

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Porovnání hydrologických charakteristik vybraných srážko-odtokových epizod malých horských povodí s rozdílným lesním pokryvem

Diplomová práce

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

Diplomant: Lubomír Kříž

2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením ze strany mého vedoucího diplomové práce a uvedené literatury.

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Pavláskovi, Ph.D., za odborné vedení, poskytnutí odborné literatury, cenné rady a podnětné připomínky k této práci a za poskytnutí dat a informací v průběhu celé práce a především za čas, který mi věnoval.

Ve Vlašimi dne 22. 4. 2011

.....

Lubomír Kříž

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje vyhodnocení, porovnání a analýze vybraných hydrologických charakteristik na dvou horských experimentálních povodích, v zájmové oblasti na Šumavě. Předmětem zájmu je zejména vyhodnocení srážko-odtokových událostí a následně stanovení vzájemných souvislostí vybraných složek těchto epizod na povodích Modrava 1 a Modrava 2. Měření probíhala z počátku pouze bez sněhové pokrývky, ale od roku 2007 probíhá monitoring celoročně. Řešená problematika srážkoodtokového procesu je poměrně rozsáhlá a tato práce se zaměřila spíše na extrémnější epizody a porovnání hydrologických veličin v delším časovém horizontu. Z výsledků vyplývá, že malá horská povodí mohou sloužit jako nedílné informace sloužící k predikci při případných povodních. Při porovnání dvou povodí s rozdílným pokryvem se prokázala vyšší retenční schopnost povodí s mladým lesním porostem než povodí pokryté pasekou. Nejvyšší srážkové úhrny byly prokázány v měsíci červenci ve vyšších polohách národního parku Šumava. Patrné nebyly mezi zkoumanými experimentálními povodími výraznější rozdíly při porovnání limitních hodnot vybraných závislostí.

klíčová slova: analýza hydrologických veličin, experimentální povodí, vegetační pokryv, oblast Šumavy, srážky, odtok

Abstract

The diploma paper deals with the evaluation, the comparison and the analysis of the chosen hydrological characteristic of two mountain experimental basins, which are located in the service area of the Bohemian Forest. The subjects of the interest are primarily the evaluation of the rainfall-runoff occasions and consequently the determination of the mutual continuity of the picked units of these passages on the basins Modrava 1 and Modrava 2. At the beginning the measurements were proceed just without the snow cover, but since 2007 the monitoring runs permanently. The solved dilemma of the rainfall-runoff process is relatively wide-spread and this paper focus rather on more extreme passages and the comparison of the hydrological quantities in the longer time horizont. From the results flow, that the small mountain basins can serve as the indiscrptible informations used to predict the contingent floods. In the comparison of two basins with the different cover have been proved the higher retentive abilities of a basin with the younger forest crop then a basin covered by the forest clearance. The highest precipitation amount have been proved in the highest location of the national park the Bohemian Forest in the month of July. There weren't apparently any outstanding differences in the comparison of the limiting rates of the chosen dependances.

key words: the analysis of the hydrological quanitites, the experimental basin, the vegetative cover, the area of the Bohemian Forest, the rainfalls, the drainage

Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Cíle práce | 2 |
| 3 Předmluva | 3 |
| 4 Povodí | 6 |
| 4.1 Experimentální a reprezentativní povodí | 7 |
| 4.2 Malá povodí | 9 |
| 4.3 Párová povodí | 11 |
| 5 Vlivy na srážkoodtokové epizody | 13 |
| 5.1 Vliv evapotranspirace a výparu | 13 |
| 5.2 Role saturace a zadržetí vody v půdním profilu | 17 |
| 5.3 Vliv vegetačního krytu a lesního porostu | 18 |
| 5.3.1 Obnova porostu | 19 |
| 5.3.2 Změna vegetačního krytu, zalesnění a odlesnění | 20 |
| 6 Popis experimentálních povodí Modrava | 26 |
| 7 Metodická část | 31 |
| 7.1 Měření a vyhodnocení srážkoodtokových událostí | 31 |
| 7.2 Metodický postup pro vyhodnocení a analýzy | 32 |
| 7.2.1 Základní hydrologické charakteristiky a jejich vyhodnocení .. | 33 |
| 7.2.2. Vlny s jedním a více vrcholy a jejich analýza | 33 |
| 8 Výsledky a přínos práce | 37 |
| 8.1 Přehled měřených dnů průtoku a srážkového úhrnu | 37 |

| | | |
|------|--|----|
| 8.2 | Vyhodnocení měsíčních hodinových průtoků a srážkového úhrnu | 37 |
| 8.3 | Vyhodnocení epizod s extrémním průtokem | 41 |
| 8.4 | Analýza ve vegetačním období | 43 |
| 8.5 | Povodňové vlny a vlny s velmi vysokým odtokem | 51 |
| 9 | Diskuze | 64 |
| 10 | Závěr | 66 |
| 11 | Přehled literatury | 68 |
| 12 | Přílohy | 75 |
| 12.1 | Přehled měřených dnů průtoků a srážkového úhrnu | 75 |
| 12.2 | Vyhodnocení měsíčních hodinových průtoků a srážkového úhrnu | 79 |
| 12.3 | Rozbor odtok. epizod s $Q_{24hod} \geq 1\,000\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (vyj. výškou odtoku) | 88 |
| 12.4 | Analýza ve vegetačním období v letech 1999 – 2009 (VI – X) | 92 |
| 12.5 | Povodňové vlny a vlny s velmi vysokým odtokem | 99 |

1 Úvod

Srážko-odtokové události jsou jednou z nejzákladnějších složek vyhodnocování v hydrologii. Samotné srážky mají významný vliv na odtok z povodí. Ke studiím těchto událostí mohou sloužit experimentální povodí, které jsou opatřeny příslušnými přístroji. Pro správné a dostatečné vyhodnocení a analýzy je žádoucí opatřit vhodná měřidla, podmínky pro měření a zvolit správnou metodiku pro vyhodnocení a práci s daty.

V současnosti probíhá na daných šumavských experimentálních povodích měření především průtoku, srážkového úhrnu, teploty a konduktivity. Data jsou základem pro nejrůznější analýzy a vyhodnocení. O problematice daného tématu existuje mnoho literatury a po celém světě, v rozličných klimatických regionech, geologických a pedologických podmínkách, při různém vegetačním pokryvu a jiných rozdílech, probíhají studia na nejmenších i rozsáhlých povodích. Zaměření se vždy stanovuje libovolně podle předem stanovených podmínek.

2 Cíle práce

Tato diplomová práce se zaměřila především na vyhodnocení srážko-odtokových epizod v rámci jedenáctiletého období na dvou experimentálních povodích na Šumavě. Součástí jsou i různá porovnávání a podrobnější rozbor jednotlivých epizod. Data byla pořízena přímým měřením Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování České univerzity v Praze a zpracována do přehlednějšího datového souboru, který byl poskytnut pro tuto práci.

