přihlížejících a dvou nepřihlížejících k hladině podzemních vod. U každé metody je určena hodnota BFI (sledované období 1973–97).

Zdroj: (*PETERS A VAN LANEN, 2005*)

Separace základního odtoku byla tedy provedena pomocí čtyř metod:

- metoda navržená *PETERSEM A VAN LANENEM (2005)*,
- metoda UKIH (*INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980*) (viz kapitola 4.2),
- metoda *BOUGHTONOVA* digitálního filtru (*1993*) (viz kapitola 2.3.1) a
- metoda *KLINERA A KNĚŽKA (1974)* (viz kapitola 2.3.2).

Rozdíly mezi stanovenými hodnotami základního odtoku různými metodami jsou značné, nejvyšší hodnoty základního odtoku dává metoda UKIH a naopak nejnižší metoda Klinera a Kněžka (obr. č. 5). Velké rozdíly jsou také v časovém vývoji hydrogramu. Metody založené na přihlížení k hladině podzemní vody ukazují, že zvýšení základního odtoku je značně zpožděné oproti zvýšení celkového průtoku. To znamená, že metoda UKIH, a do jisté míry i Boughtonův filtru, obsahuje část hipodermického odtoku v odtoku základním. Hlavní rozdíl mezi metodami založenými na pozorování hladiny podzemních vod, je v tom, že způsob Klinera a Kněžka dává na rozdíl od nové metody navržené Petersem a van Lanenem, minimální hodnoty základního odtoku. Proto odhady základního odtoku metodou Klinera a Kněžka jsou trvale nižší. Nevýhodou metody Peterse a van Lanena jsou vysoké požadavky na údaje a potřeba kalibrace. Použití metody v praxi také může omezit, potřeba měření hladiny podzemní vody s dostatečnou prostorovou a časovou variabilitou.

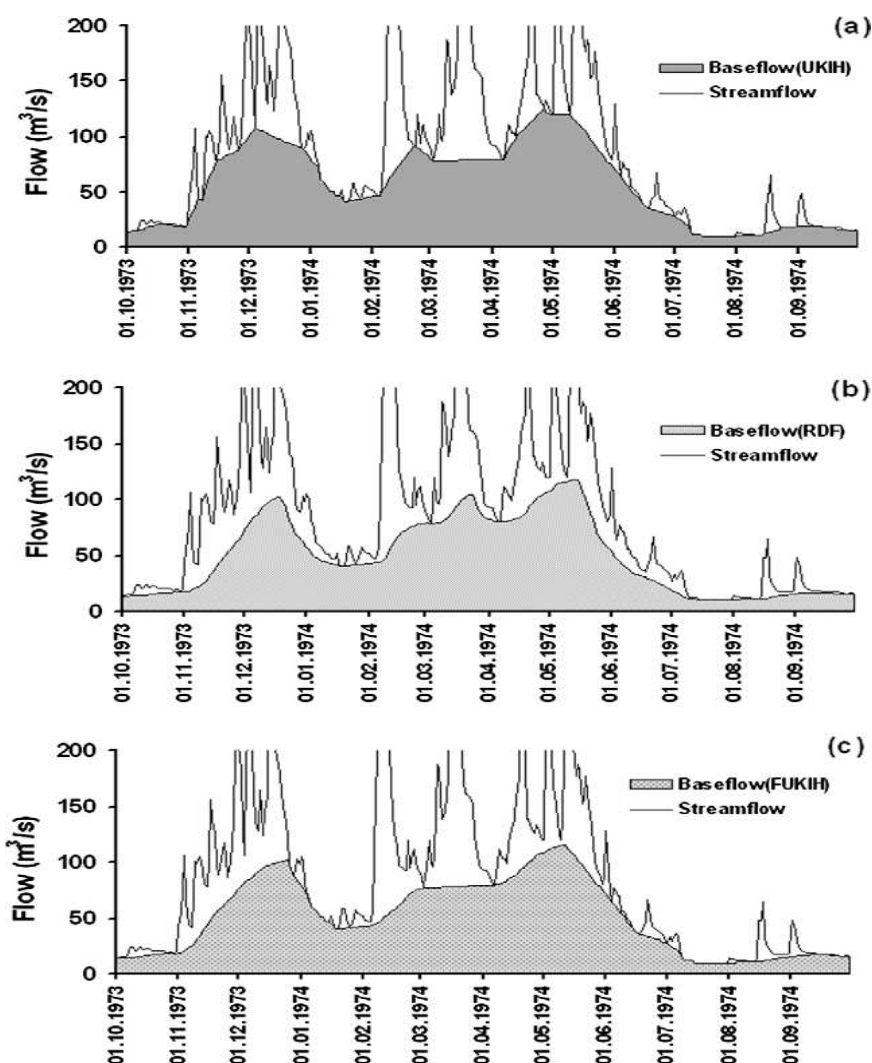
Porovnání metod separace hydrogramu – UKIH, RDF a FUKIH.

AKOSY A KOL. (2009) použili ve své práci kombinaci dvou metod separace základního odtoku pro dosažení realističtějšího tvaru křivky základního odtoku. Kombinací metody UKIH s metodou RDF vzniká nová metoda nazvaná FUKIH (všechny tři metody jsou popsány v kapitole 4.2). Na obr. č. 6 je zobrazena separace základního odtoku třemi zmíněnými metodami:

- metoda UKIH (*INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980*),
- metoda RDF navržená *LINE A HOLLICKEM (1979)* a
- metoda FUKIH navržená *AKOSY A KOL. (2009)*.

AKOSY A KOL. (2009) aplikoval tyto metody pro separaci hydrogramu v období hydrologického roku 1992 v Turecku na povodí řeky Filyos v západní části Černého moře. Ačkoli všechny tři sekvence základních odtoků vypadají podobně, v oddělení

základního odtoku metodou UKIH jsou běžné ostré vrcholy vzhledem k lineární interpolaci používané touto metodou. Navíc, při analýze obr. č. 6, je vidět podobnost při vzestupu křivky základního odtoku v listopadu, únoru a dubnu, mezi RDF a FUKIH kde jsou vrcholy základního odtoku zpožděné oproti vrcholům celkového odtoku. Což působí realističtěji vzhledem k tomu, že základní odtok má obecně delší dobu koncentrace oproti povrchovému. Na druhou stranu, v recesi hydrogramu, je chování FUKIH podobné UKIH a navíc se shodují s předpokladem, že v tomto období je tok tvořen převážně základním odtokem. Důležitým výsledkem je tedy to, že metoda FUKIH dává realističtější hodnoty než UKIH při vzestupu a než RDF při recesi.



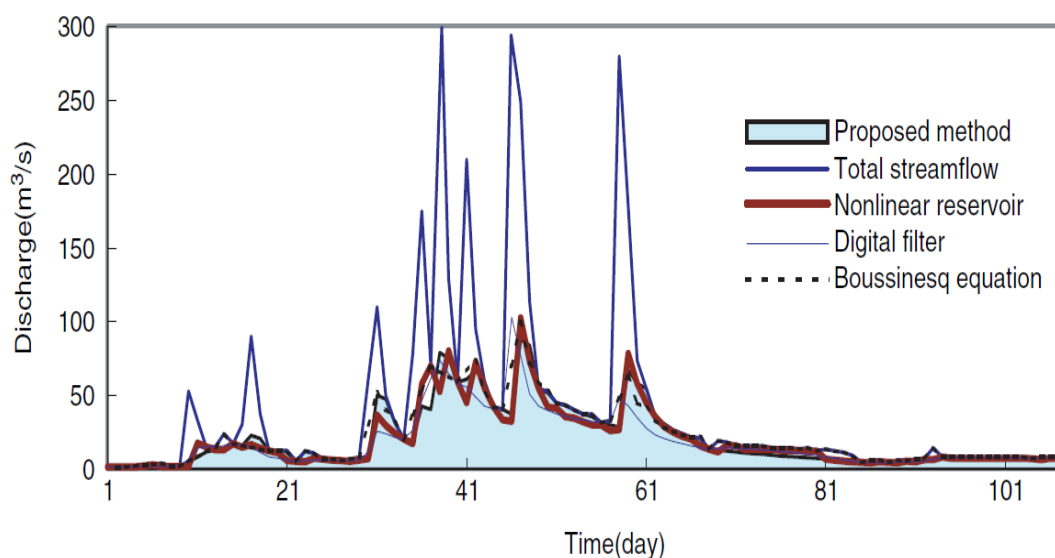
Obr. č. 6: Separace základního odtoku z hydrogramu metodami UKIH(a), RDF(b), a FUKIH(c).

ZDROJ: (AKOSYA KOL., 2009)

Porovnání tří analytických metod a metody digitálního filtru

LINEM A KOL. (2007) byla navržena a odzkoušena metoda separace základního odtoku založená na infiltrační schopnosti Horton křivky (viz kapitola 2.3.3). Tato metoda byla aplikována na čtyři povodí v Číně společně s dalšími metodami separace základního odtoku, které slouží pro porovnání výsledků. Pro separaci základního odtoku byly tedy použity a porovnány čtyři metody:

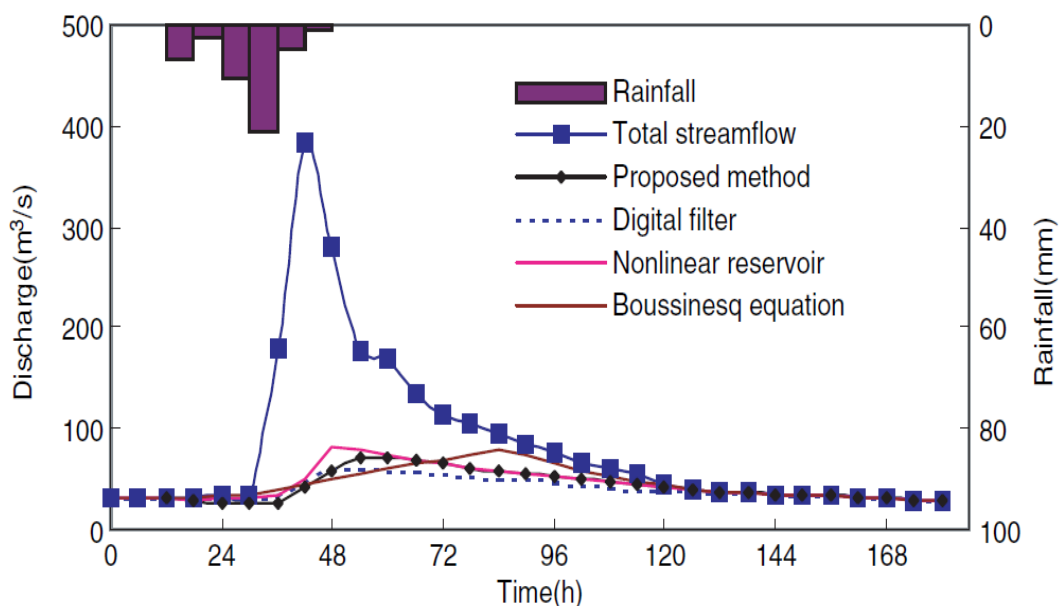
- metoda založená na infiltrační schopnosti Horton křivky,
- digitální filtr dle *LINE A HOLICKA (1979)* (viz kapitola 4.2),
- metoda nelineární nádrže (*WITTENBERG, 1999*) (viz kapitola 2.3.3) a
- metoda založená na řešení Bousinesqovi rovnice (*SZILAGYI A PARLANGE, 1998*) (viz kapitola 2.3.3).



Obr. č. 7: Separace základního odtoku pomocí třech různých analytických metod a metody digitálního filtru. Zdroj: (*LINE A KOL., 2007*)

Separace základního odtoku na povodí Dongwan pro rok 1998 je zobrazena v obr. č. 7. V obr. č. 8 je separace základního odtoku pro povodňovou událost z 27.8.1998. Pro jednotlivé metody byly vypočteny hodnoty BFI. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo metodou digitálního filtru a to 41 %. Pro nelineární nádrž je BFI = 43 %, pro metodu založenou na infiltrační kapacitě Horton křivky 46 % a nejvyšší hodnotu BFI = 48 % dává metoda založená na řešení Bousinesqovi rovnice. Metody digitálního filtru a nelineární nádrže dávají nižší hodnoty než zbylé dvě metody i u dalších třech

povodích studovaných v práci *LINEHO A KOL. (2007)*. Rozdíly mezi metodami jsou i v odhadovaném čase vrcholu základního odtoku. U metody nelineární nádrže je vrchol základního odtoku blízko době vrcholu celkového odtoku, zatímco metoda založená na řešení Bousinesqově rovnici má vrchol základního odtoku blízko době, kdy se povrchový odtok stává nulovým. Zbylé dvě metody mají odhadovaný čas vrcholu základního odtoku mezi oběma uvedenými.



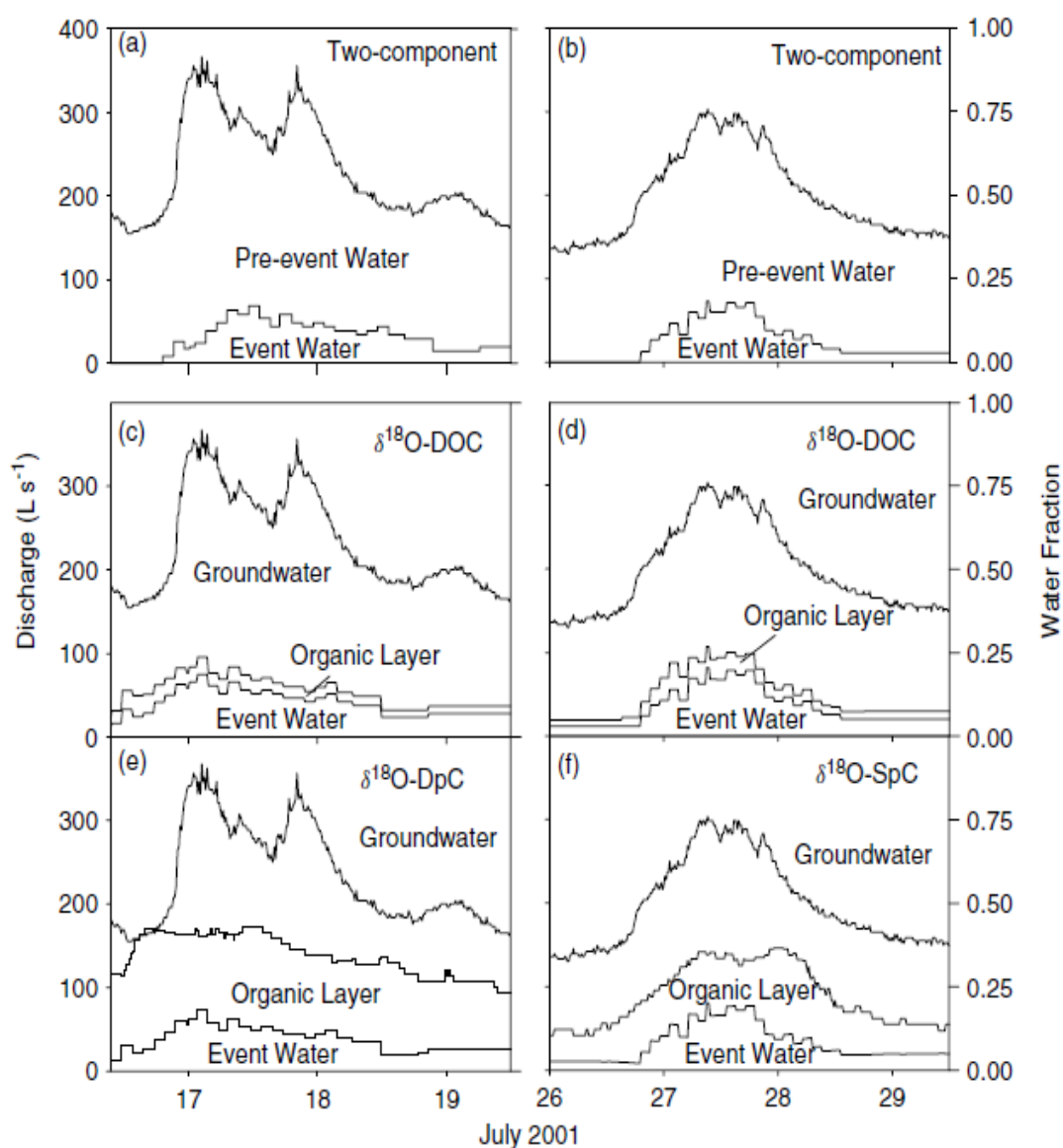
Obr. č. 8: Separace základního odtoku pro jednu povodňovou událost v povodí Dongwan.

Zdroj: (*LINE A KOL., 2007*)

Porovnání metod založených na množství chemických látek a izotopů ve vodě

WELS A KOL. (1991) používají pro separaci hydrogramu chemické a izotopové stopovací látky. Ve své studii zjistili podíl podpovrchové vody v celkovém odtoku při použití metody separace odtoku pomocí chemických stopovačů (SiO_2) 90 % a použití izotopových stopovačů (deuteria $\delta^{18}\text{O}$) pouze 72 % při. To může být vysvětleno skutečností, že při použití deuteria je i určitý podíl vody, která rychle prochází půdním profilem, označen jako voda povrchová. *CAREY A QUINTON (2005)* provedli dvou – komponentní analýzu pomocí $\delta^{18}\text{O}$ a dvě tří - komponentní analýzy pomocí dvojic stopovacích látek, $\delta^{18}\text{O}$ – SpC a $\delta^{18}\text{O}$ – DOC (obr. č. 9). Studovaným územím je povodí Granger, Whitehorse, Kanada. Separace hydrogramu je provedena pro dvě srážkové události 16-20.6.2001 a 26-30.6.2001. Z výsledků dvou i

tří – komponentní analýzy hydrogramu vyplývá, že přímý odtok tvoří průměrně méně než 10% celkového odtoku. Při určení hodnot BFI naznačuje tří - komponentní separace hydrogramu celkového odtoku, že odtok podzemní vody dominuje nad hypodermickým odtokem. Pro $\delta^{18}\text{O}$ – SpC tvoří základní odtok 68 a 77,6% (obr. č. 9 c,d) a pro $\delta^{18}\text{O}$ – DOC 88,3 a 88,2 % (obr. č. 9 e,f). U dvou - komponentní analýzy je určen podpovrchový odtok (podzemní + hypodermický) na 97 a 91 % z celkového (obr. č. 9 a,b). Z hodnot BFI je vidět, že výsledky se značně liší na základě výběru kombinace stopovacích látek.



Obr. č. 9: Separace základního odtoku pomocí izotopů a chemických látek.

Zdroj: (CAREY A QUINTON, 2005)

2.5 KONCENTRACE FOSFORU V PODZEMNÍCH VODÁCH A ZÁKLADNÍM ODTOKU

2.5.1 VÝSKYT FOSFORU VE VODÁCH

Tvorba složení podzemních vod závisí na vzájemném působení atmosférických a povrchových vod, podzemní atmosféry a horninového prostředí. Složení podzemních vod je závislé především na složení půd a hornin, kterými při svém podzemním oběhu probíhají (ŽÁČEK, 1998).

Celkový fosfor ve vodách se dělí na rozpuštěný a nerozpuštěný. Rozpuštěný a nerozpuštěný se dále dělí na anorganicky a organicky vázaný. Rozpuštěný anorganicky vázaný může být ortofosforečnanový (reaktivní) a polyfosforečnanový (nereaktivní) (GRÜNWALD, 1993). Vzhledem k významné chemisorpci fosforečnanů na tuhých fázích se fosforečnany vyskytují ve vodách jen ve velmi malých koncentracích (PITTER, 1999). Do vodních ekosystémů přicházejí fosforečnany ve formě rozpuštěných ortofosforečnanů nebo jejich sraženin, většinou ve formě fosforečnanu železitého (LELLÁK A KUBÍČEK, 1991). V podzemních vodách jde většinou o desetiny miligramu v 1 litru vody, v podzemních vodách neznečištěných i méně (HETEŠA A KOČKOVÁ, 1998). Fosforečnany jsou v půdě zadržovány zejména sorpcí na hlinitokřemičitanech a hydratovaných oxidech železa a manganu. Průměrná koncentrace fosforu v pitných vodách podzemního původu je v Jihočeském kraji asi 0,06 mg/l a ve střeďočeském asi 0,2 mg/l (GRÜNWALD, 1993). Roční přísun fosforu atmosférickými srážkami nepřesáhne 0,5 kg/ha. Průměrné množství celkového fosforu v řekách se uvádí kolem 0,07 mg/l, vlivem odpadních vod a zemědělského znečištění se jeho koncentrace zvyšuje až na několik mg/l (LELLÁK, KUBÍČEK, 1991). Podstatně větší koncentrace fosforu se nacházejí ve splaškových odpadních vodách, kde fosfor pochází jednak z fekálií a jednak z pracích prostředků (PITTER, 1999).

