

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Diplomová práce

Analýza odtoku podzemní vody na experimentálním povodí

Modrava 2

Analysis of groundwater outflow from experimental catchment

Modrava 2

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D

Diplomant: Tomáš Pivrnec

© 2018 ČZU v Praze

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci “Analýza odtoku podzemní vody na experimentálním povodí Modrava 2“ vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Jiřího Pavlásky, Ph.D. Při zpracování práce jsem použil pouze materiály, které jsou uvedené v seznamu použité literatury a zdrojů. Jako autor diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

.....

Bc. Tomáš Pivrnec

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Pavláskovi Ph.D, za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Mé poděkování patří také rodině a přátelům, kteří mi byli oporou v průběhu studia a při zpracování diplomové práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu odtoku podzemní vody v experimentálním povodí Modrava 2, ve střední části Šumavy pod vrcholem hory Malá Mokrůvka. K vypracování této práce byla použita data měřená v průzkumných vrtech a toku Mokrůvka u uzávěrového profilu povodí. Část práce se orientuje na popsání druhů vod a jednotlivých složek odtoku, dále se zabývá metodami separace odtoků. Nejvíce se zaměřuje na metodu Kliner-Kněžek, která byla vhodně upravena a aplikována na měřená data. Touto metodou se provedla separace jednotlivých složek odtoku pro různá období. Následně je v této práci popsán vzájemný vztah hladin vrtů k průtoku v korytě toku na sestupných větví hydrogramu. V závěru práce jsou zpracovány matematické modely simulací výtokových větví hydrogramu, pro odvození odtoku vody z povodí.

Klíčová slova: separace odtoku, sestupné větve hydrogramu, základní odtok, matematický model

Abstract:

This diploma thesis focus on the analysis of groundwater runoff on the experimental catchment area Modrava 2, in the middle part of Šumava, under the mountain of Mala Mokruvka. For this work, data measured in exploratory wells and the stream call Mokruvka, in the catchment area were used. Part of the thesis is focused on description of water types and individual components of drainage and as well as on drain separation methods. It focuses primarily on the Kliner-Knezek method, which has been appropriately modified and applied to the measured data. The separation of the individual components of the effluent is carried out for different periods. There is desribed, the relationship between, the wells level and the flow in the flow channel on the descending curve of the hydrogram. At the end of the thesis, the mathematical models are processed by simulating drainage lines of the hydrogram to derive drainage of water from the river basin.

Keywords: drainage separation, hydrogram descending branch, basic runoff, mathematical model

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Pivrnec

Voda v krajině

Název práce

Analýza odtoku podzemní vody na experimentálním povodí Modrava 2

Název anglicky

Analysis of groundwater outflow from experimental catchment Modrava 2

Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza odtoku podzemní vody z experimentálního povodí na základě vyhodnocených měřených dat a aplikace matematického modelu.

Díličí cíle práce jsou:

- 1) vyhodnocení měřených dat z experimentálního povodí,
- 2) výběr jednotlivých srážko-odtokových událostí se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku,
- 3) analýza sestupných větví hydrogramů ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody,
- 4) modelování sestupných větví hydrogramu pomocí vybraných modelů.

Metodika

Práce bude vypracována na základě zpracovaných dat měřených na experimentálním povodí Modrava 2, především dat odtoku a výšky hladiny podzemní vody v mělkých vrtech u uzávěrového profilu povodí. Z časových řad budou vybrány srážko-odtokové epizody, při kterých došlo k podstatnému zvýšení průtoku i změně hladiny vody ve vrtech. Na takto upravených datech bude provedena separace celkového odtoku z povodí. Na závěr bude využito matematického modelu pro simulace poklesové větve hydrogramu.

Doporučený rozsah práce

cca 50 stran

Klíčová slova

separace základního odtoku, sestupné větve hydrogramu, základní odtok, matematický model

Doporučené zdroje informací

Kessl J., Kněžek M. 2000. Metody výpočtu základního odtoku. Podzemná voda, 6(2), s. 52-58.

Kliner K., Knežek M. 1974. Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemních vod. Vodohospodářský časopis SAV Bratislava, 5 (22), s. 457-466.

Krejčová D. 1990. Vyčleňování základního odtoku separací hydrogramu pomocí průměrných výtokových čar. Zpráva ČHMÚ, Brno.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2018

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2018

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 14. 04. 2018

Obsah

1. Úvod	10
2. Teorie	11
2.1 Hydrologický cyklus	11
2.2 Druhy vod	13
2.2.1 Povrchové vody	13
2.2.2 Podpovrchové vody	13
2.3 Složky odtoku	16
2.3.1 Povrchový odtok	17
2.3.2 Mělký podpovrchový odtok (hypodermický)	18
2.3.3 Základní odtok	18
2.3.4 Přímý odtok	19
2.4 Faktory ovlivňující odtok	20
3. Metody separace základního odtoku	24
3.1 Grafické zpracování základního odtoku	24
3.2 Hydrologická bilance	25
3.3 Metoda Kliner Kněžek	27
3.4 Metoda Killeho	29
3.5 Metoda CN (ztrátová)	30
3.9 Metody rozčlenění hydrogramu celkového odtoku vycházejícího z analýzy výtokových čar	35
3.9.1 Bousinequova metoda, Voskresenského metoda	35
4. Metodika	36
4.1 Charakteristika oblasti	36
4.2 Geologické a půdní poměry	37
4.3 Získaná data	38
Analýza sestupných větví hydrogramů ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody	40
Výběr jednotlivých srážko-odtokových událostí, se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku	40
5. Výsledky	42
5.1 Charakteristika vzájemné závislosti jednotlivých měřených složek	42
5.2 Výběr jednotlivých srážko-odtokových událostí, se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku	44
5.3 Analýza sestupných větví hydrogramů ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody	48
5.4 Modelování sestupných větví hydrogramu pomocí vybraných modelů	49
6. Diskuze	51
7. Závěr	54

8. Zdroje	55
9. Příloha	59

1. Úvod

Voda, nejrozšířenější látka na zemi. Je nezbytnou složkou pro existenci všech žijících organismů. V přírodě je hlavním účastníkem klimatických, biologických, fyzikálních a chemických procesů. Hydrosféra je soubor veškerých vod na Zemi. Místa, kde se voda nalézá, jsou oceány, moře, vodní plochy, jezera, nádrže, povrchové toky, podpovrchové toky, bažiny, sníh, led, ledovce, podpovrchové vody atd. Koloběh vody je zajištěn díky sluneční energii. V přírodě má různé části, jako jsou srážky, výpar, odtok povrchový, podpovrchový a základní. Voda může být také akumulována v přirozených a umělých nádržích. Fyzikálně se voda vyskytuje ve všech skupenských formách v závislosti na teplotě.

Fyzicko-geografické prvky, zejména teplota a srážky, mají vliv na rozvoj vegetace i život člověka. Významnou roli mají přirozené srážky, v jakém množství a intenzitě dopadají na zemský povrch (Kos, 1996).

Sledované rozdíly ve srážkových událostech ročních, měsíčních a denních jsou velké a na jedné straně můžeme pozorovat extrémní sucha a na druhé vlhká období, často provázeny vysokým zvodněním krajiny, nasycením půd a následnými povodněmi. Tyto extrémní situace se vyskytují zřídka, ale kratší suchá nebo vlhká období zhoršují hospodaření v zemědělství a projevují se poměrně často (Soukup a Hrádek 1999). V současnosti pozorujeme velké problémy s výkyvy počasí. Dlouho trvající sucha mají pro lidstvo mnohem větší ohrožující následky než povodně, které se v minulosti vyskytovaly. Při suchu, nejsou jen ohroženy zásoby podzemní vody, ale i zásoby povrchové vody, následkem jsou klesající hladiny průtoků a ve velkém strádají na deficit vodní vláhly zemědělské pozemky. Tím jsou způsobené zhoršené podmínky pro lidi, faunu a floru (Datel a kol. 2014).

Při řešení úloh hydrologické bilance a při návrzích využitelných množství podzemní vody se často můžeme setkat s problémem určení velikosti jednotlivých složek odtoků z povodí. Proto se tato práce zabývá metodami na určení a separaci jednotlivých odtoků z povodí. Odtok vody je podmíněn řadou faktorů, například jsou to klimatologické, hydrologické či botanické, ale také zejména morfologické a hydrogeologické faktory. Zkoumání zákonitosti vzniku a rozdělení jednotlivých složek odtoku se využívá pro hydrologické podklady při úpravě vodních toků, hrazení bystřin, podklady pro zásobování vodou, průmysl, zemědělství, pro využití vodní energie a ochranu před povodněmi (Hrádek a Kuřík 2004)

Cílem této práce je zaměřením se na experimentální povodí z pohledu analýzy, separace a popsání jednotlivých složek odtoků. V první části práce je zpracován hydrologický cyklus a zaměřením na jednotlivé druhy vod v přírodě. Dále jsou popisovány srážko-odtokové vztahy se zaměřením na jednotlivé složky odtoků vody z povodí. Odtok ovlivňuje řada faktorů, například klimatické, vegetační, půdní a další poměry, které mají vliv na objem jednotlivých složek odtoku. Odtokovými procesy se zabývají různé modely, které mohou simulovat jednotlivé složky, existuje jich velká řada a v části práce jsou popsány jen vybrané.

Praktická část práce je zaměřena na experimentální povodí Modrava 2, malého toku označovaného Mokrůvka pojmenovaném po jednom z vrcholů Malá Mokrůvka ohraničující povodí. Práce vychází z měřených dat v tomto povodí, zaznamenaná měrným profilem na toku, průzkumnými vrty umístěnými na levém a pravém břehu toku v blízké vzdálenosti od měrného profilu a srážkoměrnou stanicí. Data byly vybraná z období od roku 2013–2017. Měřeny byly průtoky, srážky, hladiny ve vrtech a teploty. Je zde ukázána charakteristika oblasti v závislosti měřených dat. Vybrány byly jednotlivé srážko-odtokové události se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku. Při zkoumání jednotlivých složek odtoku se použila upravená metoda Klinner-Kněžka. Dále pro analyzování odtokových vlastností povodí je použita analýza sestupných větví hydrogramu ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody a následně modelování sestupných větví hydrogramu pomocí vybraných modelů.

2. Teorie

2.1 Hydrologický cyklus

Voda se na Zemi vyskytuje ve třech skupenstvích, plynném kapalném a pevném. Všechna voda, která se nachází na povrchu, pod povrchem i v atmosféře, se nazývá hydrosférou a je v neustálém pohybu. Hnacím motorem tohoto koloběhu je slunce, které iniciuje a reguluje oběh vody v přírodě. Oběh vody, označovaný jako hydrologický cyklus, zajišťuje fungování systému Země. Obsahuje nespočet procesů výměny vody, změny skupenství, chemické reakce či přesun energie. Představuje největší přesun jedné látky v rámci celého zemského systému. Nejdůležitějším faktorem v oběhu vody je slunce, které je hlavním zdrojem energie a jeho vlivem se voda vypařuje z vodní hladiny, z povrchu rostlin a ze zemského povrchu. Poté se voda dostává do atmosféry a pomocí vzdušných hmot je dopravena na jiná místa,

kde za určitých podmínek kondenzuje a ve formě deště spadá na povrch země. Následně se voda vsakuje do půdy, odtéká do vodních toků, rybníků, jezer a obohacuje vláhou půdní profil. Poté se voda opět vypařuje a vytváří koloběh vody.

Na planetě Zemi vznikají dva koloběhy vody, velký a malý. Velký koloběh vody je uzavřený hydrologický cyklus, který probíhá nad světovými oceány a pevninou. Malý koloběh vody probíhá pouze nad hladinami moří či v bezodtokových oblastech, ze kterých voda neodtéká do oceánu (Blažek a kol. 2006). Při velkém koloběhu vody (Obr. č. 1) dochází k výparu z vodních hladin a následně je vzdušnými proudy odnášen nad pevninu, kde jsou vodní páry kondenzací nebo desublimací přeměněny na srážku, která pak spadá na povrch Země. Ze zemského povrchu se dostane pomocí vodních toků, či výparu do atmosféry a po následné přeměně na srážku, opět do světového oceánu. Při malém koloběhu se voda vypařená z oceánu opět vrací v podobě srážek zpět. Na malé části Země se vyskytují takzvané bezodtokové oblasti, ze kterých voda do světových oceánů a moří neodtéká. Při malém koloběhu nad zemským povrchem je princip obdobný, vypařená voda se vrací zpět na povrch Země (Hrádek a Kuřík 2004, Nypl 1986).



Obr. č. 1 Schéma koloběhu vody (<https://water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html>)

2.2 Druhy vod

2.2.1 Povrchové vody

Povrchové vody jsou všechny vody přirozeně se vyskytující na povrchu Země. Tento charakter si uchovávají i přesto, že se nevyskytují jen na zemském terénu, ale například vody v přechodně zakrytých úsecích, přirozených dutinách pod zemským povrchem nebo také v nadzemních vedeních. Povrchovou vodou můžeme označit i tu vodu, která při dešti či sněžení dopadla na zemský terén, také to může být voda, která na zemský terén vyvěrá. Vody dělíme na vody kontinentální a mořské a dále na vody tekoucí a stojaté. Vodami tekoucími jsou vodní toky a stojatými například rybník, jezera, vodní nádrže, jezové zdrže nebo i voda ve sněhové pokrývce. Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují kontinentální povrchové vody, například geologickou skladbou podloží, hydrologicko – klimatickými poměry (srážky, teplota) a antropogenní činností (zemědělství, průmysl, komunální odpad) (Horáček, 2015).

2.2.2 Podpovrchové vody

Voda podpovrchová se vyskytuje pod zemským povrchem ve všech formách a skupenství. Dělí se na vodu půdní a podzemní (Nypl, 1986). Půdní voda je podpovrchová voda zastoupena v půdě, která nevytváří souvislou hladinu (nenасыčené prostředí). Na půdní vlhkosti závisí život rostlin a živočichů v ní žijící. Podzemní voda je podpovrchová voda, vyplňující dutiny zvodnělých hornin, vytváří z pravidla souvislou hladinu. Je velkou zásobou pitné vody a zdrojem vodnosti řek (Šilar, 1996).

Podzemní voda se dle původu rozděluje na vody vadózní, juvenilní a fosilní. Vadózní podzemní voda vzniká infiltrací povrchové vody na zemském povrchu anebo kondenzací vodních par, které pronikly pod zemský povrch z atmosféry z nízkých výšek u povrchu země. Pohybuje se v poměrně mělkých vrstvách zemské kůry a představuje největší část celkových zásob podpovrchových vod na Zemi. V podzemí se pohybuje filtračním pohybem ve směru horizontálním i vertikálním a je nedílnou složkou oběhu vody v přírodě.

Juvenilní podzemní voda, vzniká hluboko v zemské kůře, při tuhnutí žhavé hmoty, při kterém se uvolňují molekuly vodíku a kyslíku a při vysokém tlaku i teplotě se slučují do molekul vody, následně v chladnějších vrstvách zemské kůry přecházejí do kapalného stavu. Tato voda proniká na zemský povrch jako součást vod horkých pramenů, gejzírů v oblastech, kde byla či je sopečná činnost. Tato voda se neúčastní oběhu vody v přírodě a představuje jen nepatrnou část zásob podzemní vody.

Fosilní podzemní voda, je po dlouhá geologická období uzavřena nepropustnými horninami.

Režim podzemních vod závisí na geologických poměrech ovlivněných mocností a hloubkou zvodnělé vrstvy, propustností nadloží či rozlehlostí infiltračního území. Ovlivňující složkou odtoku je reliéf terénu, který díky většímu sklonu působí na možnost vsaku vody do půdy a tím se snižuje infiltrace vody do půdy. Voda pak putuje přímo do vod povrchových.

Klimatické podmínky se mohou podílet na režimu podzemních vod i ztrátovou složkou. Tento faktor můžeme pozorovat u množství vypařené vody, působením na zvětrávání vrchních vrstev hornin a množstvím, které potřebuje vegetace. V horninovém prostředí dochází k změnám zásoby a je zde pozorováno kolísání hladin podzemních vod. Změny často sledujeme se značným zpožděním, a to hlavně po dlouhé vydatné srážkové události. Krátkodobé intenzivní srážky jsou pro doplnění zásob podzemních vod méně důležité, pokud není množství deště dostačující, aby doplnilo vodní kapacitu na maximum, srážková voda níže do půdy nepronikne (Pokorná a Zábranská, 2008).

Podzemní voda tvoří 30% z celkové světové zásoby sladké vody a 99% ze zásoby sladké je vody v tekutém skupenství. Voda pod povrchem je i jako ostatní voda v neustálém pohybu, i když její rychlost je většinou menší než 1 m za den. Podzemní voda je důležitou částí dotování vodou řek a vodních ploch. Nedílnou součástí je její využití pro odběry lidské potřeby (Dingman, 2002).

Podzemní vodou se udává voda, která se přirozeně vyskytuje pod zemským povrchem v pásmu nasycení, kde se dostává do kontaktu s horninami. Tato voda se vyskytuje v zemských dutinách a zvodnělých zemských vrstvách. Za podzemní vody se považují také vody protékající drenážními systémy a vody ve studnách a vrtech. Útvar podzemní vody se považuje za vymezené soustředění podzemní vody v příslušném kolektoru.

V hydrogeologii se pojmem **kolektor** rozumí horninová vrstva nebo souvrství hornin s dostatečnou propustností, která dostatečně umožňuje spojitou akumulaci podzemní vody nebo její proudění či odběr.

Pojmem **izolátor** se označuje horninové těleso, které vodu propouští jen v malém množství nebo vůbec.

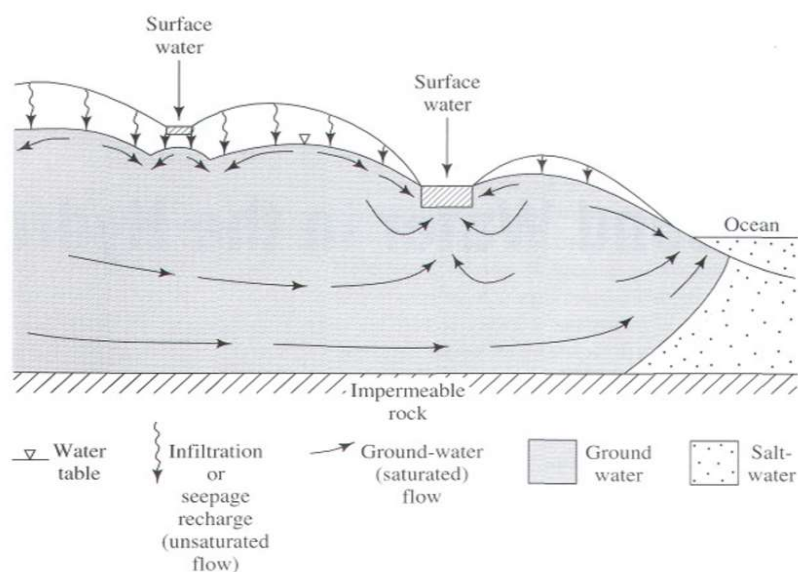
V horninovém prostředí se podzemní voda pohybuje převážně póry mezi jednotlivými částicemi hornin. Průlinová propust se týká především sedimentárních hornin, jaká je

například u písků a pískovců. Na druhé straně puklinová propustnost hornin je u omezeně vyvěřelé nebo metamorfované horniny, které vedou vodu většinou v puklinách vzniklých v důsledku jejich rozpadu.

Pásmo nasycení je část geologického profilu, kde se vyskytují póry zcela zaplněny vodou. **Pásmo provzdušnění** je ta část geologického profilu, kde jsou póry částečně vyplněny vzduchem, vyskytuje se mezi povrchem terénu a pásmem nasycení. **Zvodeň** je hydraulicky spojitá akumulace v pásmu nasycení gravitačních podzemních vod vyplňující kolektor. Může se vytvořit i několik zvodní nad sebou, voda v první zvodni (zpravidla v kvartérních sedimentech nebo v pásmu povrchového zvětrávání hornin) se nazývá mělká (freatická) podzemní voda (Pitter, 2015).

Geneze vody

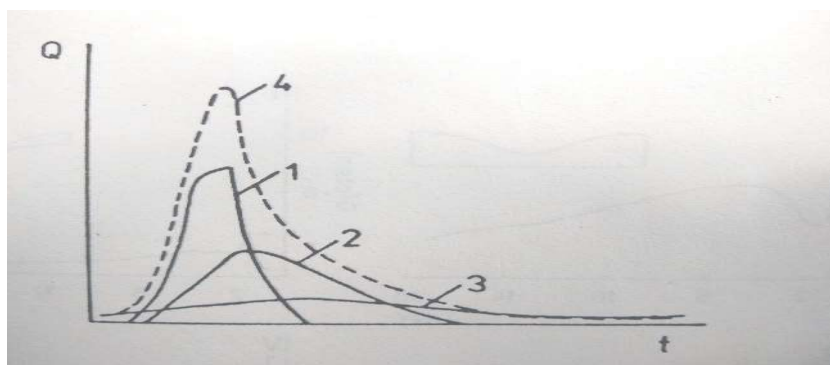
Podzemní vody mohou dosahovat hloubky až 10 km pod zemským povrchem. Zásoby podzemní vody se doplňují infiltrací srážkových a povrchových vod do půdy. Dále to může být kondenzace vodních par v půdě, vznikem a kondenzací vodních par z magmatu. Z celkového ročního objemu srážek tvoří zhruba 75 % výpar, půdní vláhá a doplňování podzemních vod. Odtok povrchovými vodami je tvořen 25 %. Část podzemních vod vzniká břehovou infiltrací, kdy voda z koryt toků, nebo vodních ploch, proniká vlivem hydraulického gradientu do půdy (Pitter, 2015, Strnad, 2015). Obr. č. 2 ukazuje, průtokové poměry v porézním prostředí, pod kterým jsou nepropustné horniny. Je zde znázorněna cesta vody, která se vsakuje do půdy a pak následně se shromažďuje v depresích u povrchu země. Voda dále putuje ve velkých hloubkách ohraničených nepropustným podložím a směřuje k oceánu.



Obr. č. 2 Podzemní voda v hydrologickém cyklu (Dingman, 2002)

Složky odtoku

Odtok je hydrologický pojem, který vyjadřuje množství vody odteklé za dané časové období z povodí. Představuje přitékání povrchové nebo podpovrchové vody do recipientu. Odtok je zahrnutý v hydrologické bilanci a je tvořen několika složkami. Rozdělujeme ho na povrchový odtok, mělký podpovrchový (hypodermický), základní (podzemní) a sumou povrchového a hypodermického je odtok přímý. Na Obr. č. 3 jsou znázorněny jednotlivé složky odtoku. Součtem těchto složek odtoku (bez přímého) je celkový odtok (Pokorná a Zábranská, 2008). Velikost odtoku a časový průběh závisí na topografických, geologických, půdních, vegetačních, klimatických a dalších podmínkách. Časový průběh jednotlivých složek odtoku závisí i na hydraulické spojitosti nebo nespojitosti podzemních a povrchových vod (Blažková, 1993).



Obr. 3. Komponenty celkového odtoku. 1- povrchový odtok, 2- hypodermický odtok, 3- podzemní odtok, 4- hydrogram celkového odtoku. (Flaming, 1975)

Celkový odtok

Skládá se ze tří složek, povrchového, hypodermického a základního odtoku. Separace složek odtoku v uzávěrovém profilu povodí je základním nástrojem hydrologie už desítky let. Výška celkového odtoku je součtem odtoku povrchového, podpovrchového (hypodermického) a podzemního. Používá se především při analýzách povodňových vln a k oddělení přímého odtoku, vyvolaného srážkou, od odtoku základního, který je zapříčiněn výtokem vody ze zásob podzemních vod v daném povodí (Kulhavý a kol., 2001).

O_c – celkový odtok

O_p – povrchový odtok

O_h – hypodermický odtok

O_z – základní odtok

$$O_c = O_p + O_h + O_z \quad (1)$$

2.2.3 Povrchový odtok

Povrchový odtok je gravitační pohyb vody po svahu nebo soustředěný odtok říční sítí k uzavíracímu profilu povodí. Povrchová voda odtékající z území povodí, pochází z deště, ze sněhu, z výronů podzemních vod nebo z ledovců, případně z věčného sněhu. O režimu odtoku vody z povodí rozhodují vlastnosti zdroje zásobujícího vodní tok společně s vlastnostmi prostředí, kde se odtok děje. Na to, který zdroj určuje charakter odtoku, mají velký vliv i klimatické poměry v okolí. Převládajícím zdrojem povrchového odtoku jsou atmosférické srážky v podobě deště a sněhu. Povrchový odtok, je přímo závislý na vsakovacích schopnostech půdy, vzrůstá v průběhu deště a jeho velikost je závislá na intenzitě srážkové činnosti. K povrchovému odtoku dochází v okamžiku, kdy intenzita deště překročí vsakovací schopnost půdy. Odtok je ovlivněn řadou faktorů, například morfologií území, geografickými poměry, půdními poměry, druhem a složením vegetačního krytu. Dále mohou být ovlivněny antropogenními činiteli, působícími svými nepřirozenými vlivy na povodí (Holý, 1978). Režim toků je ovlivněn množstvím spadlých srážek, a to na jak velké ploše se vyskytly a za jak dlouhou dobu měly dobu trvání (Dub a Němec, 1969). Do povrchového odtoku se započítává voda, která odtéká po povrchu z míst, kdy vznikly podmínky pro tvorbu odtoku. Tato složka odtoku je zapříčiněna důsledkem srážek a voda po povrchu země stéká do vodotečí a vodních ploch. Povrchový odtok představuje objem vody, která odtéká za uvažované období O_p a udává se v jednotkách $[m^3]$ a objem odtoké vody za čas označovaný jako průtok Q_p v $[l/s]$ nebo $[m^3/s]$ (Pokorná a Zábranská, 2008, Hrádek a Kuřík, 2004).

Objem povrchového odtoku lze vyjádřit z objemu deště použitím součinitele odtoku, z empirických závislostí, odvozených podle pozorování a měření v přírodě a z vyhodnocení dešťů podle závislosti vsaku na intenzitě a době trvání deště (Holý, 1978).

Fáze povrchového odtoku

- **Fáze nasycování půdy** – v této fázi je intenzita deště většinou menší, než je intenzita infiltrace, do této doby nevzniká ještě povrchový odtok. Dochází k zadržování dešťové vody odtokovou plochou (infiltrace, intercepce, akumulace vody v povrchových depresích).
- **Fáze plošného či svahového odtoku** – v tomto případě převyšuje intenzita deště intenzitu infiltrace, zde po saturaci ztratí intercepce a akumulaci v povodí voda stéká v drobných stružkách po svahu dolů. Tyto stružky se vytváří ve

směru největšího sklonu k uzavíracímu profilu povodí. Tento odtok představuje z pohledu hydrodynamiky velice složitý proces, který je ovlivněn velkým počtem působících faktorů, kdy největší vliv mají geometrické charakteristiky povodí, hydrografický síť (mikrosíť), půdní poměry, charakter povrchu a vlastnosti deště.

- **Fáze soustředěného odtoku v říční síti** – v této fázi se uplatňuje povrchový odtok s podpovrchovým. Velikost podílu povrchového odtoku ve složce celkového odtoku závisí na počátečním stavu nasycenosti půdy, dále na propustnosti půdy a charakteru deště (Soukup a Hrádek, 1999).