Práce je rozdělena do několika kapitol. V úvodních kapitolách je uveden úvod, cíle práce a předmluva. Od čtvrté do páté kapitoly začíná rešeršní část, na kterou navazuje v kapitole šest popis daných povodí. Rešeršní část se zabývá rozdělením a popisem různých typů povodí, vlivu evapotranspirace, saturace a vegetace na odtok z povodí. Sedmá kapitola zahrnuje metodickou část, ve které byl důraz kladen na stanovení na vyhodnocování hydrologických charakteristik a vychází z poznatků z předchozích kapitol. Vlastní práce, výsledky a výstupy jsou zahrnuty v osmé a deváté kapitole. Prostředí, ve kterém probíhala vyhodnocení, byly zejména softwary sady Microsoft Office (tabulky, grafy) a grafický program GIMP 2 (obrázky). Následuje diskuze, která uvádí jednotlivé výsledky do souvislostí a porovnává je s výsledky a postupy jiných autorů. Jedenáctá kapitola – závěr shrnuje výsledky a poznatky získaných zpracování diplomové práce a zobecňuje je v širším měřítku. Posledními kapitolami je přehled literatury a přílohy s méně důležitými výstupy. Součástí práce je i datový nosič v podobě CD.

3 Předmluva

Voda je jednou z nejdůležitějších složek na Zemi s ohledem především na vznik a vývoj života a je důležitá pro existenci všech životních forem. Je významným krajinnotvorným prvkem a základním zdrojem energie četných fyzikálních a biologických procesů. Voda je díky sluneční energii, která dopadá na zemský povrch, v neustálém koloběhu. Koloběh zajišťuje vyrovnanou vodní zásobu na Zemi. Tento hydrologický cyklus je provázen mnoha dalšími dílčími procesy, které souvisí s disipací energie při jejich přeměnách. Přeměna energie je díky slunečnímu záření základním procesem probíhajícím v hydrologickém cyklu. Rovnoměrnost disipace energie v časoprostorovém měřítku je základním předpokladem života na Zemi v současné formě. Rozlišné poruchy v systému spotřeby sluneční energie mohou být například extrémní srážkoodtokové události z roku 2002 nebo extrémní sucha v roce 2003. Na tento systém lze pohlížet i z jiného úhlu, kdy se může na něj pohlížet jako na jakousi samoregulační vlastnost, kterou se snaží kompenzovat odchylky z jedné strany, odchylkou z druhé strany a vede to tudíž k různým poruchám. K těmto situacím dochází vždy na určitém místě a následná porucha nastane na místě jiném, efektem nezávislým na předchozí situaci.

Vodní zdroje jsou v biosféře ve vzájemných souvislostech s jinými přírodními zdroji (ovzduší, půda, horniny, vegetace, fauna aj.) a probíhají jimi neustále kvalitativní a kvantitativní změny. Variabilita hydrologických procesů má přirozené příčiny nebo je ovlivněna antropologickou činností.

Rostoucí populace klade stále větší důraz na využívání vodních zdrojů a půdy pro městský a zemědělský rozvoj ve venkovských oblastech a krajině. Tento proces může způsobit výrazné změny v režimu toky řeky v povodí v různém rozsahu a velikosti. Změny naruší hydrologický cyklus povodí a mění tak rovnováhu mezi srážkovým úhrnem, evaporací a odtokem v celé oblasti. Lidské zásahy jako odstraňování vegetace, agrotechnické činnosti, stavebnictví, hornictví, městský a průmyslový rozvoj a podobné činnosti mají významný vliv na množství a rychlost odtoku, na rychlost eroze a transport sedimentů. Je proto nezbytné podniknout

opatření, která povedou ke kontrole odtoku a snížení eroze půdy v lokalitách, kde nejsou jiné možnosti nebo se na ně nevztahují určité zákonem stanovené limity. Přírozený vodní režim krajiny bývá narušován antropogenní činností v povodí např.: nesprávným využíváním pozemků, včetně nevhodných agrotechnických zásahů a úprav pozemků, devastací lesních pozemků, omezováním přírodních funkcí toků a nádrží a snížením akumulčních prostorů v povodí aj.

Jako jednu z důležitých oblastí hydrologických výzkumů v malých povodích lze považovat sledování a analýzu srážkových a odtokových poměrů. Česká republika není dostatečně pokryta sítí standardních meteorologických stanic, které spravuje Český hydrometeorologický ústav. Ten zřizuje a zajišťuje měření a zpracování naměřených hodnot. Rozmístění stanic závisí především na členitosti terénu. Vzhledem ke skutečnosti, že síť meteorologických stanic ČHMÚ se jeví poměrně jako nedostatečná, je nutné zpřesnit srážkové a odtokové poměry v účelově zřízených staničních sítích. Výskyty intenzivních dešťů v horských oblastech poměrně často vyvolávají vznik bleskových povodní a výrazně se na těchto lokalitách projevuje eroze půdy. Výzkumy v těchto místech jsou tedy velice vhodné a především velmi žádoucí.

Srážkoodtokový vztah se celosvětově měří v malých lesnatých povodích v různých geografických pásmech a s odlišným lesním hospodářstvím. Ovlivňování hydrologických účinků lesů se statisticky hodnotí podle dřevinné skladby a hospodářských způsobů.

Současné aktivity se obracejí na horské oblasti, které jsou pokryty lesními porosty. Tento zájem byl vyvolán sérií klimatických a hydrologických událostí, jako byly povodně v letech 1997, 1998 a 2002 nebo období sucha v letech 2000 a 2003. Nevhodné odlesnění v oblastech české a části slezské hranice způsobilo značné ekologické škody a není možné pokaždé spoléhat na samo obnovující se potenciál přírody a je tudíž nutné zintenzivnit aktivní obnovu vegetačního krytu v postižených oblastech. Obnova by měla být provedena citlivým a vhodným způsobem, jelikož většina pohraničních horských oblastí se nachází na území národních parků nebo chráněných krajinných oblastí.

U lesního prostředí je voda dotována nepravidelně, má různou intenzitu a množství z hydrometeorologických zdrojů v průběhu celého roku. Pouze některá kratší období bývají vydatná silnými dešti. Vodní režim v lesích je již dlouhodobě monitorován (více jak 100 let), ale přesto poskytuje stále nové poznatky. Vydatné deště, které mají krátkou dobu trvání, způsobují na mnoha územích povodně. Další studie a výzkumy by se tedy měli obracet na predikci povodní. Malá povodí by měli sloužit jako zdroj informace k jakési předpovědi povodně. Při vhodně zvoleném experimentálním povodní a hlavně jeho intenzivním spravováním s následnými analýzami a výpočty, můžeme předcházet menším lokálním katastrofám a přispět až kupříkladu k regionálním nebo národním opatřením. Jehož důsledkem budou nejen ekonomické úspory, ale i ekologické, kulturní a přírodní zájmy. Na ochranu před povodněmi mohou být opatření strukturálního charakteru, jako jsou stavební investice (např. úpravy koryt toků, ochranné hráze, retenční nádrže a poldry), dále opatření nestrukturálního charakteru, které se provádějí preventivně před povodní, během povodně a po povodni (např. povodňové plány, hlásná povodňová služba a předpovědní povodňová služba).