2.5.2 DŮSLEDKY ZVÝŠENÝCH KONCENTRACÍ FOSFORU VE VODÁCH

Zhoršující se podmínky životního prostředí, především kvalita podzemních i povrchových vod, jsou předmětem výzkumného šetření v mnoha státech světa (*KLINER A KOL., 1978*). Jakákoliv kontaminace podzemních, ale i povrchových vod může způsobit riziko pro člověka i pro zvířata a může poškodit akvatické biocenózy. Fosfor je zásadním rizikem pro rozvoj procesu eutrofizace (obohacování vodních ekosystémů živinami, zejména fosforem). Eutrofizace je jednou z nejčastějších příčin ekologického poškození v řekách, jezerech a mokřadech, a fosfor (P) je hlavní limitující živinou v těchto systémech. Jedná se o děj z části přirozený, ale v současnosti je akcelerován člověkem do takové míry, že se stal celosvětově vážným problémem. Nežádoucí projevy eutrofizace jsou primárně masový rozvoj sinic a řas a sekundárně rozkolísaný kyslíkový režim, úhyny ryb, ekonomické ztráty díky omezení rekreace a další (*SONDERGAARD A JEPPESEN, 2007; FIALA A ROSENDORF, 2010; SAMSONOVÁ A KOL., 2005*).

2.5.3 ZDROJE ZVÝŠENÝCH KONCENTRACÍ FOSFORU V PODZEMNÍCH VODÁCH

Pro omezení nežádoucích jevů vznikajících zvýšenými koncentracemi P (viz kapitola 2.5.2) je mimo jiné důležité pochopit způsoby, jakými může být fosfor do vodních ekosystémů dodán (*SONDERGAARD A JEPPESEN, 2007*). Zdroje P lze rozdělit do čtyř různě ovlivnitelných skupin (*FIALA A ROSENDORF, 2010; EDWARDS A WITHERS, 2008*):

- vlastní nádrž (zejména sediment, tzv. interní zdroj),
- bodové zdroje (velké komunální a průmyslové zdroje s kanalizací a ČOV),
- difúzní zdroje – rozptýlené bodové zdroje (samoty, malé obce a farmy bez soustředěného nebo organizovaného odtoku odpadních vod)
- plošné zdroje (zejména odnos ze zemědělské půdy, eroze a atmosférická depozice)

Hlavní zdroje, kterými člověk přispívá ke znečišťování podzemních vod fosforem jsou především aplikace fosforečnatých hnojiv v zemědělství a odpadní vody.

1) Zemědělské půdy (orná a pastviny) - Nepříznivé afekty zemědělství na podzemní a podpovrchové vody jsou do značné míry způsobeny erozí a vyplavováním látek nebo přívalovými vodami. Po mnoho let byl P aplikován na zemědělskou půdu (jako hnojivo a dovezené krmivo pro zvířata) v nadbytečném množství, které rostliny nemohou využít, tento způsob hospodaření vedl mimo jiné k akumulaci P v půdách a následně ke zvýšenému riziku vyluhování P, když dešťová voda nebo voda ze závlah a tání sněhu prostupuje půdou do podzemních vod (*SAMSONOVÁ A KOL., 2005; POOR A McDONNELL, 2007*).

2) Septiky - V mnoha venkovských oblastech, jsou domácnosti připojeny k místnímu systému čištění jako jsou septiky, spíše než k veřejné kanalizaci. Člověk vylučuje denně asi 1,5 g fosforu, který přechází do splaškových odpadních vod. Splaškové vody obsahují však také fosforečnany z pracích a mycích prostředků a tím se specifická produkce fosforu zvyšuje na 2,3 g na obyvatele/den (*PITTER, 1999*). Koncentrace rozpuštěného P v odpadních vodách v septiku může být tedy vyšší jak 38 mg / l (*HOLMAN A KOL., 2008*).

3) Netěsnosti v kanalizaci - Neošetřený odpad může mít celkové koncentrace fosforu mezi 9 a 15 mg/l P, z nichž jedna třetina je v organických formách a dvě třetiny jsou anorganické (*HOLMAN A KOL., 2008*). Největší koncentrace obsahují odpadní vody z prádelen, do kterých se dostávají fosforečnany z pracích prostředků (fosforečnanové prací prostředky mohou obsahovat od 5 do 30% fosfátů) Koncentrace P v odpadních vodách z prádelen mohou být 43 až 68 mg/l (*PITTER, 1999*).

4) Prosakující nádrže s kejdou a skladování hnoje - Pod místem uskladnění hnoje či kejdy může docházet ke značnému vyplavování P do půdního profilu a následně ke znečišťování podzemních vod (*GOODDY, 2002*).

2.5.4 ŘEŠENÍ PROBLÉMU PŘEVODU FOSFORU ZÁKLADNÍM ODTOKEM DO POVRCHOVÝCH VOD

Antropogenní zdroje živin spolu se změnami životního prostředí a klimatu jsou jevy nyní tak všudypřítomné, že žádný vodní systém, nelze považovat za skutečně nedotčený (*EDWARDS A WITHERS, 2008*). Podpovrchový odtok je v transportu P významný především v oblastech s výrazným odvodněním, přičemž závisí také na druhu půd – písčité půdy s nízkou sorpční kapacitou a vysokou hydraulickou konduktivitou snadno propouštějí fosfor, v hlinitých a jílovitých půdách může zase docházet k transportu fosforu preferenčním tokem v makropórech (*BERÁNKOVÁ, 2010*). Dle *KVÍTEKA A KOL. (2008)* nezávisí zranitelnost podzemních vod jen na druhu půdy, ale na mnoha dalších faktorech proto ve své práci popisují výběr kritických lokalit zranitelnosti podpovrchových a podzemních vod z hlediska vyplavování nutrientů. Jedná se o mapy vzniklé kategorizací BPEJ (kategorizace bonitované půdně - ekologické jednotky dle hlavní půdní jednotky, sklonitosti, expozice, skeletovitosti, a hloubky půdy.) a syntetické mapy zranitelnosti půdy a horninového prostředí (míra schopnosti nesaturované zóny propouštět infiltrovanou vodu). Výsledkem je 5 kategorií zranitelnosti podpovrchových a podzemních vod, přičemž maximálně zranitelná je kategorie 1 (s maximální schopností půdy a horninového prostředí infiltrovat srážkovou vodu) a minimálně zranitelná pak kategorie 5.

HEJZLAR A KOL. (2008) ve své práci uvádí rozdělení zdrojů živin v rámci provedené bilanční rovnice v povodí nádrže Orlick, kde se uplatňuje v případě zemědělských zdrojů odnos koncentrací P hlavně podzemním a podpovrchovým odtokem. Koncentrace celkového P však nevykazovaly v kontrolních zemědělských povodích výraznější znečištění.

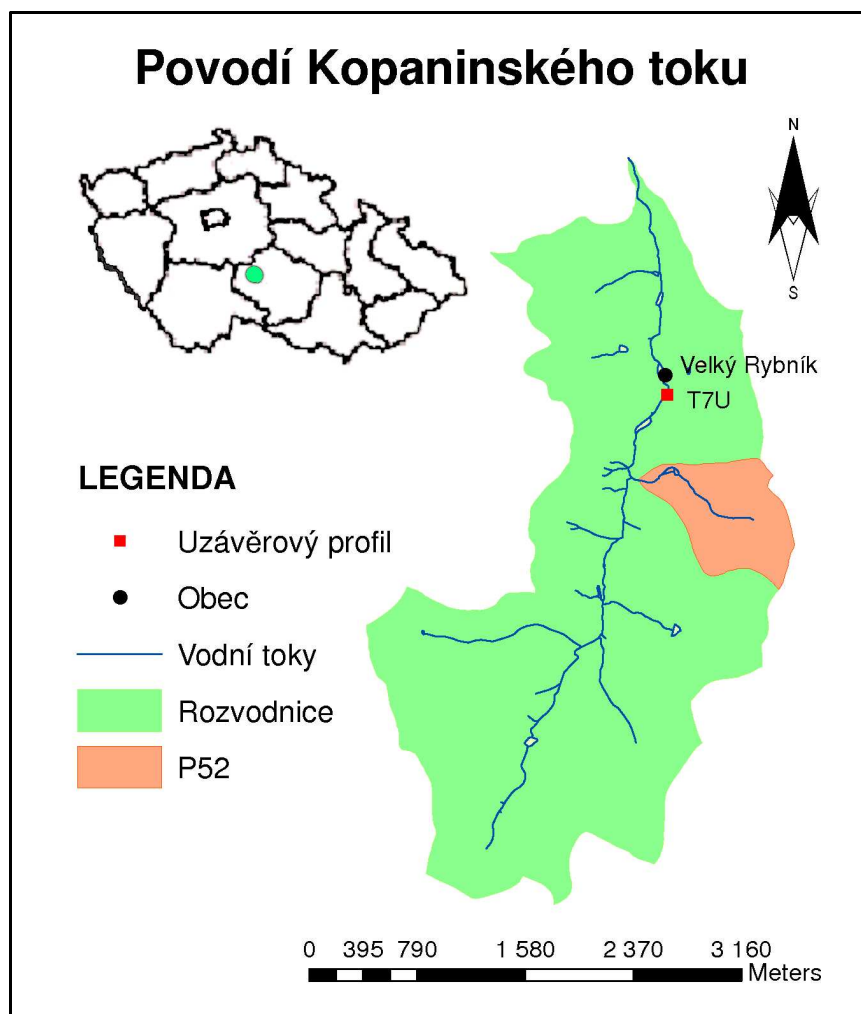
LIŠKA A DURAS (2011) provedli monitoring kvality vody v povodí VN-Švihov a uvádějí sestupný trendem průměrných ročních koncentrací celkového P a PO₄-P v uzávěrových profilech hlavních přítoků VN Švihov. Hlavním zdrojem P v povodí jsou komunální a průmyslové odpadní vody. V devadesátých letech byly u řady stávajících ČOV doplněny terciární stupně čištění (odstraňování fosforu) a proběhla výstavba ČOV i v některých malých obcích. V současné době je proto

produkce fosforu na podstatně nižší úrovni oproti devadesátým letům 20. stol. Je ovšem nezbytné položit si otázku, jak udržet poměrně příznivou situaci i v dlouhodobém výhledu protože řada dříve vybudovaných ČOV vyžaduje intenzifikaci a rekonstrukci. Z tohoto důvodu zde byl proveden orientační odhad z něhož vyplývá, že pro zabezpečení nádrže proti eutrofizaci bude třeba snížit vstup fosforu do VN Švihov přítoky ještě o zhruba 30 %. Je třeba dále zkoumat vstupu fosforu do vod ze zemědělských povodí podpovrchovým odtokem. I přes to, že se sice zatím zdá být tato problematika málo významná, je pořád poměrně málo údajů pro její řešení (*LIŠKA A DURAS, 2011*).

MIRANDA A MATVIENKO (2003) provedli hodnocení přítoku a odtoku fosforu v nádrži Bora ve státě São Paulo v jihovýchodní Brazílii. Bylo zjištěno, že přísun fosforu podzemní vodou (12%) je dvakrát větší než přísun fosforu srážkovými úhrny (6%). Zbýlých 82% P je do nádrže dodáváno přítokem z řeky. Zde je však potřeba vzít v potaz, že v povrchovém přítoku (přítok z řeky) je obsažen fosfor také ze srážek a podzemních vod jehož hodnotu neznáme.

HOLMAN A KOL. (2008) představil mezinárodní hodnocení koncentrací fosforu v podzemních vodách, s použitím dat ze Severního Irska, Skotska, Anglie a Walesu. Vzhledem k faktu, že fosfor je považován za hlavní limitující živinu ve většině sladkovodních ekosystémech, je regulace přítoků fosforu do vodních ekosystémů považována za klíčovou ke snížení eutrofizace a managementu ekologické kvality vody. Hodnocení převodu fosforu přes podzemní vody byla v minulosti věnována velmi malá pozornost a to vzhledem k dlouho držené víře, že adsorpční a kovové komplexní formy zadržují většinu potenciálně mobilního fosforu. Předpokládalo se, že příspěvky P základním odtokem do povrchových vod nejsou důležité, protože většina mobilních forem P - fosforečnanů snadno sorbuje a reaguje s půdou a geologickou matricí, což snižuje jeho pohyblivost zejména v hydrogeologických formacích s dlouhou dobou zadržení vody. *HOLMAN A KOL. (2008)* uvádí, že v každé z hodnocených zemí byly ekologicky-důležité prahové hodnoty fosforu překročeny. Dále je prokázáno, že příspěvky fosforu pro tyto zvýšené koncentrace jsou přinejmenším částečně antropogenní. Výsledky naznačují, že koncentrace P v podzemních vodách jsou takové, že základní odtok může být více důležitý přispěvatel fosforu do povrchových vod, než se myslelo dříve.

3. MATERIÁL



Obr. č 10: Povodí Kopaninského toku a jeho subpovodí P52.

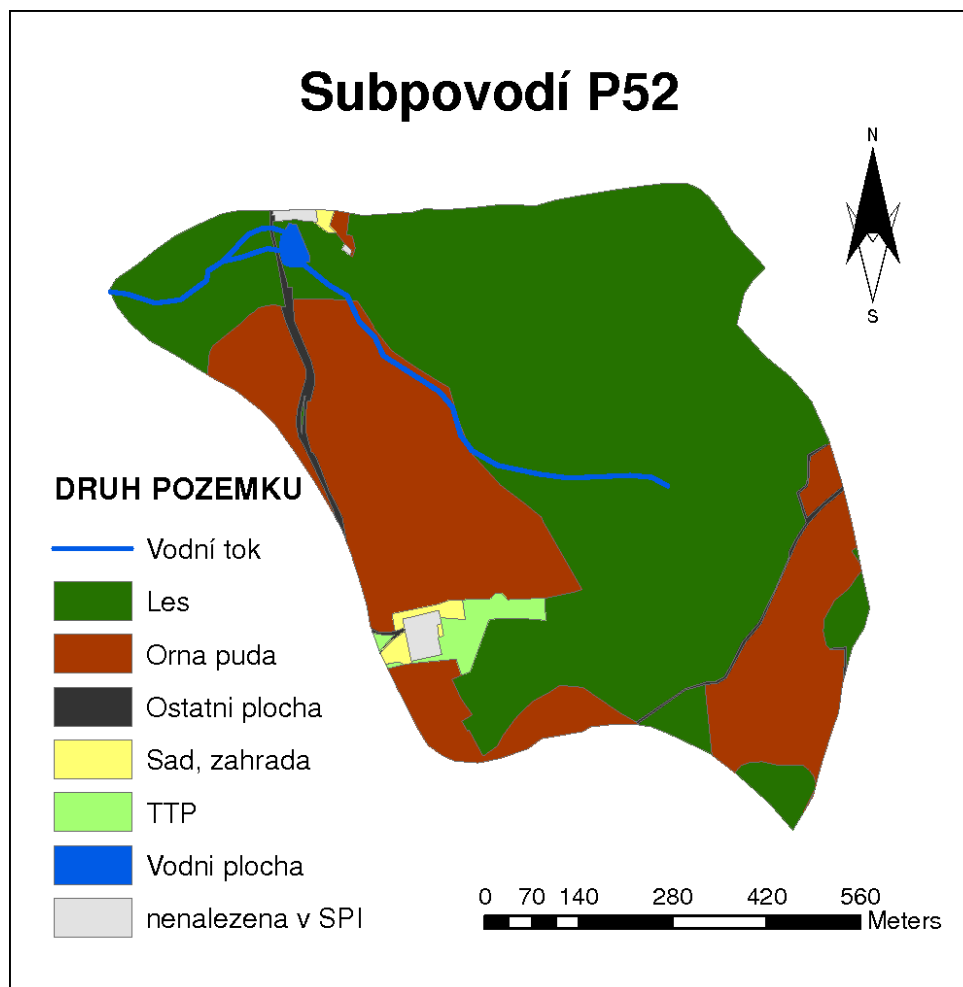
Pokusné povodí Kopaninského toku (obr. č. 10) je sledováno dnešním Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy (dále jen VÚMOP). Jedná se o malé, geomorfologicky členité, zemědělsko-lesní povodí na Českomoravské vrchovině o rozloze 710 ha. Kopaninský tok je levostranným přítokem Jankovského potoka v povodí Želivky. Povodí toku leží v kraji Vysočina, severovýchodně od Pelhřimova ve výseči tvořené silnicemi I. třídy č. 34 a II. třídy č. 602 (průměrná zeměpisná šířka povodí je $49^{\circ}28'$ N, průměrná zeměpisná délka $15^{\circ}17'$ E). Z hlediska geomorfologického patří povodí do oblasti Českomoravské vrchoviny, celku

Křemešnické vrchoviny, podcelků Želivské pahorkatiny a Humpolecké vrchoviny, na rozhraní okrsků Košetické a Vyskytenské pahorkatiny. Povodí Kopaninského potoku je součástí hydrogeologického rajónu 652 – Krystalinikum v povodí Sázavy. Nadmořská výška povodí je 478–620 m.n.m. Délka hlavní údolnice je 4,2 km, a průměrný sklon hlavní údolnice 2,6 %. Odvodněno podpovrchovou drenáží je 10 % území. Srážkový úhrn ve vegetačním období se pohybuje od 350 do 450 mm, v zimních měsících od 250 do 300 mm (KVÍTEK A KOL., 2012). Profil P52 je situován na pravostranném přítoku Kopaninského toku; cca 300 m nad profilem je malý rybníček s kombinovaným požerákem. Zemědělské odvodnění je v lokalitě tvořeno převážně podpovrchovou systematickou drenáží s výustěmi do drobných vodních toků nebo hlavních odvodňovacích zařízení. Sběrné a svodné drény jsou uloženy v hloubkách 0,9–1,1 m a mají světlosti 5–6,5, resp. 6,5–10 cm. Rozchody sběrných drénů se pohybují v rozmezí 8–18 m (FUČÍK A KOL., 2012).

Subpovodí P52 je odvodněné území s velkým zastoupením lesní plochy (obr. č. 11). Celková plocha subpovodí je 64,93 ha a z toho je **31 %** orná půda a **64 %** les (tab. č 1). Průměrná sklonitost povodí je 5,4°.

Tab. č. 1: Subpovodí P52 – využití území.

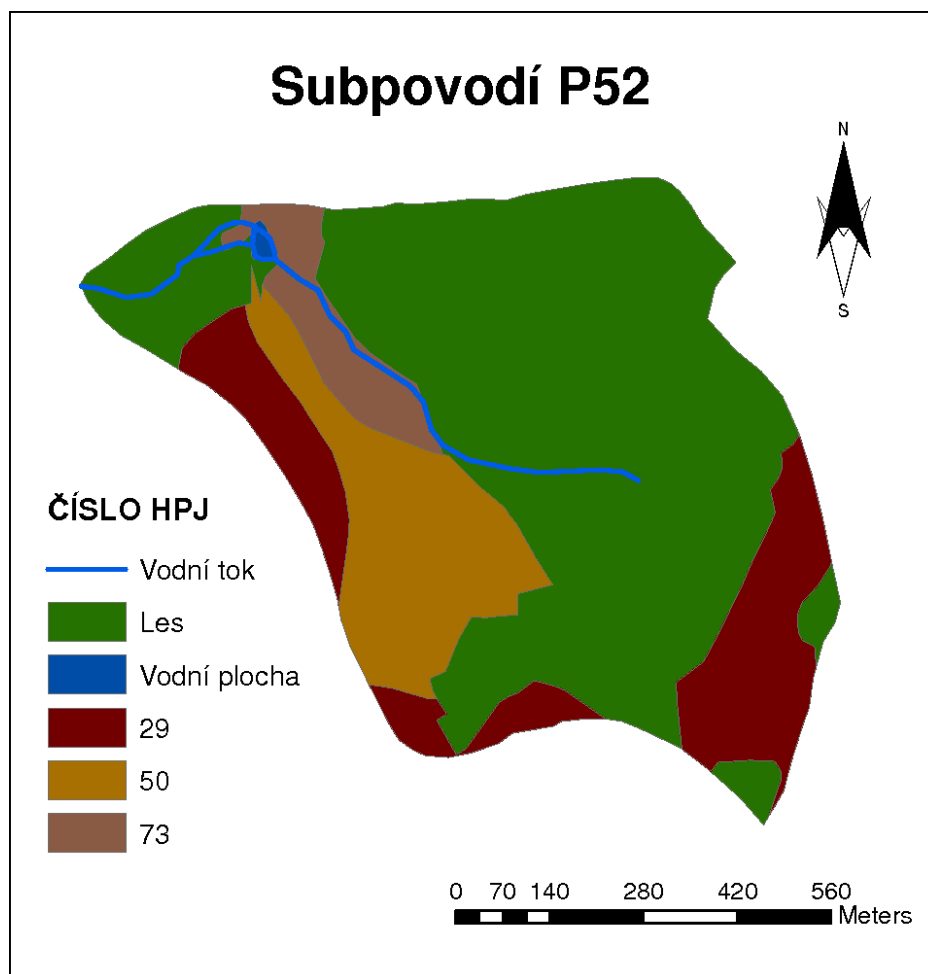
Druh pozemku	[ha]	[%]
Plocha	64,92	100
Orná půda	20,30	31,16
TTP	0,87	1,34
Lesy	41,67	64,29
Vodní plochy	0,17	0,26
Sady a zahrady	0,41	0,63
Zastavěné území	0,44	0,68
Ostatní plochy	1,06	1,64
Drenážní systémy	10,36	16



Obr. č. 11: Subpovodí P52 – využití půdy.