2.2.4 Mělký podpovrchový odtok (hypodermický)

Hypodermický odtok je voda, která se infiltrovala do půdy a před odtokem z povodí nedosáhla hladiny podzemní vody. Představuje odtok prosakující gravitační vody ve vrchní podpovrchové vrstvě do koryta toku, aniž by se infiltrovala k hladině podzemní vody. Má význam v celkové vodní bilanci, závisí na charakteru půdy, deště a výskytu vodonosných horizontů. Tato složka odtoku prosakujících gravitačních vod, představuje část infiltrovaných srážek, která se nepodílí na zvýšení dlouhodobé zásoby vody v půdě. K podpovrchovému odtoku dochází v horní vrstvě půdy, v přechodně nasycené zóně s možností dotace povrchového odtoku, přestože by nebylo dosaženo hladiny podzemní vody. Příčinou vzniku podpovrchového odtoku jsou méně propustné, nakloněné vrstvy půdy nebo propojené podpovrchové systémy kořenů a chodbiček, jsou označovány jako preferenční cesty hypodermického odtoku. Hypodermický odtok může být způsoben i laterálním gradientem půdní vlhkosti (Kulhavý a Kovář, 2000). V půdním profilu putuje nekapilárními póry k uzavíracímu profilu povodí. Voda odtéká nesaturovanou zónou a v době sucha nezvodněným horninovým prostředím, v těchto případech dotéká k povrchovému toku s určitým časovým zpožděním. Tento odtok je velice spjatý se srážkovou událostí nebo srážkovým rokem (vlhký rok). Označuje se $O_h [m^3]$ nebo $Q_h [l/s]$

2.2.5 Základní odtok

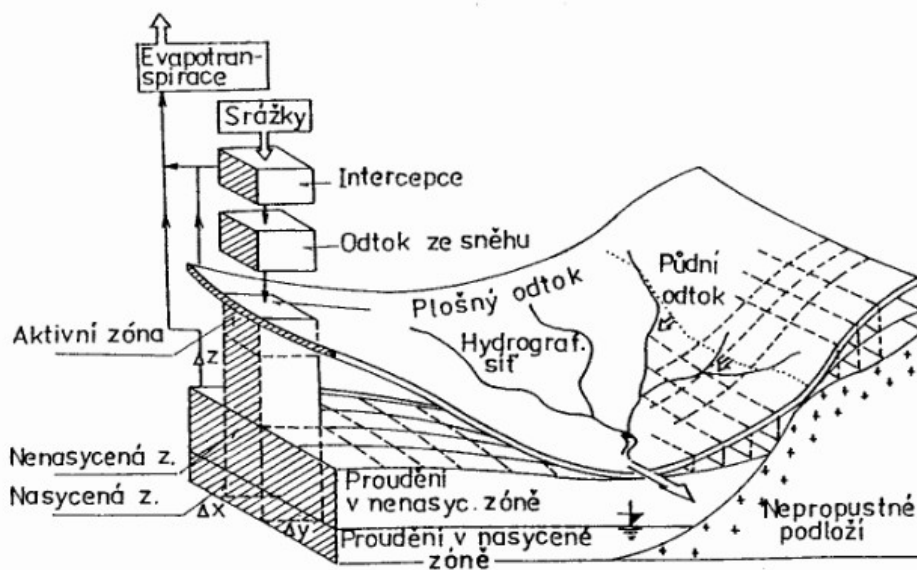
Základní odtok, je část celkového odtoku tvořená dotací z podzemních vod a je vztahována k profilu na toku. Je to ta část vody, která se pohybuje ve směru sklonu nepropustného podloží. Rychlost je velice nízká a závisí na charakteru horninového prostředí, půdního prostředí a na zdroji podzemní vody. Vody ze srážkové činnosti se

infiltrují k hladině podzemních vod a následně do povrchového odtoku se dostávají opožděně za odtokem povrchovým (Hrádek a Kuřík, 2004). Toto je složka celkového odtoku, představující odtok podzemní vody z povodí. Označuje se O_z [m^3], a nebo Q_z [m^3/s], [l/s] (Pokorná a Záborská, 2008)

2.2.6 Přímý odtok

Přímý odtok se používá v případě, kdy se uvažuje dohromady složka představující povrchový a hypodermický odtok. Kvůli tomu, se hypodermický odtok obtížněji separuje a často se s povrchovým odtokem prolínají. Toto prolínání během odtokové události vzniká i několikrát za sebou (Beven, 1986). Při porovnání s povrchovým odtokem bývá hypodermický odtok pomalejší. S touto částí se počítá jako s odtokem přímým, kdy se sčítá složkou povrchového odtoku s odtokem hypodermickým. Označuje se O_{ph} [m^3], nebo Q_z [m^3/s], [l/s] (Pokorná a Záborská, 2008).

Na Obr. č. 4 jsou ukázané procesy podílejících se na odtoku z povodí.



Obr. č. 4. Povodí jako systém se subsystemy a procesy (SHE) (Kulhavý a Křovák 2000) – Povrchový odtok je zde označen – plošný odtok, Hypodermický (podpovrchový) odtok – půdní odtok, proudění v nenasycené zóně, Odtok základní – proudění v nasycené zóně

2.3 Faktory ovlivňující odtok

Vodními toky v průběhu roku protéká neustále se měnící množství vody. Kolísání průtoků nám udává režim toku, ten je ale ovlivněn i velkým množstvím faktorů, které jsou velmi úzce spjaty s povodím toku. Vlastnosti povodí menších vodních toků se projevují na odtokovém režimu toku, jakosti vody, hydrologii, biologii a stavu ekosystému v korytě. Charakter povodí u drobných malých toků se projevuje více než u povodí s větší rozlohou. Faktory, které tvoří povodí, můžeme rozdělit na neovlivnitelné (přírodní, fyzickogeografické) a ovlivnitelné, převážně antropogenního charakteru (Soukup a Hrádek 1999).

Klimatické činitele

Klimatické faktory mají pro vodnost toků a jejich režim rozhodující význam. Ovlivňují tvar a sílu odtoku.

Atmosférické srážky jsou bezprostřední příčinou velkých vod, proto velmi často se vychází z údajů o vydatnosti srážek, při odvozování povodňových vln. Opačným případem je nedostatek srážek a následné sucho, které způsobuje nejnižší průtoky, zde ale rozhodují geologické i půdní činitele.

Pro malá povodí jsou významným faktorem letní přivalové srážky, které svojí kratší dobou trvání, ale o to větší intenzitou mohou být příčinou nebezpečných povodňových stavů na středních a velkých povodích. Přivalové srážky způsobují náhlé zvýšení objemu protékající vody v korytě, ale mohou být i příčinou erozí. Důsledkem může být zanášení koryta a tím snižování průtočnosti a zmenšování objemu retenčních nádrží (Soukup a Hrádek 1999). Z dlouhodobého průměru v letním období se vyskytují značné srážky, ale i přesto jsou odtoky z povodí poměrně malé, kvůli jejich velké intenzitě a krátké době trvání.

Dalším klimatickým faktorem je teplota vzduchu. V jarním období, při zvyšujících se teplotách roztávají zásoby vody v podobě sněhu, dotují celkový odtok z povodí a významně se podílí na zvyšování zásob podzemní vody. V tomto období se pravidelně zvyšují odtoky z povodí a průtoky ve vodních tocích. V letních měsících se díky vysoké teplotě zvyšuje výpar z půdy, ze spadlých srážek a z volných hladin vodních ploch.

Výpar je způsoben rozdíly napětí vodních par na hladině se vypařující vody a přilehlém ovzduší. Je bezprostředně ovlivněn vlhkostí vzduchu, na napětí par v něm,

a tím na pohyb a teplotě vzduchu. Působením teploty a vzduchu se přirozeně mění výměnou hmot horizontálním a vertikálním směrem (Dub a Němec 1969).

Fyzickogeografické činitelé

Do těchto faktorů se mohou zařadit morfologické vlastnosti povodí a koryt toků, dále geologické poměry, rozsah, druh a složení porostu, výskyt přirozených a umělých nádrží, složení a stav půdy. Vliv těchto činitelů ovlivňuje každý pohyb vody na planetě Zemi a může se pozorovat přímo nebo skrytě v jednotlivých částech odtoku. Některé z těchto činitelů jsou charakteristickým neměnným rysem povodí, například geologický původ, nadmořská výška polohy povodí.

Geografické činitelé

Hlavním geografickým faktorem je plocha povodí, ovlivňuje celkový objem odtoku a udává se většinou v km². Dalším důležitým faktorem je tvar povodí, na kterém závisí doba soustředování odtoku vody do uzávěrového profilu. Významným pro dobu dobíhání odtoku do uzávěrového profilu je délka údolnice a průměrná délka svahu určující dráhu odtoku, která ovlivňuje vývoj erozních procesů. Tvar povodí bývá obvykle nejširší ve své střední části směrem k prameništi a k uzávěrovému profilu na druhé straně se zužuje.

Geologické a půdní poměry v povodí

Tyto poměry výrazně ovlivňují rozdělení odtoku ze srážek na odtok povrchový a podpovrchový. Jsou důležitou složkou pro intenzitu a velikost infiltrace vody do půdy. Dále jsou důležité pro akumulaci vody v půdním profilu. Podílí se na průběhu jednotlivých složek odtoku. Ovlivňují stabilitu půdního profilu z hlediska intenzity erozních procesů. V oblastech s dobře propustnými horninami se vsakuje větší množství vody do spodních horizontů a tím se zvyšuje nasycenost půdních horizontů. O množství prosakující vody do půdy rozhodují i půdní poměry (půdní druh, struktura vrchního horizontu, propustnost a vlhkost půdy). Významně se dále podílí sklon uložení vrstev hornin z hlediska pronikání vody do spodních vrstev půdy.

Podle propustnosti se horniny dělí na tři skupiny.

Propustné horniny

- Rozrušené horniny, úlomkovité sedimenty, zkrasovatělé horniny, pórovité vyvěřeliny
- Kvarterní fluviální sedimenty: aluviální, deluviální a preluviální náplavy
- Eolické sedimenty: vložky štěrku a písku v nepropustných sedimentech

- Rozrušené a zkrasovatělé karbonátové horniny ze starších útvarů: vápenec, dolomit

Polopropustné horniny

- Hlinité písky, pískovce, rašeliny, slepence, jemně rozrušené vápence

Nepropustné horniny

- Celistvé nerozrušené horniny: žuly, syenity, porfyry, diabasy, znělice, čediče, krystalické břidlice, nerozrušené vápence, slíny, jíly a jílovité břidlice

Propustnost hornin se určuje dle nasycené hydraulické vodivosti k_f , hodnoty jsou od velmi nízké ($0,3 k_f [m/den]$), až větší než $6,0 k_f [m/den]$. Geologické poměry jsou velice významné z pohledu celkové zásoby a úrovně hladiny vod. Zjišťují se z podrobných geologických map či detailním průzkumem. Půdní poměry jsou důležité z hlediska intenzity, velikosti infiltrace. Rozdělují složky povrchového a podpovrchového odtoku. Nalezneme je v pedologických mapách či provedením hydrogeologického průzkumu ve zkoumané lokalitě (Hrádek a Kuřík, 2004).

Vodní tok s příbřežní zónou

Tato součást akumulčního prostoru je nedílnou složkou vodního toku. Důležitou vodohospodářskou funkcí je vodu z povodí odvádět, ale také ji zadržet a umožnit dotaci podzemních vod. Tato základní funkce byla v minulosti potlačována a zaměřovala se na rychlé odvedení vody z povodí. Vodní tok byl tak pouze recipientem pro rychlý a bezpečný odtok vod z povodí (Soukup a Hrádek, 1999).

Vegetační kryt

Je nedílnou součástí povodí. Vegetační kryt ovlivňuje infiltraci vody, rychlost svahového odtoku, evapotranspiraci a zachycuje podíl srážek, které dopadly na území povodí. Množství zadržené vody na rostlinách a předmětech v povodí se nazývá intercepce. Tato zadržaná voda se pak v průběhu času z listů vypařuje, za určitých podmínek může být přijata povrchem rostliny. Velikost intercepce je ovlivněna mnoha faktory, např. charakterem srážek, silou větru, faktory ovlivňující výpar, druhu a vegetačním stádiu rostlin. Intercepce zachycuje vegetační kryt určité množství srážek. Vegetační kryt evapotranspirací ovlivňuje výpar z půdy a rostlin. Vegetace vyskytující se na povodí působí na rychlost stékání vody do uzávěrového profilu a pozdržuje jí na jejím území. Vegetační kryt je z hlediska vodohospodářského velice výhodný, protože plocha krytá vegetací je více odolná k erozím (Němec 1965). Dostatečná plocha je pokryta prodyšnými rostlinami, které jsou schopny transpirace

během celé vegetační sezóny a udržují pravidelný charakter hydrologického cyklu. V průběhu vegetačního období způsobuje transpirace ochlazování krajiny, tím jsou ovlivněny teplotní rozdíly pocházející z různých míst krajiny. Důsledkem ochlazování je, že se pak v přírodě nevyskytují tak velké teplotní rozdíly, které by způsobovaly silné deště, ale převládají tak deště s malou intenzitou srážek (Šír, 2008). Vegetační pokryv také ochraňuje půdu před destruktivním působením dopadajících dešťových kapek a zpomaluje rychlost povrchového odtoku. Vegetace nepřímo působí na půdní vlastnosti, zejména na pórovitost a propustnost. Omezuje možnost zanášení půdních pórů jemnými půdními částicemi a mechanicky zpevňuje půdu kořenovým systémem. Ochranný vliv vegetace je přímo úměrný pokryvnosti v době výskytu přívalových dešťů, v období od dubna do září (Janeček a kol., 2012).

Důležité je, aby oblast měla vhodné rozložení vegetačního krytu. Dobře vsakující a významný z hlediska snížení okamžitého odtoku z povodí je travní a luční porost (Kodešová, 2010). Z hlediska situování lesu v povodí je hydrologicky nejúčinnější, umístění v horní části povodí. Les v dolní části povodí, může zejména v období jarního tání, způsobovat zvýšení kulminačních průtoků. Lesní půdy s vrstvou hrabanky a humusu, mají velkou vsakovací schopnost, nejvíce ji vstřebávají lesy dubové, dále pak lipové. Méně už vsakují lesy modřínové, březové a nejméně dlouhotrvajících srážek dokáží zadržet lesy smrkové (Němec 1965). Zdravý vyspělý smíšený les, s dostatečnou vrstvou humusu a hrabanky, je schopen pojmout a zachytit velké množství srážek a vsáklou vodou s časovým zpožděním zásobovat postupně vodní tok (Kvítek a kol., 2006).

Antropogenní faktor

Do odtoku vody z povodí, může značnou měrou zasahovat člověk. Tyto změny režimu odtoku vody jsou ovlivněny, způsobem využívání půdy. Srážko-odtokového procesu se účastní všechna půda, záleží tedy, jak se s ní nakládá. V zemědělství závisí na kulturním poměru plodin a způsobu obdělávání. Zde odtok ovlivňuje mnoho faktorů, polohové umístění kultur, osevnický postup, orba, setba plodin, hnojení. Tyto jevy mohou lépe či hůře ovlivnit srážkový odtok a případnou erozi půdy.

Dalším činitelem ovlivňujícím odtok vody z území je rozrůstání ploch se zastavěným nepropustným povrchem (domy, silnice, parkoviště). Tím se člověk podílí na zvýšení odtoku a snížení vsaku do půdy. Tyto změny je snaha regulovat, například zasakovacími drenážními opatřeními. Dalšími regulujícími prvky, které mají za účel regulovat odtok z krajiny, jsou vodní nádrže, přehrady, tůňky, ale i revitalizace vodních toků.

Negativní následek vlivu člověka na odtok vody z krajiny je zapříčiněn cíleným kácením lesů, či odstraněním vegetačního krytu. V tomto případě, zde voda odtéká větší rychlostí a není tedy dostatečně zdržena. Neblahý následek to má nejen pro přírodu, ale i pro člověka, kdy v různých oblastech mohou docházet zásoby pitné vody (Janeček a kol., 2012).

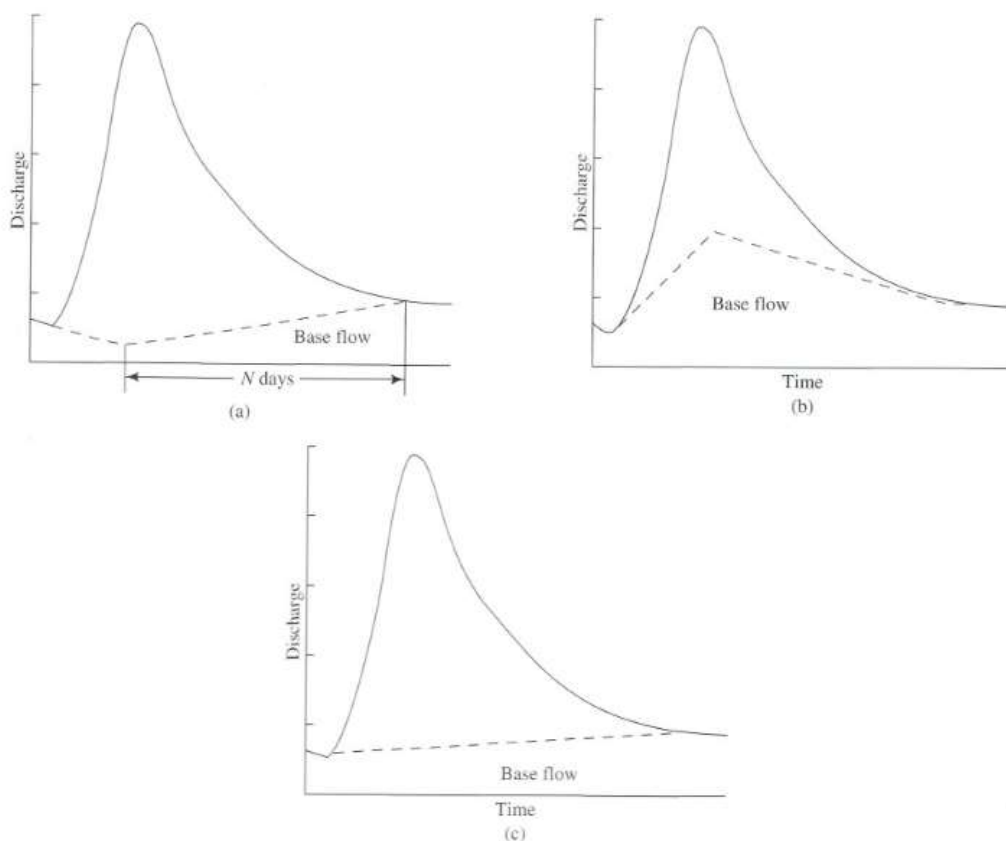
3. Metody separace základního odtoku

Tato kapitola se věnuje popisu vybraných metod, kterými můžeme separovat celkový odtok na jednotlivé složky. Metod rozdělující celkový odtok je velké množství, a proto tu jsou uvedeny jen některé. Při separaci se vychází z faktů, že celkový odtok je všechna voda, která odchází z povodí, může se rozdělit na odtok povrchový, mělký podpovrchový (hypodermický) a základní (podzemní). Následně budou popsány vybrané metody, která se dají implementovat na určité typy povodí a dále se z nich dají vypočítat a odvodit základní hodnoty složek odtoku.

3.1 Grafické zpracování základního odtoku

V této metodě jsou graficky znázorněny tři postupy při možné separaci podzemního odtoku z povodí. Nejjednodušším postupem separace podzemního odtoku je spojením typických bodů na čáře průtoků (Obr. č. 5, **graf c**). Spojujeme tedy dva nejnižší body průtoků na začátku a na konci průtokové vlny rovnou přímkou. V tomto způsobu vycházíme z předpokladu, že podzemní odtok v celé době není ovlivněn průtokovou vlnou. Je zde patrné, že předpoklad značně zjednodušuje reálný stav a s touto metodou se dá počítat jen v omezených situacích (Kněžek, 1988; Digman 2012). Druhou možností je stav, kdy se počítá, že podzemní odtok klesá až do doby kulminace průtoků a následně začíná stoupat (Obr. č. 5, **graf a**). V třetím případě (Obr. č. 5, **graf b**) při započetí srážko-odtokové události, kdy průtok začíná stoupat, hladina podzemí vody stoupá také, v době kulminace začne klesat v závislosti na průtoků, zde kopíruje trend průtoků.

Grafická řešení mají rozdílné postupy při určení začátku a konce povrchového odtoku. Liší se také s přístupem a pravidly odhadů podzemního odtoku. Při používání stejných datových sad záleží na interpretaci metody autorem.

**FIGURE 8-38**

Methods of graphical base-flow separation. (a) The pre-event flow trend is projected until the time of peak, after which the base-flow hydrograph is connected by a straight line that intersects the total-flow hydrograph N days after the peak, where N (days) = $A^{0.2}$, and A is drainage area in mi^2 . (b) The hydrograph is plotted on semi-logarithmic paper ($\log[Q(t)]$ vs. t). A straight line is fitted to the end of the hydrograph recession on this graph and projected backward in time under the peak. This projected line is transferred onto arithmetic graph paper and a smooth line is sketched connecting it to the end of the preceding recession. (c) From the point of initial hydrograph rise, a line that slopes upward at a rate of $0.05 \text{ ft}^3 \text{ s}^{-1} \cdot A$ (mi^2) per hour is drawn and extended until it intercepts the hydrograph ($A < 20 \text{ mi}^2$). From *Water in Environmental Planning* by Thomas Dunne and Luna B. Leopold. Copyright © 1978 by W. H. Freeman and Co. Reprinted with permission.

Obr. č. 5 Grafické metody separace základního odtoku (Digman, 2012)

3.2 Hydrologická bilance

Nejobecnějším vztahem, který vyjadřuje řešení vzájemných složek zúčastněných v koloběhu vody je hydrologická bilance (Kněžek, 1988). Základem této metody je bilanční rovnice, v které jsou začleněny všechny vstupy a výstupy do povodí. Hydrologická bilance zahrnuje pozorování srážek, přítoků a odtoku vody v povodí. Dále se pozorují zásoby vody v povodí, území nebo vodním útvaru za daný časový interval. Hydrologická bilance hodnotí změny zásob podzemní a povrchových vod způsobené časovou a prostorovou proměnlivostí přirozených vlivů (Vlnas a kol. 2015).

$$S = E + Op + Oh + Oz \pm \Delta W = E + Op, h + Oz \pm \Delta W \quad (2)$$

S srážky

E evapotranspirace

Op povrchový odtok

Oz odtok podzemních vod (základní odtok)

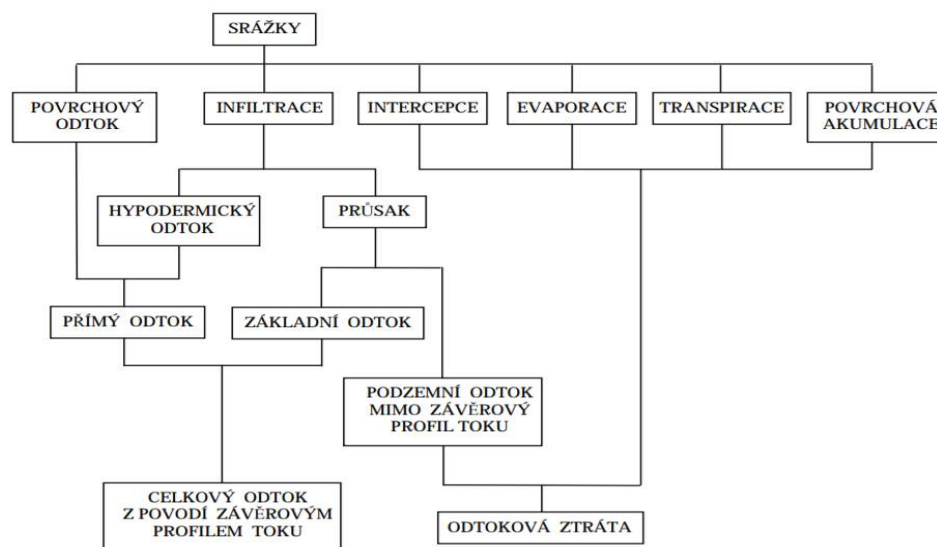
Oh hypodermický odtok

Op,h přímý odtok

ΔW změna zásob

Přesnost této rovnice je závislá na přesnosti stanovení jednotlivých členů. Změnu zásob je možné vymežit volbou bilančního období, kde jeho začátek a konec byl charakterizován stejnou úrovní hladiny podzemní vody, dosažením buď vzestupnou, nebo sestupnou fází. Při řešení se vychází nejčastěji z údajů naměřených ve vodoměrných profilech. Celkový odtok rozdělujeme na složky odtoku přímého a podzemního, protože měření složek povrchového a hypodermického odtoku je v určitých situacích více složitější, proto se používá odtok přímý. Podzemní odtok se využívá více při nízkých průtocích, kde působí jako vyrovnávací faktor (Hrádek a Kuřík, 2004). Podmínkou pro použití této metody je většinové překrytí hydrologickým povodím, hydrogeologickým. V tomto ohledu, pokud by tomu tak nebylo, je pravděpodobná velká chyba u výpočtu bilance.

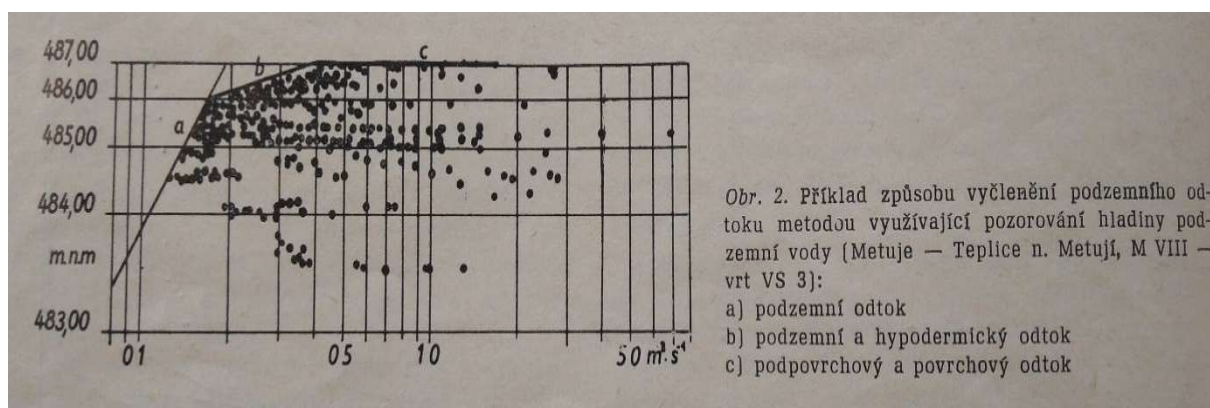
Na Obr. č. 6 Schéma odtokových poměrů, jsou zobrazené jednotlivé kroky vstupu a výstupu vody z povodí.



Obr. č. 6 Schéma odtokového procesu (Kulhavý a Kovář, 2000)

3.3 Metoda Kliner Kněžek

Metoda rozčlenění odtoku s využitím režimního pozorování hladiny podzemní vody v reprezentativním vrtu byla popsána Klinerem a Kněžkem (1974). Metoda vychází z objektivního vyjádření vztahu při kolísání průtoku vody v toku a hladin podzemních vod v přilehlých vrtech. Spojuje výsledné hodnoty stochastického (náhodné) a genetického hodnocení. Výsledkem je vynesení chronologických průtoků v měrném profilu a rozdílu hladin podzemní vody. Množina bodů, která je vynesena v grafu, je v případě reálného hydraulického vztahu podzemní vody a průtokem omezena na straně minimálních průtoků. Obalová čára nám ukazuje minimální hodnoty podzemního odtoku, které se vyskytly (Krejčová, 1990). Pokud je rozkyv hladin v toku zanedbatelný v závislosti na hladinách vrtu podzemní vody, je možnost vynášet do grafu úroveň hladiny podzemní vody. Podzemní odtok je zpětně určitelný dle získané závislosti vyčíslením podle hydrogramu kolísání hladiny podzemní vody (Krásný, 1982).



Obr. č. 7 – Příklad způsobu vyčlenění podzemního odtoku využívající pozorování podzemní vody (Metuje – Teplice nad Metují, M VIII- vrt VS 3)

Tato metoda se využívá při pozorování režimu podzemní vody. Při pozorování na objektech vodního toku a přilehlého vrtu, můžeme sledovat určitou závislost mezi hladinou podzemní vody ve vrtu a průtočným množstvím vody v korytě toku. Touto metodou lze vypočítat základní odtok při kratších časových událostech, například sezónní či roční. Předpokládaný sklon hladiny podzemní vody je směrem k toku a velikost sklonu, určen rozdílem úrovně hladin v pozorovacím vrtu a v povrchovém toku (Kněžek, 1988). Pro znázornění této závislosti se používá bilogarithmická souřadnicová soustava, v níž by měla mít přímkový charakter. Při grafickém řešení se vynášejí chronologicky odpovídající dvojice průtoků v měrném profilu a rozdíly

hladin podzemních vod a hladiny v toku (Obr. č. 7). Vynášení obalové čáry udává nejnižší hodnoty odtoku podzemní vod, které odpovídají příslušnému rozdílu hladin.

Při vynesení tří obalových čar, které nám určují jednotlivé složky odtoku, jsou patrné dva zlomy. Obalová čára v první fázi udává dotaci podzemní vody do toku. Charakterizuje podzemní odtok dotovaný o podíl hypodermického odtoku. Poloha zlomu mezi první a druhou obalovou přímkou ukazuje hodnotu maximální zaznamenaný stav hladiny podzemní vody ve vrtu. V druhém úseku je znázorněn zvyšující se průtok způsobeným povrchovým odtokem.

Pozorované rozdíly v hladinách, jsou pak odpovídajícím důsledkem příronu podzemních vod (Kněžek, 1988; Kadlecová a kol, 2010). Metodou rozčlenění odtoku pomocí pozorovacích hladin podzemní vody je možné stanovit časovou zabezpečnost spojením stochastického a genetického způsobu zpracování.

Metoda je založena na sledování vztahu mezi průtokem ve vodoměrné stanici a časovým průběhem vydatnosti pramene nebo hladiny vody ve vrtu. Podmínkou je, že monitorovací objekt podzemní vody reprezentuje proces tvorby a uvolňování zásoby podzemní vody v podobě základního odtoku. Tato metoda byla aplikována na přibližně 75% území České a Slovenské republiky. Bohužel nevýhodou této metody je subjektivita při tvorbě obalových křivek a je možné, že dva zhotovitelé obalových křivek se mohou lišit až o 35 %. Tvar obalové křivky vynáší zhotovitel a je čistě subjektivní. Přes nedostatky této metody, ale můžeme dostat velice věrohodný režim základního odtoku. (Vlnas, 20015).