Vodní bilance a její hodnoty, změny a vztahy v lesnatých povodích nelze všude snadno popsat, modelovat a předpovídat, jak se mění v dynamice ekosystému. Některá data a vztahy se v krátkém časovém úseku téměř nezmění, ale jiné se mohou změnit zcela výrazně. Proto je třeba rozhodnout, které prvky se mají podrobně sledovat a měřit. Vhodný výběr měřených parametrů a porozumění ekologickým vazbám v ekosystému má klíčový význam pro vypovídající schopnost celého experimentu.

Výraznou roli v povodí hraje vegetační kryt, který zachycuje určité množství srážek (intercepce), ovlivňuje výpar z půdy a rostlin (evapotranspirace) a svým charakterem rychlost pohybu vody po svazích povodí (plošný odtok). Vegetační kryt nevytváří primárně žádné akumulární prostory, ale chrání půdu před erozními jevy a následně před zanášením toků a nádrží. V souvislosti s maximálními průtoky vegetační kryt zajišťuje především ochranu povrchu půdy před přímým dopadem dešťových kapek a udržuje povrchový odtok ve fázi plošné odtoku, tzn. že omezuje jeho soustředování.

4 Povodí

Na povodí se může pohlížet jako na určitou hydrologickou oblast, ve kterém lze zkoumat nejrůznější procesy. Mezi nejčastější patří odtokový proces, tok látek v přírodě nebo vzájemné bilanční vztahy prvků. Velice důležitými vstupními údaji v povodí jsou srážková data a požadavky na jejich přesnost jsou často podceňovány a stále existuje řada ne zcela zodpovězených otázek spojených s odhadem množství vody, která na dané povodí spadne. Oblast povodí je jasně vymezená a nepřitéká do ní žádná povrchová či podpovrchová voda. Především u experimentálních povodí je důležitý průběh rozvodnice podpovrchových vod hydrogeologickým průzkumem území. Srážky padající na plochu povodí vyvolávají odtok, který je zjišťován v uzavírajícím profilu.

Dle velikosti plochy povodí se vodní toky člení na:

- a) Vodní toky s plochou povodí $F \geq 5 \text{ km}^2$, ty jsou registrovány v základní hydrografické síti – HMÚ (1965), jejich celková délka je 36 865 km (přibližně 48,5 % celkové délky vodních toků ČR)
- b) Vodní toky s plochou povodí $F < 5 \text{ km}^2$, jejich celková délka je zhruba 39 140 km (tj. 51,5 % celkové délky vodních toků v ČR)

Podle stávající kategorizace a legislativy jsou zařazovány drobné vodní toky do kategorie „ostatních“ vodních toků. Nejsou omezovány plochou $F < 5 \text{ km}^2$ a patří do resortu MZe ČR. Význam drobných vodních toků spočívá zejména v tom, že tvoří základní kostru krajinného ekosystému a zajišťují plnění vodohospodářských, hydrologických, krajnotvorných, hygienických, rekreačních, estetických aj. požadavků (Soukup et Hrádek, 1999).

Na povodí se sledují především parametry: rozloha, střední hodnota nadmořské výšky, svažitost, expozice, vegetace a typ půdy, střední hodnota ročních srážek, střední hodnota ročního průtoku, popis provedeného opatření (zásahu), zvýšení vodní bilance při změně pokryvu (Hibbert, 1967).

4.1 Experimentální a reprezentativní povodí

Prvotní intenzivní aplikace malých povodí ve vztahu k hydrologické analogii spadá do 1. poloviny 60. let 20. století, do doby předcházející vzniku Mezinárodní hydrologické dekády. Tenkrát docházelo k budování tzv. reprezentativních povodí, jejichž účelem bylo poskytnout exaktnější data, zpravidla v kratších časových intervalech, než jaká bylo možno získat z běžných pozorování. Pozornost se zaměřila především na pozorování meteorologických a hydrologických jevů, doplněných o co možno nejpřesnější popis fyzikálních a biologických vlastností povodí a regionu, který mělo reprezentovat. V návaznosti na zakládaná povodí probíhaly diskuze o jejich optimálních rozměrech. Obecně se hovořilo o povodích malých a navrhovali se různé limity, při kterých ještě lze považovat povodí za malá. Méně pozornosti bylo tehdy věnováno mikropovodním, respektive dolním limitům zájmových ploch. Mimo reprezentativní povodí byly rozlišovány experimentální a výzkumná povodí. Nejčastěji se zabývali v návaznosti na počáteční studie o vlivu změn vegetačního krytu na hydrologický režim. Na území ČR to byl doc. Válek a Zelený v první polovině minulého století na zalesňovaných a odlesňovaných povodích v Beskydech. Od poloviny 60. let začaly být malá povodí intenzivněji sledována i v zahraničí. Postupem času se okruh řešených problémů zaměřil na sociálně-ekonomické dopady (Balek, 2006).

Rozlišení experimentálního a reprezentativního povodí popsal Toebes et Ouryvaev (1970). Oba typy povodí jsou určena zejména k určení vlivu změn kultur, hydrologické předpovědi, k elongování datových záznamů a k základnímu výzkumu. Nejzásadnějšími pozorovacími aspekty hlavních hydrologických prvků jsou: úhrn srážek, intercepce, sněhový pokryv, evaporace, kondenzace, povrchová a podpovrchová voda, infiltrace, vliv ledovce, eroze a sedimentace, kvalita vody, ledové jevy v tocích, klimatická data a energetická bilance.

Reprezentativní povodí jsou vybrány jako zástupci hydrologického regionu, tzn. regionu, kde jsou předpokládány hydrologické podobnosti. Jsou určeny pro náročnější zkoumání konkrétních vybraných problémů hydrologického cyklu (nebo pouze části) za relativně stabilních a přírodních podmínek. Pozorování by mělo být prováděno dlouhodobě a pokud možno ve vzájemné kombinaci se studiem

klimatických, pedologických, geologických a hydrogeologických charakteristik. Velikost závisí na přírodních podmínkách a na cílech dané studie. Rozloha se pohybuje zhruba mezi 1 až 250 km² a jen zřídka překročí 1 000 km².