Nejrozšířenějšími půdními typy jsou (obr. č. 12.): HPJ 29 – kambizemě modální, až mezobazické (hnědé půdy a jejich slabě oglejené formy, převážně na žulách). Nacházejí se v horních infiltračních částech povodí. Hladina vody zde nezasahuje do půdního profilu. Půdy mají malou retenční kapacitu pro vodu. Srážková voda rychle prosakuje půdním profilem. Jedná se o půdy velmi kyselé, až kyselé s pH(KCL) 4,5 – 5,5 s nenasyceným sorpčním komplexem a nízkým obsahem humusových látek. HPJ 50 – kambizemě oglejené a pseudogleje modální (hnědé půdy oglejené a oglejené půdy na různých horninách) a HPJ 73 – kambizemě oglejené, pseudogleje glejové, gleje hydroeluviální, gleje povrchové a pseudogleje hydroeluviální (oglejené půdy zbažinělé a glejové půdy svahových poloh). Patří do transportní oblasti povodí. Jedná se o půdy s dobrou retencí případně málo

propustné, až nepropustné. Podzemní voda je v těchto územích většinou napjatá, až tlaková s možností vzniku pramenných vývěřů zejména v jarním období. Z tohoto důvodu byla tato území v 60. až 80. letech odvodněna (ŽLÁBEK, 2009; KVÍTEK A DOLEŽAL, 2003).



Obr. č. 12: Subpovodí P52 – půdní typy.

4. DATA A METODY

4.1 SBĚR DAT

Povodí Kopaninského toku je od roku 1985 provozováno jako Experimentální povodí VÚMOP v.v.i.. V této diplomové práci jsou použita data za hydrologické období 2009 – 2011. Pro separaci odtoku jsou použity denní průtoky z uzávěrového profilu subpovodí Kopaninského toku P52 (bližší popis povodí v kapitole 3.). Měření průtoku VÚMOP probíhá v dolní části trubního propustku pod lesní cestou na měrném přelivu Thomsonova typu (obr. č. 15). Zde je osazena ultrazvuková sonda US1200 měřící výšku vodní hladiny se záznamovou jednotkou M4016 od firmy Fiedler-Mágr (obr. č. 13.).



Obr. č. 13: Sestava pro měření průtoku od firmy Fiedler-Mágr. V popředí ultrazvukový snímač hladiny US1200 se stojanem a v pozadí registrační jednotka M4016.

Zdroj: (<http://www.fiedler-magr.cz/>)

Pro zjištění hodnot koncentrací na profilu P52 je v rámci výzkumného projektu NAZV QH82095 (*KVÍTEK A KOL., 2008*) instalován vzorkovač ISCO (obr. č. 14) od firmy Technoaqua pro kontinuální odběr průměrných denních a událostních vzorků. Vzorkovač je umístěn na podstavci pod krytem, který má zabránit účinku nepříznivých vlivů počasí na přístroj (obr. č. 15). Sací hadice pro odběr vzorků vody je umístěna do dolní části trubního propustku (obr. č. 14).

Vzorkovače ISCO umožňují různé nastavení programů. Na Kopaninském potoku byl na vzorkovačích nastaven dvoudílný program, který zajišťuje současně odběr průměrných denních vzorků a vzorků událostních. Z celkového počtu 24 lahví je zde rezervováno 8 lahví na průměrný denní vzorek, pro událostní vzorky zbývajících 16 kusů lahví. Vzorky vybírány a odváženy do laboratoře na rozbor jedenkrát týdně, pokud není z důvodu události potřeba častěji (KVÍTEK A KOL., 2008).

Časová řada získaných koncentrací zde však není kompletní z důvodu zamrzání techniky v zimních obdobích.



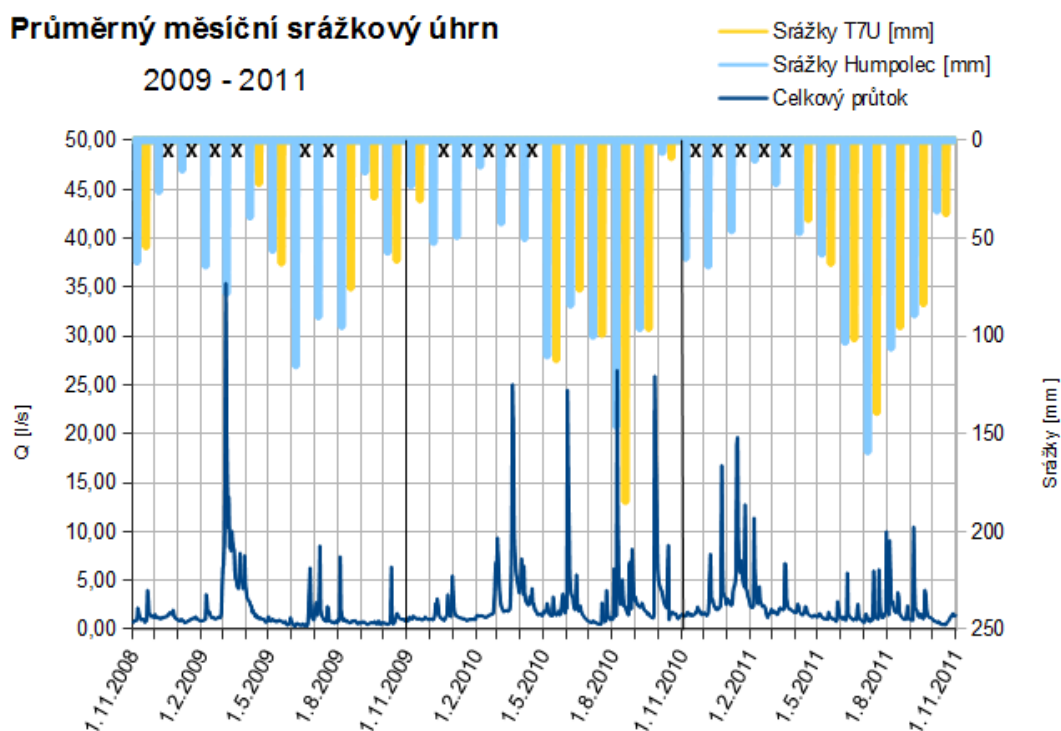
Obr. č. 14: Umístění sací hadice vzorkovače ISCO v trubním propustku Thomsonova typu vlevo. Vzorkovač ISCO od firmy Technoaqua vpravo nahoře a vpravo dole sada 24 kusů vzorkovnic ze spodní části vzorkovače. Zdroj: (KVÍTEK A KOL., 2008)



Obr. č. 15: Thompsonův přepad s ultrazvukovou sondou a dataloggerem vpravo a vzorkovač ISCO pod ochranným krytem vlevo. Zdroj: (KVÍTEK A KOL., 2008)

Dále jsou zde měřeny denní srážkové úhrny ve srážkoměrné stanici Velký Rybník vzdálené zhruba 0,9 km od uzávěrového profilu P52. Zde však není vyhřívaný srážkoměr, proto údaje o srážkových úhrnech v zimních měsících chybí. K dispozici jsou také srážkové úhrny ze srážkoměrné stanice ČHMÚ v Humpolci, ale jedná se pouze o údaje měsíčních úhrnů srážek. Na obr. č. 16 je graf který zobrazuje měsíční srážkové úhrny ze srážkoměrné stanice VÚMOP Velký Rybník a ze srážkoměrné stanice ČHMÚ v Humpolci (vzdálené zhruba o 7 km dál než srážkoměrná stanice Velký Rybník). Křížky jsou označeny měsíce, pro které chybí údaje ze srážkoměrné stanice Velký Rybník. Je zde vidět, že v měsících, kde jsou k dispozici úplné časové řady úhrnů srážek z obou srážkoměrných stanic, není rozdíl ve srážkových úhrnech velký. Lze tedy předpokládat, že i hodnoty v ostatních

měsících budou na obou místech obdobné. Z tohoto důvodu budou v této práci použity srážkové úhrny z obou srážkoměrných stanic, vždy vzhledem k nárokům na podrobnost či úplnost časových řad.



Obr. č. 16: Graf srážkových úhrnů ze srážkoměrné stanice Velký Rybník a Humpolec a reakce průtoku měřeného v uzávěrovém profilu P52.

4.2 METODY SEPARACE ODTOKU

Pro tuto práci je k dispozici řada denních průtoků za tříleté hydrologické období 2009 – 2011. Metody pro separaci základního odtoku, jsou vybrány na základě jejich náročnosti na množství údajů potřebných k provedení separace. Vybrané metody jsou početně zpracovány v programu Microsoft Excel a výsledky jsou převedeny pro názornost do grafů, případně tabulek. Výhodou vybraných metod je jednoduchost jejich provedení a hlavně nenáročnost na vstupních dat.

Metoda UKIH

Separace základního odtoku metodou UKIH byla navržena *INSTITUTE OF HYDROLOGY, (1980)*. Metoda se provádí na řadě po sobě jdoucích průměrných denních průtoků dle těchto kroků:

- 1) Rozdělí se denní průtoková data do nepřekrývajících se pětidenních bloků.
- 2) Vypočte se minimum každého z těchto bloků, neznou se Q_1, Q_2, \dots, Q_t a vezmou se v pořadí $(Q_1, Q_2, Q_3), (Q_2, Q_3, Q_4), \dots, (Q_{t-1}, Q_t, Q_{t+1})$.
- 3) V případě, že je splněna podmínka (6) pro stálé toky nebo podmínka (7) pro toky dočasné:

$$Q_{t-1} > 0,9 Q_t < Q_{t+1} \quad (6)$$

$$Q_{t-1} \geq 0,9 Q_t \leq Q_{t+1} \quad (7)$$

pak je tato prostřední hodnota (Q_t) mezním bodem pro linii základního odtoku. V tomto postupu se pokračuje, dokud není celá časová řada zanalyzována.

- 4) Mezní body se pomocí lineární interpolace spojí přímkami tvořící hydrogram základního odtoku.
- 5) Pokud je některý den, základní odtok odhadnutý vyšší než celkový průtok, základní odtok se v tento den nastaví tak, aby se rovnal celkovému toku.

Metoda RDF dle Line a Hollicka

Metoda rekurzivního digitálního filtru je upravena z teorie zpracování signálu. Filtrováním lze signál rozdělit na nízké a vysoké frekvence. Kde vysokofrekvenční signály představují rychlou složku odtoku a nízkofrekvenční pak pomalou. Prvními představiteli digitálního filtru byli *LINE A HOLLIC (1979)* kteří navrhli rekurzivní digitální filtr, odvozený z analytických studií a běžně používaný k separaci hydrogramu.

$$Q_f(i) = \alpha Q_f(i-1) + (1+\alpha)/2 (Q(i) - Q(i-1)) \quad (8)$$

$$Q_f(i) \leq 0 \quad (9)$$

kde: $Q_f(i)$ je přímá složka odtoku v i -tém dni,

$Q(i)$ je celkový odtok v i -tém dni a

α je filtrační parametr.

Pokud je $Q_f(i) < 0$ nastaví se hodnota v tento den jako $Q_f(i) = 0$. Základní odtok se pak vypočítá jako:

$$Q_b(i) = Q(i) - Q_f(i) \quad (10)$$

Filtrační parametr je v této práci nastaven dle *NATHANA A McMAHONA (1990)* na hodnotou 0,925 při třech průjezdech filtru. Časová řada je filtrována ve třech krocích: vpřed, vzad a znovu vpřed. V druhém kroku při filtrování vzad se začíná na konci časové řady a v rovnici (8) se použije $(i+1)$ místo $(i-1)$. Pro porovnání je zde použit ještě filtrační parametr 0,977, který použili *MUGO A SHARMA (1999)*, ale místo jednoho průjezdu vpřed zde použijeme všechny tři průjezdy (vpřed–vzad–vpřed).

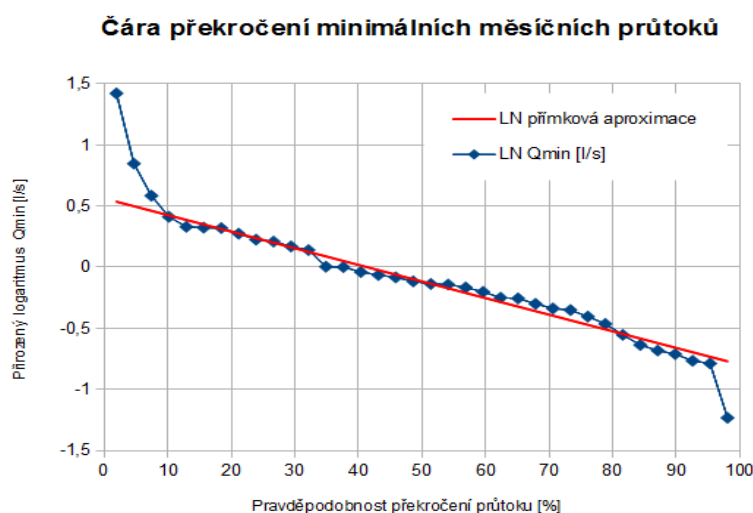
Metoda FUKIH

Metoda je navržena *AKOSYM A KOL. (2009)* a vzniká kombinací metody UKIH s metodou rekurzivního digitálního filtru. Nejprve je provedena separace hydrogramu metodou UKIH a takto vzniklé hodnoty základního odtoku jsou dále ještě filtrovány pomocí metody RDF. Obě metody jsou popsány výše v této kapitole. Při filtrování časové řady průtoků vzniklé metodou UKIH je použit filtrační parametr 0,925 a jeden přechod filtru - vpřed. Pro snížení hodnot základního odtoku je použit ještě filtrační parametr 0,994.

Killeho metoda minimálních měsíčních průtoků

KILLEHO metoda (1970) vychází z minimálních průměrných denních průtoků v jednotlivých měsících. Metoda se provádí na řadě denních průtoků za nejméně desetileté období. Zde však máme k dispozici pouze tříleté období. Základem metody je výběr nejmenšího denních průtoků v každém měsíci. Tyto vybrané hodnoty se seřadí podle velikosti ve vzestupném pořadí a vynesou se v

semilogaritmické síti. Vzniklá křivka je tzv. čarou překročení minimálních měsíčních průtoků (obr. č. 17). Množinu bodů, zejména ve střední a spodní části, tvořících přímou část křivky lze v této soustavě aproximovat přímkou, která je prodloužena i do vyšších hodnot. Průběh množiny bývá tím pravidelnější, čím je zvolené období delší. Hodnoty ležící na této vyrovnávací přímce jsou zlogaritmovanými aproximovanými hodnotami základního odtoku. Po přenesení přímky do lineárního zobrazení vznikne exponenciála, která spolu s osami omezuje plochu představující celkové odteklé množství. Z této hodnoty se pak získá průměrný podzemní odtok za zpracované období. Pro lepší znázornění základního odtoku stanoveného Killeho metodou jsou odlogaritmované hodnoty přímkové aproximace rozříděny dle původního pořadí a vráceny zpět do časové řady průtoků na místo nejmenšího měsíčního průtoků v každém příslušném měsíci. Takto vzniklou řadu lze zobrazit v grafu společně s celkovými denními průtoky.



Obr. č. 17: Čára překročení minimálních měsíčních průtoků. Střední část křivky je aproximována přímkou, která představuje zlogaritmované hodnoty základního odtoku dle Killeho metody.

Metoda digitálního filtru dle Chapmana

Chapmanův digitální filtr je metoda založená na zpracování signálu pomocí následujících rovnic (CHAPMAN 1999):

$$Q_b(i) = \frac{k}{2 - k} Q_b(i - 1) + \frac{1 - k}{2 - k} Q(i) \quad (II)$$

$$Q_b(i) < Q(i) \quad (12)$$

Kde: $Q_b(i)$ je průměrný průtok základního odtoku v i-tém dni

$Q(i)$ je průměrný celkový průtok v i-tém dni

k je bezrozměrný koeficient, je to poklesová konstanta hydrogramu během období bez přímého odtoku.

Při použití digitálního filtru je potřeba odhadnout velikost koeficientu pomocí jiné metody, jako např. analýza poklesové větve, tracerové metody apod., nebo použít již osvědčenou hodnotu koeficientu pro dané specifické podmínky povodí (ŽLÁBEK, 2009). V tomto případě jsme použili na subpovodí Kopaninského toku P52 koeficient $k = 0,99483$. Tato metoda s použitím koeficientu 0,99483 již byl kalibrována a použita na tomto území DOLEŽÁLEM A KVÍTKEM (2004), ŽLÁBKEM (2009), a BYSTRICKÝM (2012).

4.3 STATISTICKÉ METODY

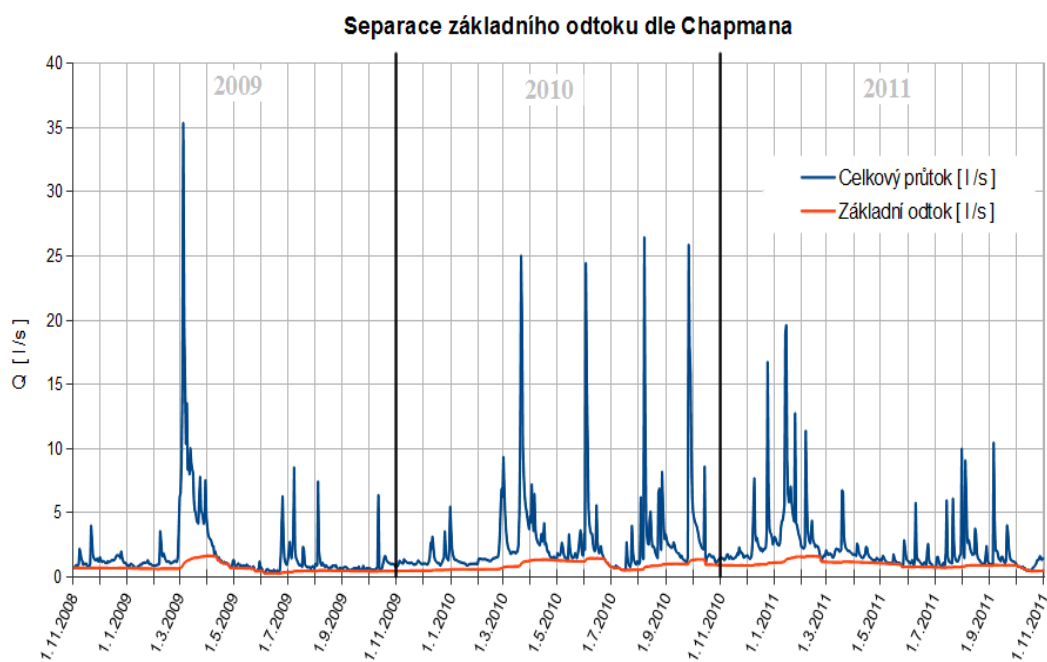
Pro statistické vyhodnocení byla použita jednocestná analýza variance (ANOVA) a dvouvýběrové t-testy proměnných. T-test se používá k porovnání středních hodnot (průměrů) dvou souborů zatímco ANOVA se používá k porovnání více než dvou souborů. ANOVA je technika umožňující posouzení jednotlivých zdrojů variability v datech. Základní myšlenkou analýzy rozptylu je v tomto případě, zda a jak může být v sadě výsledků paralelních stanovení statisticky rozpoznáno rozdělení do skupin. Celkový rozptyl celé sady dat je dán kombinací rozptylu mezi skupinami a uvnitř skupin. ANOVA umožňuje separovat jednotlivé zdroje rozptylu a dílčí rozptyly vzájemně porovnat za účelem určení, zda jsou rozdíly mezi nimi (statisticky) významné. ANOVA je užitečná zejména při analýze dat získaných při plánovaných experimentech (GRAŠKO A KOL., 2008).

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 SEPARACE ZÁKLADNÍHO ODTOKU VYBRANÝMI METODAMI

Metoda digitálního filtru dle Chapmana

Jedná se o metodu vyvinutou z původního rekurzivního digitálního filtru navrženého *LINEM A HOLLICKEM (1979)*. Chapmanova metoda digitálního filtru byla jako jediná z vybraných metod, přímo pro studované povodí kalibrována a použita *DOLEŽÁLEM A KVÍTKEM (2004)*, *ŽLÁBKEM (2009)*, a *BYSTRICKÝM (2012)*. Proto tato metoda bude základem pro další postupy v této práci. Křivka základního odtoku separovaného touto metodou je zobrazena na obr. č. 18.