Pro hydraulické řešení proudění v homogenním porézním prostředí se používá rovnice ve vztahu (Krásný, 1982):

$$Q_z = f \varepsilon \cdot \Delta H^n \quad (3)$$

kde:

Q_z - základní odtok

ΔH - rozdíl hladin v pozorovacím vrtu a vodním toku

ε - koeficient zahrnující konstanty vlivu prostředí (hydromechanické, rozměrové)

n - počet pozorování

f - funkce

3.4 Metoda Killeho

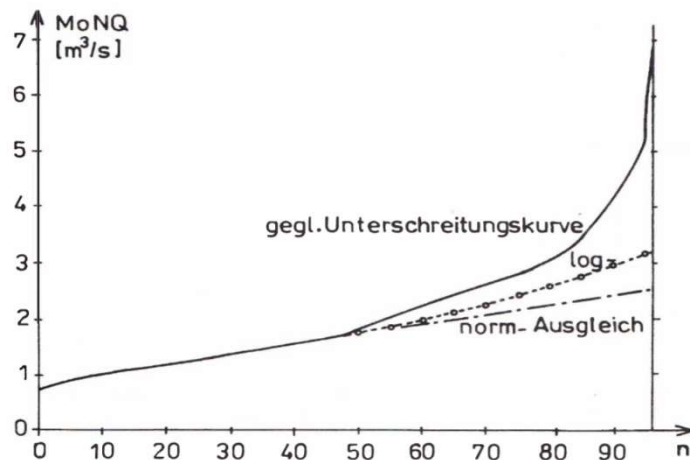
Metoda minimálních měsíčních průtoků. Metoda Killeho je založena na hodnotách měsíčních minimálních průtoků povrchového toku, za nejkratší období deseti hydrologických let. Metodu založil K. Kille v roce 1970 a tato metoda podle něj byla pojmenována. Našla si široké uplatnění a byla použita pro zmapování velkého území bývalého Československa. Má mnoho výhod, například, že data pro zpracování jsou lehce dostupná a jednoduše zpracovatelná. V této metodě není velký prostor pro subjektivní posouzení, proto různí řešitelé dospívají ke stejným výsledkům. Vstupními údaji jsou minimální měsíční průtoky povrchového toku, přitom měsíční průtoky nemají normálové rozdělení početností. Proto se u naměřených hodnot neshoduje hodnota mediánu ani aritmetického průměru. V dnešní době se začala metoda používat ve zjednodušené formě, kde měřené hodnoty prokládáme exponenciální křivkou při vyčlenění podzemního odtoku. V této metodě se vybrané hodnoty vynášejí dle velikosti ve vzestupném pořadí do semilogaritmické sítě. Po proložení přímkou spodní částí množiny bodů dostaneme dělicí čáru podzemního odtoku. Průběh množiny je pravidelnější, čím je období měřených hodnot delší. Přenesením vyrovnávací přímky do lineárního zobrazení nám vznikne exponenciální přímka, která dohromady s osami omezuje plochu podzemního odtoku. Z plochy ležící pod touto exponenciálou můžeme vypočítat průměrný podzemní odtok (Kille, 1970; Sommer 1985).

Na Obr. č. 8 je znázorněn postup vynesení křivek dle Killeho. V Killeho metodě není zcela jasné, zda dělicí křivka vyčleňuje pouze podzemní odtok, anebo i část odtoku hypodermického.

Základní hlediska pro výběr metody Killeho (metody minimálních měsíčních průtoků) (Fendeková, Fedek, 1999).

- Získané hodnoty podzemního odtoku nám popisují rozsáhlé území nebo celá povodí a je možné u nich provádět regionální hodnocení.
- Data, která jsou potřebná ke zpracování, jsou snadno dostupná a nevyžadují žádné doplňující údaje.
- Výhodou je rychlost a jednoduchost zpracování.

- Proces vyhodnocení je relativně objektivní a v porovnání s jinými metodami není ovlivněn subjektivním přístupem a tím k docílení odlišných výsledků.



Obr. č. 8 Znárodnění původního postupu dle Killeho (1970) MonQ – minimální měsíční průtok, gegl. Unterschreitungskurve – vyhlazená čára nedosažení (měřené hodnoty), log- logaritnické (hodnoty vyrovnané lineární regresí), non- Ausgleich- normálové vyrovnání (hodnoty vyrovnané exponenciální regresí)

3.5 Metoda CN (ztrátová)

Metoda čísel odtokových křivek (CN- Curve Number) představuje jednoduchý srážkoodtokový model s poměrně lehce zjistitelnými vstupy, dostatečně přesnými a následně použitelnými pro určení objemu odtoku a kulminačního průtoku, které jsou zapříčiněny návrhovým přívalovým deštěm o zvolené pravděpodobnosti výskytu v zemědělsky a lesnicky využívaných povodích, do velikosti plochy 10 km². Metoda byla odvozena v USA, Službou pro ochranu půd (US- Soil Conservation Service – US SCS), a publikována National Engineering Handbook, Hydrolog. Section 4, SCS, USDA Washington D.S. v roce 1972.

V praxi může být metoda použita k navrhování technických protierozních opatření. Tyto opatření jsou například dráhy soustředěného povrchového odtoku (zatravněné údolnice), příkopy, průlehy, ochranné hrázky a také pro posouzení vlivu protierozních opatření na povrchový odtok (Janeček a kol. 2012). Metoda odtokových křivek CN se používá pro samostatný svah i povodí s údolnicí. Využívá pro výpočet přímého odtoku pro zadanou výšku deště, dále pro doby dobíhání a doby koncentrace. Přímý odtok tvoří odtok povrchový a odtok hypodermický. Odtokové křivky CN stanovují podíly těchto složek odtoku na celkový odtok. Odtok z povodí je ovlivněn množstvím srážek,

infiltrací vody do půdy, vlhkostí půdy, vegetačním druhem pokryvu, retencí povrchu a nepropustnými plochami. Dále to mohou být hydrologické vlastnosti půd a intercepce.

Vstupem do této metody je srážkový úhrn navrhovaného deště za zvolenou dobu opakování, u tohoto deště se předpokládá, jeho rovnoměrně rozdělení na ploše povodí. Objem srážek (výška) je přetransformována na objem (výšku) odtoku, pomocí odtokových křivek CN. (Janeček a kol., 2012).

Metodu CN můžeme použít, když vycházíme z podmínek, kdy poměr objemu odtoku k objemu přívalových dešťů se rovná poměru potencionální retence povodí k retenci aktuální. Maximální odtoky jsou odvozovány dle empirických vzorců (Soukup a Hrádek 1999).

Vypočítávají se s ní kulminační průtoky pro zadanou výšku deště. Při této metodě můžeme zohlednit vliv změn charakteristik povodí v závislosti hodnot charakteristiky hydrogramu maximálního odtoku.

Podklady pro výpočet jsou (Hrádek a Kuřík, 2004; Janeček a kol., 2012):

- a) Informace o způsobu využívání pozemků a způsobu obdělávání půdy
- b) Hydrologické skupiny půd (HSP) – charakteristika hydrologických vlastností T
- c) Vztah mezi HSP a kategorií půd dle ekologické – půdních jednotek BPEJ
- d) Průměrná čísla odtokových křivek CN
- e) Nomogram pro stanovení čísel odtokových křivek CN na lesních půdách

1- denní maximální srážkový úhrn $H_{1d,N}$ dle údajů ČHMÚ nebo (Šamaj, Valovič Brázdil, 1985 uvedené v Janeček 2012)

Materiály k výpočtům a metodice jsou uvedeny v (Janeček a kol, 1992).

3.6 Izotopové analýzy

Izotopová metoda využívá stabilních izotopů kyslíku a vodíku jako přirozených stopovačů pro určování pohybu vody v hydrosféře. Tuto metodu můžeme použít pro různé hydrologické procesy. Díky koncentraci stabilních izotopů se dá určit, jak putuje voda od výparu z hladiny oceánu, moří, vodních ploch a toků, po kondenzaci ve stavu srážek a následném dopadu na povrch země. Infiltrací se voda dostává do půdy a propustných hornin, kde voda kondenzuje a vytváří vodu podzemní a následně vytlačena voda odtéká do povrchových toků. Izotopy vodíku můžeme využít pro stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí, odlišení staré a nové vody v povrchových tocích. Metody pro analýzu stabilních izotopů nejsou finančně ani časově náročné, k těmto metodám se používá laserová a hmotnostní spektroskopie.

Další metody na určení izotopů jsou jadernou rezonanční spektroskopií, metoda založená na absorpci rozptylu záření nebo aktivační analýza (Šanda, 2011).

Hmotnostní spektrometrie určuje izotopové složení na základě přeměny molekul vzorku na ionty a jejich rozlišení pomocí poměru hmotnosti a náboje. Laserová spektroskopie vyniká přesností pro stanovení izotopů vodíku a kyslíku ve vzorcích vody. Výhodou také je možnost současného měření izotopů vodíku a kyslíku. Touto vyspělou metodou je možné sledovat vzorky při kratších intervalech, například denních, hodinových či kratších. Laserová spektroskopie funguje na principu vysílaných vln do námi zkoumaného vzorku (Cabicar, 1983).

V současné době se nově ve velké míře používají **izotopové analýzy**, které jdou obtížně provádět do minulosti. Pro modelování se izotopové separace tolik nepoužívají, protože modely v sobě nemají zahrnutý modul, kdy nová voda vytlačuje starou vodu. Izotopové modely separace se spíše orientují na změnu objemu, kde působí rychlá a pomalá odezva. Zde se nepočítá s původem vody, zda odtéká voda, která byla saturována před srážkovou událostí, či voda ze srážky zaplní místo nebo vytlačí vodu, která už zde byla před událostí. U této metody jde pouze o změnu objemu (Pokorná a Zábranská 2008; Hubačíková, 2002; Kříž, 1983)

Při separaci lze použít jiné látky než vodík a kyslík. Při obarvení příčinných srážek za sebou fluorescenční metodou, se může jednoduše pozorovat, kdy jednotlivá srážka, která se vsákla do půdy, vytéká zpět do vodního toku. U této metody se jedná o přímou separaci a dá se určit stáří vody na uzávěrovém profilu.

3.7 Metoda Ground a MGPM

Metoda GROUND vznikla z potřeby urychleně a přibližně separovat základní a přímý odtok z povodí. Tuto metodu Ground (separation of ground water runoff) zpracoval Doležal a Jain (Jain, 1997). Na separaci základního odtoku jsou potřeba hodnoty z datové řady v uzávěrovém profilu a to středních denních průtoků. Metoda je empirická funkce, určená tak, aby hydrogram středních denních odtoků, které jsou separovány z povodí o rozloze v řádu jednotek km², vypadaly věrohodně a dali se posoudit pouhým okem. Vybraný začátek odtokové události, by měl začínat v období méně vodném, kdy nekolísá průtok. Vstupním parametrem je koeficient přírůstku základního odtoku COEF, tento vstupní parametr je proměnlivý. Hodnota COEF je dle zkušeností pro povodí v jednotkách km² odvozena na 0,075. Dalšími vnitřními parametry jsou přírůstek základního odtoku DIFF a logická proměnná FLOOD. Vstupními hodnotami do metody jsou řady středních denních průtoků nebo v jiném

konstantním časovém kroku průměrovaných průtoků nebo odtoků. Výstupem vzniknou dvě řady středních denních průtoků, které znázorňují, v pořadí přímý a základní odtok z povodí. Součet jednotlivých separovaných složek v každém časovém intervalu rovná celkovému odtoku (Kuhavý a kol., 2001).

Při postupu výpočtu se počítá, že první člen řady je považován za základní odtok. Přímý odtok je tedy v prvním dni nulový. Dále se uvažuje, že v prvním dni a ani jeho předcházeních nenastala žádná povodňová událost. Přírůstek základního odtoku DIFF je nulový.

V druhém kroku se porovnávají denní průtoky s průtoky o den předešlymi. Další kroky jsou ovlivněny, zdali přetrvává povodňová situace ze dnů minulých. Mohou nastat čtyři situace (Kulhavý a kol., 2001).

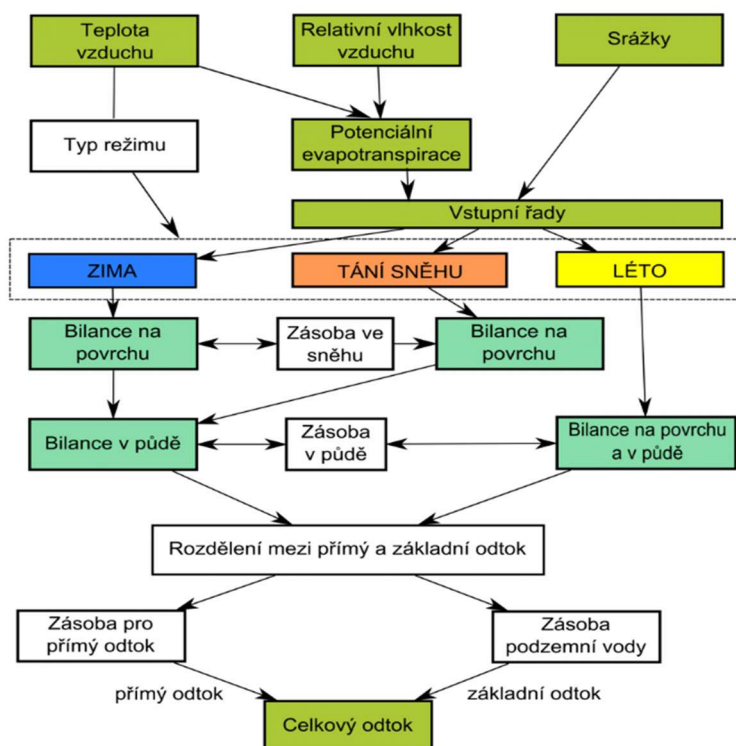
- Povodňová situace nepřetrvává a průtok se nezvyšuje. Zde se celý průtok považuje za základní odtok a přímý odtok v daném dni je roven nule.
- Povodňová situace nepřetrvává, ale je zaznamenán zvyšující se průtok. Zde se základní průtok rovná průtoky z předchozího dne a přírůstek zvyšujícího průtoky se považuje za odtok přímý.
- Při povodňové situaci, kde se průtok zvyšuje nebo zmenšuje.
- Při povodňové situaci, kdy průtok zůstává konstantní

Metoda MGPM se vytvořila z důvodu potřeby rozčlenit dlouhodobé datové řady středních denních průtoků na složky základního a přímého odtoku. Metodu MGPM (modifikovaná graficko-početní metoda) vytvořil Z. Kulhavý. Údaje, využívané metodou, jsou hladina podzemní vody, vlhkost půdy, srážkové poměry v dané zkoumané lokalitě. Tato metoda je založena na principu rozčlenění hydrogramu, za podmíněk, že každá zřejmá odtoková vlna je zapříčiněna srážkovou epizodou a příčinné deště mohou za sebou libovolně navazovat. Cílem této metody je separace té části odtoku, která je přímou odezvou na srážkovou událost. V závislosti na vývoj dlouhodobý vývoj hydrologické bilance v povodí se počítá s tím, že základní odtok má mít plynulý průběh a kolísat jen pozvolna. Jeho maximální hodnota může dosahovat maxim celkového odtoku. Metoda je detailně popsána v knize (Kulhavý a kol., 2001).

3.8 Metoda separace odtoku v povodí modelem BILAN

Model Bilan byl vyvinut pracovníky Výzkumného ústavu vodohospodářského T.G. Masaryka v Praze, pro simulaci složek vodní bilance v povodí. Je založený na vzájemném vztahu popisující základní principy vodní bilance na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut vegetační kryt v povodí a zóně podzemní vody.

Časový krok má délku jeden měsíc či den. Vstupními daty pro výpočet bilance jsou používány měsíční řady úhrnů srážek, průměrné měsíční teploty a vlhkosti vzduchu, nebo evapotranspirace. Výpočtem se modeluje potencionální evapotranspirace, uzemní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Na kalibraci modelu se používají porovnání simulovaných a pozorovaných řad průměrných měsíčních hodnot odtoku v závěrečném profilu povodí. (Vizina a Hanel, 2011). Schéma modelu je zobrazeno na Obr. č. 9.



Obr. č. 9 Schéma modelu hydrologické bilance Bilan

(<http://bilan.vuv.cz/bilan/modely-pro-vypocet-hydrologivke-a-vodohospodarske-bilance/hydrologicky-model-bilan/>)

Model simuluje celkový odtok $rm(i)$ jako sumu třech složek:

$$rm(i) = dr(i) + I(i) + bf(i) \quad (4)$$

$dr(i)$ přímý odtok

$I(i)$ hypodermický odtok

$bf(i)$ základní odtok

Složka celkového odtoku $dr(i)$ - přímý odtok v letních měsících je zapříčiněn vysokou intenzitou srážek. Je závislá na složce rychlého proudění, která není schopná se vyprazdňovat a neovlivní bilanci vody v půdě. Hypodermický odtok $I(i)$ představuje

přebytečnou vodu v zóně aerace ve stanoveném měsíci. Předpokládá se, že tato složka odtoku obsahuje i přímý odtok v období kdy roztává sníh. Základní odtok $bf(i)$ je nejpomalejší složkou celkového odtoku z povodí a je tvořený výtokem zásob z podzemních vod (Machlica a Fendeková, 2006).

3.9 Metody rozčlenění hydrogramu celkového odtoku vycházejícího z analýzy výtokových čar

3.9.1 Bousinequova metoda, Voskresenského metoda

Dle **Bousinesquovy** rovnice (1903) pro výtokovou čáru, je definována ta část klesající větve průtokové vlny, kdy je průtok tvořen již výhradně dotací z podzemní vody. Tuto výtokovou čáru, která je vyjádřena analytickým či grafickým způsobem, můžeme například použít k předpovědi průtoků pro období bez dešťů. Další možnost využití je při zjišťování říčních zásob a při řešení srážkoodtokových vztahů (Hrádek a Kuřík, 2004). Základní nelineární diferenciální rovnice pro stacionární proudění z vodonosných vrstev směrem ke korytu toku prezentoval Boussinesq roku 1877 (Hall, 1968). U této metody se počítá s idealizovanými podmínkami, tím pádem nelze zahrnout evapotranspirace ani ztráty či příbytky vody. U této metody je tok brán, jako systém, Dupuit-Boussinesqova zvodeň. U tohoto systému se počítá s platnými Dupitovými postuláty, zanedbatelnými pro proudění vertikální složky a je možné zanedbat vliv kapilarity nad hladinu podzemní vody (Tallaksen, 1995).

$$Q_t = Q_0 * e^{-at} \quad (5)$$

Q_t	průtok v čase t
Q_0	počáteční průtok
e	základ přirozeného logaritmu
a	součinitel vyčerpávání

Rovnice Voskresenského je rozšířena pouze o parametr n , který vyjadřuje tvar výtokové čáry.

$$Q_t = Q_0 * e^{-at^n} \quad (6)$$

U rovnice dle Voskresenského se vyskytují dva stupně volnosti a tím je větší pravděpodobnost výstižnějšímu vykreslení výtokové přímky.

4. Metodika

4.1 Charakteristika oblasti

Měřená data byla pořízena na experimentálním povodí Modrava 2. Toto experimentální povodí bylo vybudováno Katedrou vodního hospodářství a Katedrou biotechnických úprav krajiny FLE ČZU v roce 1998. V současné době zde Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze provádí monitoring hydrologických charakteristik povodí. Toto povodí vzniklo na základě potřeby detailního popsání různých vlivů lesních ekosystémů na hydrologický cyklus malých lesních povodí. Detailně je zde studován srážko-odtokový proces, zaznamenaný v různém časovém měřítku.

Experimentální povodí Modrava 2 se nachází v centrální části národního parku Šumava (Obr. č. 24 viz příloha). Je rozpoloženo na severním svahu Malé Mokrůvky (1330 m.n.m) v pramenné oblasti Ptačího potoka (hydrologické pořadí 1-08-01-002). Leží 5 km jižně do Filipovy Huti a na státní hranici s Německem. Hranice České republiky a Německa tvoří zároveň evropské rozvodí. Plocha povodí je zhruba 17 ha a leží v nadmořské výšce 1188-1330 m.n.m. Expozice svahu je převážně severní. Údolí, v kterém leží území, se nazývá Medvědí doupe. Tuto lokalitu postihla kůrovcová kalamita v 90. letech a následně zde byla povolena těžba napadeného smrkového porostu. Smrkový porost byl zhruba 160 let starý a také na části plochy zde byl 26 let starý porost. Po těžbě zde byla vytvořena paseka se smrkovou výsadbou a částečně byla zalesněna jeřábem a klenem. V roce 2006 byl vegetační pokryv tvořen zejména travním porostem, smrky (*Picea abies*), javory (*Acer pseudoplatanus*), břízy (*Berula pendula*), vrby (*Salix aurita*, *Salix caprea*) a jeřáby (*Sorbus aucuparia*). V současné době je zde mladý les, stromy dosahují výšky 2-5 m, půdní pokryv lesa tvoří převážně porosty borůvky, brusinky, biky, metličky, papratky a dalších rostlin (Pavlásek a kol., 2006).

Lesní pokryv	Paseka
Plocha povodí	0,17 km ²
Minimální nadmořská výška	1188 m.n.m
Maximální nadmořská výška	1330 m.n.m
Délka údolnice	0,745 km
Sklon svahu	0,21
Hloubka půdního profilu	0,2 – 0,3 m

V území Modrava 2 jsou prováděna hydrologická měření srážek, odtoku, teploty a vodivosti. Od roku 1998 do roku 2006 bylo měření prováděno pouze ve vegetačním období, od roku 2007 je měření prováděno kontinuálně po celý rok. V povodí pramení tok Mokrůvka, na něm byl vytvořen uzávěrový profil, na kterém byl zbudován měrný trojúhelníkový Thomsonův přeliv, díky přepadové výšce se vypočítává průtok. Přepadovou výšku zde snímá čidlo v intervalu pěti minut. Poblíž měrného profilu je umístěn srážkoměr. Srážky jsou zde měřeny překlopným srážkoměrem se záchytnou plochou 500 cm² ve výšce 1 m v časovém intervalu 5 minut a při srážkové události po 1 minutě. Dále zde je měřena teplota ve výšce 3 m, konduktivita a vlhkost. V těsné blízkosti měrného přelivu jsou umístěny dva experimentální vrty. Každý vrt je na odlišné straně toku. U jednotlivých vrtů je různé geologické podloží. V zemních vrtech se měří hladina vody.

4.2 Geologické a půdní poměry

Odtok vody je podmíněn řadou faktorů, mohou to být klimatologické, hydrologické či botanické, ale také zejména morfologické a hydrogeologie oblasti. Hydrogeologické poměry prostředí, jsou dány pozicí geologických struktur a jejich typem propustnosti v ploše i hloubkovém řezu (Levý a kol., 2008).

Dle regionálně geologického dělení Českého masívu, povodí Mokrůvky spadá do moldanubické oblasti. Moldanubikum je tvořeno metamorfity ve vysokém stupni metamorfózy, které jsou postupovány plutonickými horninami, jež intrudovali v závěru variské orogeneze. Moldanubické horniny jsou překryty kvarténními uloženinami fluvio-deluviálními a periglaciálními původu. V experimentálním povodí Modrava 2 jsou moldanubické horniny jednotvárné skupiny proterozoického až paleozoického stáří. Horniny, které tu nalezneme, jsou silimanit – biotilické stromatické migmatity s přechody do pararuly a magmatické horniny plutonu svrchnopaleozoického stáří. Dále se tu nachází například granity eisgamského typu. Jsou to světlé, střednězrné až jemnozrné dvojslídne horniny.

Kvarténní pokryv se dá rozložit do dvou skupin a to jsou fluviální usazeniny Mokrůvky a periglaciální usazeniny (sutě). Periglaciální usazeniny jsou blokovité sutě horninového podloží s malým transportem v předpolí kontinentálního ledovce. Sedimenty fluviální jsou písčitoštěrkovité usazeniny s menším rozsahem vázané na vodoteče.

Na blocích jsou patrné mrazové praskliny. Sněžná čára v době posledního kontinentálního zalednění byla v úrovni 1000-1100 m n. m. Sledovaná oblast spadá

strukturně do antiklinálního pásma Kvildy, která začíná na státní hranici u Mokrůvky a vede přes Černou horu na Františkov a Borovou Ladu. Nejsou zde pozorovány významnější tektonické projevy. Významnější tektonické poměry nejsou v zájmovém území pozorovány. V ose toku Mokrůvky, je možné očekávat lokální tektonickou zónu (Levý a kol., 2008).

Půdní typ se tu zde vyskytuje převážně podzol a kryptopodzol, subtyp modální. Půdní profil je zde mělký, zhruba 60-90 cm a značně skeletovitý (10 až 40 %). Naměřená hodnota ustálení infiltrační rychlosti se pohybuje okolo 0,073 mm/s a nasycená hydraulická vodivost $K=3,46 \times 10^{-6}$ tím se půda dá označit jako málo propustná (Jačka, 2009).

4.3 Získaná data

Data, která byla poskytnuta, obsahují hodnoty hladin podzemní vody u pravého a levého vrtu, množství protéké vody v měrném profilu toku, srážky a teplotu v časových intervalech po deseti minutách.

Experimentální vrt vypadá tak, že vede zhruba dva metry do hloubky a je pažený rourou z umělé hmoty. Vrty jsou umístěny ve svahu a jsou od sebe vzdáleny zhruba 10 m.

Měření je prováděno každých deset minut a při srážkové události ombrometr posílá data každou minutu. Tyto získaná data byla upravena, aby i měřené srážkové události byly ve formě desetiminutových kroků. Při redukci byl použit program R studio a následně se data zpracovávala v programu Excel. Datová sada obsahovala informace o hladině levého a pravého vrtu v mm, hladině přelivu, o průtoku v toku v l/s, o teplotě K1, teplotě vzduchu v 0,2m, 3m v C°, srážky v mm a vlhkosti v %. Zpracováváný časový interval v této práci byl vybrán od začátku roku 2013 do konce září 2017. Pro účel této práce byly vybrány hladiny ve vrtech, průtoky a srážky.

Charakteristika vzájemné závislosti jednotlivých měřených složek

Při obecnější charakteristice vzájemných měřených složek se vybraly hodnoty od začátku roku 2013 do konce září 2017. Pro lepší představu, jak se povodí chová v závislosti na jednotlivých měsících v námi určeném období, se aritmetickým průměrem data zredukovala na měsíční průměrné hodnoty. Provedlo se grafické znázornění a vznikly grafy o tom, jak se vyvíjí hladiny ve vrtech v jednotlivých měsících a následně byly vzájemně porovnány (viz přílohy). Dále se porovnávaly, jak na sebe reagují průtoky a srážky s hladinami ve vrtech v dlouhodobějším časovém

horizontu v časových krocích jednoho měsíce. Porovnání bylo prováděno graficky odděleně po letech a následně pro celé měřené období. Očekávalo se odlišné chování dvou pozorovaných vrtů na základě rozdílné polohy a odlišném půdním profilu. (viz přílohy a výsledky). Dále se tyto data vyhodnotila a popsala ve výsledcích.

Výběr jednotlivých srážko odtokových událostí se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku

V tomto kroku se zkoumaly srážkoodtokové události a separovaly se jednotlivé části celkového odtoku. Celkový odtok je tvořen, třemi složkami, povrchovým, podpovrchový (hypodermickým) a podzemním odtokem. Na provedení separace celkového odtoku se vybrala upravená metoda Kliner-Knežek (1974) a aplikovala se na experimentální povodí Modrava 2. Tato metoda se upravila, tak že grafické znázornění je průtok v závislosti logaritmus výšky hladiny podzemní vody ve vrtu. Úprava byla provedena z důvodu nulových průtoků, které nejdu znázornit na logaritmickém měřítku. Porovnávali se roční období jara a léta v jednotlivých letech. V těchto obdobích se očekává, že bude nejvíce reagovat povrchový odtok s podpovrchovým odtokem. V jarních měsících se předpokládá tání sněhu a tím větší doplnění zásob podpovrchové vody a odtékání v povrchovém toku. Při letních měsících je to způsobeno extrémními a vydatnými srážkami.

Při použití upravené metody Kliner-Knežek (1974) pro letní a jarní období se využily data z levého vrtu, který lépe komunikoval s povrchovým tokem. Naměřená data, která byla v intervalu po deseti minutách, byla zprůměrována na denní hodnoty. V upravené metodě Kliner – Knežek se využívala data z průtoku v toku Mokruvka, měřené v uzávěrovém profilu v [l/s] a hodnoty výšky hladiny vody v levém vrtu v [mm]. Na naměřené hodinové hladiny levého vrtu se pro lepší reprezentaci v grafu použil dekadický logaritmus. Graficky se znázornily hodnoty průtoků v závislosti na zlogaritmovaných hodnotách hladiny v levém vrtu. Nad vyneseny body se vytvořili tři obalové čáry, dle upravené metody Kliner- Knežek. Pomocí lineárních přímek spojnicí trendu u obalových čar, vyšli tři rovnice vyjadřující jednotlivé složky odtoku. Tyto obalové čáry se porovnávaly, jak pro období jara a léta v letech od toku 2013-2017, tak i s průměrnými hodnotami pro daná období. Porovnávaly se rozdíly mezi průměrnými hodnotami z jara a léta. Dále se porovnávaly obalové čáry pro celé měřené období z hodinových dat pro pravý vrt a levý vrt.