Na experimentálním povodí by mělo být relativně homogenní složení půdy, složení vegetace a stejné fyzikální vlastnosti. Jako největší problém se jeví najít povodí se zcela homogenními podmínkami ve všech směrech (pokryv lesa na celém území, složení úplně z písčitých nebo jílovitých půd atd.). Výběr povodí souvisí i s jinými požadavky: vlastnictví a provoz povodí, jednotnost půdy, vegetace a geomorfologie, hluboká infiltrace a směr infiltrace, klimatická proměnlivost, svažitost, míra průtoku a prozatímní měření. Na povodí panují přírodní podmínky a při studii nebo výzkumu by měla být změněna 1 nebo více hydrologických charakteristik a účinky změn, které nastanou v daném povodí, jsou předmětem rozborů. Tento hlavní účel přispívá k tomu, že výzkumný celek může s pozemky nakládat podle přání. Velikost experimentálního povodí dosahuje maximálně 4 km². Také povodí, na kterých se provádí detailní studie hydrologického cyklu, i když nebyla provedena změna kultur na jejích pozemcích, se nazývá experimentální povodí. Výzkum je zaměřen obvykle na srovnávací studie, a proto jsou někdy tyto povodí provozovány ve skupinách nebo po 2 či více povodí. Důležitým aspektem všech výzkumů a analýz na experimentálním povodí je při změně kultur období před a po porovnání.

Souhrnně by měli brát experimentální a reprezentativní povodí v úvahu několik zásadních požadavků: dostupnost hydrologických údajů a výsledků výzkumu, odhad současných vodních zdrojů a jejich využití (se zvláštním zřetelem k plánům budoucího ekonomického využití krajiny) a hydrologické problémy, které jsou v lokalitě řešeny a na dostupnost dat důležitých zejména pro vyřešení těchto problémů. Všechny zjištěné údaje shromážděné na povodích by měli být zpracovány a obsaženy v tabulkách a měli by být snadno použitelné pro vědecké analýzy. Kromě pozorovaných údajů je třeba nashromáždit také informace, které nejsou snadno zaznamenány přístroji (např. intenzita pastvy, možnost vzniku požáru nebo porucha přístroje aj.). Tyto informace se nejvhodněji zaznamenávají v deníku, který je veden pro experimentální povodí a měsíčně pro povodí reprezentativní.

Hlavními účely analýzy na povodích je: vývoj kvantitativních faktorů vodní bilance, zlepšení vztahů mezi charakteristikou povodí a hydrologickými charakteristikami, objasnění samotných hydrologických charakteristik a zlepšení vztahů mezi prvky hydrologického cyklu.

4.2 Malá povodí

Malá povodí byla z počátku zřizována s cílem získat co nejpřesnější data o hydrologickém a hydrometeorologickém režimu v rámci širšího regionu. Posléze se pozornost obrátila i na sledování chemismu a geochemických procesů. Postupem času bylo zjištěno, že povodí poskytují další významné informace o ekologické stabilitě, a o procesech ekonomických a sociálních ve vztahu k etnickému složení populace a o místní historii. Velikost povodí je možné stanovovat podle povahy řešených úloh a posuzovat zejména ve vztahu k velikosti povodí, pro něž se informace získávají. Jako rozhodující faktor k určení toho, zda je povodí malé, lze považovat vztah velikosti povodí a povahu problému, pro něhož vodohospodářský nebo i jiný rozvoj poskytuje menší povodí příslušné informace (Balek, 2006). Velmi malé povodí se uvádí jako specifická skupina kategorie malých povodí a jejich plocha se pohybuje mezi 1 – 5 km². Svým charakterem se blíží elementárně odtokovým plochám s homogenními charakteristikami. Rozhodující faktory podílející se na ovlivnění formování povrchového odtoku jsou klimatické faktory (srážky a evapotranspirace), geometrické charakteristiky (plocha a tvar povodí), orografické poměry povodí (výškové a sklonové poměry), geologické a půdní poměry povodí, vegetační kryt, způsob využití pozemků v povodí, akumulace vody v povrchových depresích, nádržích a bažinách, říční síť v povodí a antropologická činnost v povodí (Hrádek, 1990).

Diferenciace povodí na malé a velmi malé je potřebná podle velikosti plochy povodí. Hranice mezi jednotlivými třídami nelze jednoznačně vyjádřit velikostí plochy povodí. Za malé povodí se může považovat takové povodí, na kterém jsou maximální průtoky vyvolávány přívalovými dešti. Rozdíl mezi malým a velmi malým povodím tedy určuje maximální zasažená plocha nejdelším přívalovým

deštěm. Autoři zmiňují tuto hranici v širokém rozmezí od 30 do 300 km². Dolní hranici malého povodí lze definovat jako plochu takové velikosti, pro kterou je možné vyjádřit proces povrchového odtoku přes nejširší hydrologicko-hydraulické vztahy, považovanými pro elementární odtokové plochy. Svými charakteristikami se velmi malé povodí blíží elementární odtokové ploše nebo ho lze na malý počet elementárních odtokových ploch rozdělit (Hrádek, 1990).

Historickými vztahy mezi lesem a povodím uvádí Swank et Johnson (1994). Základy lesnických hydrologických výzkumů jsou zakotveny v základních otázkách vztahu mezi lesem a odtokem. Historický vývoj výzkumů na malém povodí je stanoven v mnoha zemích formativním předpisem International Symposium on Forest Hydrology. Jedná se o výsledek ze semináře pořádaného na Pensylvánské státní univerzitě v roce 1965. Lesnicko-hydrologický výzkum má dlouhou historii a trvá více než 100 let. Například 2 experimentální povodí byly založeny v Čechách v roce 1867 na horním toku Bečvy na Moravě a byla zkoumána role lesa na povrchový odtok.

Lidská činnost má významný vliv na krajinu a vodní zdroje. Proto je žádoucí u lesních ekosystémů zvolit správný a vhodný management. Prokazuje se škodlivý nebo příznivý vliv na land-use a na vodní zdroje při různých technologiích a způsobech obhospodařování u lesa. Znalosti by měli napomoci k tomu, aby výsledky, testování, modelování a jiné výzkumné činnosti přispěli ke korektnímu managementu a péči o lesy.

Pohyb vody v lesním prostředí je velice komplikovaný a zahrnuje mnoho skutečností. Jedná se o objasnění mechanismu pohybu vody směrem dolů po svazích, kvantifikaci jednotlivých složek evapotranspirace a odtokem, vysvětlení významu jednotlivých forem srážek na množství a načasování odtoku a kvantifikace rozdílů hydrologických procesů v různých typech lesních porostů. Jestliže se správně porozumí těmto principům, poskytnou následné výsledky podklad pro posuzování predikce a interpretace hydrologických odezev hlavně ve vztahu k nejruznějším managementovým opatřením.