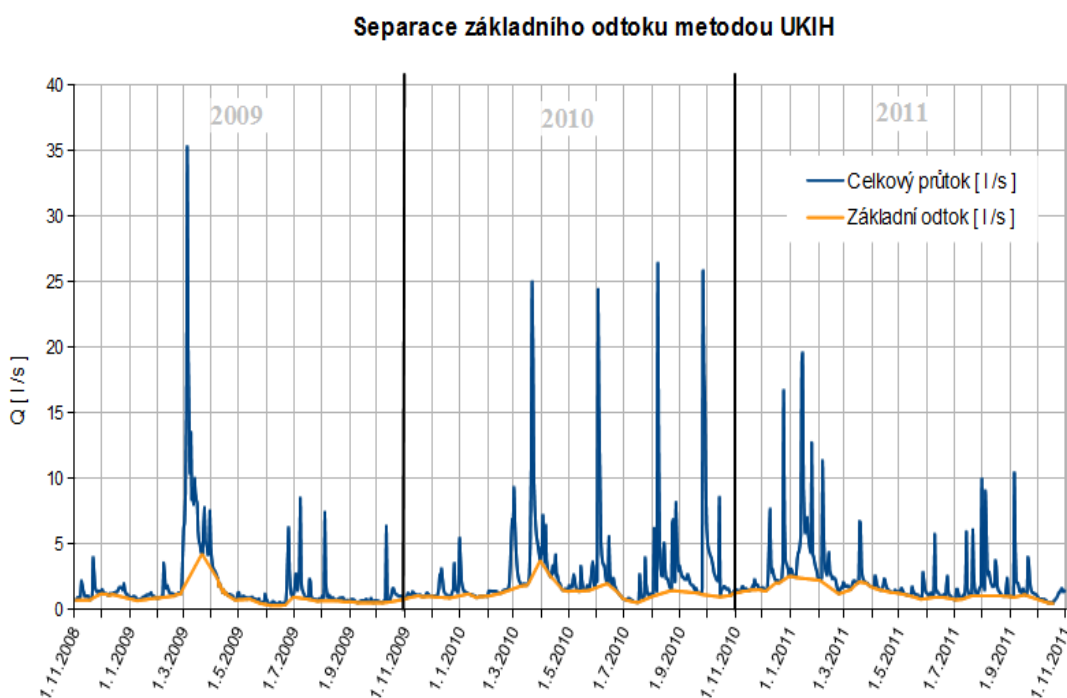


Obr. č. 18: Základní odtok separovaný metodou digitálního filtru dle Chapmana v subpodvodí P52.

Separace základního odtoku metodou UKIH

Na obr. č. 19 je zobrazen základní odtok separovaný metodou UKUH. Jedná se o empirickou metodu navrženou (*INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980*). Metoda

byla použita a přepracována mnoha dalšími autory, jako např. *PIGGOTT A KOL. (2005)*, *AKOSY A KOL. (2009)*, *KOKSELO A KOL. (2012)* a další. Při pohledu na křivku základního odtoku separovaného touto metodou jsou patrné ostré vrcholy min a max hodnot, vzniklé díky lineární interpolaci mezi lomovými body. Křivka základního odtoku proto nevypadá příliš reálně (obr. č. 25).

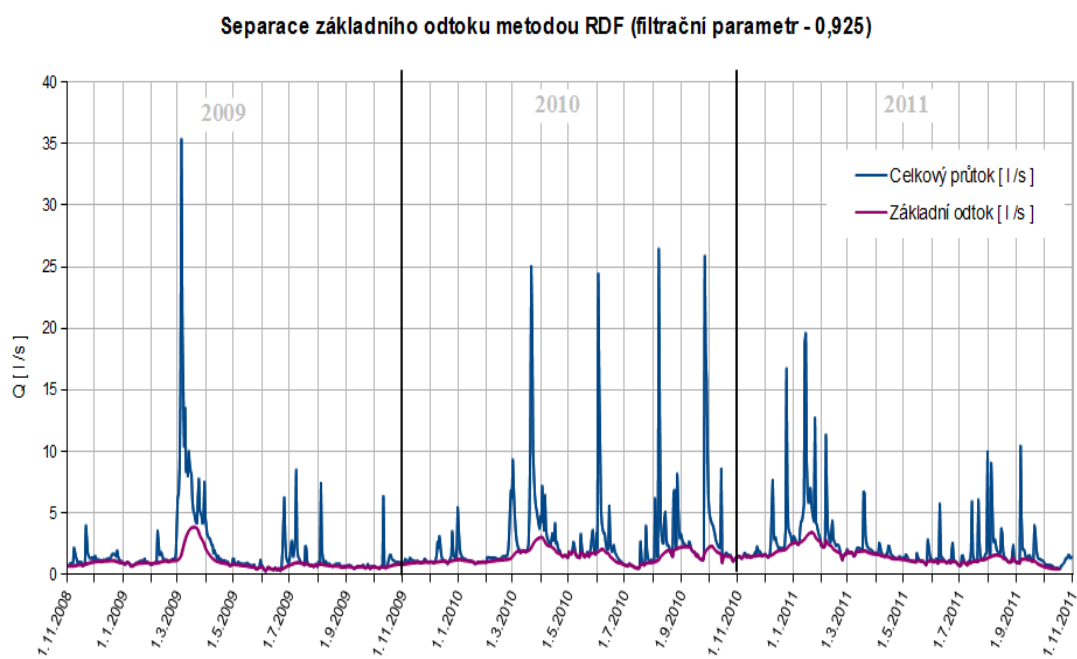


Obr. č. 19: Základní odtok separovaný metodou UKIH v subpodvodí P52.

Separace základního odtoku metodou RDF

Metoda digitálního filtru navržená *LINEM A HOLLICKEM (1979)* je další z nejčastěji používaných metod pro separaci základního odtoku. Vývojem a hodnocením metod digitálních filtrů vycházejících ze zpracování signálu se zabývalo v minulosti mnoho autorů jako např. *NATHAN A MCMAHON (1990)*, *CHAPMANEM A MAXWELLEM (1996)*, *ECKHARDT (2005)* a další. Na obr. č. 20 je zobrazen základní odtok separovaný metodou RDF za použití filtračního parametru 0,925. Průchod filtru je vpřed – vzad – vpřed. Na výsledek má však značný vliv velikostí filtračního parametru a množství a směr průjezdů filtru, jak uvádí např. *ZHANG A KOL. (2012)* a *ECKHARDT (2005)* a jak už bylo řečeno výše

v kapitole 2.3.1. Základní odtok separovaný metodou RDF s filtračním parametrem 0,925 (obr. č. 20) je na první pohled obdobný metodě UKIH. Křivka základního odtoku však vypadá realističtěji protože zde nevznikají ostré vrcholy tak jako u metody UKIH (obr. č. 25).



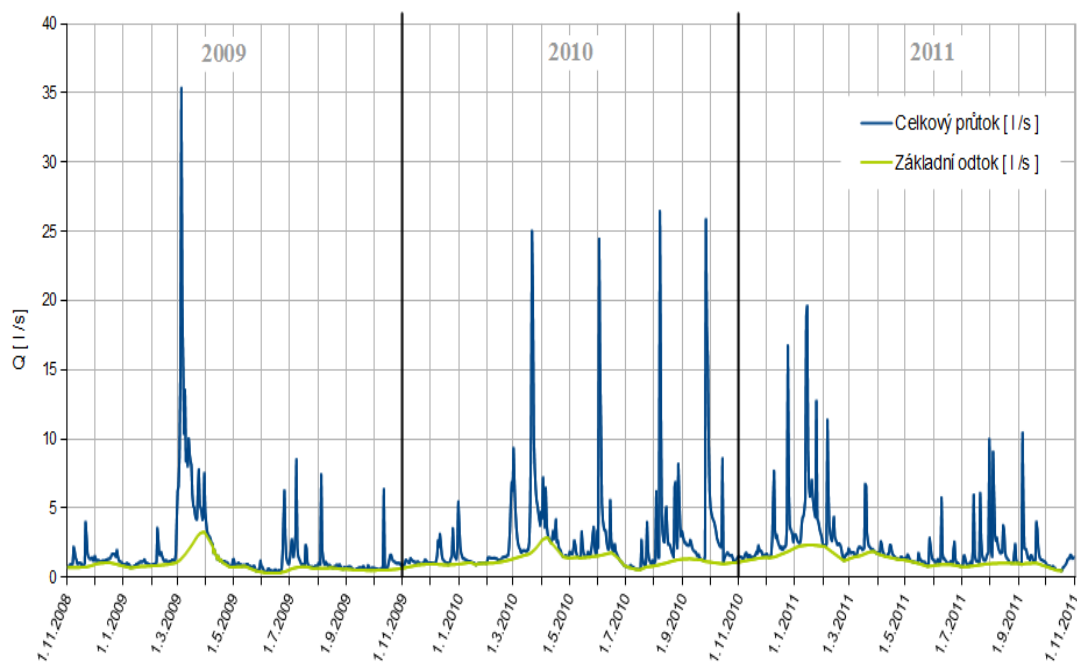
Obr. č. 20: Základní odtok separovaný metodou RDF v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,925 a průchody filtru jsou vpřed-vzad-vpřed.

Separace základního odtoku metodou FUKIH

Metoda FUKIH je navržená *AKOSYM A KOL. (2009)*. Základní odtok separovaný pomocí metody FUKIH a při použití filtračního parametru 0,925 je zobrazen na obr. č. 21. Křivka základního odtoku má na první pohled podobný tvar jako u metody UKIH a RDF. Výhodou této metody však je, že jsou vyhlazeny ostré vrcholy vznikající metodou UKIH a oproti metodě RDF jsou vrcholy základního odtoku časově zpožděné za vrcholy celkového odtoku (obr. č. 25), což je velké plus, protože obecně je známo, že základní odtok má delší dobu koncentrace než celkový odtok (*NATHAN A McMAHON, 1990; AKOSY A KOL., 2009; LINE A KOL., 2007* a další).

Obr. č. 21: Základní odtok separovaný metodou FUKIH v subpodvodí P52. Hodnota filtračního

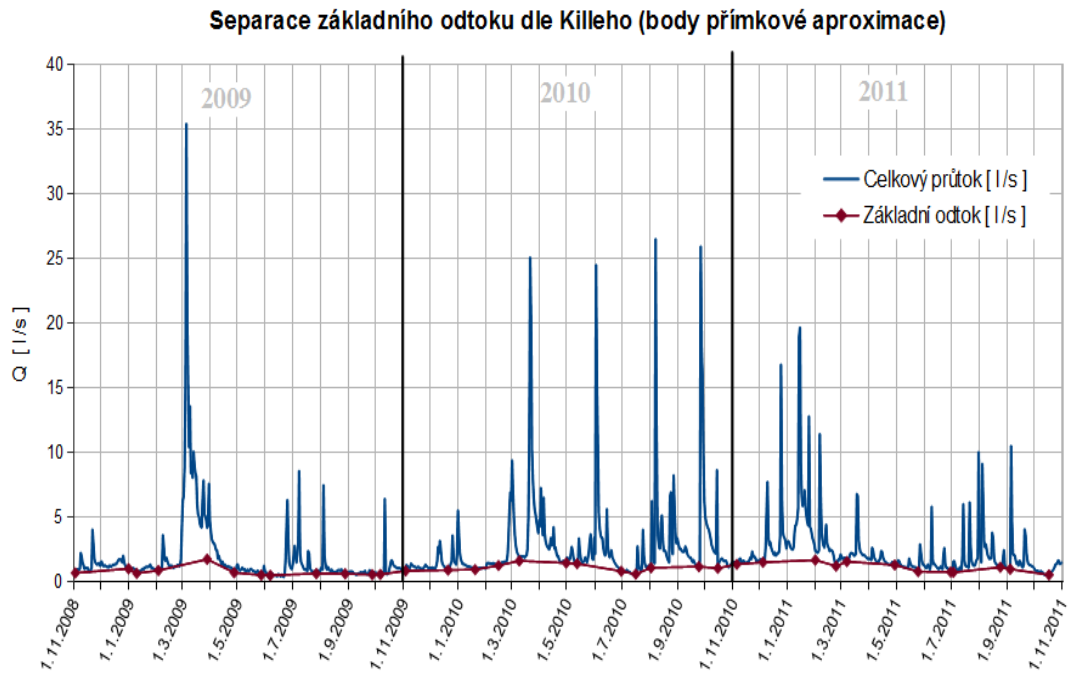
Separace základního odtoku metodou FUKIH (filtrační parametr - 0,925)



parametru je 0,925.

Killeho metoda

Výsledkem separace základního odtoku Killeho metodou není plynulá časová řada denních hodnot základního odtoku, jak je tomu u ostatních metod, ale jsou získány jednotlivé lomové body, které jsou výsledkem přímkové aproximace minimálních měsíčních průtoků. Z tohoto důvodu je metoda minimálních měsíčních průtoků více vhodná pro stanovení dlouhodobého průměrného základního odtoku než pro separaci krátkých časových řad (KILLE, 1970). Lomové body vzniklé touto metodou jsou zobrazeny v obr. č. 22 a pro lepší znázornění jejich průběhu v čase jsou body spojeny přímkami. Křivka základního odtoku, stejně jako u metody UKIH, nevypadá příliš reálně díky ostrým vrcholům v lomových bodech, avšak základní odtok separovaný Killeho metodou dává nižší hodnoty základního odtoku.



Obr. č. 22: Základní odtok separovaný Killeho metodou v subpodvodí P52.

5.2 POROVNÁNÍ METOD

Pro lepší možnost porovnání metod byl vypočítán poměr základního a celkového odtoku (BFI), který udává kolik procent celkového toku tvoří právě základní odtok. Z obr. č. 25 a tabulky hodnot BFI (tab. č. 2) je patrné, že rozdíly mezi metodami jsou značné. Neexistují žádné dvě metody, které by došli ke stejným výsledkům jak ve tvaru a průběhu křivky, tak v hodnotách BFI. Tyto rozdíly jsou způsobené jednak odlišnými způsoby separace, dále zvolenou teorií základního odtoku pro danou metodu a v poslední řadě i subjektivitou některých metod (*PETERSEM A VAN LANENEM, 2005*). Metoda UHIH, RDF a FUKIH mají však společné to, že hodnoty základního odtoku i hodnoty BFI jsou výrazně vyšší (54,59%, 58,80% a 50,17%) než u Killeho metody a metody Chapmanova digitálního filtru (42,76%, 37,91%).

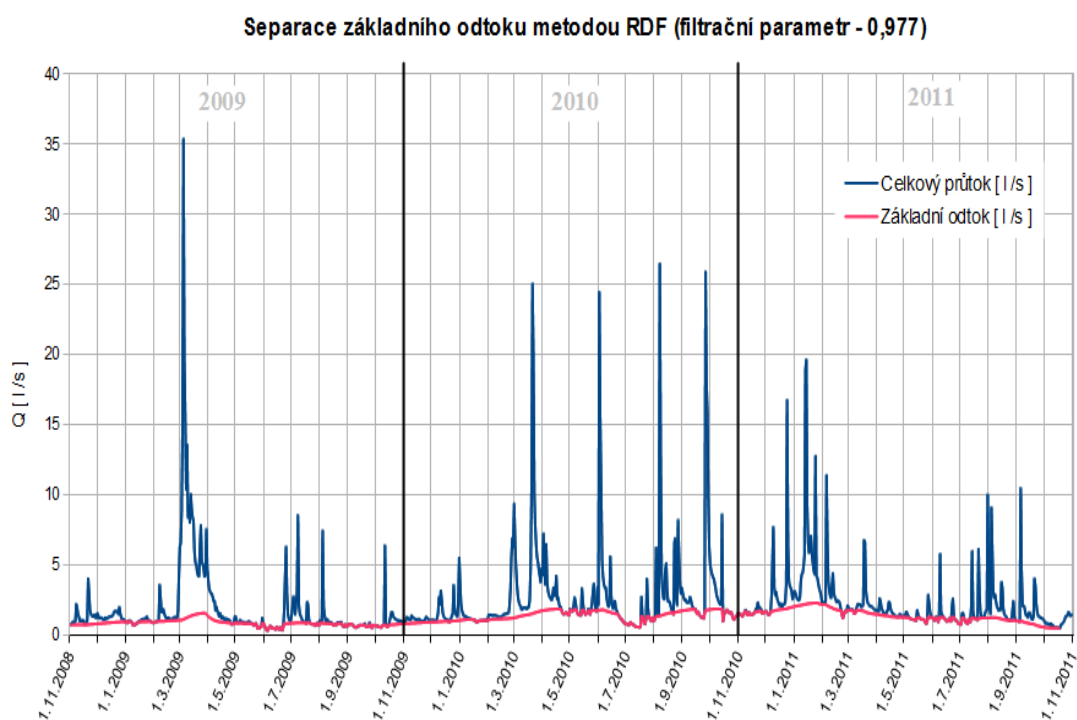
Tab. č. 2: Hodnoty BFI pro jednotlivé metody.

Vybrané metody	Hodnoty BFI v %			
	2009	2010	2011	2009 - 2011
UKIH	55,18	50,18	59,56	54,59
RDF-0,925	55,05	55,29	66,16	58,80
RDH-0,977	45,72	49,76	59,77	51,96
FUKIH-0,925	48,62	45,96	56,55	50,17
FUKIH-0,994	39,90	39,70	51,41	63,60
Kille	39,71	39,77	48,80	42,76
Chapman	37,02	33,37	44,02	37,91

Pokud metody porovnáme s kalibrovanou metodou digitálního filtru dle Chapmana, lze říci že nejpodobnější tvar a průběhem křivky a hodnoty BFI má pouze metoda dle Killeho. Tyto dvě metody odpovídají teorii *NATHANA A McMAHONA (1990)*, že základní odtok je tvořen pouze odtokem ze zásob podzemní vody. Tato teorie je zvolena i pro tuto práci. Zatím co metody UKIH, RDF a FUKIH obsahují v základním odtoku také část hypodermického.

U metody RDF byl vyzkoušen vyšší filtrační parametr a to 0,977 za účelem dosažení nižších hodnot BFI. Hodnota BFI tak byla mírně snížena (51,96%), ale došlo k velkým změnám ve tvaru křivky (obr. č. 23). Hodnoty základního odtoku v obdobích s

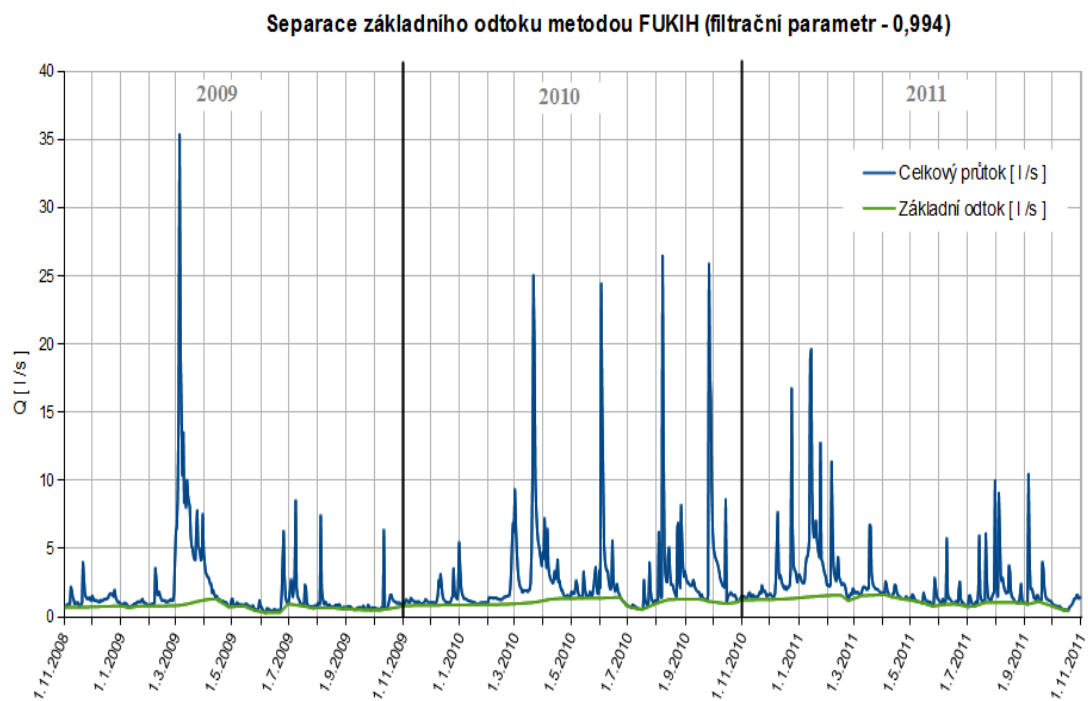
vyššími srážkovými úhrny byly sníženy oproti separaci s filtračním parametrem 0,925, ale v období nízkých nebo žádných srážkových událostí křivka více kopíruje křivku celkového odtoku a dokonce jsou hodnoty základního odtoku v těchto místech vyšší než u separace s filtračním parametrem 0,925 (obr. č. 25, D5). Křivka tak vypadá nereálně a lze z toho usuzovat, že pouhým zvyšováním filtračního parametru u této metody nelze dosáhnout optimálních výsledků pro základní odtok, které by nezahrnovaly i odtok hypodermický.



Obr. č. 23: Základní odtok separovaný metodou RDF v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,975 a průchody filtru jsou vpřed-vzad-vpřed.