Pomocí obalových křivek a jejich rovnic, se určovaly limity dosažení jednotlivých složek odtoků. Tím se naměřená data rozdělila na jednotlivé složky celkového odtoku a dále se graficky znázornila.

Následně se provedlo porovnání jednotlivých událostí s porovnáním odtokových složek pro vybrané srážko-odtokové situace. Porovnávala se období jara a léta s celkovým měřeným obdobím 2013-2017. Zde se vybraly limitní body pro jednotlivé odtoky za porovnaná období a aplikovala se vybranou událost (srážko-odtoková vlna) v hodinových datech. Poté se pozorovaly rozdíly jednotlivých odtoků.

Výsledky se graficky vyhodnotily a jednotlivé odtokové složky se okomentovaly ve výsledcích.

Analýza sestupných větví hydrogramů ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody

Průtok toku v povodí je dotován povrchovým, hypodermickým a základním odtokem. Povrchovým odtokem je tok dotován v krátké době, v události průtokové vlny. V době bezesrážkového období je dotován základním odtokem. Zajímalo nás, jak se chovají dva vrty položené v blízkosti měrného profilu umístěného na toku Mokřůvka v povodí Modrava 2. Analýza byla provedena na sestupných větví hydrogramu ve vztahu průtoku a změnám hladiny podzemní vody v experimentálních vrtech. Každý z vrtů se nachází na odlišné straně toku a tím je ovlivněno i geologické podloží a tím pádem, lze zde očekávat jinou reakci. Chtěli jsme, zjistit, jak se hladina podzemní vody ve vrtech mění v závislosti na průtoku při srážko – odtokových situacích. Vybrali jsme situace, srážko-odtokové události, kdy byl průtok v toku vyšší než 14 l/s a pokles průtoku byl až do úrovně ustáleného průtoku nebo do doby, kdy průtok začal stoupat. V tuto dobu jsme vybrali hodnoty z naměřených výšek hladiny v obou vrtech a porovnávali jsme je. Získané hodnoty jsme vynesli do grafů a pozorovali vzájemnou interakci hladin podzemní vody ve vrtech a průtoku.

Výběr jednotlivých srážko-odtokových událostí, se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku

Na povodí byly aplikované metody rozčlenění celkového odtoku, vycházející z analýzy výtokových čar.

Byly vybrány sestupné větve hydrogramu z celého období, použito jich bylo celkem 9, na kterých byl zřejmý sestupný pokles průtokových hodnot. Na vybraných hydrogramech, kde byla kulminace průtoků vyšší než 11 l/s byl zaznamenán pokles průtoku v následujících časovém sledu. Dále se hodnoty vynesly do hydrogramů a vytvořily se tím sestupné větve odtoku. Data se seřídily dle jednotného referenčního času a podobných hodnot průtoků. Hodnoty se seřadily tak, aby byla vidět možná

závislost, kdy se průtok, bude od určité hodnoty průtoku chovat podobně. Byla vybrána jedna referenční poklesová vlna a dle podobného množství průtoku se posouvaly v závislosti na referenční čas.

U vynesných grafů byla vidět jistá podobnost sestupných průtoků (Obr. č. 52 viz.přílohy). Bylo zde zkoušeno proložení grafů rovnicemi, které by popisovaly výtokovou křivku povodí Mokrůvky. Uvažovalo se, že mohou existovat jednotlivé křivky, které by mohli znázornit funkci výtokové křivky našeho povodí Mokrůvky. Typové křivky by mohli být tvaru exponenciálního, logaritmického, mocninného.

Pokoušelo se tedy hledat rovnici, která by odpovídala výtokovým větvím. Za prvé se použila exponenciální rovnice se třemi parametry a, b, c.

$$Qt = a * t^{-b} + c \quad (7)$$

Následně byla použita metoda vycházející z Bousinesquovy rovnice pro výtokovou čáru.

$$Qt = Qo * e^{-at} \quad (5)$$

Dále byly vloženy data do Voskresenského rovnice, která je rozšířena o parametr **n** vyjadřující tvar výtokové čáry.

$$Qt = Qo * e^{-at^n} \quad (6)$$

Tyto teorie se porovnávaly s vybranými výtokovými křivkami a zkoumaly se, jak rovnice data proloží a zda budou odpovídat hodnotám, z kterých bylo vycházeno. Bylo zde očekáváno, že rovnice, proloží charakterizující výtokovou čáru našeho povodí Modrava.

Při použití výše zmíněných metod se pozorovalo, jak budou korespondovat vynesné hodnoty s naměřenými. Pro řešení byl použit program excel a funkce řešitel pro nalezení optimálních hodnot. Pro zpřesnění dat se použila objektivní kritéria, střední kvadratická chyba a odmocnina ze střední kvadratické chyby. Parametry byly optimalizovány funkcí řešitel na základě objektivního kritéria. Tím byly získány hodnoty pro reprezentaci výtoku v povodí. Použité metody nám mohou reprezentovat více či méně přesněji výtokovou křivku pozorovaného povodí. Pro výtokové křivky byl použit nejprve průměr, z kterého se počítala kvadratický chyba. Následně byly vyhotoveny modelované křivky pomocí metody Bousineqa, Voskresnského exponenciální rovnice se třemi parametry. Tyto modelové výtokové byly porovnány

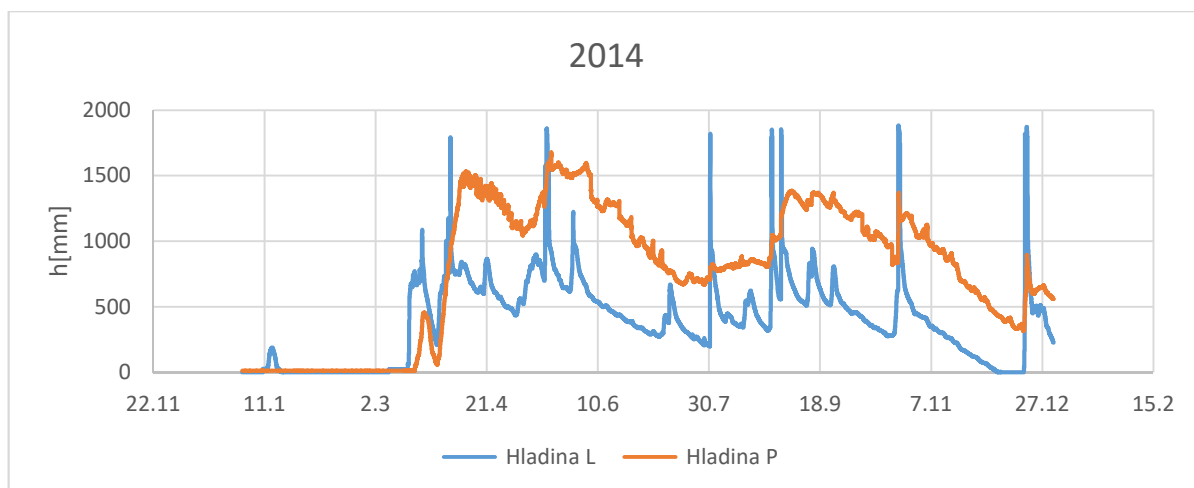
s třemi naměřenými, výtokovými čarami, aby bylo ukázáno jak, modely přesně korespondují s výtokem na experimentálním povodí.

5. Výsledky

5.1 Charakteristika vzájemné závislosti jednotlivých měřených složek

Porovnána byla data z levého a pravého vrtu, mezi nimiž protéká tok Mokruvka, dále průtok v korytě určený měrným profilem a srážkoměrná data. Grafické porovnání vzájemných vstupních průměrných hodnot bylo za měřené období od roku 2013-2017. Tyto výsledky jsou pouze hodnotami za dané měřené období. Každý rok je odlišný a díky měřeným datům a grafickému zpracování dokážeme vyhodnotit, jak se v jednotlivých měsících a rocích od sebe lišily.

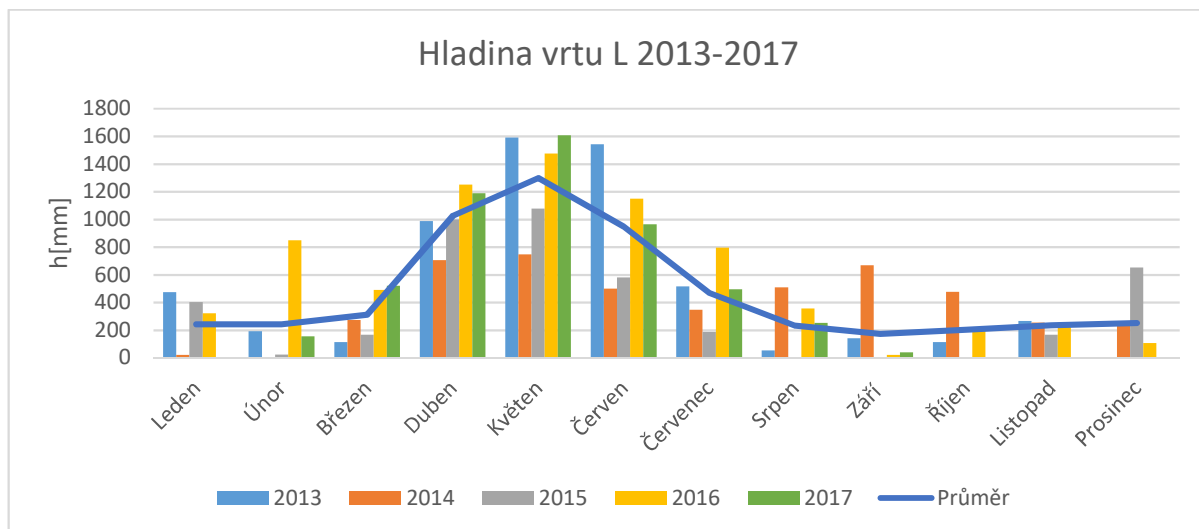
Grafické výsledky porovnání hladin levého a pravého vrtu v jednotlivých letech (Obr. č. 25-29 viz přílohy) jsou patrné a vzájemně reagují. Při stoupající či klesající tendenci hladiny podzemní vody vrty reagují podobně. Levý vrt reaguje v kolísání výšky hladiny v závislosti na čase a průtoku v toku rychleji než vrt umístěný na pravé straně toku. Je zde patrné, že levý vrt je více rozkolísaný a reaguje rychleji na zvýšení množství srážek a průtoku v povodí, oproti tomu pravý vrt se zdá být stabilnější a hladina tak prudce nestoupá či neklesá. viz Obr. č. 10 z měřených dat v roce 2014.



Obr.č. 10 – Podrobné porovnání hladin levého a pravého vrtu v roce 2014

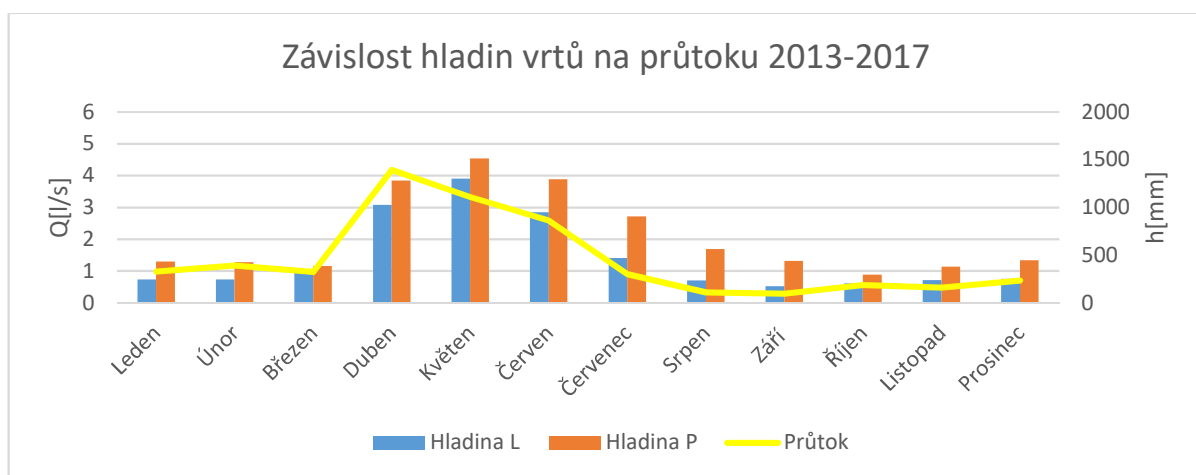
Při porovnání hladin vrtů v průměrech jednotlivých let (2013-2017) bylo ukázáno, že hladina ve vrtech začíná stoupat v měsíci březnu, způsobeným jarním táním sněhů a následně svých kulminačních hodnot dosahuje v květnu, kdy můžeme očekávat

nasycené povodí vodou z jarního tání a zároveň způsobené početnými srážkami (viz. Obr.č.11).



Obr. č. 11 – Průměrné porovnání výšky hladiny podzemní vody v levém vrtu v časovém období 2013-2017

V dalších grafech je patrné, že trend jarního tání se prokazuje na zvětšení zásoby vody, ale i na průtocích v pozorovaném toku Obr. č. 11, kde nejvyšší průměrné hladiny jsou dosahovány v měsíci dubnu a následuje klesající trend v letních měsících a pozvolna stoupající od měsíce září. Na Obr. č. 12, kde se porovnávají hladiny v pozorovacích vrtech s průtokem, je vidět závislost, kdy hladina podzemní vody ve vrtech reaguje na zvýšení průtoků v korytě toku. V tomto dlouhodobějším měřítku je patrné že, podzemní voda reaguje s mírným zpožděním a její hladina ve vrtu klesá později v rámci jednoho měsíce než průměrné průtoky.



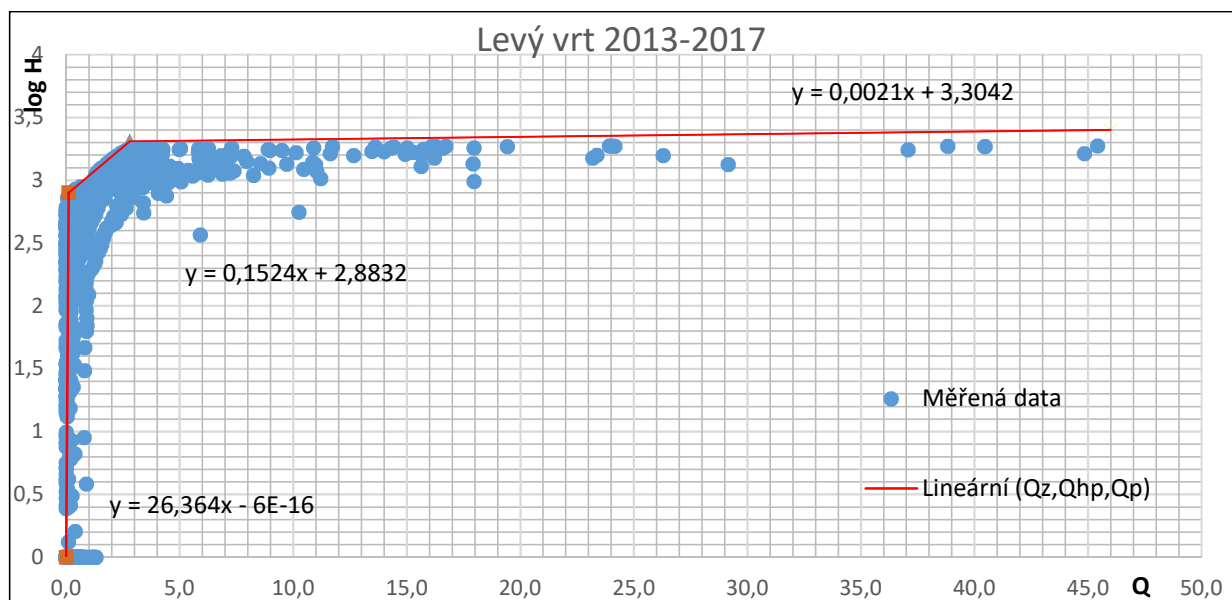
Obr. č. 12 Průměrné porovnání výšky hladin podzemní vody v levém a pravém vrtu v jednotlivých měsících v období 2013-2017 s množstvím průtočné vody v korytě toku.

V celkovém porovnání jednotlivých vrtů lze pozorovat dynamiku změn hladin podzemní vody. Hlavní dynamika probíhá v mělké půdní vrstvě za srážkových událostí. Z celkového grafu (Obr. č. 10) můžeme pozorovat, že vrty v určitých hladinách mají dvojí dynamiku, za první sezónní (jaro, léto), za druhé krátkodobá. Při krátkodobé události, vrty reagují velice rychle. Při dlouhodobé lze pozorovat, že při poklesu průměrných průtoků nasycení povodí přetrvává do června (Obr. č. 11).

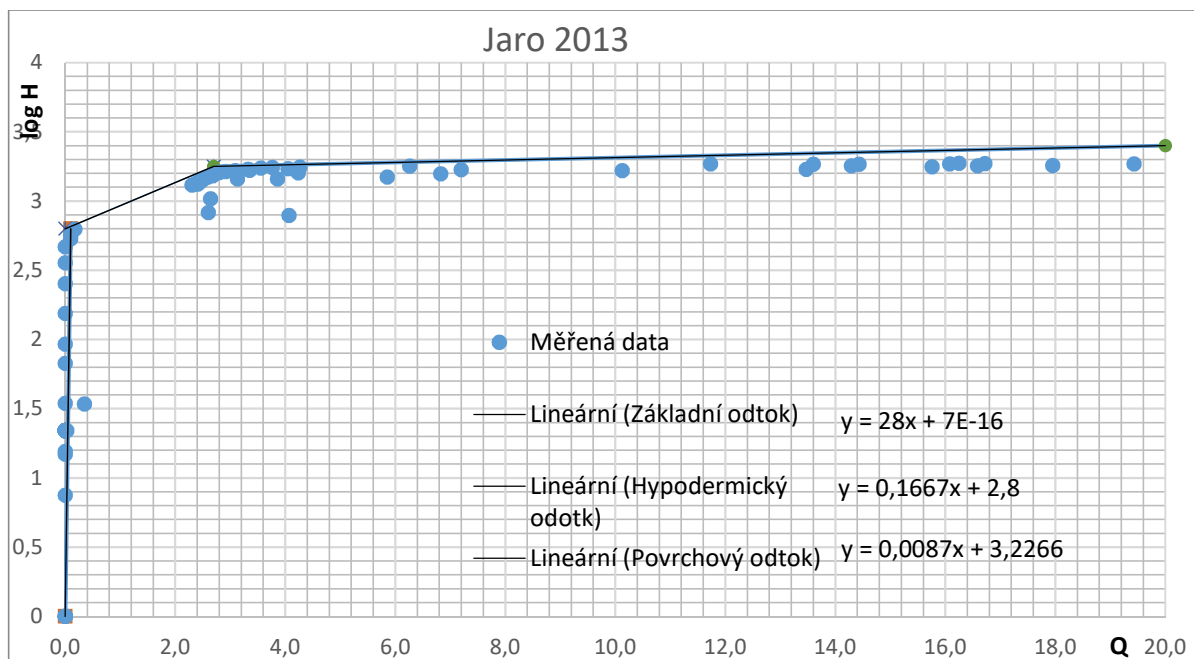
Při letních měsících je znatelné rychlejší prázdnění vrtů v rámci dnů, v porovnání s jarními měsíci, kdy vyprazdňování je dlouhodobější v rámci měsíců.

5.2 Výběr jednotlivých srážko-odtokových událostí, se zaměřením na identifikaci dílčích složek celkového odtoku

Pro separaci jednotlivých složek odtoku, byla použita upravená metoda Kliner-Kněžek. Při výběru dat se převážně použil levý vrt, kvůli lepší reakci s povrchoвым odtokem. Porovnávaly se hodnoty průtoků s logaritmovanými výškami hladiny podzemní vody ve vrtu. U vybrané metody se vykreslili tři obalové křivky nad měřenými daty. Ty určují rovnice odtoků jednotlivých složek. U obalových křivek je vyčíslen jejich rovnice za použití lineární regrese, které se mohou použít pro modelování odtoku, nebo separace odtoku. Tato metoda byla aplikována na všechna hodinová data od roku 2013-2017 (Obr. č. 13) a následně se vybírala data pro jednotlivá období jara a léta v každém roce (viz. Obr. č. 14).

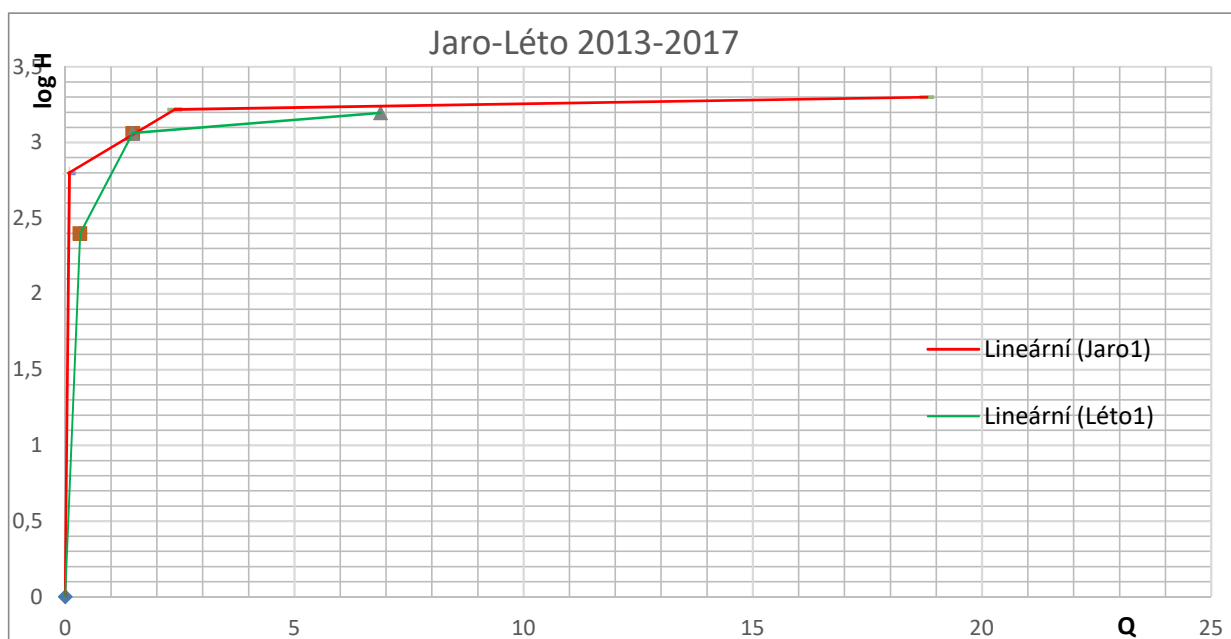


Obr. č. 13 Separace odtoku, upravené metody Kliner-Knežek pro data levého vrtu období 2013-2017



Obr.č. 14 Separace odtoku, metoda Kliner-Knežek pro data levého vrtu období Jara 2013

Obalové křivky, znázorňují velikosti odtoků. Při porovnání odtoků z období jara a léta byl rozdíl základního, hypodermického a povrchového mnohem menší než v jarních měsících. V jarních měsících, kdy je povodí více nasycené, tak je plný zásobník podzemní vody, to znamená, že podzemní voda bude mít větší podíl na celkovém odtoku než v letních měsících. Naopak rychlost odtoků hypodermického a povrchového byla v létě větší (Obr. č. 15).



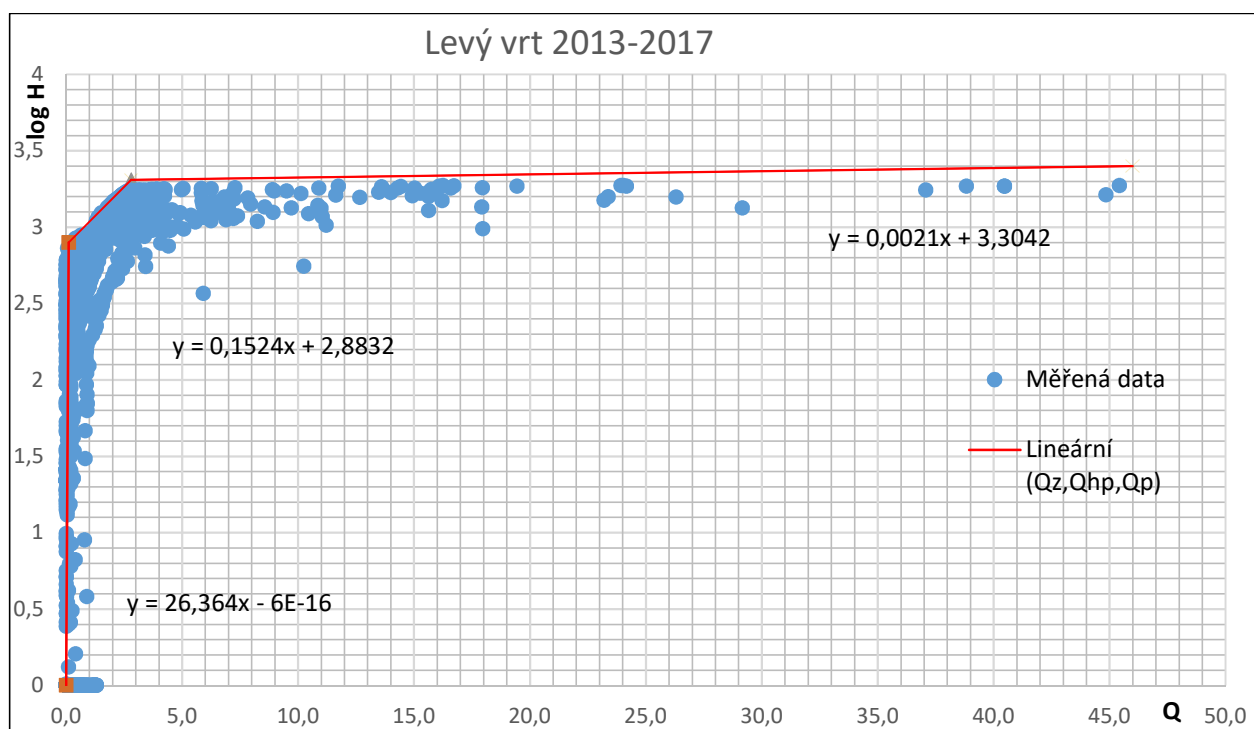
Obr. č. 15 Separace odtoku, upravené metody Kliner-Knežek pro data levého vrtu období Jara a Léta v 2013-2017

Při porovnávání výsledků reakce pravého a levého vrtu (Obr. č. 16 a Obr. č. 17) naměřených hodnot za zkoumané období 2013–2017 je vidět, že u pravého vrtu hypodermický odtok se projevuje jen malou částí na rozdíl od vrtu levého, kde je odtok velice patrný. Odtok povrchový a základní je velice podobný.

Na porovnání levého a pravého vrtu je patrné jejich odlišné chování. V pravém vrtu je vidět velice malá část přechodu u druhé obalové křivky, to znamená, že hladina ve vrtu se zaplní a pak zde neprobíhá žádný hypodermický odtok. Pravý vrt se plní celkem rychle a už i při nízkých průtocích je zcela zaplněn.

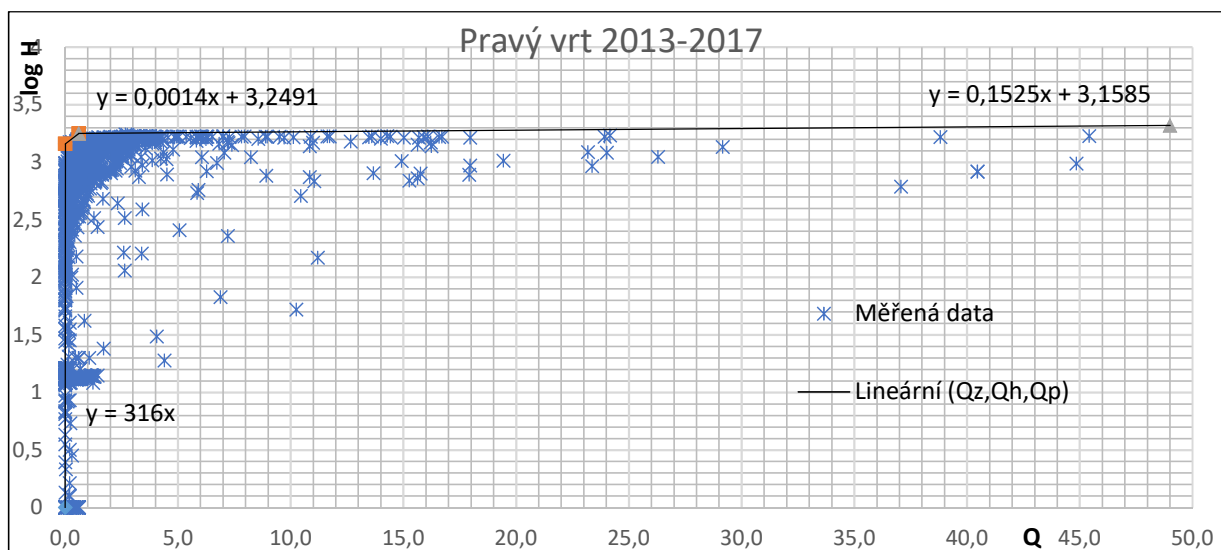
U levého vrtu je vidět vzestup hladiny podzemní vody při srážkové události. Zpočátku začíná stoupat hladina podzemní vody, následně se vrt doplňuje a po nějaké době začíná odtok povrchový. Je zde patrnější rychlejší reakce návaznosti na zvyšující se průtok.