Klima a vodní režim je žádoucí všude v malých povodích dlouho a digitálně měřit. Nejedná se pouze o prokázání rozdílů mezi vodními účinky dvou hlavních dřevin smrku a buku, ale z naměřených dat je nutné vyhodnocovat vztahy a změny spolupůsobících činitelů na lesních stanovištích. Nabízí se možnost využívat data pro ověřování korektnosti srážko-odtokových modelů (Jařabáč, 2005).

V případě, že se chtějí využít výsledky z výzkumu malých povodí, je potřeba sjednotit a uskutečnit další průzkumy z integrovaných, meziodvětvových ekosystémových přístupů, které jsou založeny na teoretických úvahách. Pochopení příčin a účinky vztahů se přiblíží k formulaci modelů, které poskytují podklad pro rozšiřování a extrapolaci výsledků z malých povodí na větší celky krajiny. Dlouhodobé záznamy pro lesní ekosystémy na hydrologické stanici poskytují důvěryhodné a unikátní podklady pro posuzování změn ve zdraví lesa a kvality vody z hlediska primárních znečišťujících látek a změny klimatu. Většina výzkumů, zabývajících se malými povodími, byla provedena pro lesy mírného pásu a kvůli nedostatku studií u jiných biotů, jako např. u tropických lesů, nejsou vztahy zcela pochopeny a objasněny (Swank et Johnson, 1994).

V malých povodích charakterizuje hydrologie vodu hydrologickými veličinami v určitém profilu malého vodního toku v závěru území, ze kterého je odváděna voda. Vodní režim se obvykle u malého povodí charakterizuje: a, hydrologickou bilancí, b, režimem průtoků v malých vodních tocích (kde m-denní vody charakterizují zabezpečení určitého průtoku v průběhu roku), c, režimem velkých vod (resp. povodní), který je popisován velikostí povodňových průtoků a četností jejich opakování jedenkrát za N let (Švihla, 2001).

4.3 Párová povodí

Párová povodí slouží pro hydrologické experimentální účely v mnoha zemích. Jejich zakládání je v posledních letech stále intenzivnější. Realizace se provádí výběrem většinou dvou podobných povodí, a to jejichmi vlastnostmi, nebo pro skupinu povodí. Podobnost spočívá především v klimatických, hydrogeologických, pedologických a jiných poměrech, resp. svažitost, expozici, typem půd, plochou

povodí, klimatem a vegetací. Nejčastěji se ponechá jedno povodí ve stávajícím stavu a na druhém povodí se provede určité, předem promyšlené, opatření. Při daném a zvoleném období výzkumu se sledují změny a dopady na provedené zásahy. Párová povodí poskytují velice hodnotné informace pro mnoho oborů, zkoumají dopady na krajinu a mohou přispět k predikci před povodněmi.

Studium párových povodí bylo provedeno u mnoha autorů. Zaměření na odlesňování a vliv na odtok uvádí Hibbert (1967); Bosch et Hewlett (1982); Best et al. (2003). Studie párových povodí je velmi používaným prostředkem k určení rozsahu změn vydatnosti vodní bilance s ohledem na změny vegetace. Nejčastějšími výzkumy jsou ty, které se zaměřují na: pokusy se zalesněním (přeměna nižší vegetace na les, např. z pastviny na les), odlesňování (přeměna hustě zarostlých pozemků na louky nebo pastviny), obnova zalesněním (odstranění vegetace z části povodí a následný opětovný růst stejného typu vegetace) a změna lesního pokryvu, např. náhrada určitého lesního typu jiným typem, např. přeměna měkkého listnatého opadavého lesa na jehličnaté lesy s borovicí (Brown et al., 2005). Omezeními výzkumu na párových povodích jsou zejména prostorové problémy a klimatická proměnlivost (Best et al., 2003).

5 Vlivy na srážkoodtokové epizody

5.1 Vliv evapotranspirace a výparu

Vegetační kryt má na povodí významnou roli v energetické bilanci povrchu. Výpar vody z povrchu aktivně disipuje (rozptyluje) podstatnou část přicházející energie do formy latentního tepla výparu, která je distribuována na Zemském povrchu. Schopnost povrchu a vegetačního krytu disipovat sluneční energii závisí především na hospodářské činnosti člověka (Brom et Pokorný, 2008; Procházka et Brom, 2008). Důsledkem antropogenních činností v krajině, jako je kosení, výsadba lesa, péče o ornou půdu nebo pasení, je změna prostorové distribuce solární energie a její následných forem. V důsledku těchto změn bývají většinou změněny srážkoodtokové poměry na povodí.

Výpar ve formě evaporace, evapotranspirace, transpirace nebo infiltrace a intercepce mají na povodí významný vliv. Při popisu evapotranspirace se rozlišuje potenciální a aktuální výpar. Charakteristika potenciální evapotranspirace hovoří o velikosti výparu, která by nastala v daném místě pokryté souvislým vegetačním porostem za podmínky nelimitujícího přísunu vody. Aktuální evapotranspirace představuje množství vody, které se odpaří a probíhá v reálných přírodních podmínkách a její stanovení je velice obtížné. Hodnoty potenciální evapotranspirace jsou vždy vyšší než u aktuální, což se ještě více projevuje ve vegetačním období.

V lesích ČR činila nejnižší hodnota výparu 216 mm/rok v pramenné oblasti Vydry v Modravském polesí na Šumavě. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána ve vrcholových partiích Hrubého Jeseníku, a to 608 mm/rok (Švihla, 2001).

Na povodí platí následující evapotranspirační podmínky (Best, 2003):