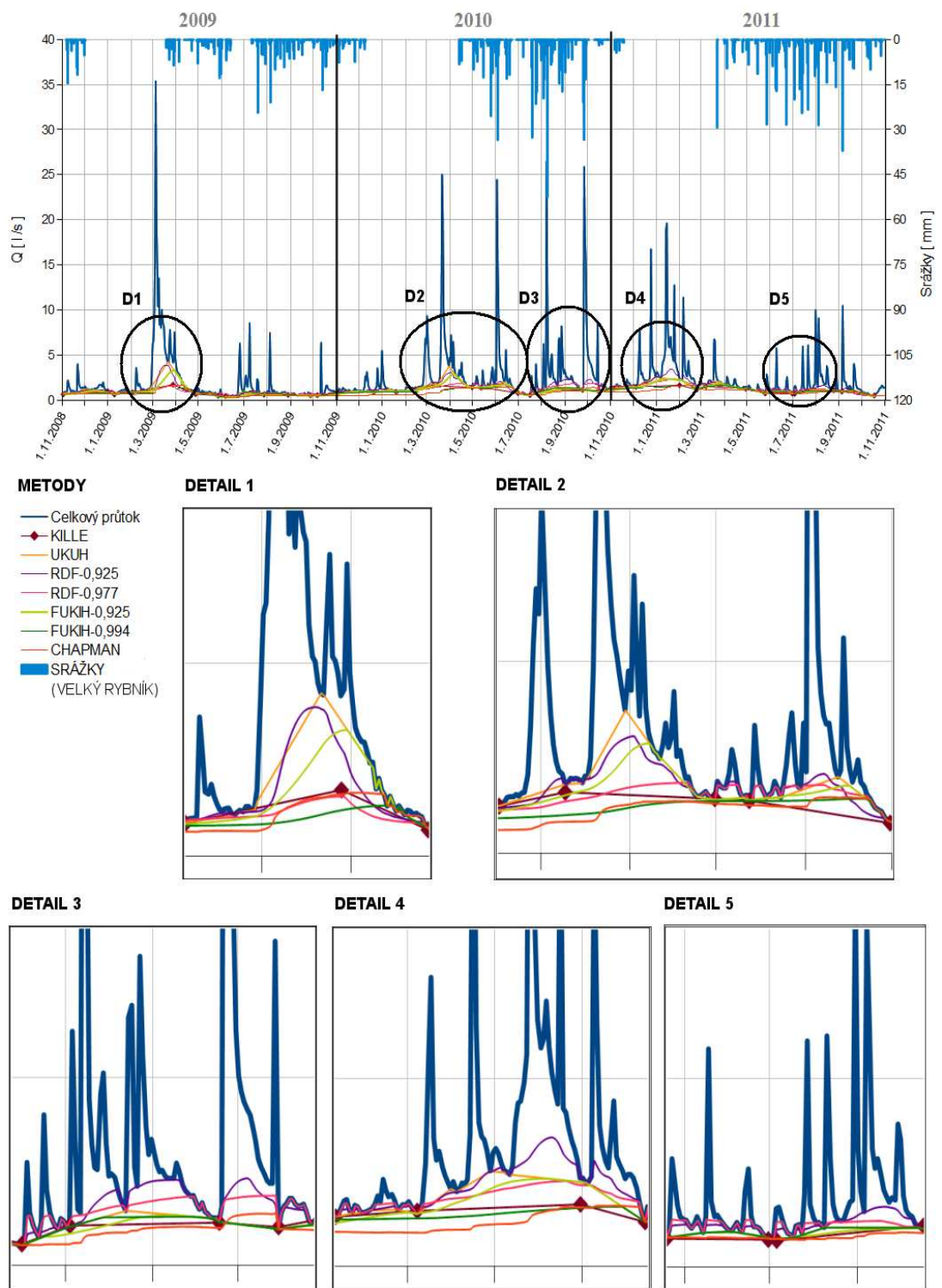
Další možností je změnit filtrační parametr v metodě FUKIH. Zde jsme požili filtrační parametr 0,994 a tím je dosaženo příznivého výsledku jak ve tvaru křivky tak ve velikosti hodnot základního odtoku a hodnot BFI. Zůstaly vyhlazeny ostré vrcholy vznikající metodou UKIH a oproti metodě RDF jsou vrcholy základního odtoku časově zpožděné za vrcholy celkového odtoku (obr. č. 24 a 25). Navíc došlo ke značnému snížení hodnot základního odtoku v období vysokých srážkových událostí a současně k mírnému snížení hodnot v období nízkých srážkových úhrnů.

Tím je snížena i hodnota BFI na 39,60%, což je srovnatelné s metodou Chapmanova digitálního filtru. Tato metoda by tedy změnou filtračního parametru mohla dávat výsledky, kde je základní odtok tvořen jen odtokem podzemní vody, ale pro dosažení přesnějších výsledků by byla potřeba kalibrace pomocí jiné metody a srovnání výsledků z více různých povodí, což není předmětem této práce. Proto pro další postupy budou používány výsledky dosažené metodou Chapmanova digitálního filtru, který už byl v minulosti na tomto území kalibrován. Pro porovnání základního odtoku separovaného Chapmanovým digitálním filtrem bude použita Killeho metoda, která dává obdobné výsledky a je běžně používána pro separaci základního odtoku tvořeného odtokem podzemní vody (ŽLÁBEK 2009).



Obr. č. 24: Základní odtok separovaný metodou FUKIH v subpovodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,994.

Srovnání metod separace základního odtoku

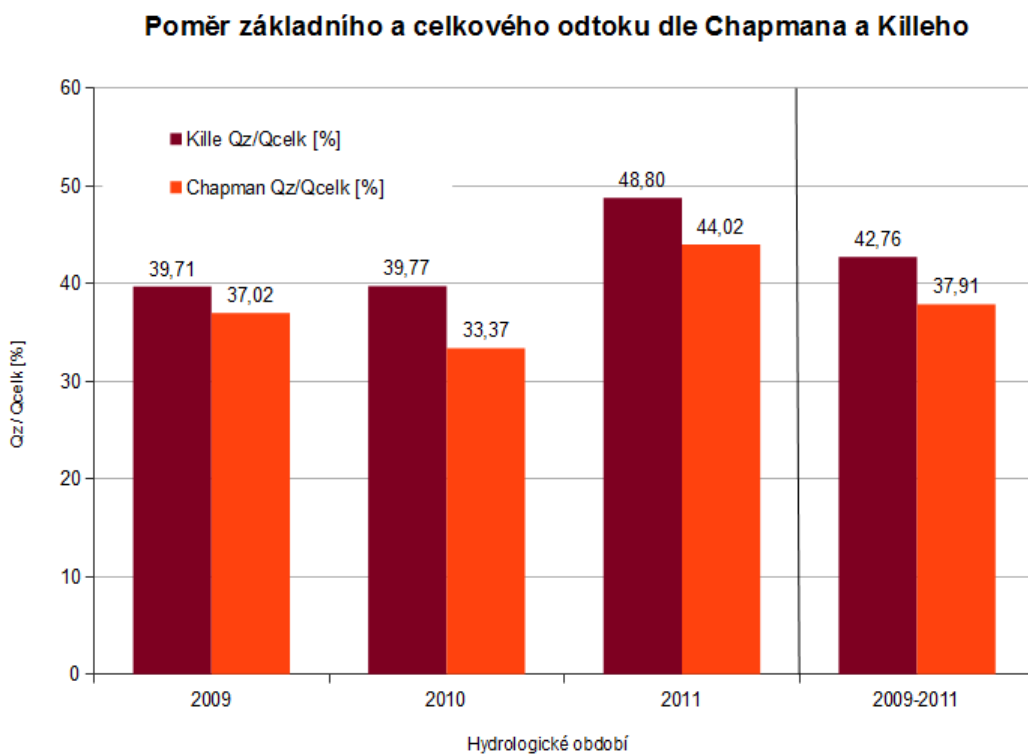


Obr. č. 25: Porovnání metod separace základního odtoku na subpovodí P52.

5.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SEPARACE ZÁKLADNÍHO ODTOKU

Porovnání metody Chapmanova digitálního filtru a Killeho metody pomocí hodnot BFI

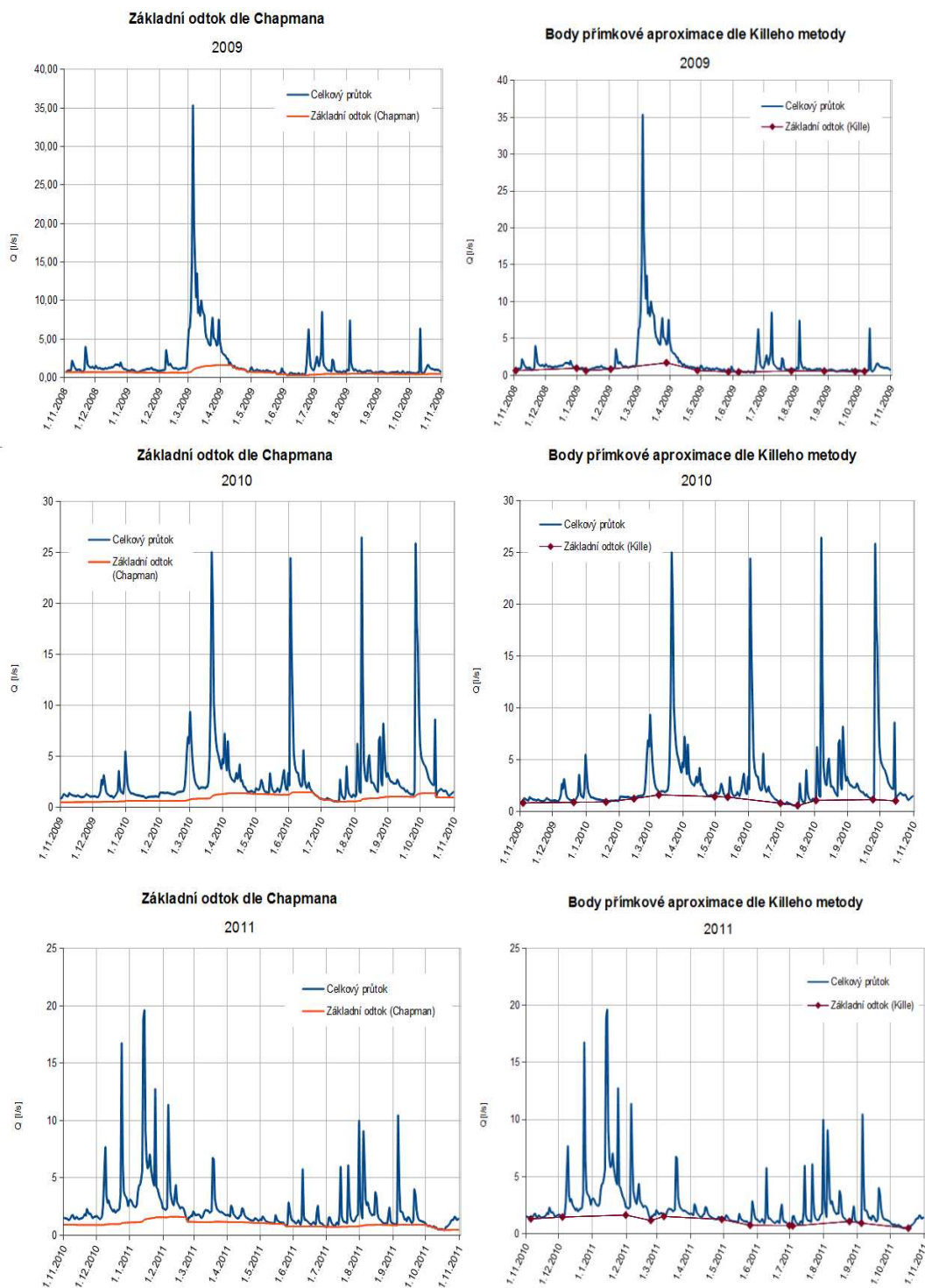
V obr. č. 26 jsou zobrazeny hodnoty BFI u Killeho metody a u Chapmanova digitálního filtru. Platí zde, že poměr základního a celkového odtoku dle Killeho metody dává vyšší hodnoty než dle Chapmanova digitálního filtru. Toto tvrzení se shoduje s obecným pravidlem, že Killeho metoda separace základního odtoku v porovnání s Chapmanovým digitálním filtrem, mírně nadhodnocuje (ŽLÁBEK, 2009). Z tab. č. 3 je patrné, že největší rozdíl hodnot poměrů základního a celkového odtoku mezi metodami, je v hydrologickém roce 2010. To je s největší pravděpodobností způsobeno tím, že v tomto roce byla větší četnost zvýšených průtoků při kterých dává Killeho metoda vyšší hodnoty (viz obr. č. 27).



Obr. č. 26: Porovnání obou metod v dle hodnot poměrů základního a celkového odtoku.

Tab. č. 3: Rozdíl mezi metodami v hodnotách poměru základního a celkového odtoku.

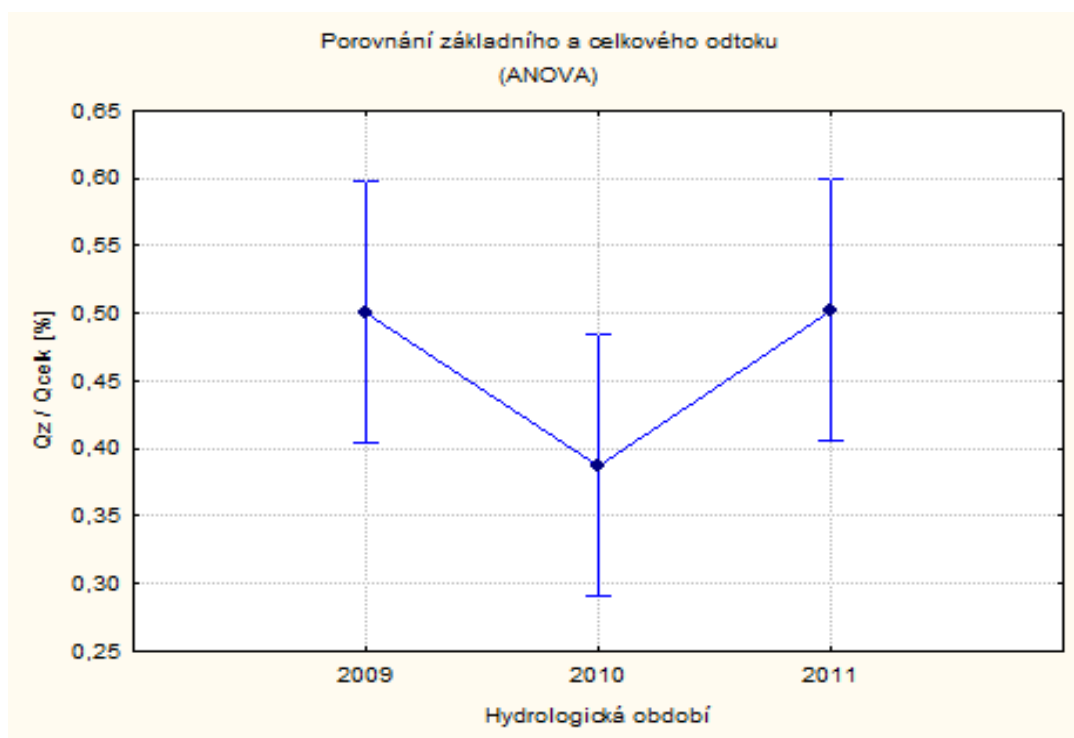
Hydrol. období	2009	2010	2011	2009 - 2011
Rozdíl hodnot	2,70%	6,39%	4,78%	4,85%



Obr. č. 27: Roční grafy základního odtoku dle Chapmanova digitálního filtru (vlevo) a dle Killeho metody (vpravo).

Statistické porovnání hydrologických roků mezi sebou a srovnání hodnot BFI se srážkovými úhrny

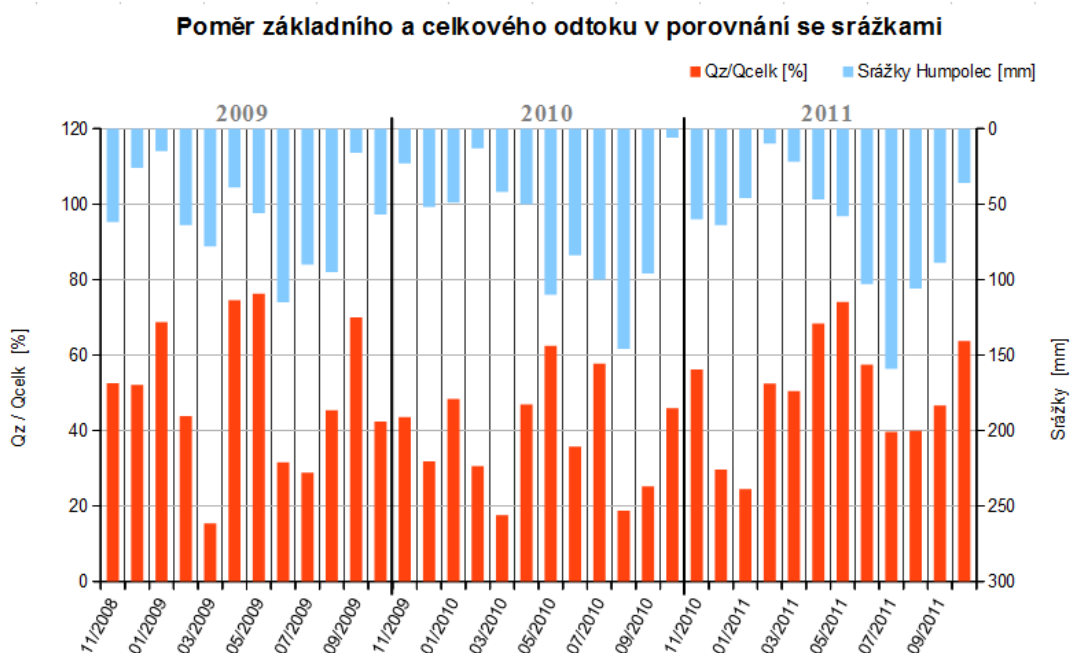
V programu Statistika byla mezi sebou porovnána jednotlivá hydrologická období jednocestnou analýzou variance (ANOVA). Vstupními daty byly měsíční poměry základního a celkového odtoku (BFI) ve třech hydrologických obdobích 2009, 2010 a 2011, vypočtené metodou Chapmanova digitálního filtru. Výsledkem je však neprůkazný test. Lze tedy říci, že rozdíl mezi roky na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ není průkazný, ale při dosažené hladině významnosti $p = 0,1598$, jsou hodnoty poměru základního a celkového odtoku pro rok 2010 nižší než u zbývajících dvou, které jsou téměř shodné (obr. č. 28).



Obr. č. 28: Statistické porovnání měsíčních hodnot poměrů základního a celkového odtoku. Dosažená hladina významnosti $p = 0,1598$, $df = 33$.

Při studování chování základního odtoku hrají důležitou roli srážkové úhrny. Obecně lze říci, že základního odtoku v poměru k celkovému, má tendenci se zvyšovat v sušších obdobích, kdy je méně srážek součástí odtoku a tok je dotován z větší části právě podzemními vodami (SCHILLING A ZHANG, 2004; ŽLÁBEK, 2009; SMAKHTIN, 2001). Na obr. č. 29 je vidět, že při porovnání měsíčního BFI se

srážkami, opravdu ve většině případů odpovídá vyšším srážkám menší BFI a naopak při poklesu srážek se BFI zvyšuje.

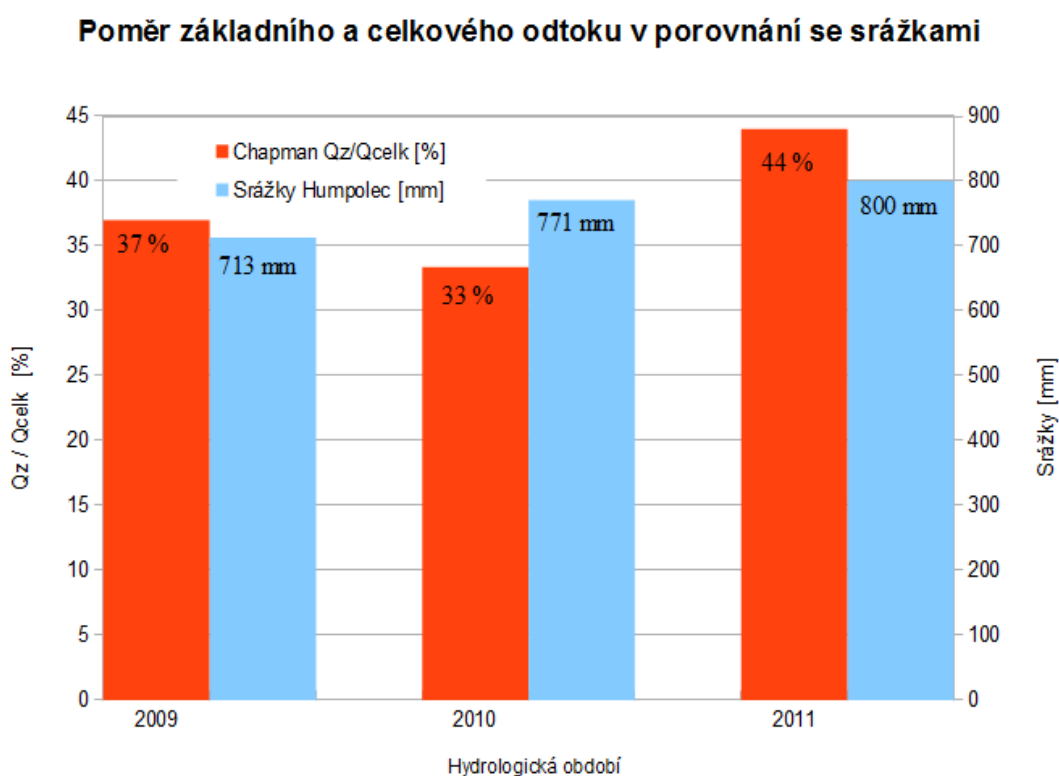


Obr. č. 29: Porovnání měsíčních hodnot BFI s měsíčními srážkovými úhrny.