Reakce levého vrtu za sledované období je zobrazena na Obr. č. 16.



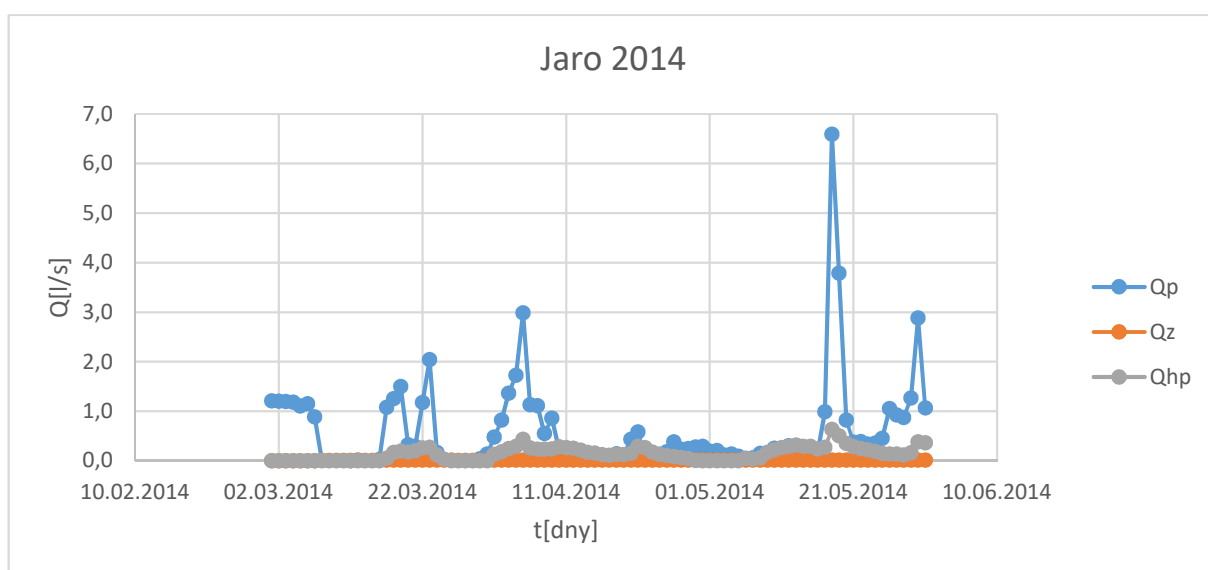
Obr. č. 16 Separace odtoku, upravené metody Kliner-Knežek pro data levého vrtu období v letech 2013-2017

Reakce pravého vrtu za sledované období je vidět na Obr. č. 17.



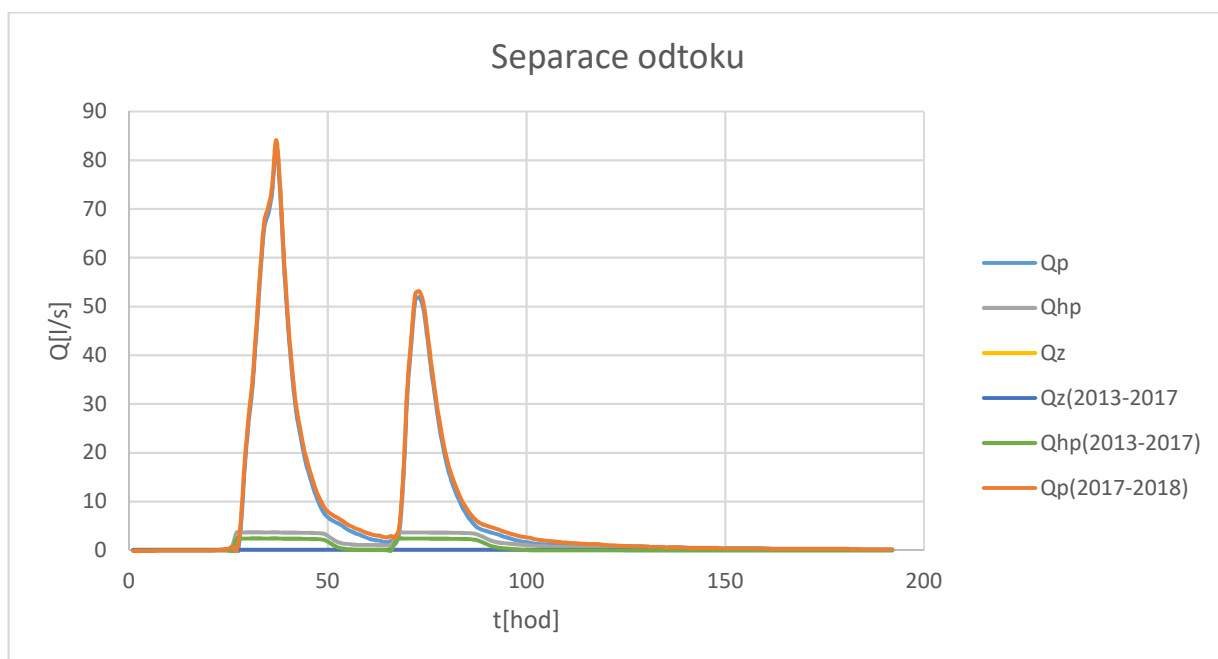
Obr. č. 17 Separace odtoku, upravené metody Kliner-Knežek pro data pravého vrtu období v letech 2013-2017

Pomocí upravené metody Kliner-Knežek a rovnic obalových křivek, se separovaly jednotlivé složky odtoků, na obr.č. 18 a obr. č. 42-50 viz přílohy, jsou názorně vidět jarní a letní období, na které byla metoda aplikována. V těchto grafech je možno pozorovat, jak na sebe jednotlivé složky odtoku reagují. V grafech je patrné, že při vzestupu odtoku povrchového začíná po krátké době stoupat odtok hypodermický, v některých srážko-odtokových situacích odtok hypodermický stoupá už dříve před odtokem povrchovým. Bohužel na grafech nelze dobře pozorovat odtok základní kvůli malému měřítku. Na obrázku je vidět názorné zobrazení separace pro období jara v roce 2014 (viz. Obr. č. 18).



Obr. č. 18 Separace odtoku, Qp- odtok povrchový, Qz- odtok základní, Qhp- odtok hypodermický, období Jaro 2014

Zaměřeno bylo i na podrobnější znázornění jednotlivých složek odtoku na vybrané události v hodinových datech (Obr. č. 19). Zde byly modely jednotlivých složek odtoku pro období průměrného celkového jara a průměrného celkového pozorovaného období 2013-2017 pro levý vrt aplikovány na srážko-odtokovou epizodu. Z výsledků vyplývá, že povrchový odtok za celé sledované období je o trochu vyšší než za průměrné jarní období. Oproti tomu hypodermický odtok je v celém období nižší než ten jarní. Porovnání základního odtoku z grafu nelze vyčíst, ale z vypočtených hodnot vyplývá, že vyšší je odtok z celého pozorovacího období.

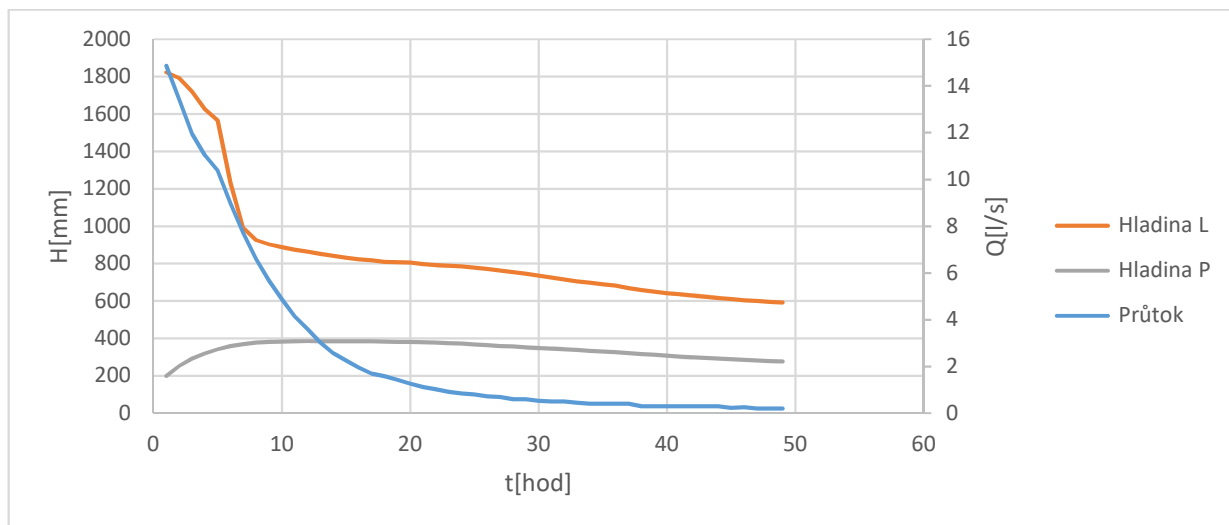


Obr. č. 19 událost 29. 3. 2014 aplikovaná na model rozdělení složek odtoku v jarních měsících a celkového období 2013-2017

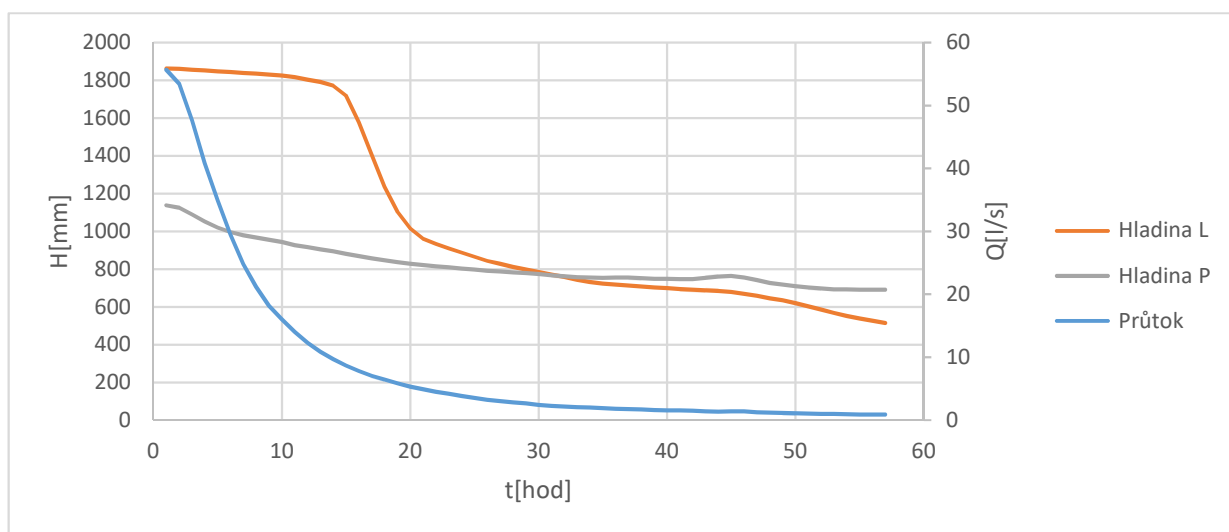
5.3 Analýza sestupných větví hydrogramů ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody

Ve výsledcích, kdy jsou porovnány hladiny podzemní vody s průtokem vody v povrchovém toku, je vidět jistá závislost reakce obou dvou vrtů na množství protečené vody měrném profilu. U sestupných hydrogramů, je patrné, že hladina levého vrtu reaguje mnohem rychleji na sestup poklesu množství protečení vody v korytě toku než hladina u vrtu pravého. Z grafů můžeme odvodit, že v hloubkách blíže k povrchu se levý vrt vyprazdňuje velice rychle a následně v nižší hloubce rychlost klesá a vyprázdnění rovněž klesá. S touto rychlostí vyprazdňování klesá i množství protečené vody v toku. U pravého vrtu na obr. č. 20, je vidět, že hladina klesá pomalu a konstantě. Na obrázku č. 21, hladina při začátku výtokové epizody

stále roste, až po deseti hodinách reaguje na pokles průtoku a začíná hladina podzemní vody klesat.



Obr. č. 20 Analýza sestupných větví v závislosti průtoku a hladiny podzemní vody ve vrtech. Událost z 31. 3. 2015



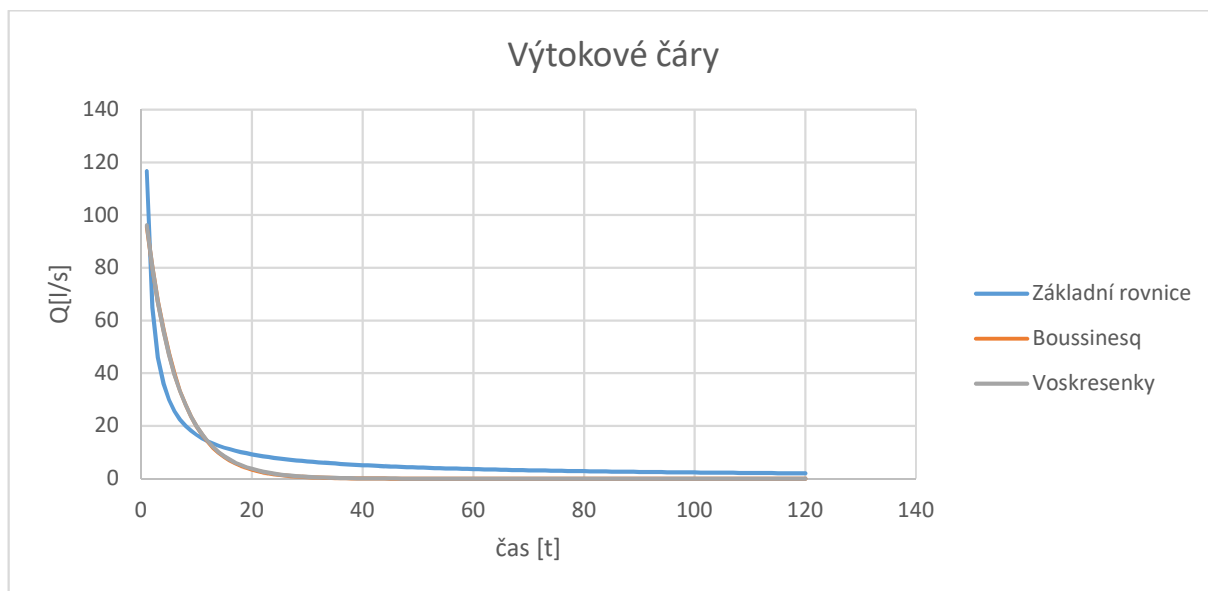
Obr. č. 21 Analýza sestupných větví v závislosti průtoku a hladiny podzemní vody ve vrtech. Událost z 18. 9. 2013

5.4 Modelování sestupných větví hydrogramu pomocí vybraných modelů

Pro výpočet porovnání metody výtokových čar, byly použity vzorce (5,6,7) uvedené v kapitole (4.3), první metoda byla odvozena z exponenciální rovnice, druhá a třetí z

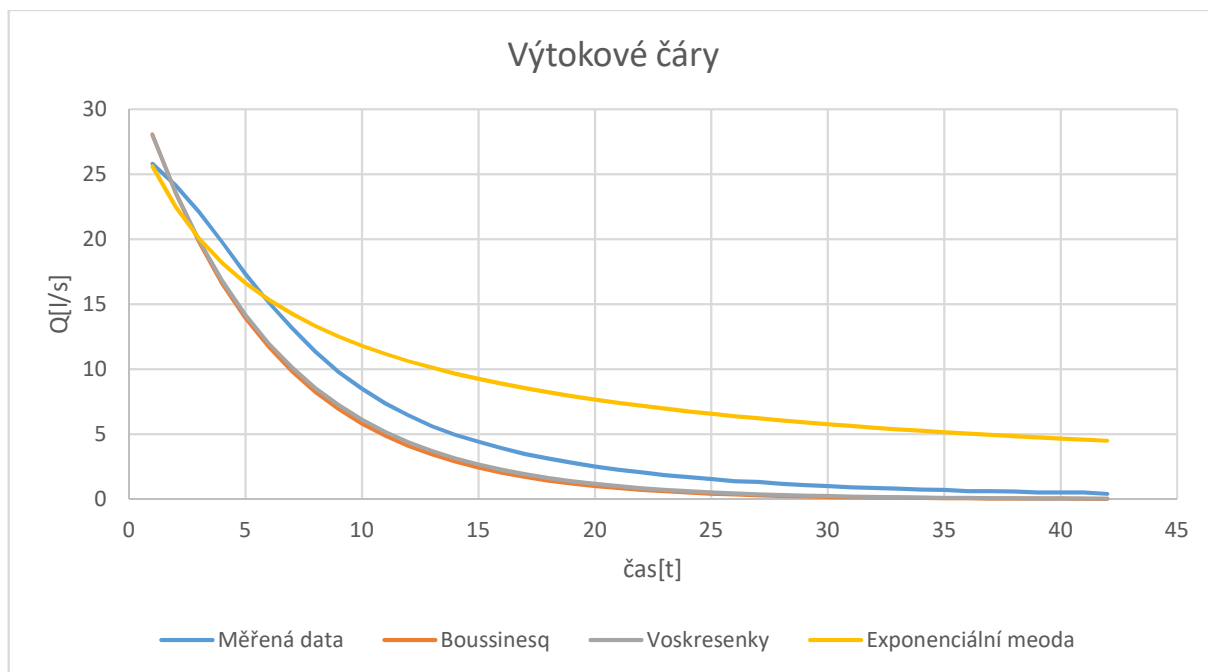
Boussinesqova a Voskresného rovnice. V Obr. č. 22. jsou výsledky výtokových čar kalibrovaných z měřených dat z výtokových křivek.

Metoda Businessq a Voskresenského jsou téměř totožné, ve vypočítaných hodnotách je vidět, že metoda Voskresnského, která má o parametr navíc, je o trochu přesnější. Rovnice exponenciální je nejméně přesná a hodnoty kvadratických chyb od referenční výtokové křivky jsou vyšší než u zbylých metod.



Obr. č. 22. Porovnání modelů výtokových čar na základě rovnic.

Při vybrání metod vycházející z rovnic Bousinesquovy, Voskresenského a exponenciální se porovnal výtokové čáry s naměřenými výtokovými čarami z experimentálního povodí Modrava 2. Metoda exponenciální rovnice se trochu od metod vzdalovala (Obr. č. 23). Dále jsou zpracovány kalibrační grafy na Obr. č. 51 v přílohách. Při vhodně určeném reprezentativním čase, kdy výtokové čáry začínají, je vidět trend, který koresponduje s použitými modely. Ve více případech lépe korespondovala metoda Voskresnského a Businequa (Obr. č. 23, a viz přílohy Obr. č. 55), ale i metoda založena na exponenciální rovnici byla v určitých epizodách blíže reprezentativní k měřenému výtoku (Obr. č. 53 viz přílohy). Z toho vyplývá, že v některých srážko-odtokových událostech, by se výše uvedené modely odvozené na základě rovnic daly použít, při modelování odtoku z povodí.



Obr. č. 23 Porovnání vybraných metod pro modelování výtokových čar z povodí s měřenými daty, které nebyly zahrnuty do kalibrace matematických modelů.

6. Diskuze

Práce se zaměřuje na analýzu odtoku podzemní vody z experimentálního povodí. Zkoumaná data byla z levého a pravého vrtu okolo toku Mokřůvka, dále se zde sleduje závislost hladiny podzemní vody s průtokem v toku. Už od počátku byla vidět rozdílnost v chování jednotlivých vrtů.

Porovnává se rychlost plnění a prázdnění hladiny podzemí vody ve vrtech s množstvím protečení vody v měrném profilu koryta. Ve výsledcích, v porovnání chování vrtů levého a pravého, je patrná rychlost reakce s povodím. U levého vrtu je vidět, že reaguje mnohem rychleji než vrt pravý. Tyto rychlosti reakcí mohou být ovlivněny geomorfologií svahů. Svah na levé straně toku, je větší a delší, začíná až na vrcholu Malé Mokřůvky (1330). Pravá strana je menší a má mírnější sklon svahu. Rychlost odtoku může ovlivnit větší sklon svahu, proto voda dotéká k levému vrtu mnohem rychleji než k vrtu pravému. U pravého vrtu je také patrné, že reakce, kdy se vrt vyprazdňuje je pomalejší a tím je patrné, že voda zde dotéká v menší rychlosti, proto voda stávající (starou) není rychleji vytlačována vodou přítékající (novou). Tomuto rozdělení na vodu starou a novou se věnují izotopové analýzy, kde lze srážkovou vodu rozpoznat dle izotopů a z ní dále určit její původ a rychlost. Jak uvádí (Lumley a Panofsky, 1996) tvorba odtoku je jev o mnoha různých měřících

charakterizující variability půd, srážkách a topografii, každá z nich může mít komponenty o velkém či malém měřítku. Tak i v našem případě je rozdíl patrný a lze usuzovat, že určité charakteristiky se liší už v jednotlivých stranách toku Mokrůvka.

Hladina podzemní vody ve vrtu, v jarních měsících je naplněna na vyšší úroveň než v měsících letních. V letních měsících je patrné, že průtok roste už při menších hladinách vody ve vrtu, což by mohlo ukazovat, že se na složce celkového odtoku podílí hypodermický odtok, popřípadě povrchový (dohromady přímý odtok z povodí). Pokud se navyšuje průtok v jarních měsících, je to způsobené tím, že je povodí relativně nasycené a celkový odtok nemusí dotovat podzemní vodu, tím je i infiltrace nižší a skoro všechna voda odtéká rychlou složkou odtoku (přímým odtokem). V letních měsících se rychlá složka objevuje i při nižších hladinách ve vrtu a postupně pak doplňuje hladinu podzemní vody. Odlišná rychlost změny hladiny podzemní vody v jednotlivých vrtech je ovlivněna půdním profilem, který je na každé straně toků rozdílný.

V porovnání grafů jednotlivých období jara a léta je patrné, že v jarních měsících, je povodí z větší části nasycené, tím nastává zvýšená komunikace mezi jednotlivými složkami odtoku. V letních měsících jsou hladiny podzemní vody vrtů nižší a komunikace není tak velká. Pokud se celkový odtok děje v mělké vrstvě, tak v letních měsících, kdy jsou vydatné srážky, většina vody odtéká rychlým povrchovým a hypodermickým odtokem a nemá velký podíl na plnění zásob podzemní vody. Tím bychom mohli odlišit dynamiky vyprazdňování vrtů dlouhodobé v rámci sezony a krátkodobé v průběhu dnů.

V horských podmínkách je zcela běžné odvodňování daného povodí vodním tokem. Ve vrchních částech povodí se mohou vyskytovat hlubší zvodně, které jsou schopné dotovat vodou v delším úseku spodní části povodí. Je zde, ale pozorováno, že hlavní dynamika odtoku probíhá těsně pod zemským povrchem. U vrtů můžeme vidět, že jejich zvodně jsou rychle naplněny a následně i rychle vyprázdněny. U levého vrtu je jev patrnější než u pravého.

V práci byl odtok rozdělen na tři základní složky, odtok povrchový, hypodermický (mělký podpovrchový) a základní. Dle jiných autorů, jsou rozdělitelné na jednodušší a přehlednější složky. Při metodě separace odtoku, jsou dle (Kulhavý a Kovář, 2000) formy povrchového a podpovrchového odtoku těžko oddělit, proto se používá řada modelových technik, kde součtem těchto odtoků je zde pojmenován odtok přímý. Rozdělení tří odtokových složek je pouze schematické a nemůže věrně zobrazovat složitost odtokového procesu. I přesto, všechny fyzikálně založené odtokové modely

toto rozdělení ve své stavbě plně respektují. Rozlišování složek odtoku, závisí na charakteru úlohy, která se má řešit. Pro většinu základních úkolů je dostačující rozdělení na základní a přímý odtok, kde přímým odtokem označujeme odtok, který můžeme spojovat s danou srážkou. Hypodermický odtok se tedy vyskytuje částečně v základním, tak i v přímém odtoku (Blažková 1993).

U tvorby obalových křivek v upravené metodě Kliner-Knežek bylo patrné, že v jarních měsících jsou hladiny podzemní vody vyšší, což je způsobováno táním sněhu a tím průběžným zvyšováním dotace vody do půdy. V obdobích podzimu a zimy bývají průtoky v korytu nižší, ale při teplejší zimě mohou průtoky kulminovat na obdobných či až vyšších hodnotách.

U vrtů také sledujeme větší dynamiku měnících se hodnot hladin v hloubkách blíže povrchu. Při nižší hladině podzemní vody se vrt vyprazdňuje výrazně pomaleji a je méně závislý na srážkách, kvůli dotaci vody z větší plochy povodí. U těchto vrtů se nedá říci, že jsou izolované a jsou plněny pouze z povrchových vod při srážkách.

V analýze sestupných větví hydrogramu ve vztahu hladiny podzemní vody ve vrtech a průtoku, se může říct, že odlišné běhy reagují rozdílně. U pravého vrtu jsou pozorovány pomalé reakce změny hladiny na průtok. Tím lze odvodit, že pravá strana povodí může déle sytit povrchový tok i v bezesrážkovém období.

Při tvorbě výtokových čar, se vycházelo z hodinových dat průtoků. Aplikace modelů na měřené a porovnávané výtokové čáry, byla v některých ohledech méně přesná a dala by se s použitím detailnějších dat více zpřesnit. Při sledování, zda model odpovídá měřeným výtokovým křivkám je důležité, přesně určit začátek události na základě hodnot dat. Tato data by měla být co nejpřesnější a měla by se co nejvíce shodovat, pak by mohla modelovaná výtoková křivka lépe korespondovat s naměřenou.

Odvozené modely rovnic dle Bousinesqua a Voskresenského se lišily pouze o jeden parametr. V aplikaci na měřená data, metody si byly velice blízké, i přesto že dle dat byla o něco málo přesnější metoda Voskresenského s jedním parametrem navíc. Je tedy otázkou, zda o něco menší zpřesnění je potřebné a dokáže lépe namodelovat výtokovou křivku z povodí. Ukázalo se, že v aplikaci na malé horské povodí rovnice Bousinesqua plně dostačující. Tyto metody jsou pouze optimalizační a při vyhledávání algoritmu se mohou nalézt více či méně přesné výsledky.

7. Závěr

V této diplomové práci na téma „Analýza odtoku podzemní vody na experimentálním povodí Modrava 2“ bylo hlavním cílem popsat jednotlivé složky odtoku se zaměřením se na odtok podzemní vody z experimentálního povodí. K této práci byla poskytnuta data z experimentálního povodí Mokruvka II od roku 2013-2017. Bylo zde provedeno vyhodnocení měřených dat a charakterizována srážko-odtoková činnost v dané lokalitě. Pro identifikaci dílčích složek celkového odtoku byla vybrána metoda Kliner-Knežek, která se upravila a vynášela se data průtoků včetně logaritmu hladin podzemní vody v levém průzkumném vrtu. Z větší části je práce zaměřena na analýzu jarních a letních období. Podle této metody se separovaly jednotlivé složky odtoků a mohlo se odvodit, jak se budou chovat srážko-odtokové události v jednotlivých obdobích. Na výsledcích jsou vidět rozdílné dynamiky vyprazdňování podzemní vody v krátkém (dny) a dlouhém (měsíce) časovém horizontu. Je ovlivněna sezónností, kdy při jarních měsících je povodí více nasyceno než při měsících letních. Dokázalo se, že při analýze sestupných větví hydrogramu ve vztahu ke změnám hladiny podzemní vody ve vrtech, se jednotlivé vrty chovají odlišně, zatímco levý vrt reaguje velice rychle, pravý vrt je stabilnější a reaguje méně výrazně a se zpožděním. Při analýze sestupných větví hydrogramu se použila metoda výtokových čar a separace jednotlivých složek odtoků. Pro modelování jednotlivých sestupných větví hydrogramu byly použity tři metody. První, která byla na základě jednoduché exponenciální rovnice s dvěma parametry, následně rovnice odvozeny Bousinesquem také s dvěma parametry a Voskresnským s třemi parametry. Tyto modely byly kalibrovány na základě dat sestupných hydrogramů a referenčních křivek a dále porovnávány s naměřenými daty. Pomocí těchto křivek, bychom mohli modelovat odtokovou činnost na daném povodí.