$$ET = I + T + E$$

I ... intercepční ztráty

T ... transpirace

E ... evaporace

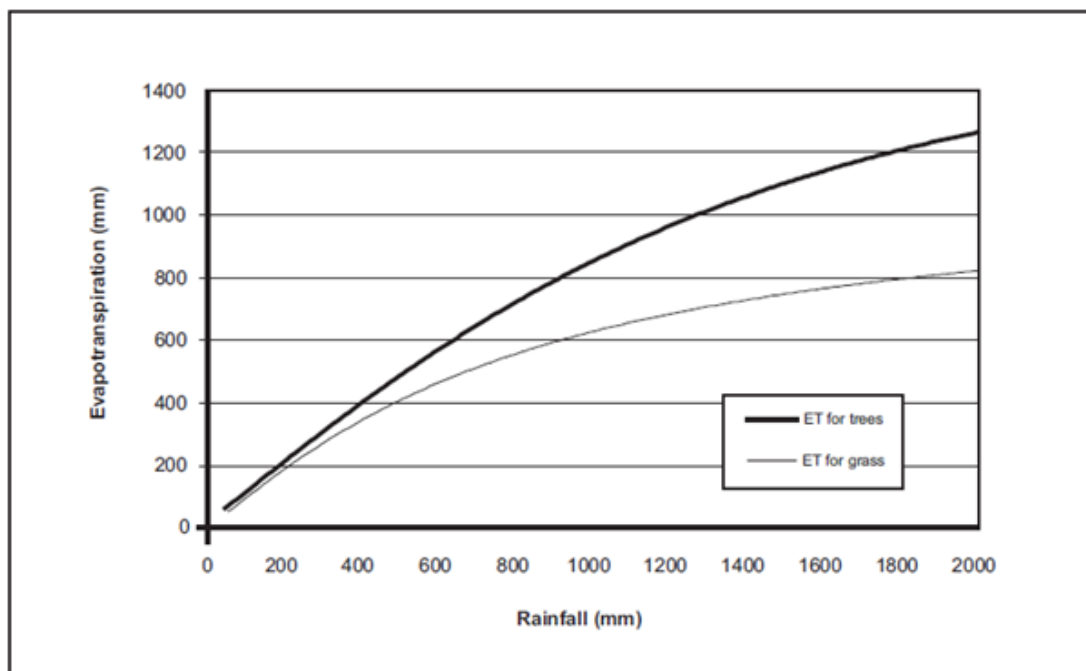
Skutečná evapotranspirace se vypočítá rozdílem mezi ročním úhrnem a odtokem (Piňol et al., 1991). Výpočet potenciální evapotranspirace uvádí Penman, 1948.

Studie:

- se zvyšujícím lesním pokryvem stoupá na povodí schopnost evapotranspirace (Wattenbach et al., 2006)
- evapotranspirace bude podle většiny klimatických podmínek v lesích vyšší než na loukách a pastvinách (Best, 2003; Zhang et al., 1999)
- roční evapotranspirace koreluje významně s úhrnem srážek na rozdíl od stálosti roční evaporace na povodích s vlhkým a chladnějším klimatem (Piňol et al., 1999; Gallart et al., 2002)
- ve Středomoří se v průměru 8 % ročních srážek stane součástí odtoku a zbylých 92 % se odpaří (evaporace) za předpokladu, že nejde ke ztrátám do podloží (Piňol et al., 1999)
- evaporace u lesů v období sucha je vyšší, a tím zároveň roste rychlost celkové evaporace (Calder et Dye, 2001)
- evaporační frakce pro aktuální a potenciální výpar na kosených lukách – na výpar spotřebováno přibližně 60 % dostupné energie, zatímco v případě lesních porostů je to kolem 70 % (Procházka et Brom, 2008)
- odvodněné pastviny vykazují vyšší množství odpařené vody než mokřady (Procházka et Brom, 2008) a projevují se dynamičtěji než mokřady
- ztráty intercepce jsou vyšší u lesů než na loukách a pastvinách (Best, 2003)
- intercepce je ve vlhkém podnebí u lesů vyšší než u kratších plodin, protože velmi nevyrovnané plochy lesů napomáhají aerodynamickému transportu vodního výparu do atmosféry - přístup advektivní energie, kratší plodiny mají omezenou radiaci (Calder et Dye, 2001)
- transpirace hraje významnou roli v rozptylu sluneční energie především ve studeném klimatickém pásmu během vegetačního období (Tesař et al., 2008)

Fyzikální procesy ovlivňují evapotranspiraci v lesních porostech v poměru k loukám a pastvinám. Rozdíly jsou patrné především v aerodynamické drsnosti, albedu, ploše listů, hloubky zakořenění a schopnosti získání vody z půdního prostředí (Zhang et al., 1999).

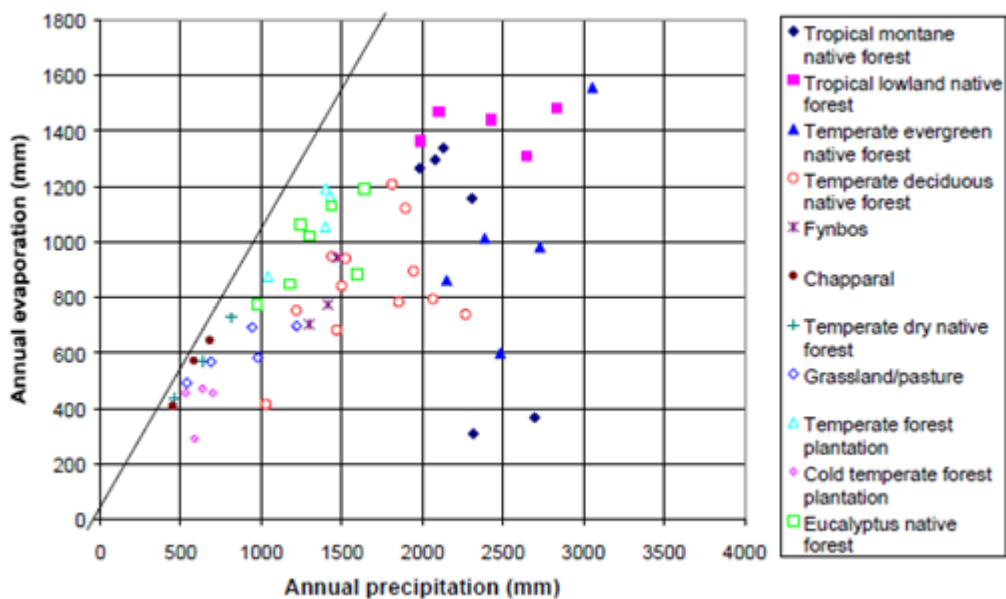
Zhang et al. (1999) odvodil obecné křivky pro vztah mezi evapotranspirací a srážkovým úhrnem.



Obr. č. 1: Závislost mezi roční evapotranspirací a srážkovým úhrnem u lesního pokryvu a luk a pastvin (Zhang et al., 1999).

Z toho vyplývá, že je velmi patrná divergence mezi lesem a loukami a pastvinami. Ta nastává při překročení průměrné roční srážky od 400 mm.

Rozsáhlejší rozbor roční evaporace v závislosti na ročním srážkovém úhrnu při různém vegetačním krytu vyjadřuje Calder et Dye (2001):



Obr. č. 2: Roční evaporace mezi ročním úhrnem srážek a různým vegetačním typem (Calder et Dye, 2001).