Stejný trend by měl samozřejmě platit i v porovnání ročních hodnot BFI se srážkami. Pokud se podíváme na hydrol. období 2009 a 2010 na obr. č. 30, můžeme říci, že toto pravidlo odpovídá. Hydrol. rok 2011 se však tomuto trendu vymyká. Zde je nadměrně vysoká suma srážek i hodnota BFI.

Nelze přesně říci čím tato situace na povodí vznikla, ale může to být způsobeno tím, že i přes vysokou sumu srážkových úhrnů v tomto hydrol. roce, je rozptýl, variační koeficient a maximální hodnota srážek nižší než v roce předchozím (tab. č. 4). Z čehož lze usoudit, že srážkové události v hydrol. roce 2011 byly vydatnější, ale pozvolnější, proto mohla být většina srážkové vody infiltrována a převedena do podzemních vod. Bohužel údaje o denních srážkových úhrnech máme k dispozici pouze ze srážkoměrné stanice Velký Rybník a zde není časová řada kompletní (kapitola 4.1). Proto lze porovnat pouze hydrol. rok 2010 a 2011, které mají kompletní data alespoň v období od dubna do října. *KVÍTEK A DOLEŽAL (2003)* ve své studii na povodí Kopaninského toku uvádí, že daleko častější je odtok

vody půdním profilem (hlubokými i mělkými vrstvami půdy) než přímý povrchový odtok, který se vyskytuje jen u extrémních srážkových událostí. Hypotézu navíc potvrzuje i fakt, že v hydrol. roce 2011, který je nejdeštivější je celkový odtok průměrně nižší (nižší odtokový součinitel), než u předchozího hydrol. roku a hodnoty rozptylu, variačního koeficientu i maximální hodnoty jsou nižší, než v obou předchozích hydrol. letech (obr. č. 30 a tab. č. 4). Srážková voda tedy pravděpodobně nezvýšila rychlou složku odtoku, ale byla do toku převedena odtokem podzemní vody, který zvyšuje průtok v toku jen pozvolna.



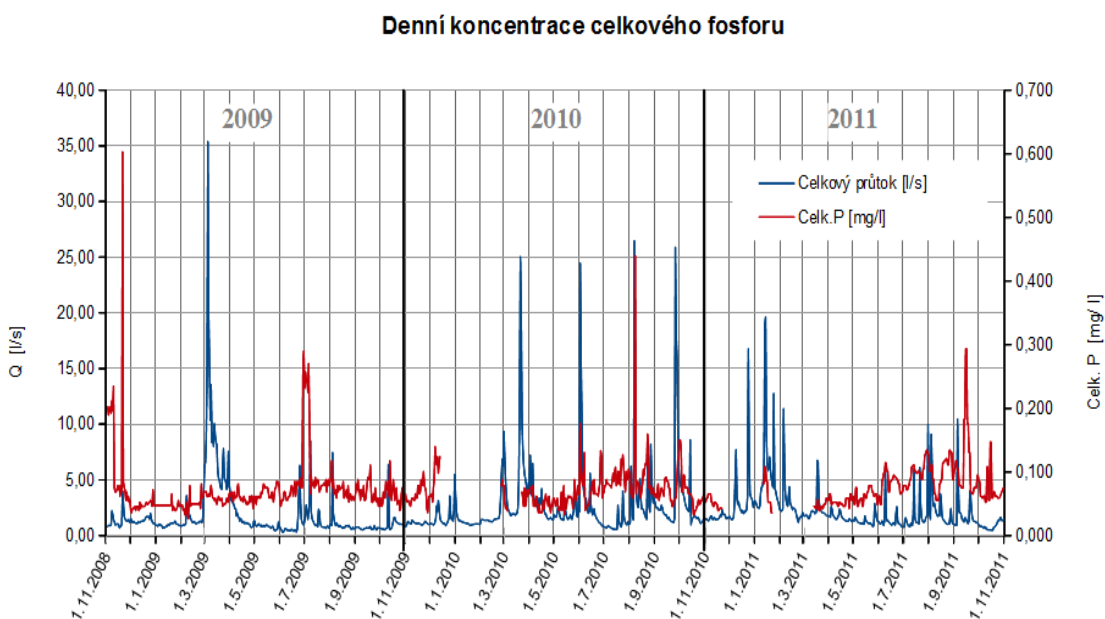
Obr. č. 30: Porovnání ročních hodnot BFI s ročním srážkovým úhrnem.

Tab. č. 4: Popisné statistiky pro Srážky ze srážkoměrné stanice Velký Rybník v období od dubna do října a celkové průtoky v toku v jednotlivých hydrologických obdobích.

Srážky (Velký Rybník)	2009	2010	2011
Průměr [mm]	-	2,94	2,68
Medián [mm]	-	0,20	0,20
Maximum [mm]	-	52,50	37,10
Minimum [mm]	-	0,00	0,00
Rozptyl [mm ²]	-	46,43	34,42
Směrodatná odchylka [mm]	-	6,81	5,86
Variační koeficient [%]	-	231,03	217,46
Celkový odtok	2009	2010	2011
Průměr [l/s]	1,81	2,66	2,24
Medián [l/s]	0,99	1,60	1,61
Maximum [l/s]	35,38	26,47	19,63
Minimum [l/s]	0,29	0,53	0,46
Rozptyl [l ² /s]	8,40	11,49	4,94
Směrodatná odchylka [l/s]	2,90	3,39	2,22
Variační koeficient [%]	159,82	127,25	99,35

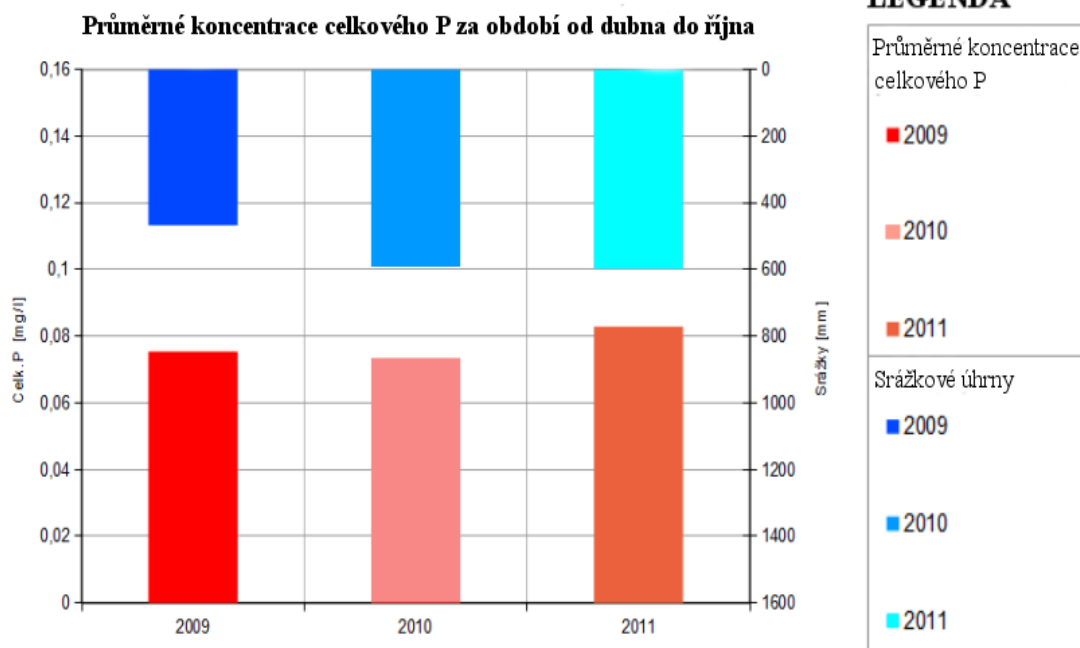
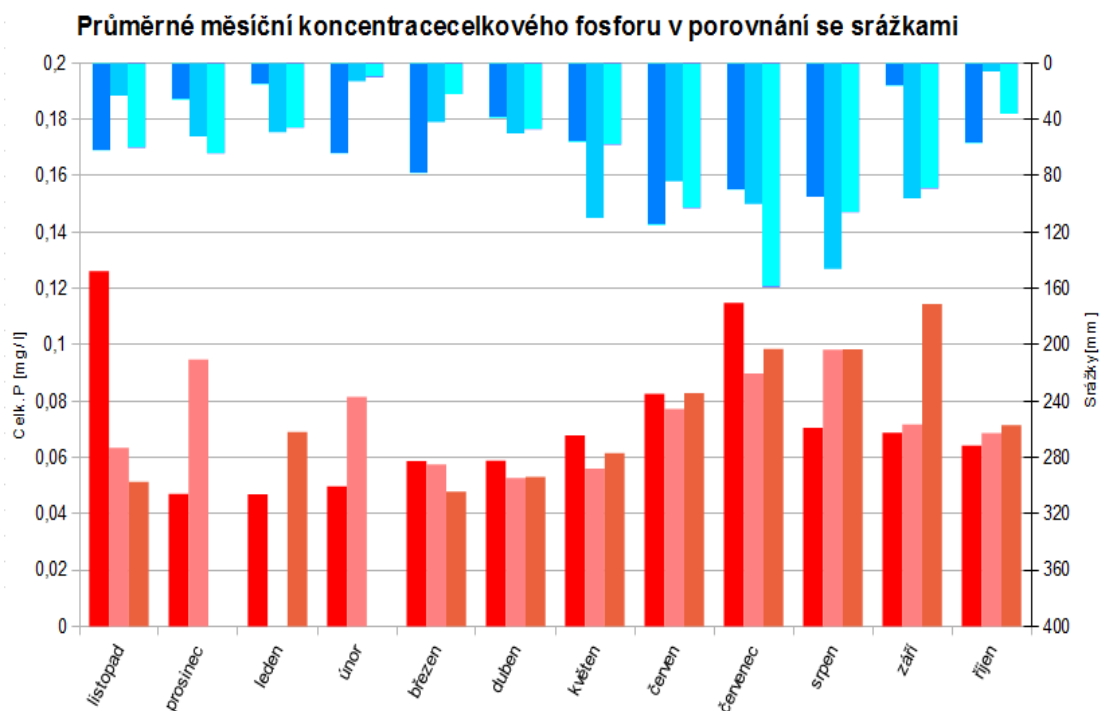
5.4 KONCENTRACE FOSFORU V CELKOVÉM ODTOKU

Na obr. č. 31 je znázorněna řada denních koncentrací celkového fosforu a celkového odtoku. Hodnoty koncentrací se vždy začínají zvyšovat v květnu a v říjnu opět klesají. Největší výkyvy hodnot se nachází v období od července od září. Výjimkou jsou extrémně vysoké hodnoty v říjnu 2008, které mohou být způsobeny náhlým bodovým znečištěním nebo prudkou srážkovou událostí, která by zvýšeným hodnotám koncentrací předcházela.



Obr. č. 31: Řada denních hodnot koncentrací celkového fosforu a celkového odtoku.

Na obr. č. 32 je zobrazen roční chod koncentrací pro tři sledované hydrologické roky. Koncentrace celkového fosforu dosahují nejvyšších hodnot v červenci, srpnu a září. Průběh měsíčních koncentrací téměř kopíruje průběh srážkových událostí. V období nejvyšších srážkových úhrnů jsou nejvyšší i koncentrace celkového P. Tento fakt může být způsoben tím, že s vyšším množstvím srážek dochází k většímu odnosu půdních částic. Tím se živiny erodované společně s půdou ze zemědělsky využívaných pozemků dostávají do toku kde mohou být hlavním znečišťovatelem. Toto se shoduje s mnoha autory jako např. se *SAMSONOVOU A KOL. (2005)*, *HOLMANEM A KOL. (2008)*, *LELLÁKEM A KUBÍČEKEM (1991)* a dalšími.



LEGENDA

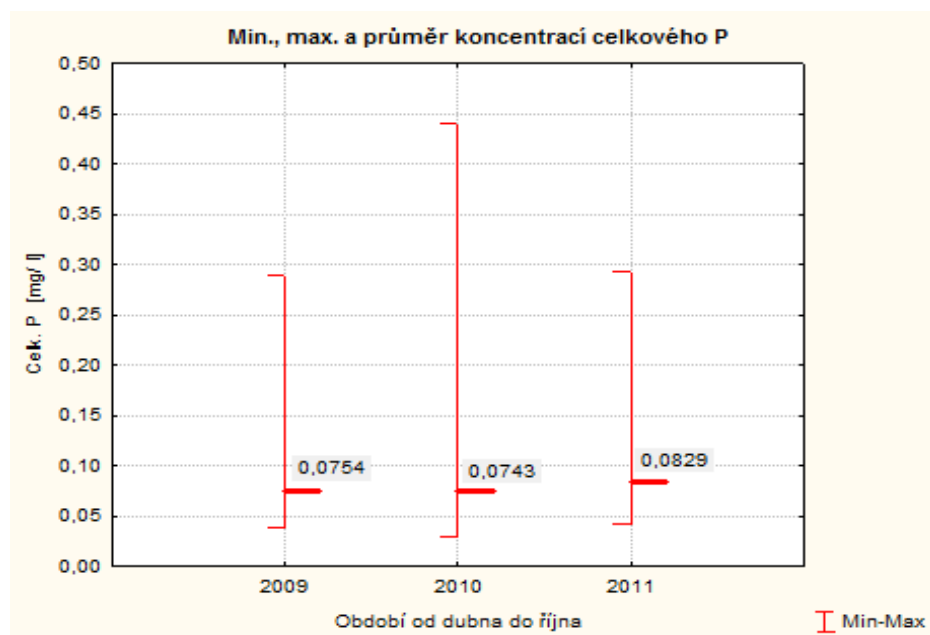


Obr. č. 32: Srovnání měsíčních průměrů koncentrací celkového fosforu se srážkovými úhrny (na hoře) a průměrných hodnot koncentrací se srážkami pro období od dubna do října (dole).

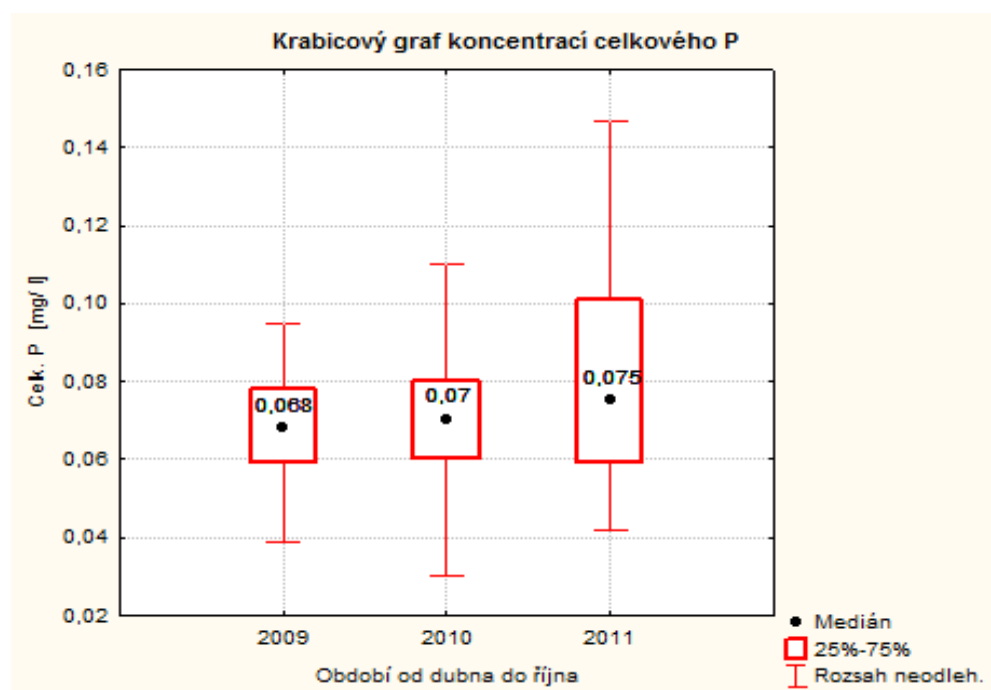
Pro porovnání průměrných koncentrací P a další statistické hodnocení budou použity hodnoty koncentrací v období od dubna do října, protože v zimních měsících většina hodnot nebyla změřena (viz kapitola 4.1). Z obr. č. 32 je patrné, že koncentrace jsou nejvyšší v hydrol. roce 2011 kde je nejvyšší i suma srážek. Nejnižší průměrnou hodnotu koncentrací P má rok 2010. V tab. č. 5 a obr. č 33 a 34 jsou zobrazeny popisné statistiky pro podrobnější zhodnocení. V roce 2010 mají koncentrace P větší hodnotu variačního koeficientu, rozptylu i rozsahu maximálních a minimálních hodnot než v roce 2011 (viz tab. č. 5). Koncentrace P tedy mají v roce 2010 větší výkyvy, ale průměrně jsou nižší než v roce 2011. Krabicový graf na obr. č. 34 potvrzuje, že koncentrace celkového P jsou nejvyšší v roce 2011. Zde je zobrazeno rozpětí neodlehlých hodnot, které je pro rok 2011 jednoznačně největší a stejně tak je největší i interkvartikové rozpětí.

Tab. č. 5: Popisné statistiky koncentrací celkového P v období od dubna od října.

	2009	2010	2011
Průměr [mg/l]	0,075439	0,074299	0,082869
Medián [mg/l]	0,068000	0,070000	0,075000
Maximum [mg/l]	0,290000	0,440000	0,293000
Minimum [mg/l]	0,039000	0,030000	0,042000
Horní kvartil [mg/l]	0,078000	0,080000	0,101000
Dolní kvartil [mg/l]	0,059000	0,060000	0,059000
Rozptyl [(mg/l) ²]	0,001476	0,001235	0,001199
Směrodatná odchylka [mg/l]	0,038416	0,035142	0,034626
Variační koeficient [%]	50,923390	47,297890	41,784090



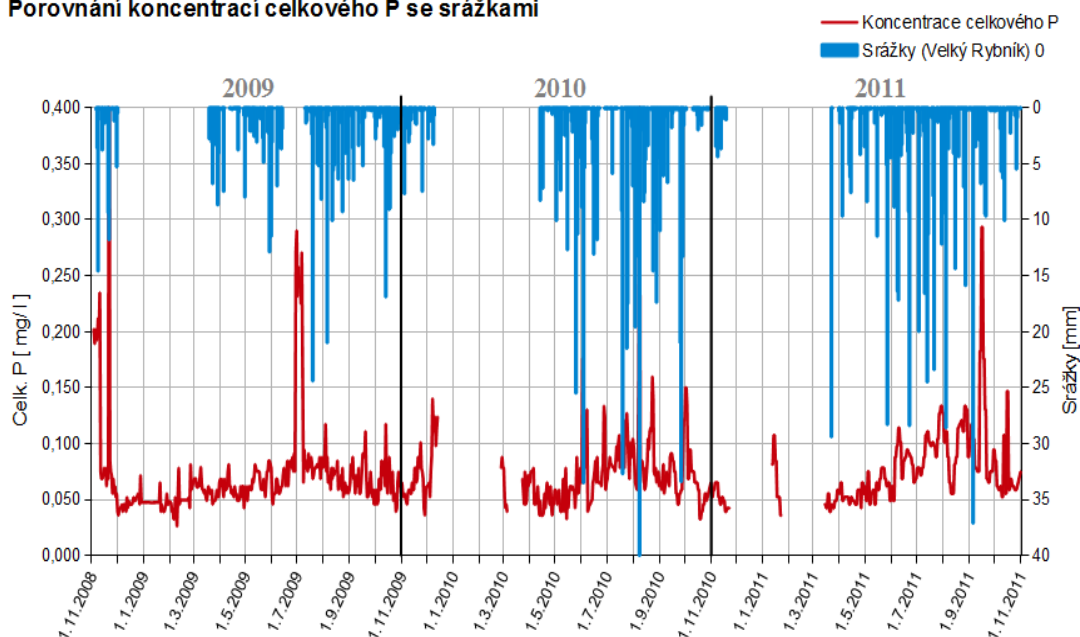
Obr. č. 33: Rozsah max., min. a průměrných hodnot koncentrací celkového fosforu pro období od dubna do října..