8. Zdroje

1. BEVEN K.J., 1986: Runoff production and flood frequency in catchments of order n : an alternative approach. In: Scale Problems in Hydrology (editor GUPTA, V.K. et al.) pp. 107-131. D. Riedel Publishing Comp
2. Boussinesq, J. (1903), Sur le de´bit, en temps de se´cheresse, d'une source alimente´e par une nappe d'eaux d'infiltration, C. R. Hebd. Seanc. Acad. Sci. Paris, 136: 1511– 1517.
3. BLAŽEK, Vladimír, NĚMEC, Jan a Josef HLADNÝ (eds.). Voda v České republice. Praha: Pro Ministerstvo zemědělství vydal Consult, 2006. ISBN 80-903482-1-1.
4. BLAŽKOVÁ, Šárka. Srážkoodtokové modelování založené na principu jednotkového hydrogramu. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 1993. Práce a studie. ISBN 80-901181-3-5.
5. CABICAR, Josef. Stabilní izotopy. Praha: Academia, 1983.
6. DATEL, Josef, Jindřiška HAUEROVÁ a Jan NOVOTNÝ, ed. Průzkum, využívání a ochrana podzemní vody: nové úkoly a výzvy: sborník příspěvků XIV. hydrogeologického kongresu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-903635-4-0.
7. DINGMAN, S. L. Physical hydrology. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-13-099695-5.
8. Dub Oto, Němec Jaromír, Hydrologie, Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1969.
9. Fendeková M, Fendek M, 1999, Killeho metoda – Teoria a prax. Podzemná vody 7(2) s 77 – 87.
10. Fleming, G. Computer Simulation Techniques in Hydrology. Elsevier 1975
11. 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.
12. HOLÝ, Miloš. Protierozní ochrana. Praha: SNTL, 1978, 283 s.
13. HORÁČEK, Zdeněk. Vodní zákon: s aktualizovaným podrobným komentářem po roce účinnosti nového občanského zákoníku k .. Praha: Sondy, 2015-. Paragrafy do kapsy
14. HUBAČÍKOVÁ, Věra. Hydrologie. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. ISBN 80-7157-638-7.
15. HRÁDEK F., Kuřík P.: Hydrologie. FLE ČZU Praha, 2004, 280 s.

16. JAČKA L., 2009: Stanovení vybraných hydro-pedologických charakteristik na povodí Modrava 2
17. JAIN, S. K. 1997: 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,
18. JANEČEK, M.: *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.
19. JANEČEK, Miloslav. *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, 1992. Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe.
20. Kadlecová, R. - Olmer, M. (2010b): Regionální hydrogeologický průzkum podzemních vod. In Muller, Muzikář: Podzemní voda ve vodoprávním řízení VII, svazek VII. s. 39-44. – Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost. Praha. ISBN 978-80-02-02262-6
21. Kessl J., Kněžek M. 2000. Metody výpočtu základního odtoku. Podzemná voda, 6(2), s. 52-58.
22. Kille, K., 1970: Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Z. deutsch. geo. I. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem., Hannover, 89-95
23. Kirkby, M.J: Network hydrology and geomorphology. In: Beven, K. and Kirkby, M.J. : Channel Network Hydrology. Wiley, Chichester, 1993, pp. 1-11
24. Kliner K., Knežek M. 1974. Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemních vod. Vodohospodářský časopis SAV Bratislava, 5 (22), s. 457-466.
25. Kodešová, R. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland. ScienceDirect: Soil Tillage Research, 2010, 4 s
26. KOS, Zdeněk. Vodní hospodářství. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 8001014177
27. KRÁSNÝ, Jiří. Odtok podzemní vody na území Československa. Praha: SNTL, 1982.
28. Krejčová D. 1990. Vyčleňování základního odtoku separací hydrogramu pomocí průměrných výtokových čar. Zpráva ČHMÚ, Brno.
29. KŘÍŽ, H.: Hydrologie podzemních vod. Československá akademie věd, Praha, 1983, s. 292.
30. KNĚŽEK, M. Podzemní složka odtoku. Výzkumný ústav vodohospodářský. Praha: Státním zemědělské nakladatelství, 1988, s. 64.
31. KULHAVÝ, Z.; DOLEŽAL, F.; SOUKUP, M. Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů. Praha: Vědecké práce VÚMOP, v.v.i., 2001

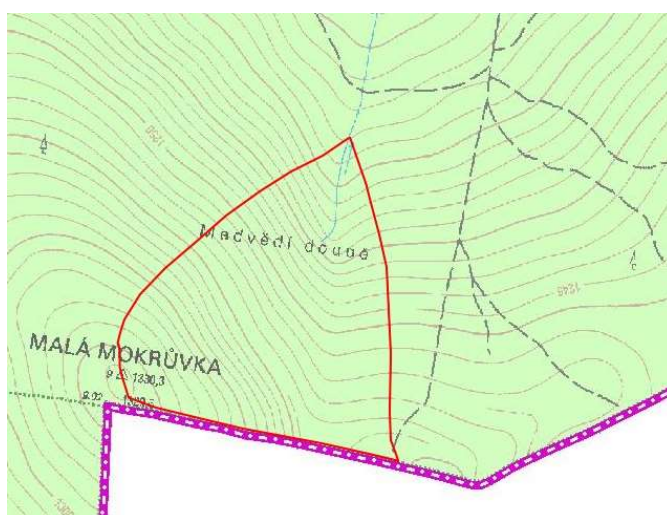
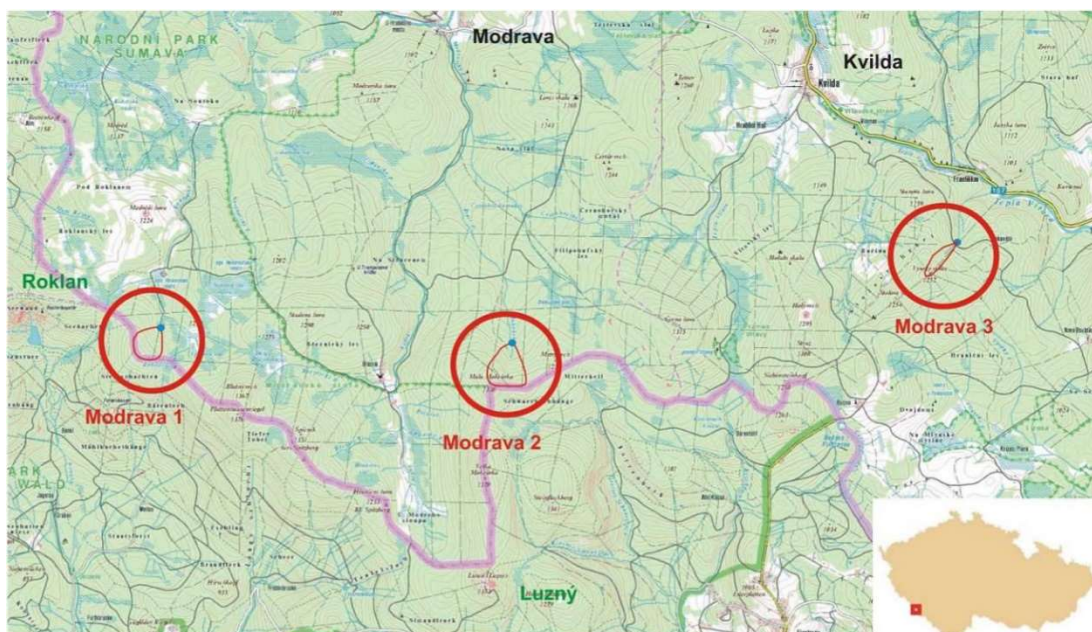
32. KULHAVÝ, Zbyněk a Pavel KOVÁŘ. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2000.
33. Kvítek, T. a kolektiv Zemědělské meliorace. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Zemědělská fakulta, České Budějovice 2006, 164 stran.
34. LEVÝ O., 2008: Geofyzikální průzkum povodí Modrava 2. INSET s.r.o., Nepublikováno, Dep.: KVHEM FŽP ČZU, Praha
35. LISCHKE, P., FRANK V. Hydrologie, meteorologie, pedologie. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
36. Lumley, J. L. and Panofsky, H. A. 1969. The structure of atmospheric turbulence. John Wiley and Sons, New York, 239 pp.
37. MÁCA, Petr. Jednotkový hydrogram. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka, 2010. ISBN 978-80-87402-05-4.
38. Machlica, A. & M. Fendeková, 2006: Separácia zložiek odtoku v povodí Chvojnice modelom BILAN.- Podzemná voda ISSN 1335-1052, XII, 2/2006, 135-147.
39. NĚMEC, J. Hydrologie. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1965
40. NYPL, V. Hydrologie, meteorologie, pedologie. Díl 2. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
41. PAVLÁSEK, J. – MÁCA, P. – ŘEDINOVÁ, J. Analýza hydrologických dat z Modravských povodích. Journal of Hydrology and hydromechanics, 2006, roč. 54, č. 0, s. 207 - 216. ISSN: 0042-790X.
42. PITTER, Pavel. 2015. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
43. POKORNÁ, Dana a Jana ZÁBRANSKÁ. Hydrologie a hydrogeologie. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008. ISBN 978-80-7080-707-1.
44. SOMMER, M.: Hydrologie. Vysoké učení technické v Brně, 1985, s. 206
45. SOUKUP, Mojmír a František HRÁDEK. Optimální regulace povrchového odtoku z povodí. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 1999. ISBN 1211-3972.
46. STRNAD, Zdeněk. Vodní právo. 2. vydání. Vodňany: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod, 2015. ISBN 978-80-7514-026-5
47. ŠANDA, Martin. Environmental tracers in experimental hydrology: Přirozené stopovače v experimentální hydrologii. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04817-7.

48. ŠILAR, Jan. Hydrologie v životním prostředí. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. Phare. ISBN 80-7078-361-3.
49. Šíř, M. Soil Water Retention and Gross Primary Productivity in the Zábrod area in the Šumava Mts. ScienceDirect: Soil and Water. 2008, 1 s.
50. TALLAKSEN, L.M.: A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology 165, 1995, s. 349-370.
51. ÚVTIZ č.5/1992 „Ochrana zemědělské půdy před erozí.“ VUMOP Praha
52. Vizina, A. a Hanel, M. (2011) Eliminace ovlivnění průtoku pomocí propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance. VTEI, 53, č. 3, s. 20–22, příloha Vodního hospodářství č. 11/2010.
53. Vlnas, Radek, Mgr. Martin Pecha, Ing. Vladimír Sosna, Lenka Černá p.g. Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky v roce 2015, 2015, 181.

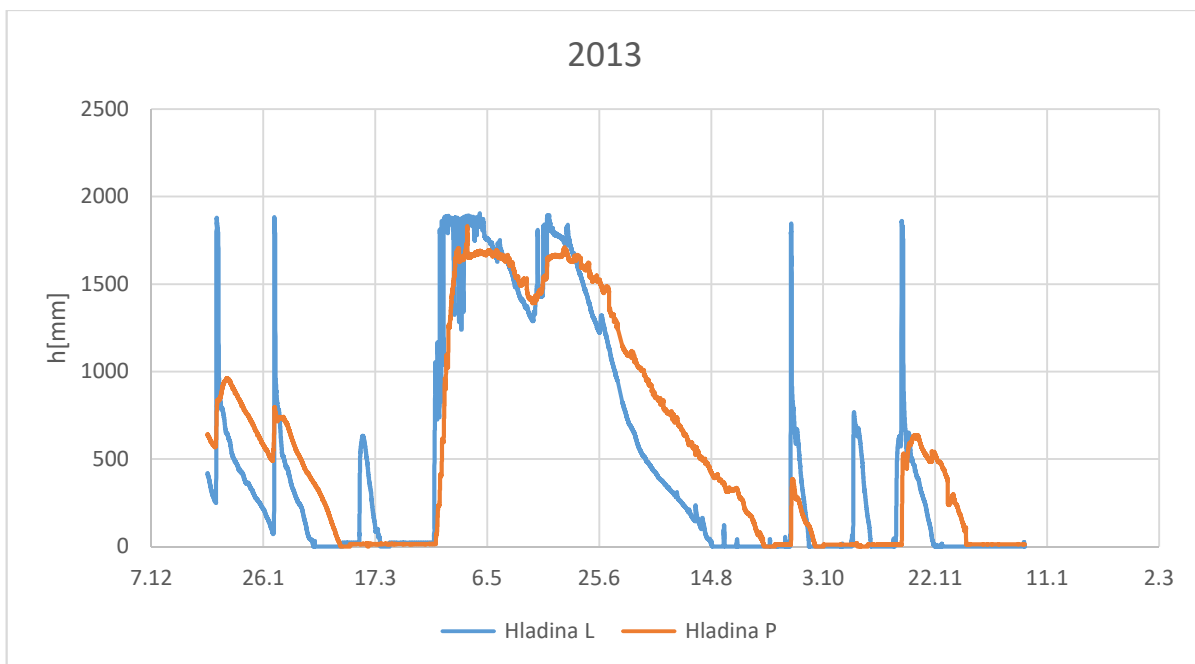
Internetové odkazy:

1. http://voda.chmi.cz/opzv/zakl_odt/zakl_odt.htm
2. <http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/bilance.htm>
3. <https://water.usgs.gov/edu/watercycleczech.html>

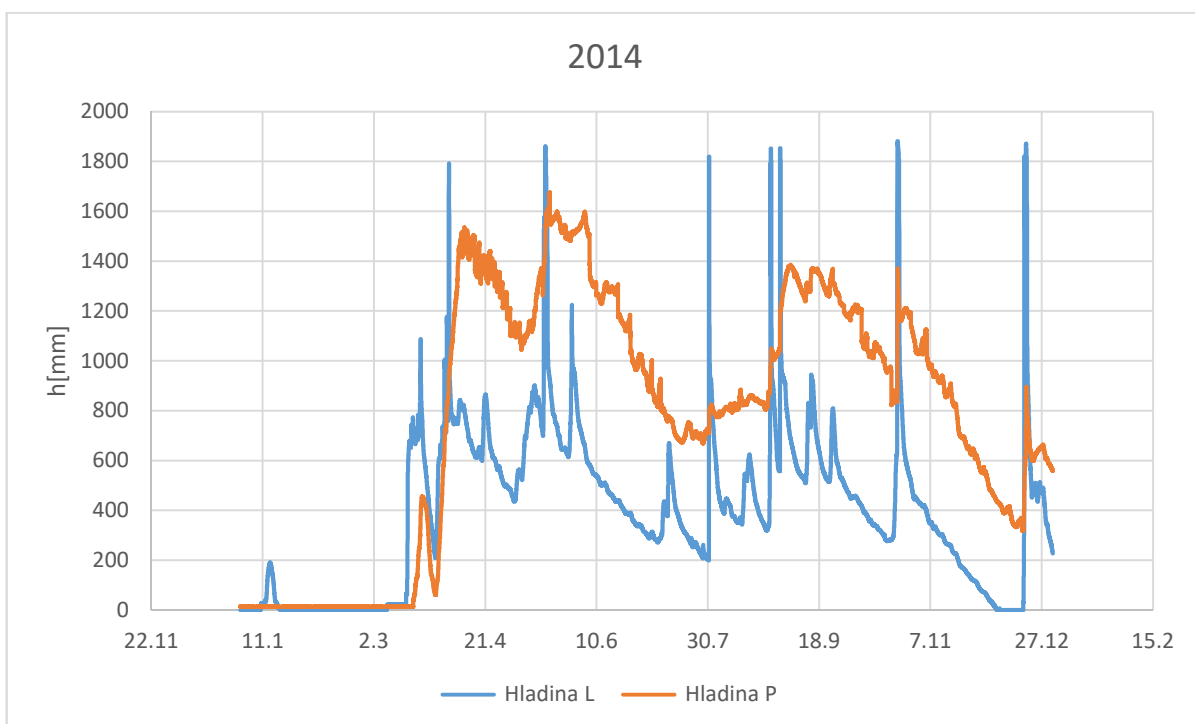
9. Příloha



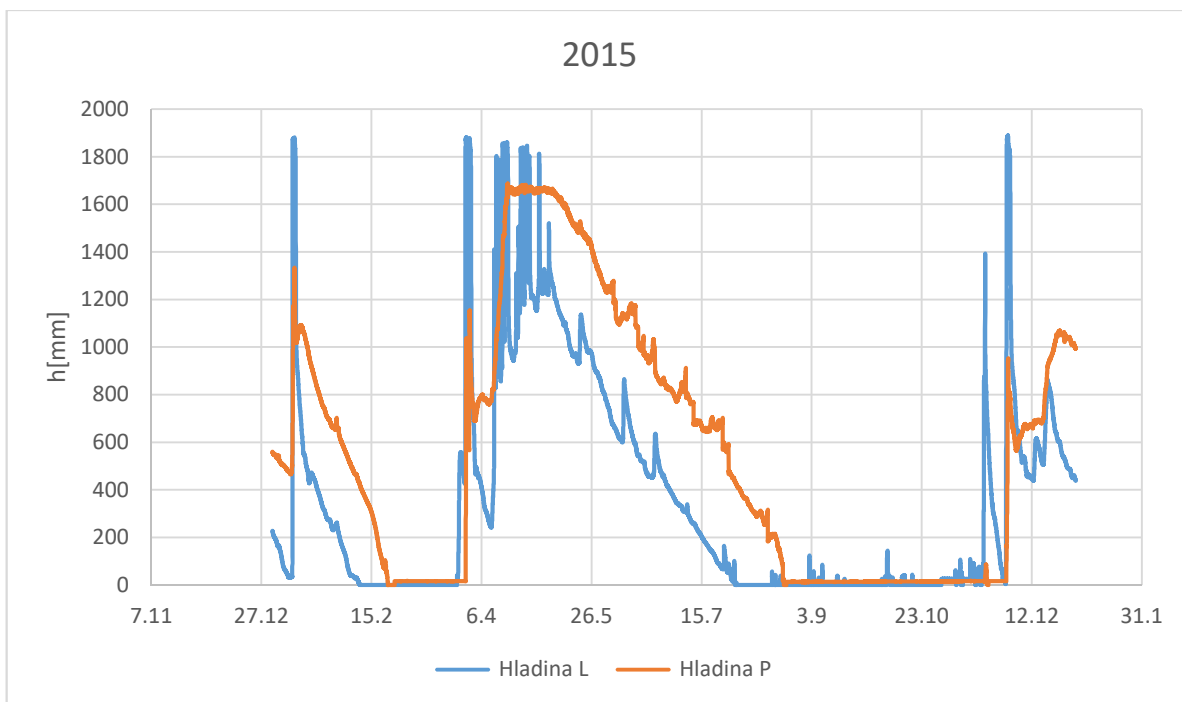
Obr. č. 24 Poloha experimentálních povodí Modrava 2 (Experimentální povodí Modrava).



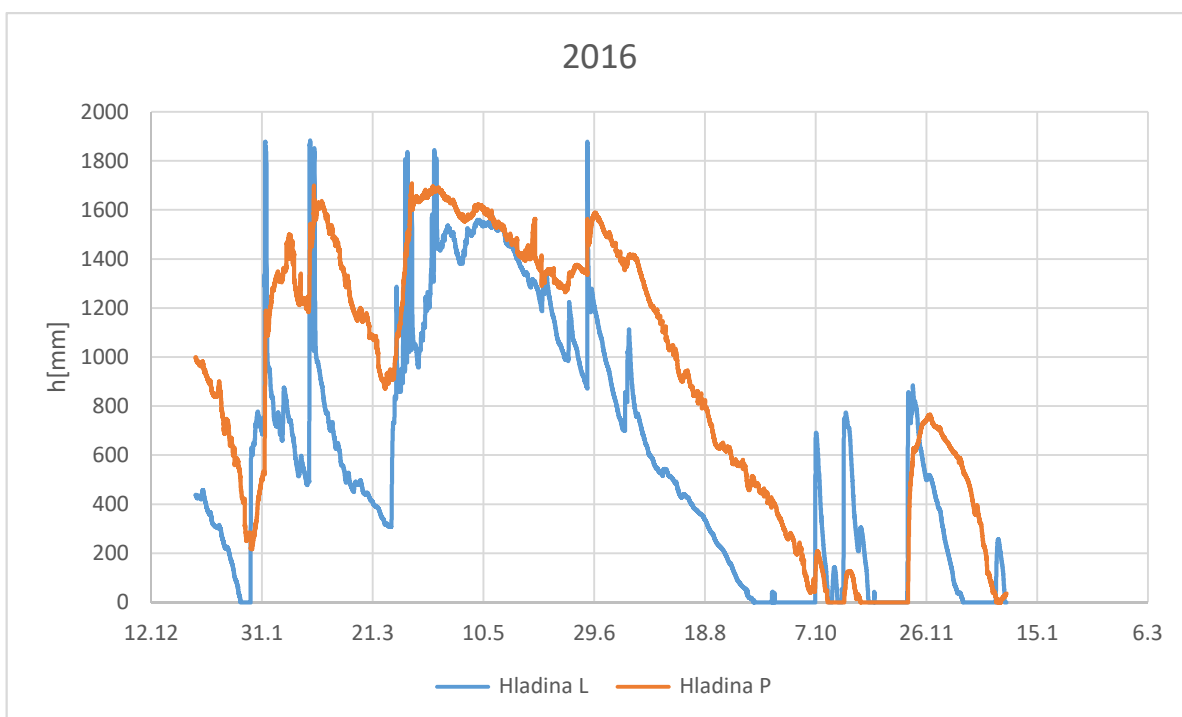
Obr. č. 25 Pozorování hladiny levého a pravého vrtu pro rok 2013.



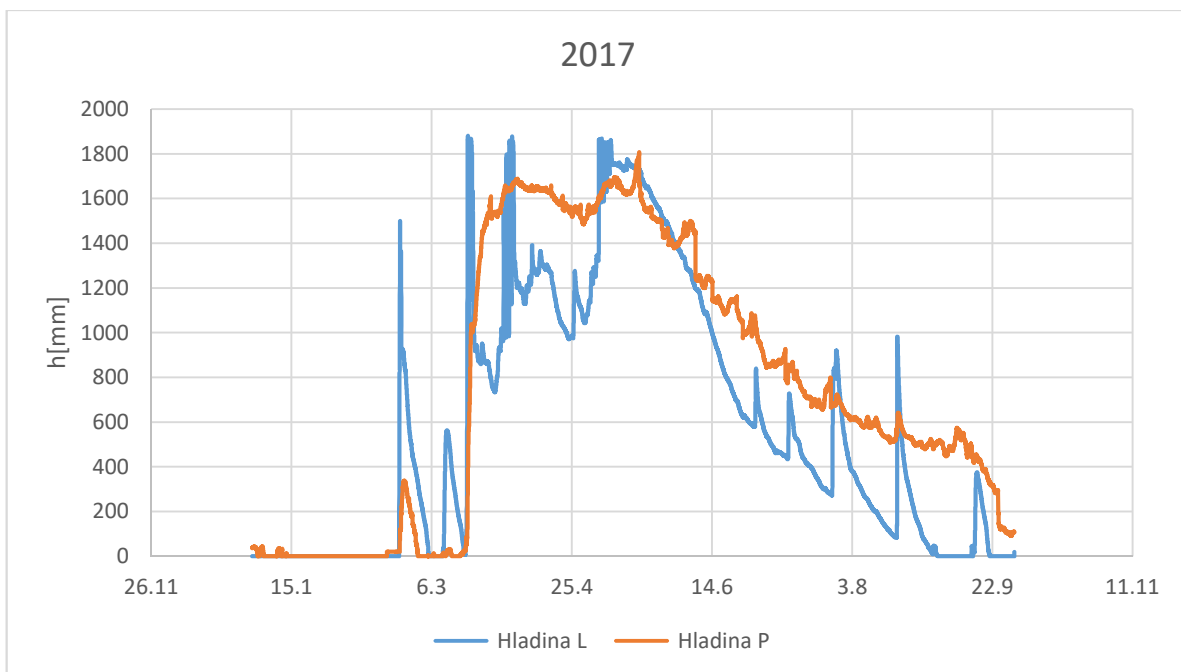
Obr. č. 26 Pozorování hladiny levého a pravého vrtu pro rok 2014.



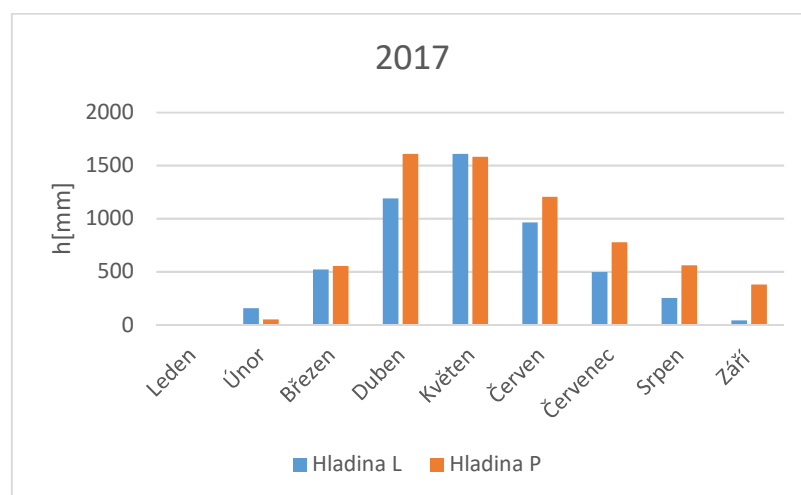
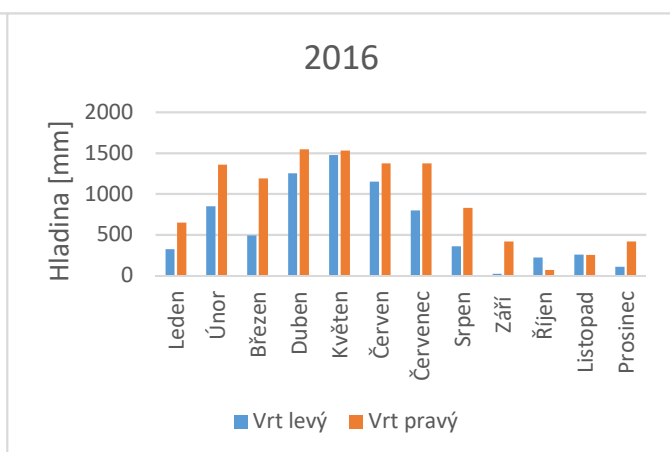
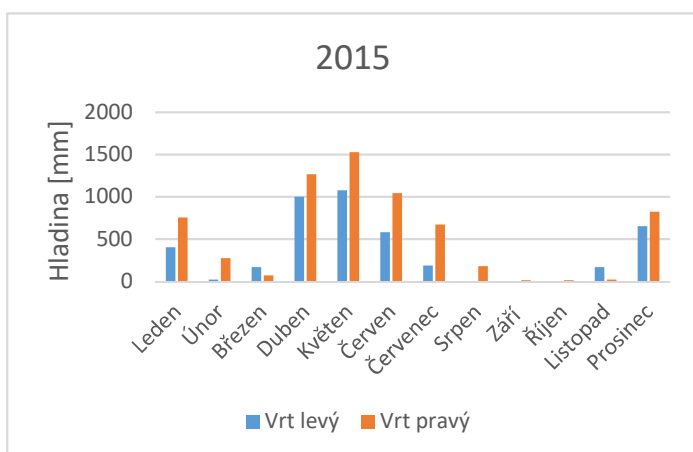
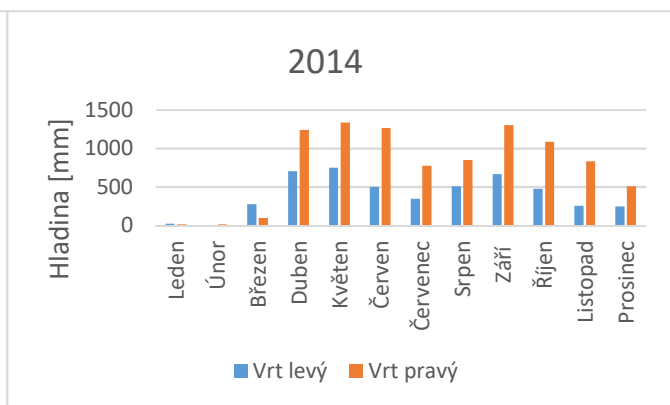
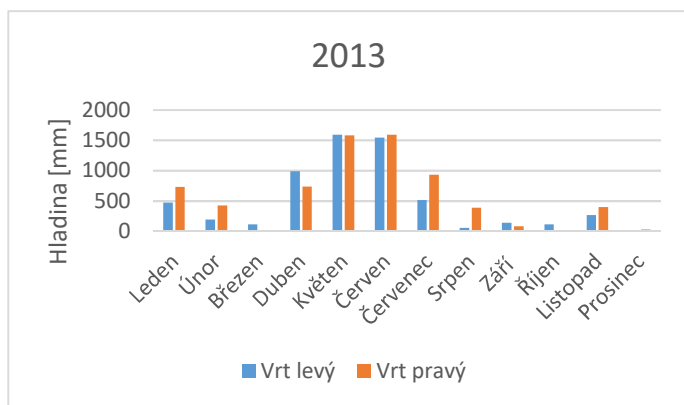
Obr. č. 27 Pozorování hladiny levého a pravého vrtu pro rok 2015.