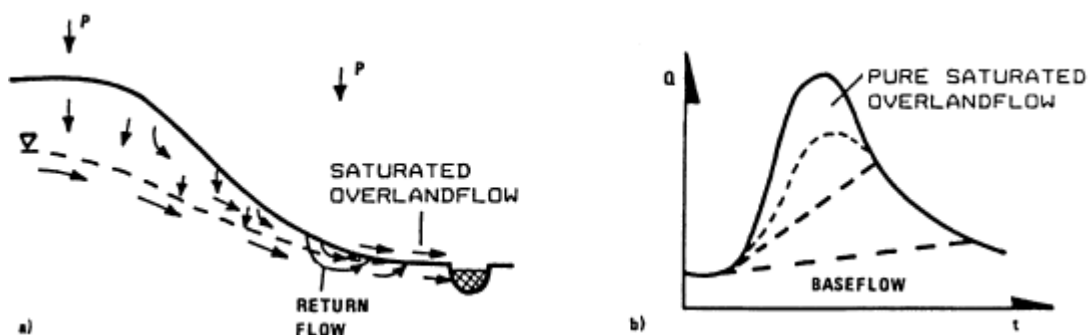
Transpirace rostlin mění klimatické podmínky na povrchu půdy a v půdě během vegetační sezóny. V horských oblastech střední Evropy recykluje transpirace zhruba 50 % dešťové vody během vegetačního období. Výměna vody mezi půdou a rostlinami je řízena teplem ze slunečního záření, které v kombinaci s teplotou vzduchu zapříčiňuje ohřev rostlin (Tesař et al., 2008).

Kantor et al. (2003) uvedl ve své práci srovnávací tabulku ztrát intercepce pro bukovou a smrkovou kmenovinu (in Unucka et al., 2008). Je čerpáno z prací pro USA, ČR (Kantor, Zelený), Evropu (Benecke, Heuveldop) a Rusko (Rajev, Bitjukov). Vyplývá, že průměrná hodnota ztráty intercepce pro bukovou kmenovinu činí 15,5 % srážek z volné plochy a pro smrkovou kmenovinu 31,5 % srážek z volné plochy. Nezanedbatelný vliv má stok po kmeni, který u hladších borek hraje nezanedbatelnou roli.

Především horské a podhorské lesní oblasti jsou při poměrně vysokých hodnotách územního výparu zásobárnou vody, jelikož se jedná o území s vysokými srážkami, které lesní porosty stačí zadržovat pro sušší období. Jehličnaté lesy mají všeobecně vyšší hodnotu územního výparu než listnaté lesy, a to v průměru o 10 %.

5.2 Role saturace a zadržení vody v půdním profilu

Důležitým ekologickým a ekonomickým zájmem je minimální množství vody zadržené na povodí (Procházka et al., 2009). Především horské lesní oblasti svou infiltrační a retenční schopností výrazně ovlivňují srážkoodtokový proces. Tyto oblasti jsou zásobárnou vody pro období bez srážek a mají zásadní vliv na průtoky ve vodních tocích při povodňových situacích v níže položených lokalitách. Při odtoku z horských povodí se významnou mírou uplatňují podpovrchové půdní horizonty, které určují formu odtoku a rychlost odezvy na srážku. Informace o hodnotách nasycené hydraulické vodivosti vyjadřující schopnost těchto horizontů vést vodu je tudíž důležitá pro predikci odtoku z dešťů (Jačka et Pavlásek, 2010). Literatura se zaměřením na saturaci a zadržení vody nejčastěji spojuje tyto analýzy s výpočtem odtoku (Myrabø, 1986). Samotný stupeň saturované plochy v povodí je významným hydrologickým činitelem a je žádoucí se mu věnovat. Pro odhad, rozsah a kolísání nasycené plochy v půdním profilu je nejvhodnější metoda mapování. Ta je časově velmi náročná a obtížná pro dlouhodobé pozorování. Mezi saturovanou plochou a odtokem mohou být vytvořeny funkční vztahy (Myrabø, 1986). Povodí s významnou přítomností rašeliny mají nejvyšší vlhkost v půdním profilu. V horských oblastech mají nejnižší hodnotu vlhkosti především travní porosty nad horní hranicí lesa nebo v údolích pod smrkovým lesem (Tesař et al., 2003). Je-li srážkový úhrn soustředěný v několika málo deštivých událostech, může být potom retenční kapacita povodí půdy překonána a vzniknou nejvyšší hodnoty pro odtokovou osu (Piňol et al., 1991).



Obr. č. 3: a, Profilový sklon znázorňující odtokové procesy; b, typický hydrogram s různými liniemi separace (Myrabø, 1986).

Nasycenost povodí lze roztrždit do určitých kategorií a popsat události, k nimž v případě vypuknutí srážky dochází, popř. stanovit rozptyly odtokových koeficientů.

Studiem malého horského povodí, resp. výzkumem v Jizerských horách, v ČR se zabýval Kuráž (2006) se zaměřením na výskyt přivalové srážky kolem 6 mm.h^{-1} . Do 300 mm byla zjištěna malá nebo téměř nulová reakce recipientu na srážku. Pro vyšší hodnoty (od 300 do 370 mm) se nacházela půda po většinu času v povodí. Jedná se o charakteristické období mezi srážkami v průměrném letním období. Hodnoty nad 370 mm se jeví jako extrémní stav, kterého dosahuje půda po přechodu vydatné srážky, půda je v povodí zcela nasycena, vytváří se prudký povrchový a podpovrchový odtok, reakce na srážku je prudká. Odtokové koeficienty dosahují až hodnoty 0,35.

5.3 Vliv vegetačního krytu a lesního porostu

V ČR zaujímají lesy zhruba 1/3 celkové plochy. Nejlesnatějšími jsou prameniště toků, a proto je ochrana malých toků v horských oblastech důležitá pro povodí z hlediska povodní. Pro lesy platí, že snižují vrcholy průtokových vln. Zásady protipovodňové ochrany by měly vycházet spíše z naměřených dat na povodích a ne z tradičně idealizovaných představ.

Les je třeba hodnotit z dlouhodobého hlediska jako ekosystém, který dobře chrání krajinné prostředí před povodňovými škodami a má schopnost tlumit vnější náhlé podněty, ale pouze po určitou hranici. Má protierozní účinky, které je potřeba hodnotit s přihlédnutím na orografické poměry, podle stavu vegetace celého povodí a faktorů, které stav vegetace narušují (Bíba et al., 2006).

Funkce lesa, především vitálního porostu, spočívá ve vodohospodářské nenahraditelnosti. Jedná se o zejména vyrovnanost odtokových poměrů. Při hospodaření v lesích je nutné zachovat, respektive vytvořit stabilní a zdravé lesní ekosystémy, které v naší krajině plní optimálně požadované všechny ekonomické, ekologické a sociální funkce společnosti (Vacek et Podrázský, 2006). Vodní režim je podřízen cyklu tepla v přírodě upravovanému entropií, resp. fyzikálními vztahy tepla a teploty. V lesním hospodářství je hlavní vlastností srážko-odtokového režimu jeho

dynamika. Počíná rozkolísáním klimatu, průběhy srážko-odtokových jevů i změnami stavu lesního prostředí. Významným činitelem zhoršujícím odtoky po silných deštích v lesnatých povodích je přibližování linií a lesních cest. Celoplošně by měl být zachován vsak vody do půdy, ale často tomu brání například stavební díla. Nejsou v takovém množství v lesích zastoupena, ale jejich účinky se přičítají do souhrnného působení nepříznivých vlivů na odtokový proces (Jařabáč, 2005). Stromy ke svému životu potřebují více vody než nižší vegetace, jako např. trávy (Lane et al., 2003).