Obr. č. 34: Krabicové grafy hodnot koncentrací celkového fosforu zobrazující rozsah neodlehých hodnot, interkvartilové rozpětí a medián pro období od dubna do října.

Za předpokladu, že v roce 2011, byly pozvolnější srážky s menšími výkyvy jak je uvedeno v kapitole 5.2, měly by koncentrace P v celkovém odtoku být nižší, což v tomto případě neodpovídá. Koncentrace P však nejsou závislé pouze na množství srážek, ale na řadě dalších faktorů jako např. množství, druhu a způsobu používání hnojiv na zemědělské půdě, způsob využití území, typ vegetačního krytu a druh pěstovaných plodin nebo zvýšené koncentrace fosforu ve srážkách a další (FIALA A ROSENDORF, 2010; POOR A McDONNELL, 2007; EDWARDS A WITHERS, 2008; BYSTRICKÝ, 2012). Fakt, že koncentrace nejsou závislé pouze na srážkách je patrný i z obr. č. 35. Časová řada denních úhrnů srážek sice není kompletní, ale je zde vidět, že zvýšené koncentrace jsou v čase zvýšené srážkové události, ale ne všechny zvýšené srážkové události způsobují vyšší koncentrace P.

Porovnání koncentrací celkového P se srážkami

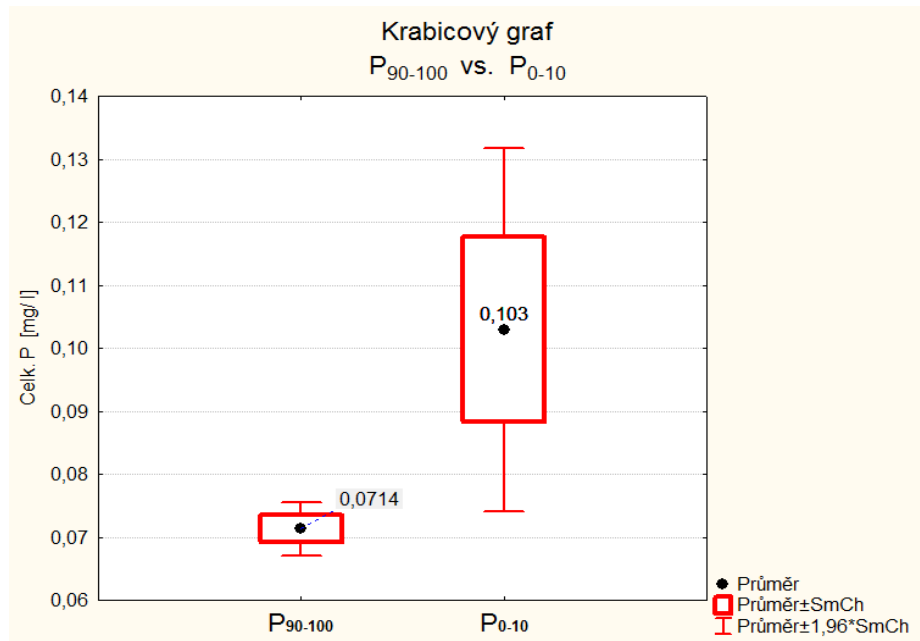


Obr. č. 35: Porovnání koncentrací celkového fosforu v průtoku se srážkovými úhrny.

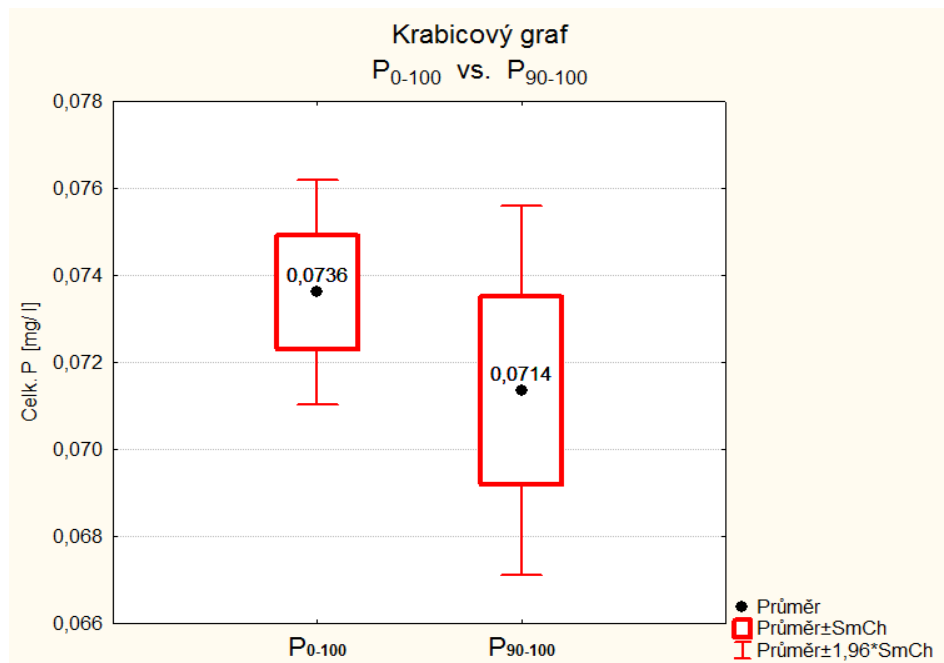
5.5 KONCENTRACE FOSFORU V ZÁKLADNÍM ODTOKU

Pro určení vlivu základního odtoku na množství celkového fosforu v toku, byl použit postup, který je popsán v práci *BYSTRICKÉHO (2012)*. Nejprve byly vypočítány denní BFI. Z denních hodnot BFI byly vytvořeny 3 skupiny hodnot. První skupinu tvoří hodnoty BFI 0-10%, v druhé jsou hodnoty 90-100% a třetí je 0-100% tedy celý soubor hodnot. Ve skupinách byly k denním hodnotám BFI přiřazeny příslušné koncentrace celkového fosforu a skupiny byly mezi sebou otestovány dvouvýběrovým t-testem. Skupina hodnot koncentrací celkového fosforu pro BFI = 0-10% (dále jen P_{0-10}) reprezentuje přímou složku odtoku, a naopak hodnoty koncentrací pro BFI = 90-100% (dále jen P_{90-100}) jsou typické pro základní odtok. Třetí skupinu tvoří hodnoty koncentrací z celého souboru (dále jen P_{0-100}). Na obr. č. 38 jsou zobrazeny hodnoty BFI a křivka průběhu koncentrací celkového P. Je zde vidět, že zvýšené koncentrace spadají většinou do období přímého odtoku (nízké hodnota BFI) ale někdy i do období základního (vysoké hodnoty BFI). Body na křivce koncentrací celkového fosforu, pak představují typické hodnoty koncentrací které byly vybrány popsáním způsobem. Pro základní odtok skupina hodnot P_{90-100} a přímý odtok skupina hodnot P_{0-10} .

Testovány byly nejprve skupiny P_{90-100} a P_{0-10} (obr. č. 36). Oboustranný test vyšel průkazně s hladinou významnosti $p=0,0432$ a $df=26,09$, takže lze říci, že základní odtok je menším přispívatelem fosforu než přímý. Což odpovídá předpokladu, že celkový P se snadno váže na půdní částice, a proto se do toku dostává zejména při povrchovém smyvu půdy přívalovými srážkami, které tvoří právě přímou složku odtoku. Při testování skupin P_{0-100} a P_{90-100} vyšel neprůkazný test, kde průměry jsou téměř vyrovnané (obr. č. 37). Lze z toho usuzovat, že i přes vyšší hodnoty koncentrací v přímém odtoku, není množství těchto koncentrací tak dominantní aby výrazně zvýšily průměr celkového odtoku. Příspěvek fosforu základním odtokem tedy rozhodně není zanedbatelný.

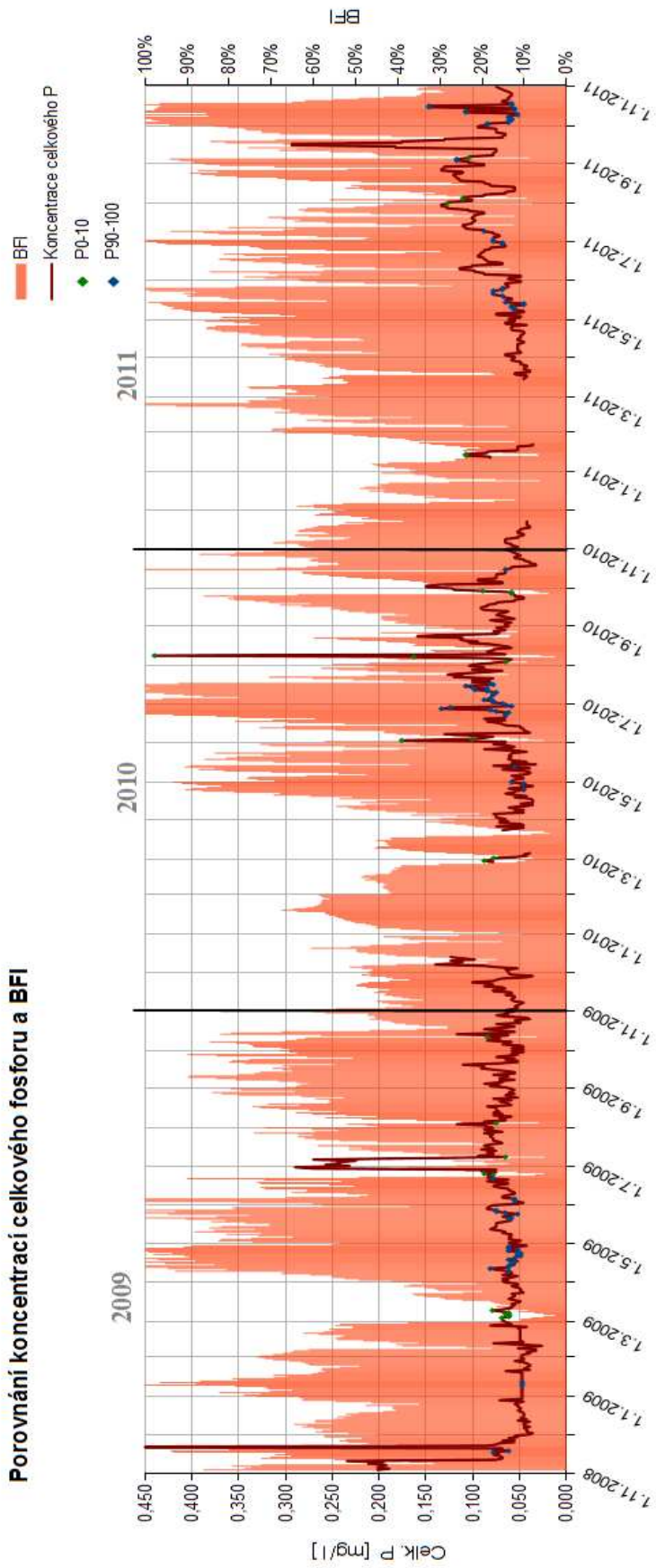


Obr. č. 36: Krabicový graf proměnných P₉₀₋₁₀₀ (koncentrace v základním odtoku) a P₀₋₁₀ (koncentrace v přímém odtoku).



Obr. č. 37: Krabicový graf proměnných P₀₋₁₀₀ (koncentrace v celkovém odtoku) a P₉₀₋₁₀₀ (koncentrace v základním odtoku).

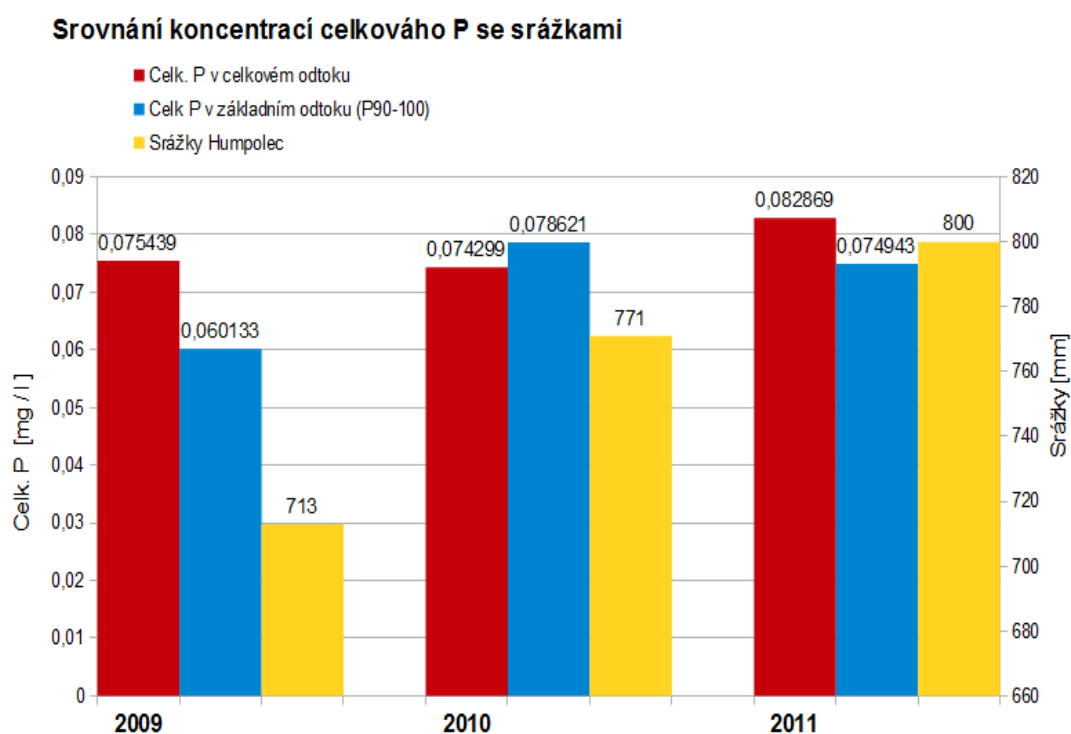
Porovnání koncentrací celkového fosforu a BFI



Obr. č. 38: Koncentrace celkového fosforu a poměry celkového a základního odtoku (BFI).

Při srovnání průměrných hodnot koncentrací P v základním odtoku mezi jednotlivými roky (obr. č. 39) je patrné, že nejnižší hodnota je v roce 2009 a téměř vyrovnané jsou hodnoty v roce 2010 a 2011, což neodpovídá tomu, že v celkovém odtoku je nejnižší hodnota koncentrací P v roce 2010 a nejvyšší v roce 2011. Při porovnání hodnot se srážkami v jednotlivých hydrologických obdobích nelze nalézt žádnou přímou spojitost mezi koncentracemi P a srážkovými úhrny.

Aby bylo možné zhodnotit vliv srážek na koncentrace fosforu v celkovém i základním odtoku a vliv základního odtoku na koncentrace P v celkovém odtoku, bylo by třeba mnohem delší sledované období, například deset let a možnost porovnat výsledky z více různých povodí. I tak by ovšem bylo potřeba zjistit ještě další informace zejména o hospodaření na zemědělské půdě (používání hnojiv, pěstované plodiny a další) protože jak uvádí SAMSONOVÁ A KOL. (2005), HOLMAN A KOL (2008) a mnoho dalších autorů, zvýšené koncentrace fosforu jsou, pokud neuvažujeme bodové zdroje znečištění, způsobeny ve většině případů právě zemědělskou činností.



Obr. č. 39: Porovnání koncentrací P v celkovém a základním odtoku se srážkami.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na metody separace základního odtoku a jejich porovnání, analýzu koncentrací celkového fosforu v celkovém odtoku a vliv základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtoku.

Existuje ohromné množství metod pro separaci základního odtoku (grafické metody, metody digitálních filtrů, analytické metody, metody analýzy obsahu chemických látek a přírodních izotopů ve vodě a spousta dalších). V této práci bylo pro separaci základního odtoku a porovnání metod vybráno 5 metod, které jsou jednoduché na provedení a nenáročné na vstupní data.

Při porovnání metod je hlavním problémem že výsledky dosažené různými metodami jsou značně rozdílné. Neexistují žádné dvě metody, které by došly ke stejným výsledkům jak ve tvaru a průběhu křivky, tak v hodnotách BFI. Tyto rozdíly jsou způsobené jednak odlišnými způsoby separace, dále zvolenou teorií základního odtoku pro danou metodu a v poslední řadě i subjektivitou některých metod. Z výsledků bylo zjištěno že metody UKIH, FUKIH a RDF zahrnují v základním odtoku kromě odtoku podzemní vody také část odtoku hypodermického. Nejpodobnějších výsledků s metodou Chapmanova digitálního filtru, která byla již v minulosti na tomto území kalibrována, dává Killeho metoda. Tyto dvě metody odpovídají teorii základního odtoku zvolené pro tuto práci, že základní odtok je tvořen pouze odtokem ze zásob podzemní vody. Z to lze usuzovat že metodu pro separaci základního odtoku nelze zvolit libovolně, ale je potřeba zohlednit velké množství faktorů (specifické podmínky v povodí, zvolenou teorii základního odtoku pro danou metodu, účel za jakým separaci odtoku provádíme, množství vstupních údajů, délka časového období a další).

Dalším bodem práce je zhodnocení koncentrací celkového fosforu v celkovém odtoku. Jakákoliv kontaminace podzemních, ale i povrchových vod může způsobit riziko nejen pro člověka. Fosfor je zásadním rizikem pro rozvoj procesu eutrofizace (obohacování vodních ekosystémů živinami, zejména fosforem). V malé míře se jedná o děj přirozený, avšak zásahy člověka do přírody a využití krajiny způsobují děj zrychlený, při kterém se eutrofizace stává nejčastější příčinou ekologického poškození ve všech vodních systémech. Zhoršující se podmínky životního prostředí, především kvalita podzemních i povrchových vod, jsou předmětem výzkumného šetření v mnoha státech světa. V této práci je analyzována řada denních koncentrací celkového fosforu i průměrné měsíční a roční hodnoty

koncentrací. Nízké i vysoké hodnoty koncentrací jsou porovnávány s hodnotami srážkových úhrnů a jsou hledány spojitosti mezi těmito hodnotami. Hlavním problémem je že koncentrace fosforu nejsou závislé pouze na množství srážek, ale na řadě dalších faktorů jako např. množství, druhu a způsobu používání hnojiv na zemědělské půdě, způsob využití území, typ vegetačního krytu a druh pěstovaných plodin nebo zvýšené koncentrace fosforu ve srážkách a další.

Posledním bodem je řešení vlivu základního odtoku na množství celkového fosforu v toku. Zde je použit postup, který popsal ve své práci *BYSTRICKÝ (2012)*. Jsou určeny hodnoty koncentrací typické pro základní odtok, pro rychlou složku odtoku a celkový odtok. Skupiny hodnot jsou mezi sebou testovány a porovnány. Z výsledků vyplývá že základní odtok není zanedbatelným přispívatelem fosforu do toku ale pro dosažení přesnějších výsledků jak u vlivu základního odtoku na koncentrace fosforu v celkovém odtoku tak u vlivu srážek na koncentrace fosforu v celkovém i základním odtoku, by bylo třeba mnohem delší sledované období (např 10 let) a možnost porovnání výsledků z více různých povodí. I tak by ovšem bylo potřeba zjistit ještě další informace zejména o hospodaření na zemědělské půdě (používání hnojiv, pěstované plodiny a další), protože zvýšené koncentrace fosforu, pokud neuvažujeme bodové zdroje znečištění, jsou způsobeny ve většině případů právě zemědělskou činností.

7. SOUHRNY

7.1 SEZNAM LITERATURY

- 1) AKOSY, H., KURT, I., ERIS, E.: Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology* 372, 2009, s. 94 –101.
- 2) ARNOLD, J. G., ALLEN, P.M., MUTTIAH, R., BERNHARDT, G.: Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water* 33(6), 1995, s. 1010-1018 .
- 3) BERÁNKOVÁ, T.: Přístup k hodnocení náchylnosti zemědělských povodí ke ztrátám fosforu z půdy do vody. *Vodní hospodářství*, 7, 2010, s. 182 – 2012.
- 4) BOUGHTON, W. C.: A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. *Hydrol. and Water Resour. Symp.*, Institution of Engineers Australia, Newcastle, NSW, 1993, s. 317 - 324. In: WITTENBERG H.: Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes* 13, 1999, s. 715–726.
- 5) BOUSSINESQ, J.: Essai sur la théorie des eaux courantes. *Memoires de l'Academie des Sciences de l'Institut de France* 23, 1877, 252–260. In ZHANG, R., LI, Q., CHOW, T.L., LI, S., DANIELESCU, S.: Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. *Hydrological processes*, 2012, s 7.
- 6) BUTTLE, J. M.: Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 1994, s. 16-41. In: ŽLÁBEK, P.: Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku. *Disertační práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*, 2009, s. 106.
- 7) BYSTRICKÝ, V.: Analýza časových řad nutrientů v celkovém i základním odtoku ve vybraném povodí. *Disertační práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*, 2012, 138 s.
- 8) CAREY, S. K., QUINTON, W. L.: Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment. *Hydrol. Process.* 19, 2005, S. 95–114.
- 9) CHAPMAN, T.G.: A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes* 13, 1999, s. 701–714.