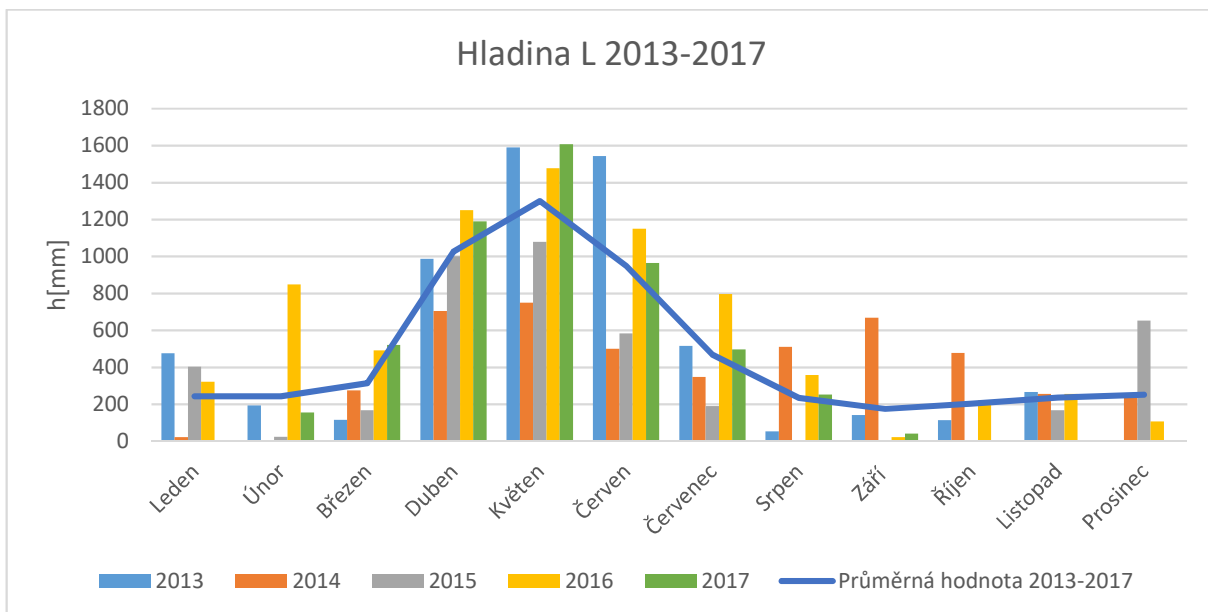
Obr. č 28 Pozorování hladiny levého a pravého vrtu pro rok 2016.



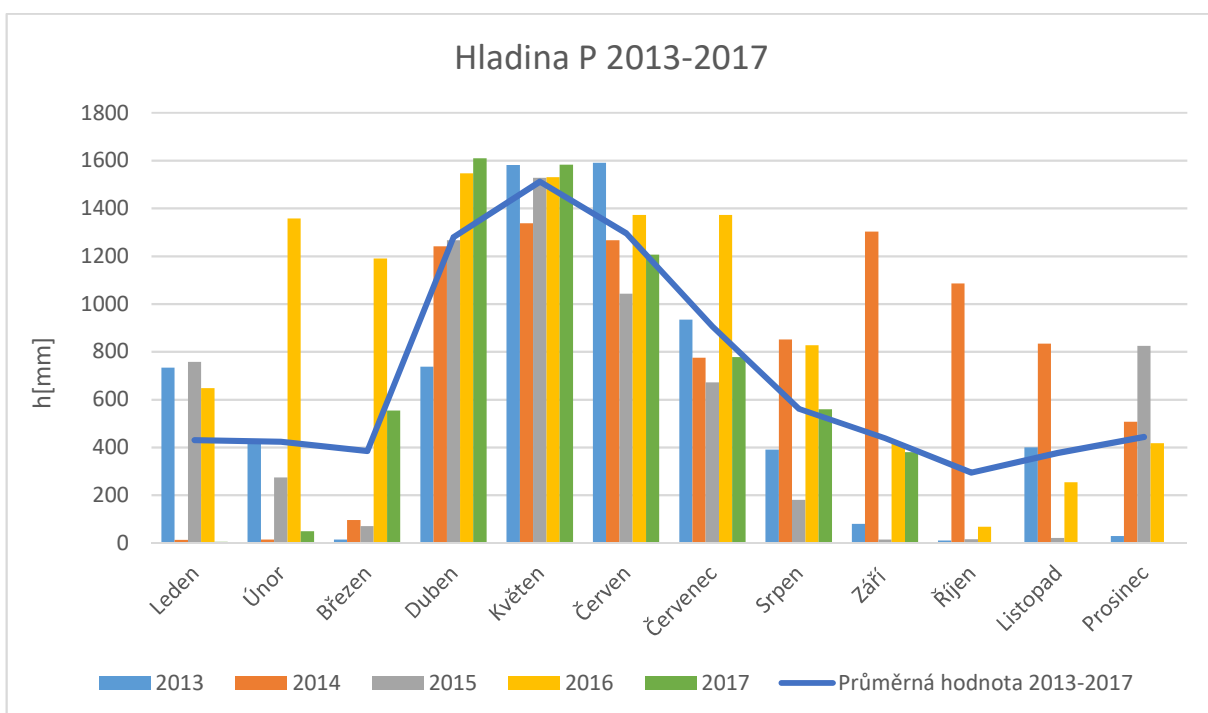
Obr. č 29 Pozorování hladiny levého a pravého vrtu pro rok 2017.



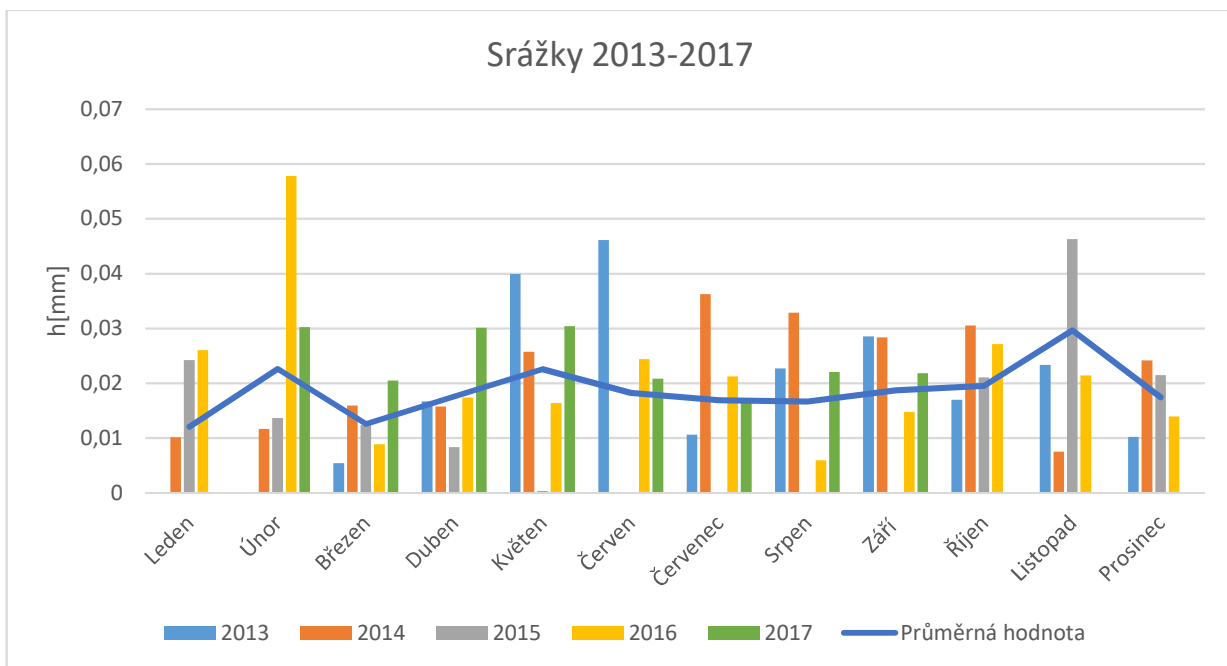
Obr. č. 30-35 Průměrné měsíční hladiny levého a pravého vrtu pro roky 2013-2017.



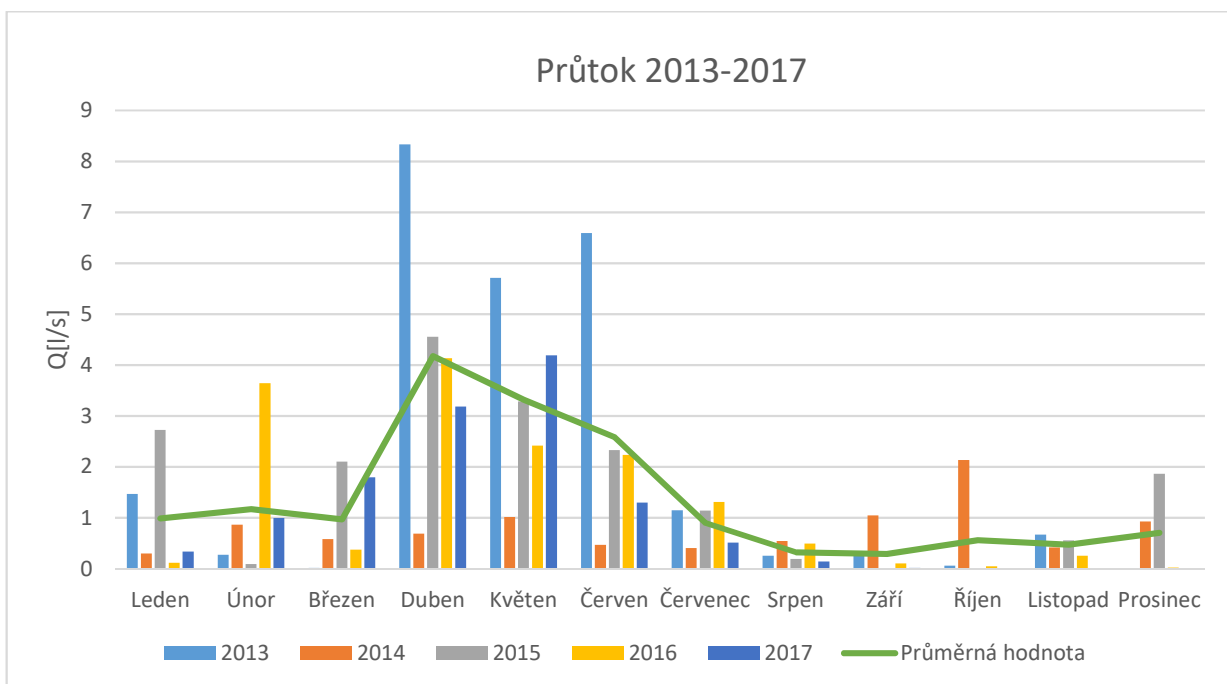
Obr. č. 36 Průměrné hladiny v levém vrtu v jednotlivých letech a měsících, průměrná hodnota hladin v letech 2013-2017.



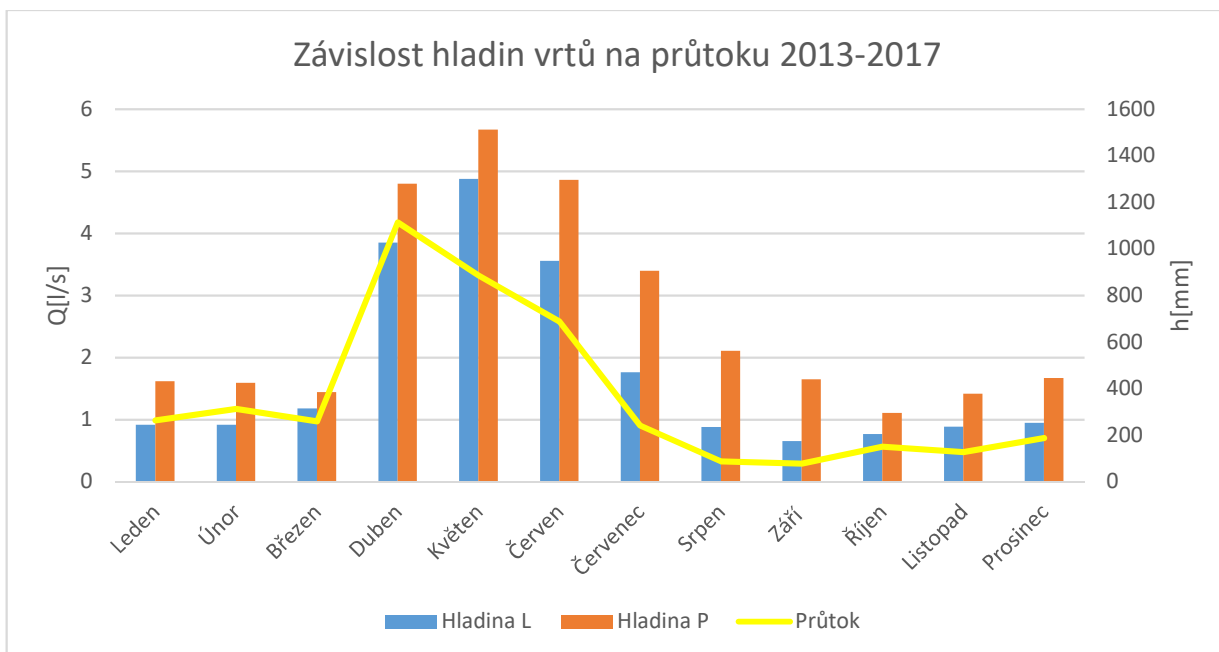
Obr. č. 37 Průměrné hladiny v pravém vrtu v jednotlivých letech a měsících, průměrná hodnota hladin v letech 2013-2017.



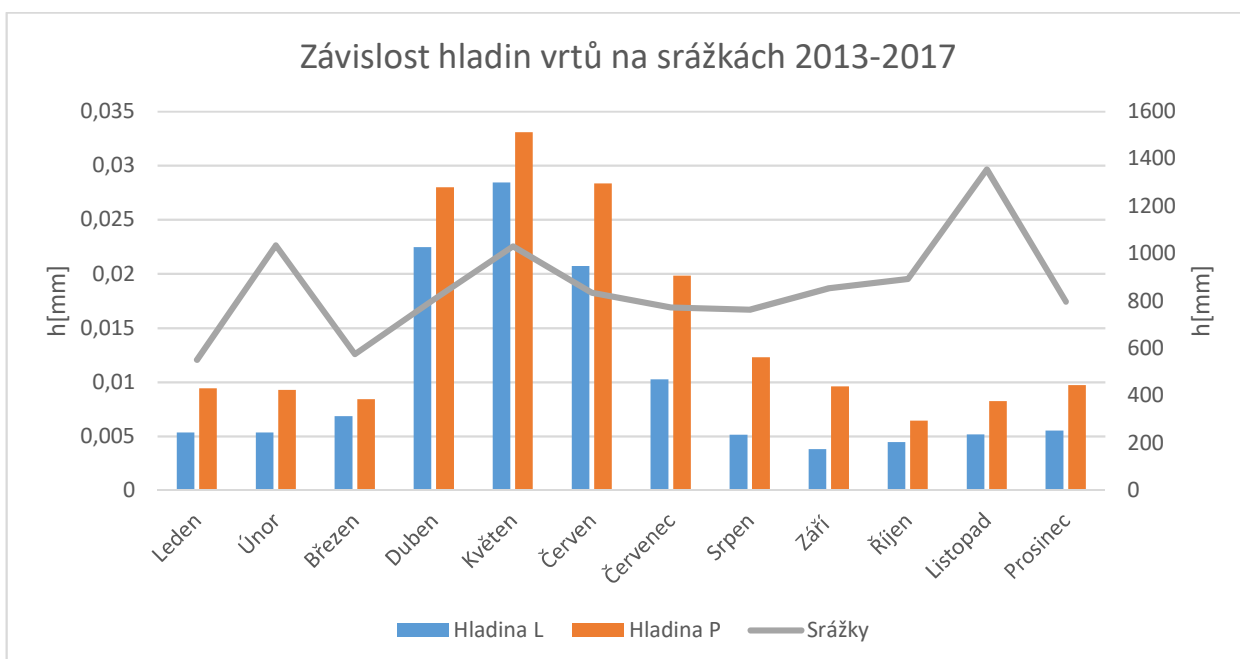
Obr. č. 38 Průměrné velikost srážek v jednotlivých letech a měsících, průměrná hodnota velikost v letech 2013-2017.



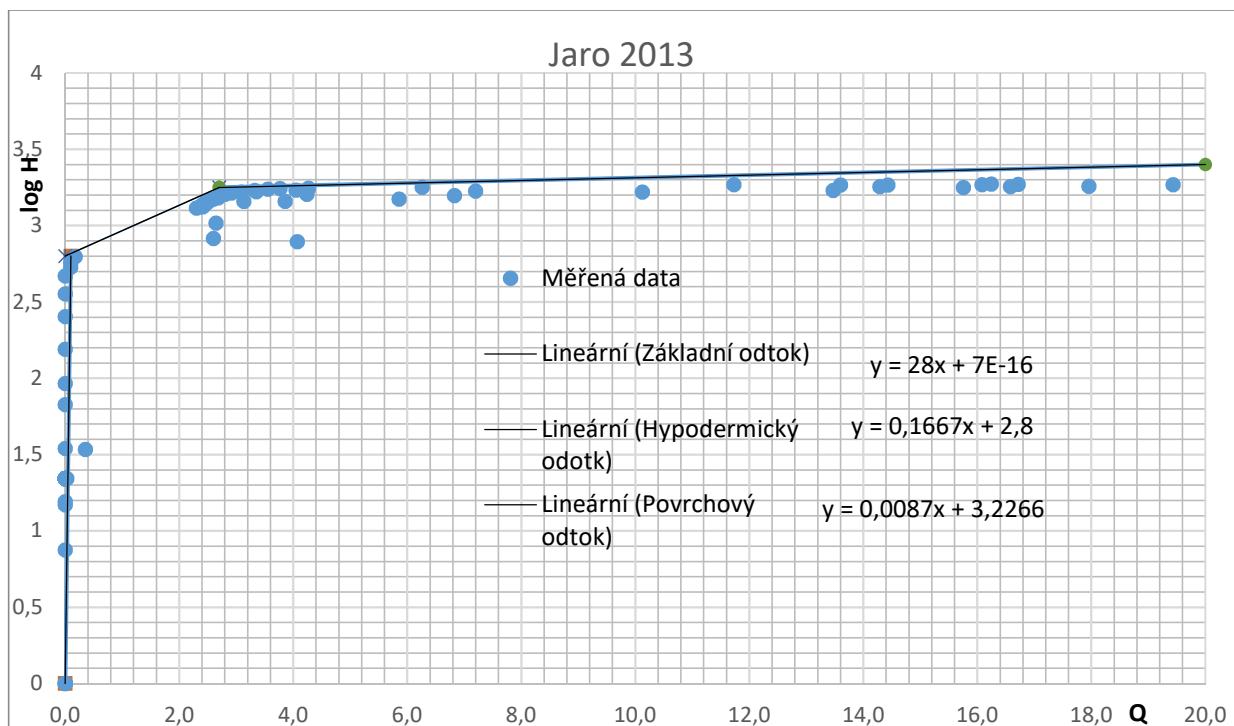
Obr. č 39 Průměrné množství protočené vody v korytě toku Mokřůvka v jednotlivých letech a měsících, průměrná hodnota v letech 2013-2017.



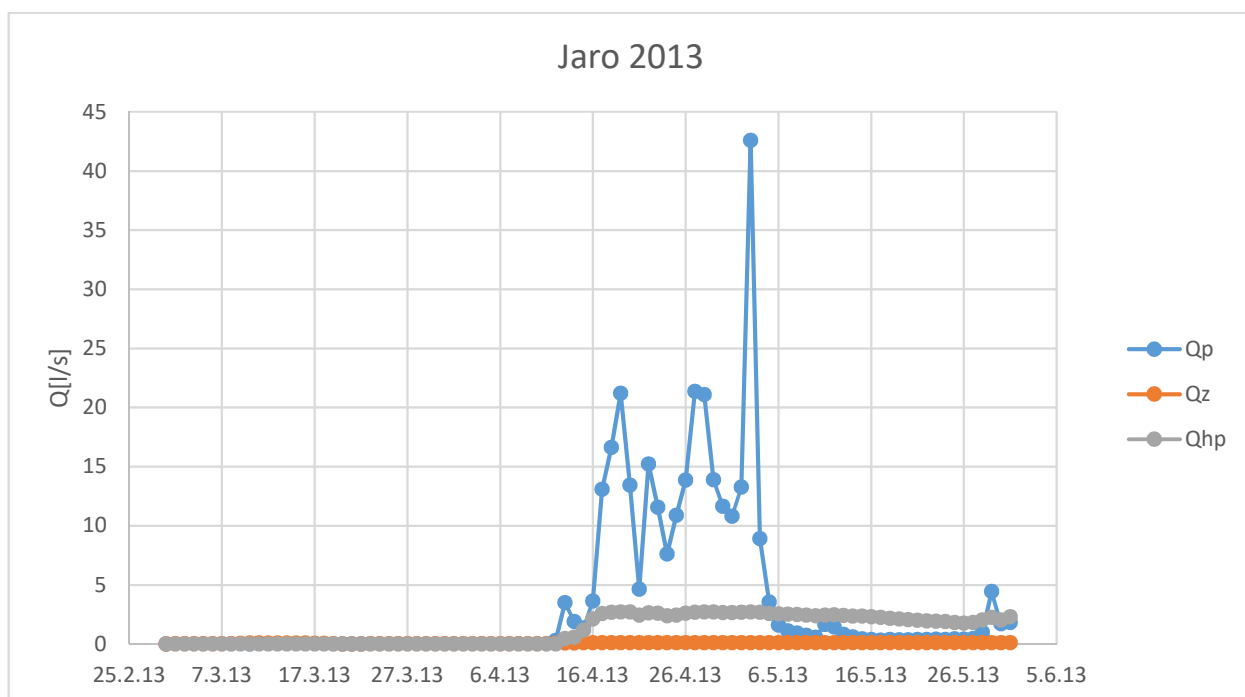
Obr. č. 40 Průměrné množství průtoku v jednotlivých měsících za období roku 2013-2017 s porovnání průměrných hladin podzemní vody v levém a pravém vrtu v jednotlivých měsících za období 2013-2017.



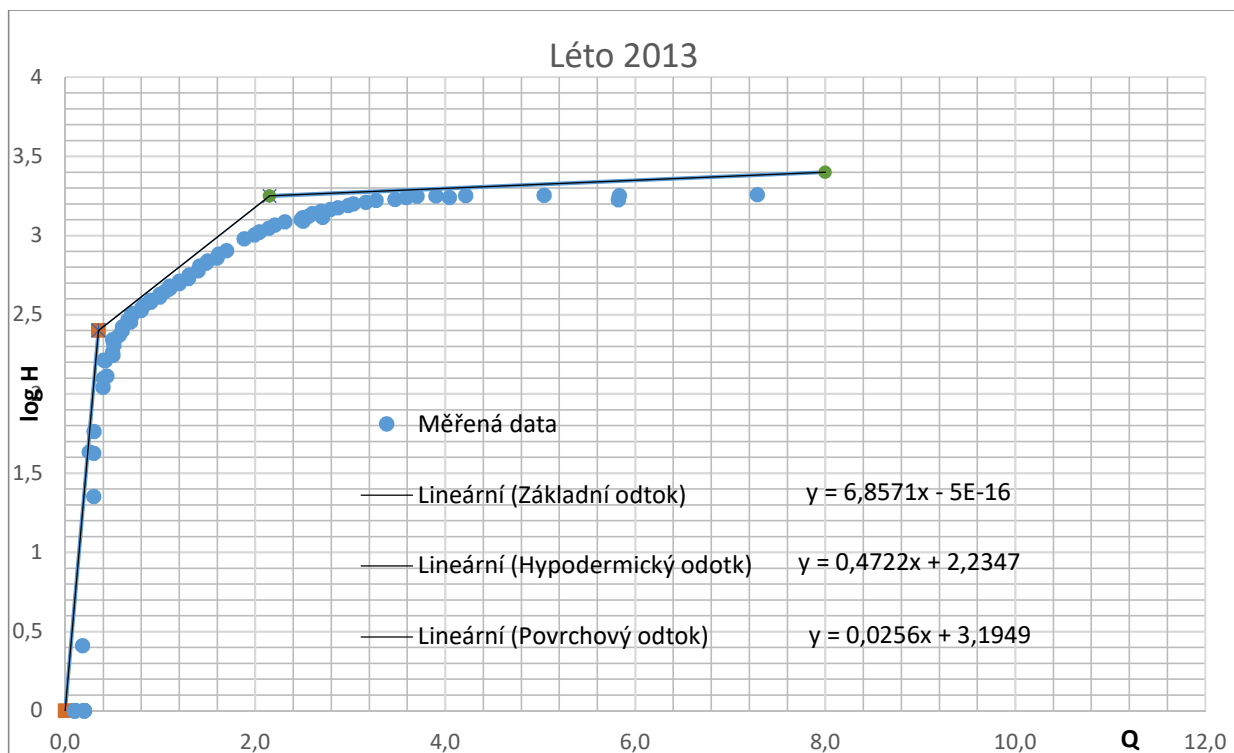
Obr. č. 41 Průměrné množství velikosti srážky v jednotlivých měsících za období roku 2013-2017 s porovnání průměrných hladin podzemní vody v levém a pravém vrtu v jednotlivých měsících za období 2013-2017.



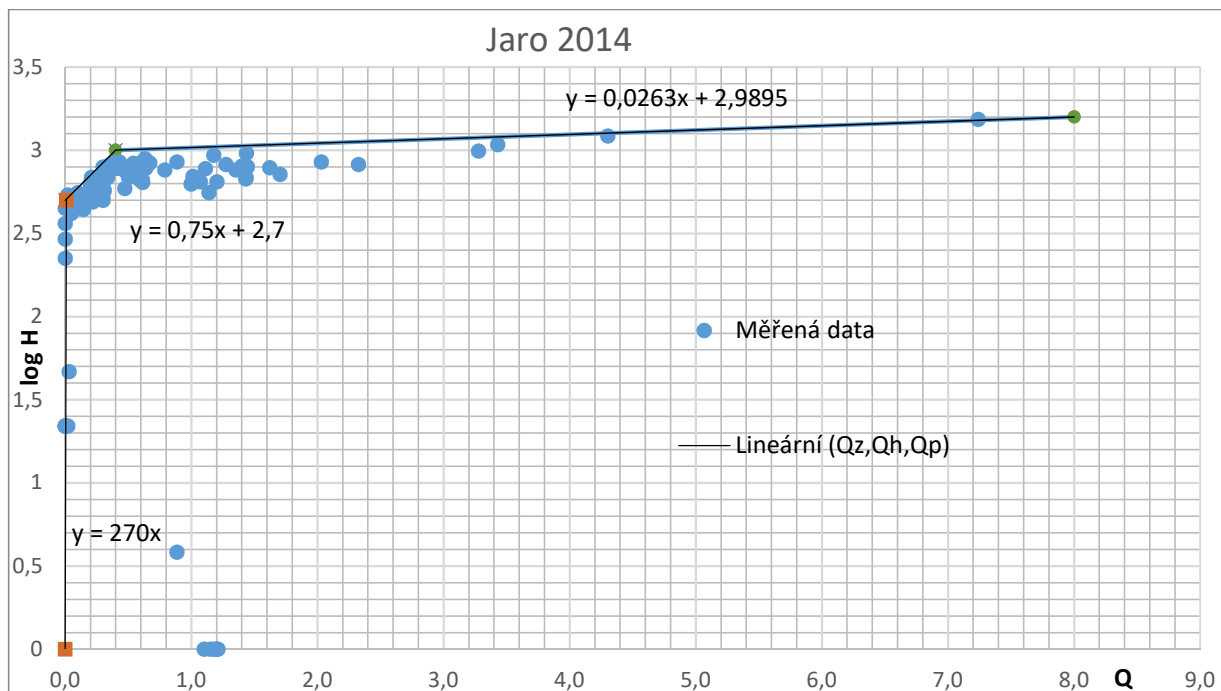
Obr. č. 42 Měření Jaro 2013, upravená metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, rovnice pro jednotlivé složky odtoku.



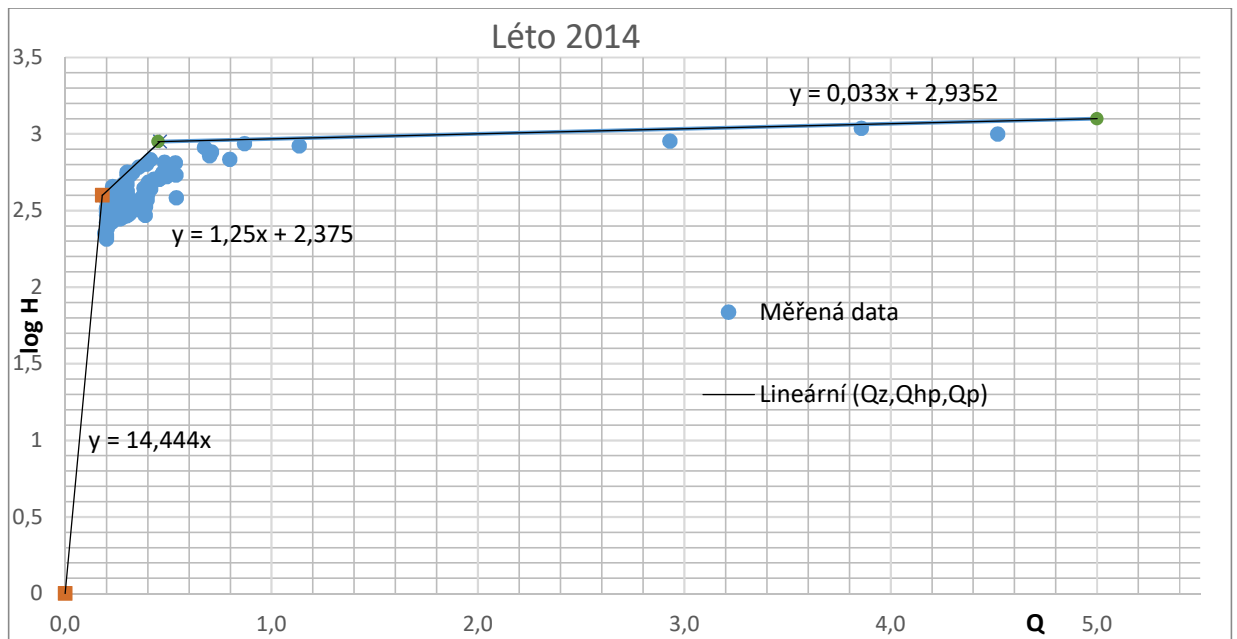
Obr. č. 43 Separace odtoku, Qp- odtok povrchový, Qz- odtok základní, Qhp- odtok hypodermický, období Jaro 2013.



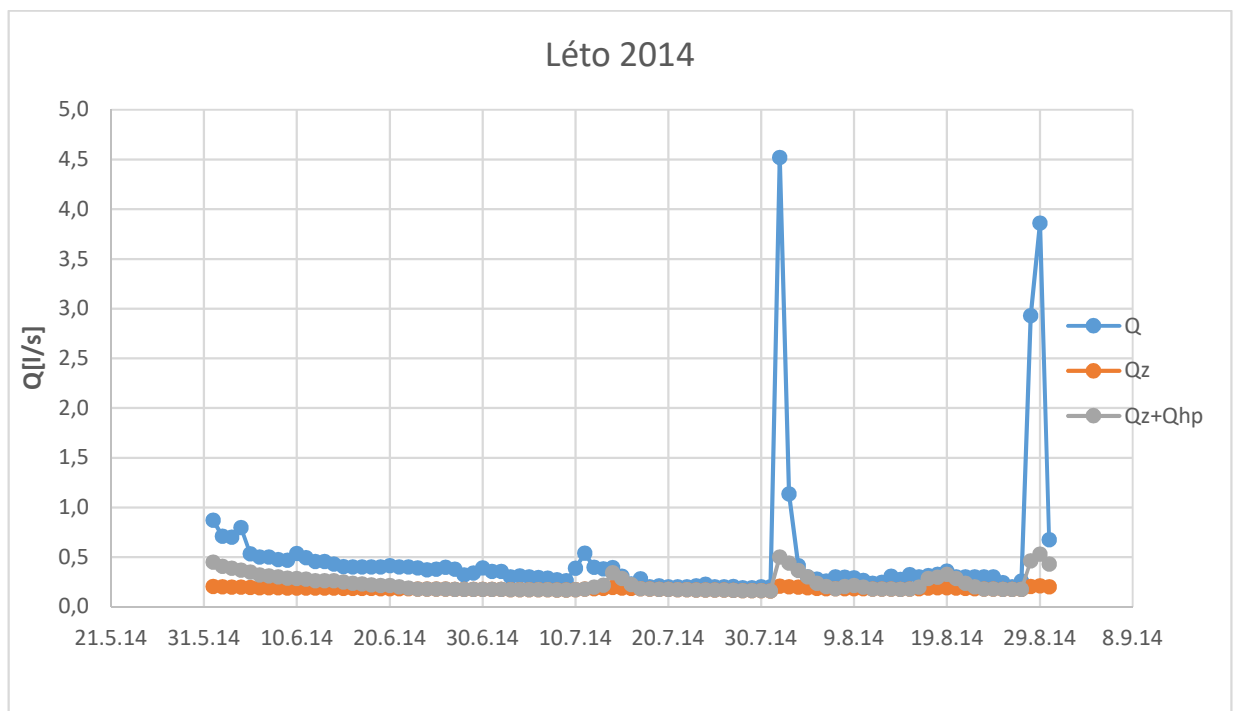
Obr. č. 44 Měření Léto 2013, upravená metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, rovnice pro jednotlivé složky odtoku.



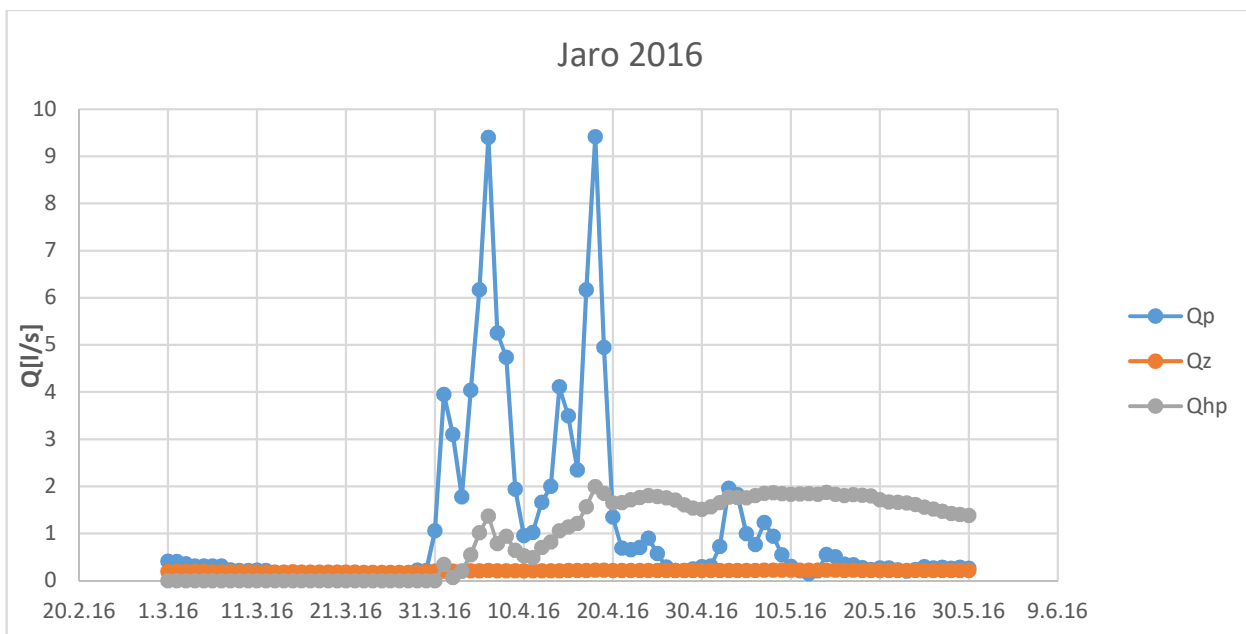
Obr. č. 45 Měření Jaro 2014, upravená metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, rovnice pro jednotlivé složky odtok.



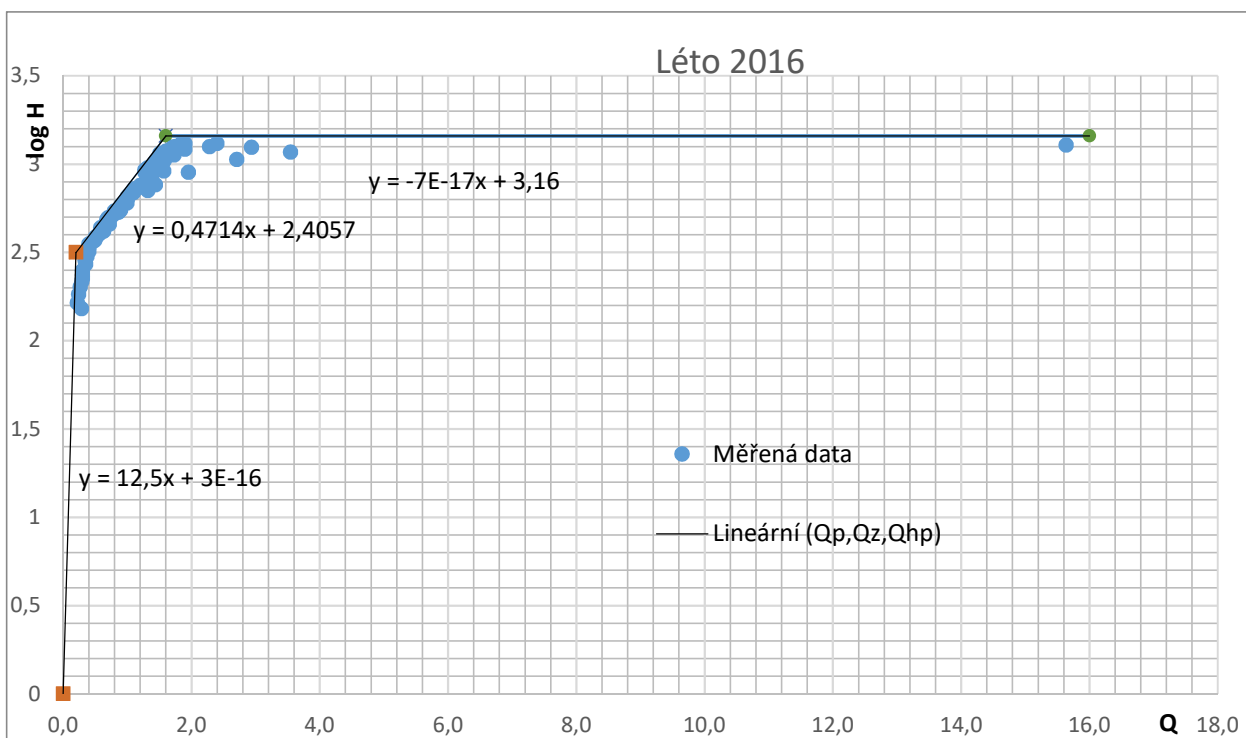
Obr. č. 46 Měření Léto 2014, upravená metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, rovnice pro jednotlivé složky odtoku.



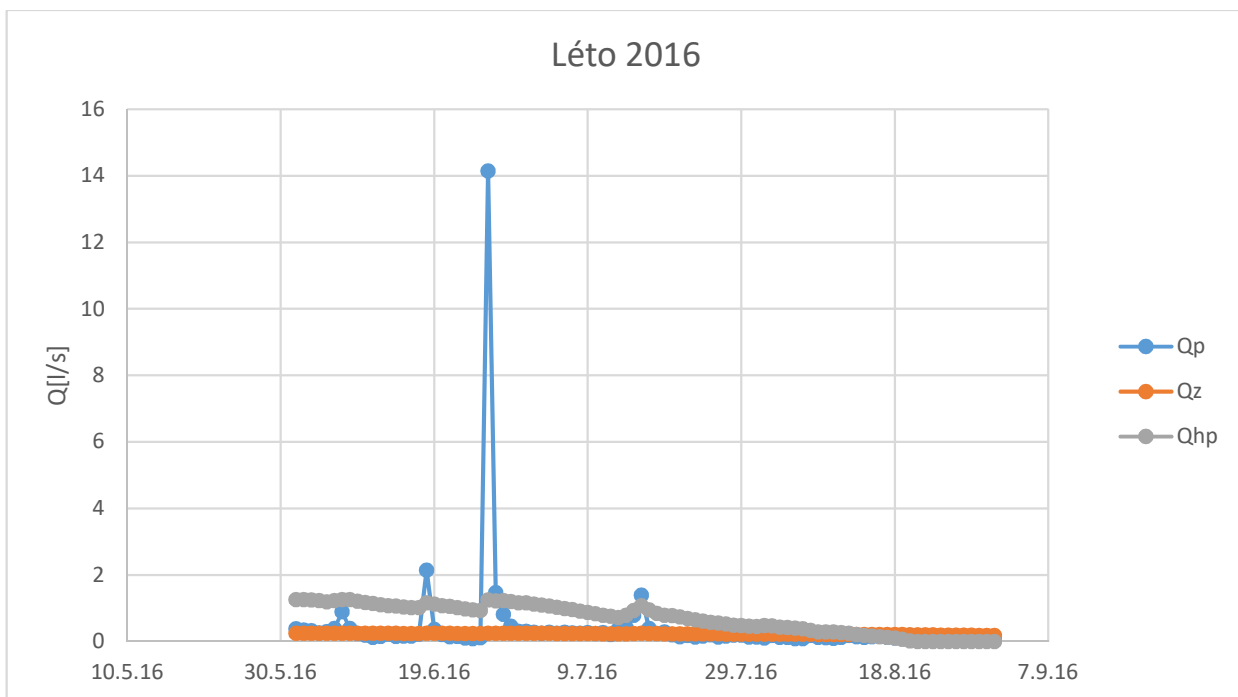
Obr. č. 47 Separace odtoku, Qp- odtok povrchový, Qz- odtok základní, Qhp- odtok hypodermický, období Léto 2014.



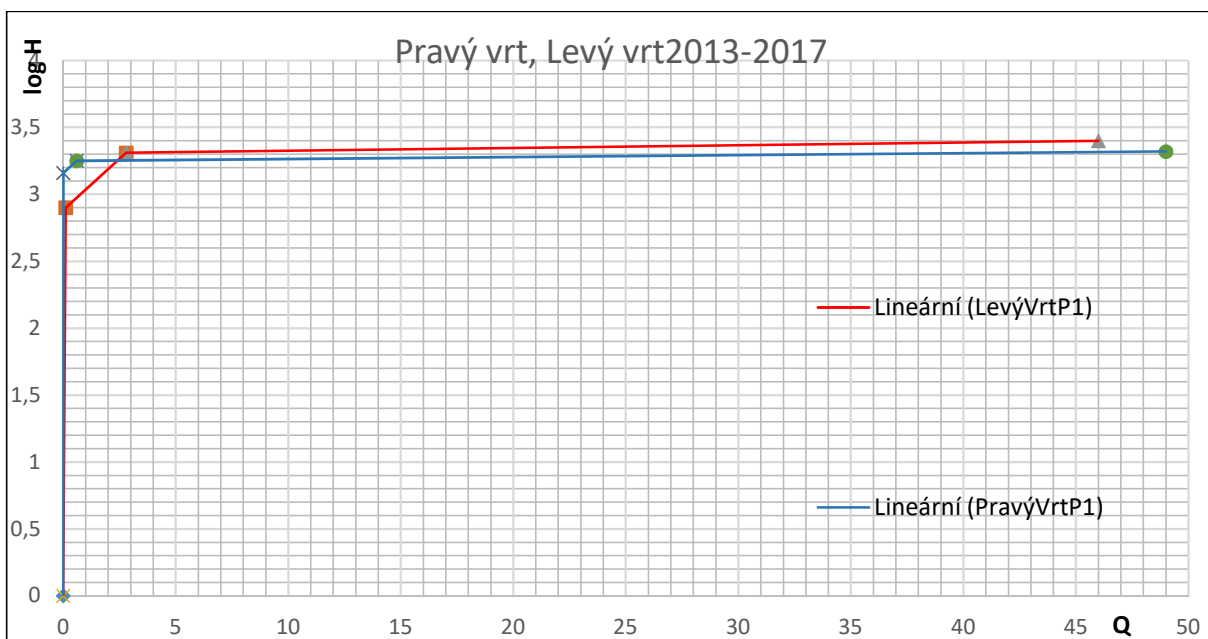
Obr. č. 48 Separace odtoku, Q_p – odtok povrchový, Q_z - odtok základní, Q_{hp} - odtok.



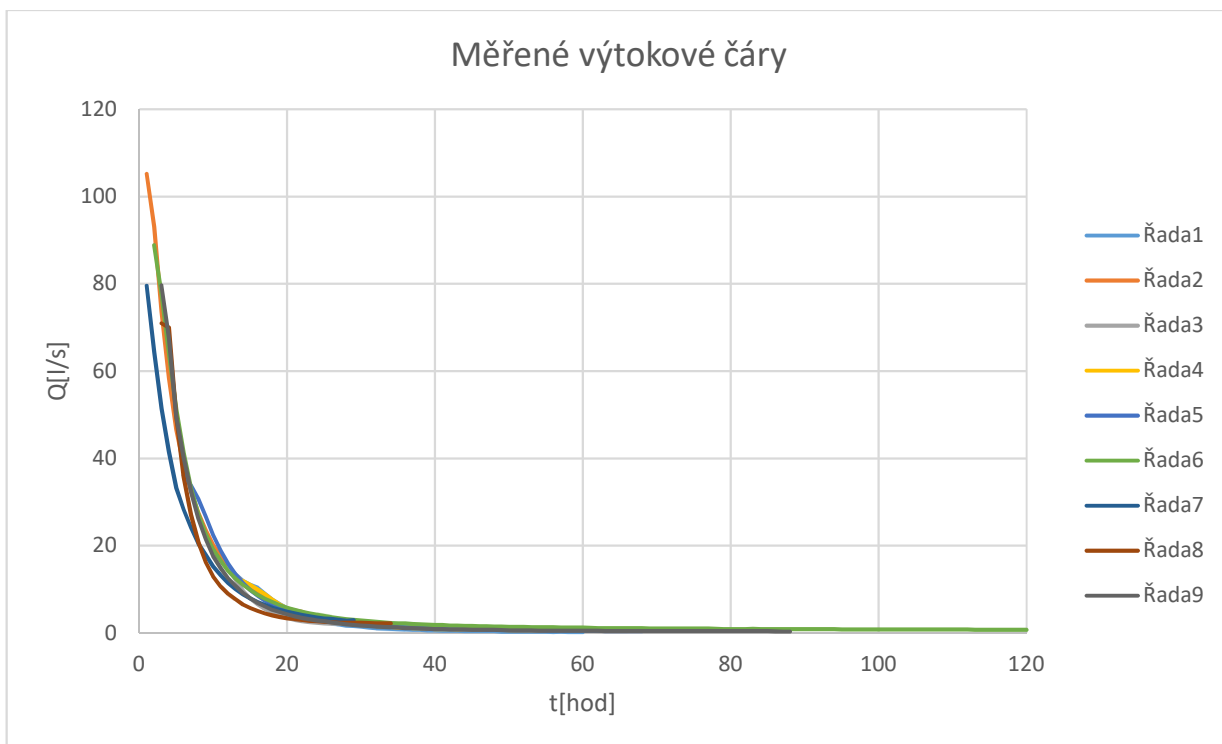
Obr. č. 49 Měření Léto 2016, upravená metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, rovnice pro jednotlivé složky odtoku.



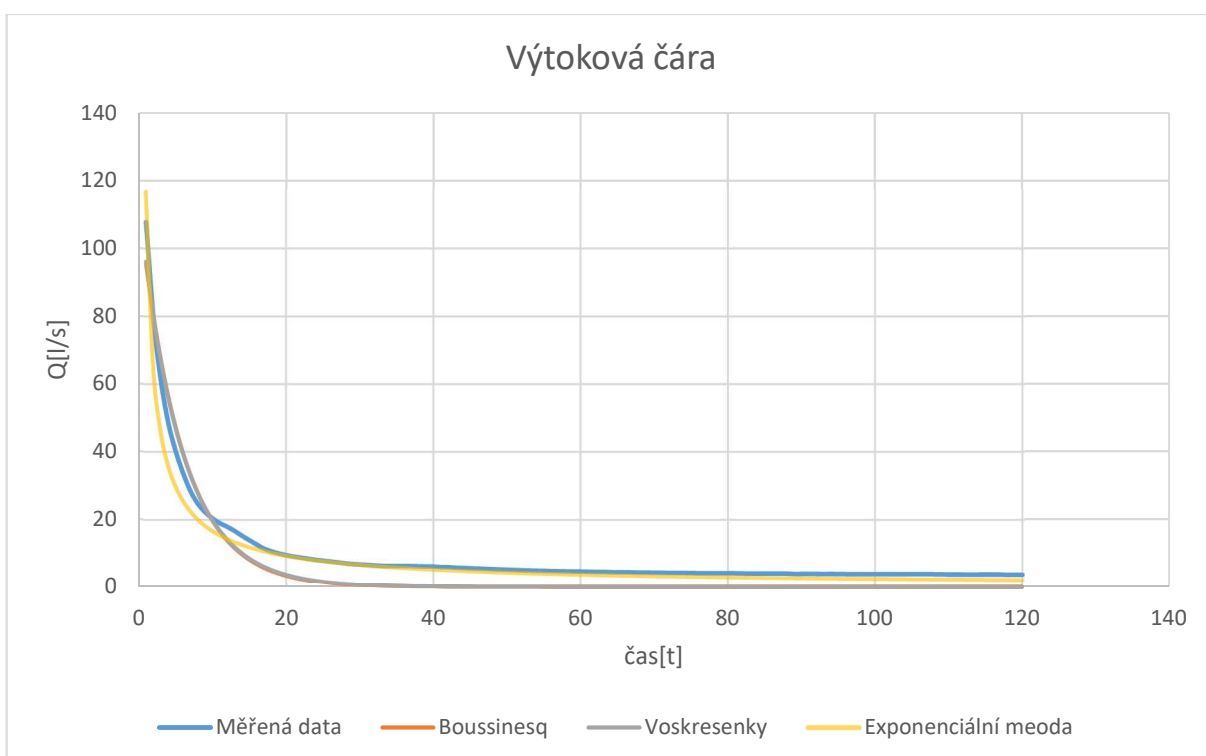
Obr. č. 50 Separace odtoku, Qp – odtok povrchový, Qz – odtok základní, Qhp- odtok hypodermický, období Léto 2016.



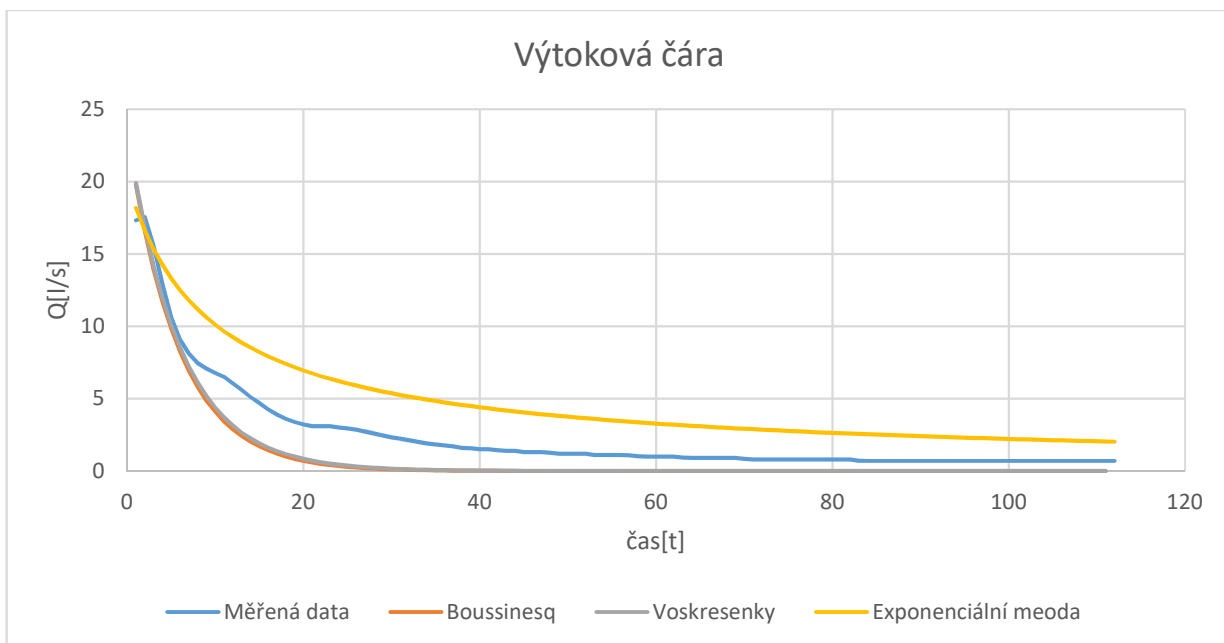
Obr. č. 51 Porovnání upravené metoda Kliner-Kněžek pro separaci jednotlivých složek odtoku, vynesená data s obalovými čarami, pro levý a pravý vrt z celého zkoumaného období 2013-2017.



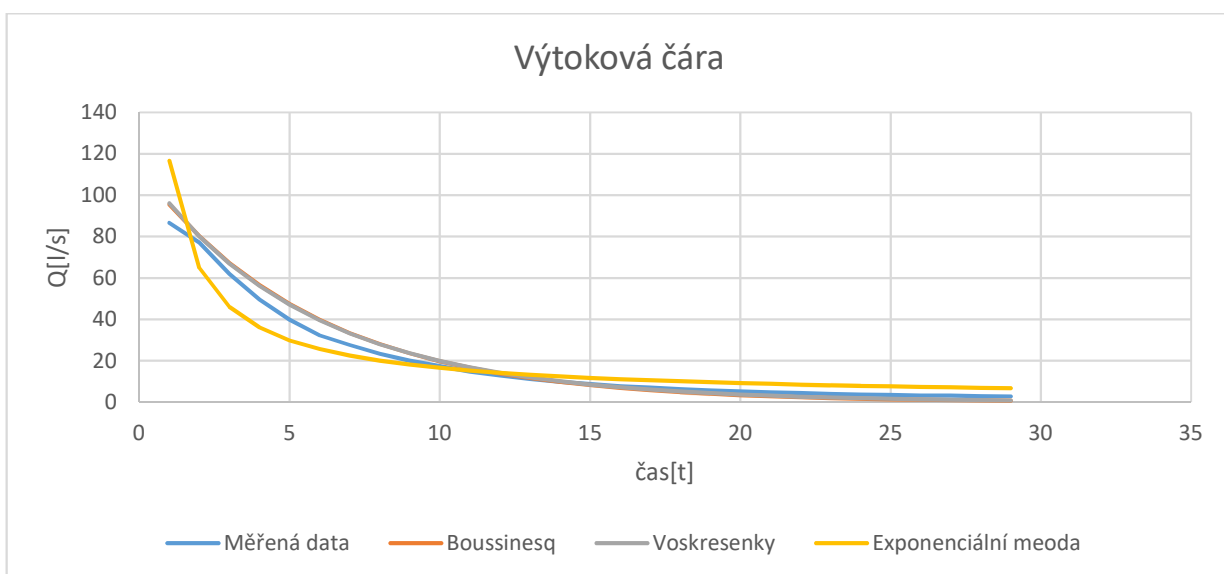
Obr. č. 52 Výtokové čáry na základě měřených dat, pomocí těchto čar se kalibrovaly matematické modely.



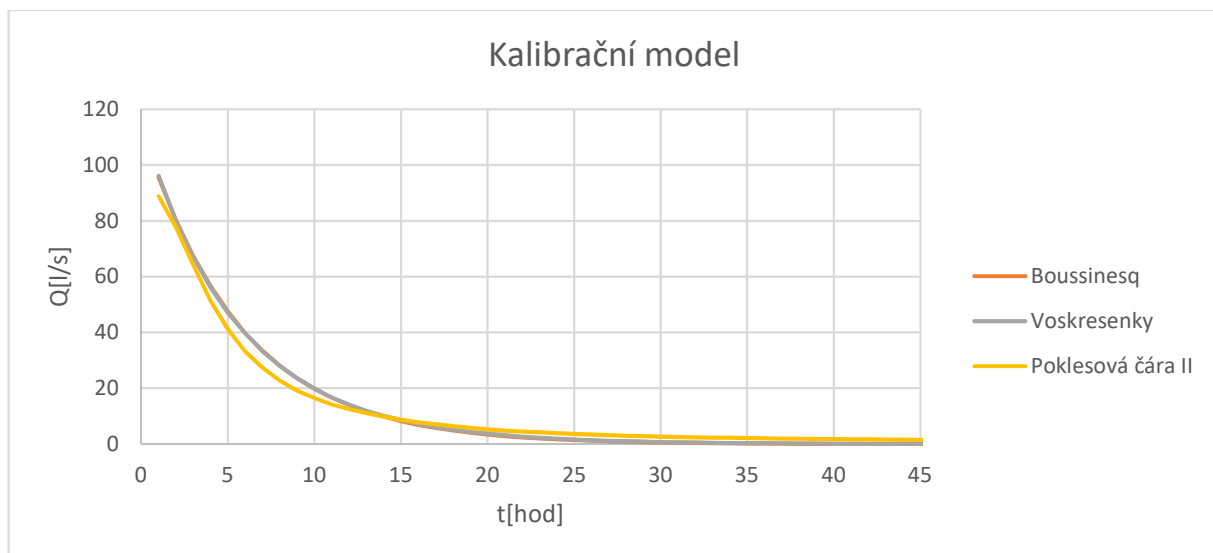
Obr. č. 53 Matematické modely výtokových čar v porovnání s měřenými daty.



Obr. č. 54 Matematické modely výtokových čar v porovnání s měřenými daty.



Obr. č. 55 Matematické modely výtokových čar v porovnání s měřenými daty.



Obr. č. 56 – Kalibrační model výtokových křivek, z poklesové čáry II se kalibrovaly hodnoty pro metody výtokových křivek.