- 10) CHAPMAN, T. G. AND MAXWELL, A. I.: 'Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments', in Hydrol. and Water Resour. Symp. Institution of Engineers Australia, Hobart. 1996, s. 539-545. In CHAPMAN, T.G.: A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes 13, 1999, s. 701–71.
- 11) CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R, MAYS, L.W.: Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 1988. In: LACEY, G.C., GRAYSON, R.B.: Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. Journal of Hydrology 204, 1998, s. 231- 250.
- 12) ČERVENÝ, J. (EDIT.) A KOL.: Podnebí a vodní režim ČSSR. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1984, s. 416.
- 13) DOLEŽAL, F., KVÍTEK, T.: The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in peneplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. Physics and Chemistry of the Earth, 29, 2004, s. 775-785.
- 14) DUB, O. (EDIT.) A KOL.: Hydrologie, Nakladatelství technické literatury Praha, 1969, s. 380.
- 15) ECKHARDT, K.: A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. Journal of Hydrology 352, 2008, s. 168– 173
- 16) ECKHARDT, K.: How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes 19, 2005, s. 507–515.
- 17) EDWARDS, A.C. WITHERS, P.J.A.: Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK. Journal of Hydrology 350, 2008, s. 144–153.
- 18) FIALA, D., ROSENDORF. P.: Plošné zdroje fosforu v povodí VN Orlík a její eutrofizace. Vodní hospodářství, 3, 2011, s. 87 – 137.
- 19) FUČÍK, P., KVÍTEK, T., HEJDUK, T., PETERKOVÁ, J.: Příspěvek k vyčíslení podílů zdrojů znečištění vod ze sledovaných profilů v malém odvodněném zemědělsko-lesním povodí. Vodní hospodářství, 8, 2012, s. 236 – 279.
- 20) GIBSON, J. J., PRICE, J. S., ARAVENA, R., FITZGERALD, D. F., MALONEY, D.: Runoff generation in a hypermaritime bog - forest upland. Hydrol. Process. 14, 2000, s. 2711–2730.

- 21) GOODDY, D. C.: Movement of leachate from beneath Turkey litter sited over chalk in southern England. *Journal of Environmental Science and Health B37(1)*, 2002, s. 81–91. In: HOLMAN, I. P., WHELAN, M. J., HOWDWD, N. J. K., BELLAMY, P. H., WILLBY, N. J., RIVAS-CASADO, M., MCCONVEY, P.: Phosphorus in groundwater - an overlooked contributor to eutrophication? *Hydrol. Process.* 22, 2008, s. 5121–5127 .
- 22) GRAŠKO, R., BALLA, B., DOHNAL, L., JANOUT, V., KLÍMOVÁ, E., MOCÁK, J.: *Štatistické metódy pre klinickú epidemiológiu a laboratórnu prax.* Aprilla, Košice, 2008, 91 s.
- 23) GRÜNWALD, A.: *Hydrochemie.* České Vysoké učení technické v Praze, 1993, s. 176.
- 24) HALL, F.R.: Base flow recessions - a review. *Water Resour.* 1968, s. 973-983. In: TALLAKSEN, L.M.: A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 165, 1995, s. 349-370.
- 25) HEJZLAR, J., MATĚNAL, J., ŠIMEK, K., TUREKL, J., ZNACHOR, P., ŽALOUNÍK, J., ROHLÍK, V., LANGHANSOVÁ, M.: Fosfor jako hlavní příčina současného nepříznivého stavu eutrofizace a jakosti vody v nádrži orlík. *Revitalizace orlické nádrže. Odborný seminář, kulturní dům Písek*, 2008, s. 84-95.
- 26) HEOG, S., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH.: Hydrograph separation in a mountainous catchment - combining hydrochemical and isotopic tracers. *Hydrological processes* 14, 2000, s. 1199 – 1216.
- 27) HETEŠA, J., KOČKOVÁ, E.: *Hydrochemie.* Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998, s. 106.
- 28) HOLMAN, I. P., WHELAN, M. J., HOWDWD, N. J. K., BELLAMY, P. H., WILLBY, N. J., RIVAS-CASADO, M., MCCONVEY, P.: Phosphorus in groundwater - an overlooked contributor to eutrophication? *Hydrol. Process.* 22, 2008, s. 5121–5127 .
- 29) HORTON R. E.: An approach towards physical interpretation of infiltration capacity. *Proceedings of the Soil Science Society of America* 5, 1940, s. 399–417. In: LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 30) HUBAČÍKOVÁ, V.: *Hydrologie.* Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002, s. 45.

- 31) HUYCK, A.A.O., PAUWELS, V.R.N., VERHOEST, N.E.C.: A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes. *Water Resources Research* 41(8), 2005, s. 1–18. In: LIN, K. A KOL.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 32) INSTITUTE OF HYDROLOGY: Low Flow Studies. Research Report, Wallingford, Oxon, 1980. In: AKOSY, H., KURT, I., ERIS, E.: Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology* 372, 2009, s. 94 –101.
- 33) JAIN, S. K.: Evaluation of catchment management strategies by modelling soil erosion / water quality in EPIC supported by GIS. M.Sc. thesis, Galway: National University of Ireland, Department of Engineering Hydrology, 1970. In: KULHAVÝ, Z., DOLEŽAL, F., SOUKUP, M.: Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů. Vědecké práce VÚMOP, Praha, č. 12, 2001, s. 29 – 52.
- 34) JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M.: *Hydraulika a hydrologie*. Vysoké učení technické v Brně, 2002, s. 186.
- 35) KILLE, K.: Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der monatliche Niedrigwasserabflüsse. *Zeitschrift d. Deutsch. Geol. Ges., Sonderheft*, Hannover, 1970, s. 89 – 95. In: KŘÍŽ, H.: *Hydrologie podzemních vod*. Československá akademie věd, Praha, 1983, s. 292.
- 36) KLINER, K., KNĚŽEK, M.: Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. *Vodohospodářský časopis, Veda*, Bratislava, 22:5, 1974, s. 457 – 466. In: KŘÍŽ, H.: *Hydrologie podzemních vod*. Československá akademie věd, Praha, 1983, s. 292.
- 37) KLINER, K., KNĚŽEK, M., OLMER, M., : *Využití a ochrana podzemních vod*. Státní zemědělské nakladatelství Praha, 1978, s. 295.
- 38) KNĚŽEK, M.: *Podzemní složka odtoku*. Výzkumný ústav vodohospodářský ve Státním zemědělském nakladatelství Praha, 1988, s. 64.
- 39) KOKSELO, A.I., FISHER, A.R., UTZ, R.M., JORDAN, T.E.: A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (<50 km²). *Journal of Hydrology* 450-451, 2012, s. 267-278.
- 40) KŘÍŽ, H.: *Hydrologie podzemních vod*. Československá akademie věd, Praha, 1983, s. 292.
- 41) KULHAVÝ, Z., DOLEŽAL, F., SOUKUP, M.: Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů. Vědecké práce VÚMOP, Praha, č. 12, 2001, s. 29 – 52.

- 42) KVÍTEK, T., DOLEŽAL, F.: Vodní a živinný režim povodí Kopaninského toku na Českomoravské vrchovině. *Acta Hydrologica Slovaca*, 4, 2003, s. 255-264.
- 43) KVÍTEK, T., NOVÁK, P., FUČÍK, P., NOVOTNÝ, I.: Lokalizace kritických zdrojových lokalit plošného zemědělského znečištění. *Revitalizace orlické nádrže*. Odborný seminář, kulturní dům Písek, 2008, s. 96 – 105.
- 44) KVÍTEK T. A KOL.: Redakčně upravená roční zpráva z projektu NAZV QH82095, 2008, s. 25. KVÍTEK, T., BYSTRICKÝ, V., PETERKOVÁ, J., ŽLÁBEK, P., MORAVCOVÁ, J.: Dynamika koncentrací a interakce odnosu dusičnanů a fosforu na malých zemědělsko-lesních subpovodích v povodí VN Švihov na Želivce. *Vodní hospodářství*, 6, 2012, s. 198-235.
- 45) LACEY, G.C., GRAYSON, R.B.: Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology* 204, 1998, s. 231- 250.
- 46) LELLÁK, J., KUBÍČEK, F.: *Hydrologie*. Univerzita karlova, Praha, 1991, s. 260.
- 47) LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 48) LIŠKA, M. A DURAS, J.: VN Švihov – monitoring kvality vody v povodí a jeho výsledky. *Vodní hospodářství*, 3, 2011, s. 87 – 137.
- 49) L'VOVICH, M.I.: Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Sov. Hydrol.* 4, 1972. In: WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M.: Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation *Journal of Hydrology* 219, 1999, s. 20–33.
- 50) LYNE, V., HOLLICK, M.: Stochastic time variable rainfall runoff modeling. National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia, 1979, s. 89–92. In: LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 51) LYON, S. W., DESILETS, S. L. E., TROCH, P. A.: A tale of two isotopes: differences in hydrograph separation for a runoff event when using δD versus $\delta^{18}O$. *Hydrological processes* 23, 2009, s. 2095–2101.
- 52) MAILLET, E.: *Essai d'hydraulique souterraine et fluviale*: Librairie scientifique. Hermann, Paris, 1905. In: WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M.: Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation *Journal of Hydrology* 219, 1999, s. 20–33.

- 53) MILEHAM, M.: Impact of rainfall distribution on the parameterisation of a soil-moisture balance model of groundwater recharge in equatorial Africa. *Journal of Hydrology*, 2008, 359, s. 46– 58.
- 54) MIRANDA, S. A., MATVIENKO, B.: Rain and groundwater as phosphorus sources of a small reservoir. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 8, 2003, s. 27–30.
- 55) MOLDAN, B., JENÍK, J., ZÝKA, J.: Životní prostředí očima přírodovědce. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1989, s. 164.
- 56) MUGO, J. M., SHARMA, T. C.: Application of a conceptual method for separating runoff components in daily hydrographs in Kimakia forest catchments, Kenya. *Hydrol. Process.* 13, 1999, s. 2931-2939.
- 57) NATHAN, R.J., AUSTIN, K., CRAWFORD, D., JAYASURIYA, N.: The estimation of monthly yield in ungauged catchments using a lumped conceptual model, *Aust. J. Water Resour.*, 1 (2), 1996, s. 65-75. In: LACEY, G.C., GRAYSON, R.B.: Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology* 204, 1998, s. 231- 250.
- 58) NATHAN, R.J., McMAHON, T.A.: Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res.* 26 (7), 1990, s. 1465–1473. In: LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 59) NETOPIL, R.: *Hydrologie pevnin*. Academia, Praha, 1972, s. 294.
- 60) NYPL, V., KURÁŽ, V.: *Hydrologie a pedologie*. VŠCHT Praha, 1992, s. 293.
- 61) PEKÁROVÁ, P., PEKÁR, J.: The impact of land use on stream water quality in Slovakia. *Journal of Hydrology* 180, 1996, s. 333-350.
- 62) PETERS, E., LANEN, H. A. J.: Separation of base flow from streamflow using groundwater levels—illustrated for the Pang catchment (UK). *Hydrol. Process.* 19, 2005, s. 921–936.
- 63) PIGGOTT, A.R., MOIN, S., SOUTHAM, C.: A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrological Sciences Journal* 50, 2005, s. 911–920.
- 64) PITTER, P.: *Hydrochemie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1999, s. 568.
- 65) PLECHÁČ, V.: *Voda problém současnosti a budoucnosti*. Nakladatelství Svoboda, Praha, 1989, s. 327.

- 66) POKORNÁ, D., ZÁBRANSKÁ, J.: Hydrologie a hydroopedologie. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2008, s. 218.
- 67) PONCE, V.M., SHETTY, A.V.: A conceptual model of catchment water balance: 2. Application to runoff and baseflow modeling. *Journal of Hydrology* 173, 1995, s. 41-50.
- 68) POOR, C. J., MCDONNELL, J. J.: The effect of land use on stream nitrate dynamics. *Journal of Hydrology*, 332, 2007, s. 54-68.
- 69) ŘEHÁNEK, T., KŘÍŽ, V.: Cvičení z hydrologie. Ostravská univerzita v Ostravě, 2002, s. 54.
- 70) SAMSONOVÁ, P., ŠARAPATKA, B., URBAN, J.: Přínos ekologického zemědělství pro kvalitu podzemních a podpovrchových vod. PRO-BIO ve spolupráci s Bioinstitutem, Olomouc, 2005, s. 43.
- 71) SCHILLING, K., ZHANG, Y.K.: Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology*, 295, 2004, s. 305-316.
- 72) SKLENIČKA, P.: Základy krajinného plánování. Nakladatelství: Naděžda Skleničková, Praha, 2003, s. 321.
- 73) SLOTO, R. A., CROUSE, M. Y.: HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, 1996, s. 46. In: ECKHARDT, K.: A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology* 352, 2008, s. 168– 173.
- 74) SMAKHTIN, V.U.: Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240, 2001, s. 147–186.
- 75) SOMMER, M.: Hydrologie. Vysoké učení technické v Brně, 1985, s. 206.
- 76) SONDERGAARD, M., JEPPESEN, E.: Anthropogenic impacts on lake and stream ecosystems, and approaches to restoration. *Journal of Applied Ecology* 44, 2007, s. 1089–1094.
- 77) SPONBERG, M. E.: Spectral analysis of baseflow separation with digital filters. *Water Resources Research* 36(3), 2000, s. 745–752. In: LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Process.* 21, 2007, s. 1719–1736.
- 78) SZILAGYI, J., PARLANGE, M. B.: Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation. *Journal of Hydrology* 204, 1998, s. 251-260.

- 79) ŠILAR, J.: Hydrologie v životním prostředí. Technická univerzita Ostrava, 1996, s. 136.
- 80) TALLAKSEN, L.M.: A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology 165, 1995, s. 349-370.
- 81) URBÁNEK, P.: Aplikovaná hydrologie podzemní vody. Praha: Hydrometeorologický ústav, 1970, s. 96.
- 82) WARD, R.C., ROBINSON, M., Principles of hydrology, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1990. In: LACEY, G.C., GRAYSON, R.B.: Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. Journal of Hydrology 204, 1998, s. 231- 250.
- 83) WELS, C. H., CORNETT, R. J. LAZERTE, B. D.: Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers. J. Hydrol., 122, 1991, s. 253-274. In: PEKÁROVÁ, P., PEKÁR, J.: The impact of land use on stream water quality in Slovakia. Journal of Hydrology 180, 1996, s. 333-350.
- 84) WITTENBERG H.: Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. Hydrological Processes 13, 1999, s. 715–726.
- 85) WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M.: Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation Journal of Hydrology 219, 1999, s. 20–33.
- 86) ZHANG, R., LI, Q., CHOW, T.L., LI, S., DANIELESCU, S.: Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. Hydrological processes, 2012, s 7.
- 87) ŽÁČEK, L.: Hydrochemie. Vysoké učení technické v Brně, 1998, s. 80.
- 88) ŽLÁBEK, P.: Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku. Disertační práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2009, 130 s.

3.2 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1: Koloběh vody v přírodě. Zdroj: (NYPL A KURÁŽ, 1992)

Obr. č. 2: Složky odtoku vody z povodí. Zdroj: (HUBAČÍKOVÁ, 2002)

Obr. č. 3: Křivka recese. Zdroj: (TALLAKSEN, 1995)

Obr. č. 4: Separace Hydrogramu jedním, dvěma a třemi průchody digitálního filtru, při použití filtračního parametru 0,9. Zdroj: (LIN A KOL., 2007)

Obr. č. 5: Separace základního odtoku pomocí dvou metod přihlížejících a dvou nepřihlížejících k hladině podzemních vod. U každé metody je určena hodnota BFI (sledované období 1973–97). Zdroj: (PETERS A VAN LANEN, 2005)

Obr. č. 6: Separace základního odtoku z hydrogramu metodami UKIH(a), RDF(b), a FUKIH(c). Zdroj: (Akosy a kol., 2009)

Obr. č. 7: Separace základního odtoku pomocí třech různých analytických metod a metody digitálního filtru. Zdroj: (LINE A KOL., 2007)

Obr. č. 8: Separace základního odtoku pro jednu povodňovou událost v povodí Dongwan. Zdroj: (LINE A KOL., 2007)

Obr. č. 9: Separace základního odtoku pomocí izotopů a chemických látek. Zdroj: (CAREY A QUINTON, 2005)

Obr. č. 10: Povodí Kopaninského toku a jeho subpovodí P52.

Obr. č. 11: Subpovodí P52 – využití půdy.

Obr. č. 12: Subpovodí P52 – půdní typy.

Obr. č. 13: Sestava pro měření průtoku od firmy Fiedler-Mágr. V předu ultrazvukový snímač hladiny US1200 se stojanem a v pozadí registrační jednotka M4016. Zdroj: (<http://www.fiedler-magr.cz/>)

Obr. č. 14: Umístění sací hadice vzorkovače ISCO v trubním propustku Thomsonova typu vlevo. Vzorkovač ISCO od firmy Technoaqua vpravo nahoře a vpravo dole sada 24 kusů vzorkovnic ze spodní části vzorkovače. Zdroj: (KVÍTEK A KOL., 2008)

Obr. č. 15: Thompsonův přepad s ultrazvukovou sondou a dataloggerem vpravo a vzorkovač ISCO pod ochranným krytem vlevo. Zdroj: (KVÍTEK A KOL., 2008)

Obr. č. 16: Graf srážkových úhrnů ze srážkoměrné stanice Velký Rybník a Humpolec a reakce průtoku měřeného v uzávěrovém profilu P52.

Obr. č. 17: Čára překročení minimálních měsíčních průtoků. Střední část křivky je aproximována přímkou, která představuje zlogaritmované hodnoty základního odtoku dle Killeho metody.

Obr. č. 18: Základní odtok separovaný metodou digitálního filtru dle Chapmana v subpodvodí P52.

Obr. č. 19: Základní odtok separovaný metodou UKIH v subpodvodí P52.

Obr. č. 20: Základní odtok separovaný metodou RDF v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,925 a průchody filtru jsou vpřed-vzad-vpřed.

Obr. č. 21: Základní odtok separovaný metodou FUKIH v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,925.

Obr. č. 22: Základní odtok separovaný Killeho metodou v subpodvodí P52.

Obr. č. 23: Základní odtok separovaný metodou RDF v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,975 a průchody filtru jsou vpřed-vzad-vpřed.

Obr. č. 24: Základní odtok separovaný metodou FUKIH v subpodvodí P52. Hodnota filtračního parametru je 0,994.

Obr. č. 25: Porovnání metod separace základního odtoku na subpodvodí P52.

Obr. č. 26: Porovnání obou metod v dle hodnot poměrů základního a celkového odtoku.

Obr. č. 27: Roční grafy základního odtoku dle Chapmanova digitálního filtru (vlevo) a dle Killeho metody (vpravo).

Obr. č. 28: Statistické porovnání měsíčních hodnot poměrů základního a celkového odtoku. Dosažená hladina významnosti $p = 0,1598$, $df = 33$.

Obr. č. 29: Porovnání měsíčních hodnot BFI s měsíčními srážkovými úhrny.

Obr. č. 30: Porovnání ročních hodnot BFI s ročním srážkovým úhrnem.

Obr. č. 31: Řada denních hodnot koncentrací celkového fosforu a celkového odtoku.

Obr. č. 32: Srovnání měsíčních průměrů koncentrací celkového fosforu se srážkovými úhrny (na hoře) a průměrných hodnot koncentrací se srážkami pro období od dubna do října (dole).

Obr. č. 33: Rozsah max., min. a průměrných hodnot koncentrací celkového fosforu pro období od dubna do října.

Obr. č. 34: Krabicové grafy hodnot koncentrací celkového fosforu zobrazující rozsah neodlehých hodnot, interkvartilové rozpětí a medián pro období od dubna do října.

Obr. č. 35: Porovnání koncentrací celkového fosforu v průtoku se srážkovými úhrny.
Obr. č. 36: Krabicový graf proměnných P_{90-100} (koncentrace v základním odtoku) a P_{0-10} (koncentrace v přímém odtoku).
Obr. č. 37: Krabicový graf proměnných P_{0-100} (koncentrace v celkovém odtoku) a P_{90-100} (koncentrace v základním odtoku).
Obr. č. 38: Koncentrace celkového fosforu a poměry celkového a základního odtoku (BFI)
Obr. č. 39: Porovnání koncentrací P v celkovém a základním odtoku se srážkami.

3.3 SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1: Subpovodí P52 – využití území.

Tab. č. 2: Hodnoty BFI pro jednotlivé metody.

Tab. č. 3: Rozdíl mezi metodami v hodnotách poměru základního a celkového odtoku.

Tab. č. 4: Popisné statistiky pro Srážky ze srážkoměrné stanice Velký Rybník v období od dubna do října a celkové průtoky v toku v jednotlivých hydrologických obdobích.

Tab. č. 5: Popisné statistiky koncentrací celkového P v období od dubna od října.