K účinnější protipovodňové ochraně v lesním hospodářství jmenuje Bíba et al. (2006) tyto postupy: použití hospodářských způsobů, které zachovají hydrické účinky lesů; z obnovních postupů volit ty, jež zajistí stálou ochranu půdního povrchu; zamezit zhoršení infiltrační schopnosti půdy a tvorbě erozních rýh jako primární sítě soustředěného odtoku a existující rýhy sanovat; porosty obnovovat ve stanovišti vhodnou dřevinnou skladbou, která zajišťuje vysokou stabilitu a trvalost lesního ekosystému; při výchově podporovat rezistenci porostů proti poškozování abiotickými a biotickými činiteli., aby nedošlo k rozvrácení a narušení jejich pozitivního vlivu na hydrologický režim.

Pro každého lesníka by měla spočívat úloha v tom, aby úsilí o povodňovou prevenci v prostoru s jeho působností bylo podvědomě uloženo po jeho denní práci. Bez velkých nároků na pokrytí nákladů by mohl být nejúčinnějším opatřením prevence proti povodňovým škodám souhrn dílčích účinků. Nevhodnými mohou být jednostranné a nekompromisní zákazy lidských činností dotýkajících se lesního prostředí bez hledání kompromisních řešení, i když taková rozhodnutí mohou být obtížná (Jařabáč, 2005).

5.3.1 Obnova porostu

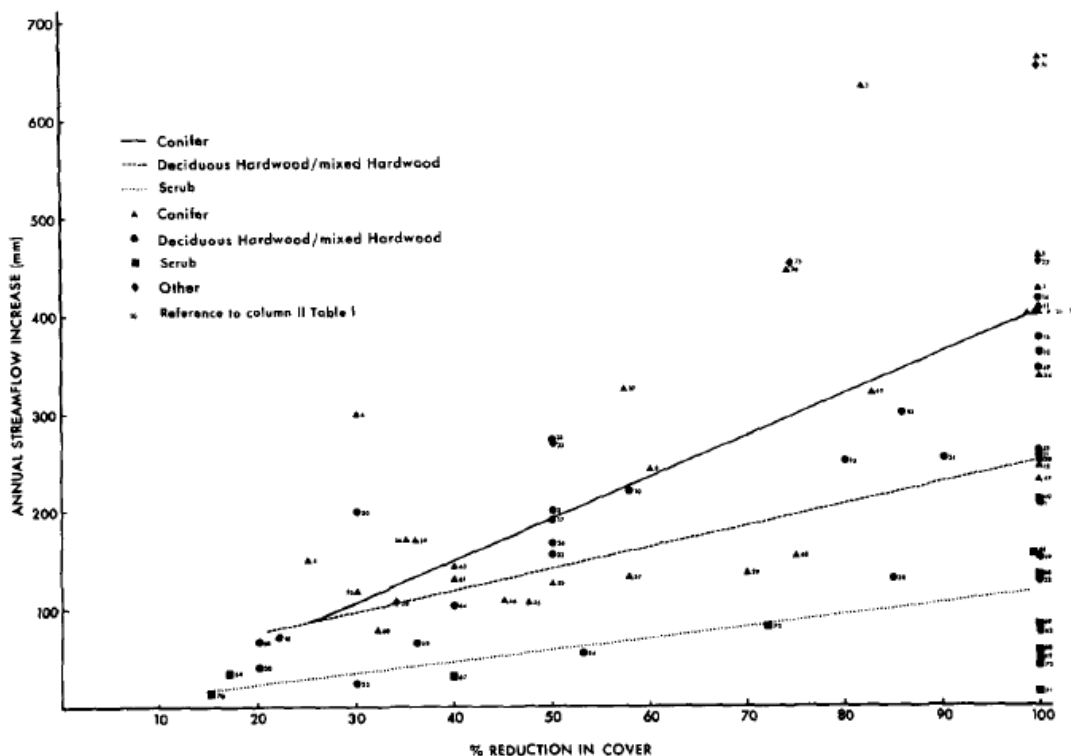
Při obnově porostu může docházet k nejrůznějším komplikacím u pokusů pro odhad zvýšení vodní bilance v důsledku trvalých vegetačních změn. Některá uvádí například Vertessy (1999): čas, který potřebuje povodí, k upravení svého chování po změně vegetace; zhutnění a narušení půdy při těžbě a samotná regenerace může dočasně zvýšit odtok v povodí a změnit vzorec u odtoku; významný vliv může mít

omezené množství datových údajů použitých k vytvoření lineárních vztahů předpovídajících změnu bilance vody, přírodní proměnlivost vodní bilance a důsledek klimatických změn.

5.3.2 Vliv vegetačního krytu a lesního porostu

Vlivem zalesnění a odlesnění se významně mění charakter povodí. Mnohé studie se zabývaly a zabývají touto problematikou a jako stěžejní literaturu mnoho autorů uvádí Bosche a Hewletta z roku 1982, kteří provedli výzkum na celkem 94 experimentálních párových povodích o průměrné ploše 80 ha (rozpětí od 1 až 2 500 ha) a zabývali se právě vlivem zalesňování a odlesňování na povodí. Z jejich výzkumu vyplývá:

- se zvyšující se plochou odlesňování se zvyšuje odtok
- se snížením lesního pokryvu se zvýší vodní bilance (analogicky se zvýšením lesního pokryvu se vodní bilance sníží)
- jehličnaté a eukalyptové lesní porosty způsobí přibližně 40 mm změnu roční vodní bilance při 10 % změně lesního pokryvu (u listnatých lesů se jedná zhruba o 25 mm a u křovinatých ploch zhruba 10 mm)
- snížením plochy lesů o méně než 20 % nelze zjistit vliv pomocí měření odtoku
- odtoková odezva u zalesnění a odlesnění závisí na průměrné roční srážce v regionu a na srážce v letech při opatření
- ke změnám vodní bilance dochází nejčastěji v lokalitách s nejvyšším srážkovým úhrnem
- vliv holoseče má krátké trvání v místech s vysokým úhrnem srážek v důsledku rychlejšího opětovného růstu vegetace
- meziroční změna v případě úpravy porostu v oblastech s vysokým úhrnem srážek se zdá být nezávislá na kolísání množství srážek od roku k roku
- změny ve vodní bilanci jsou trvalejší v sušších oblastech, protože je tu nižší schopnost obnovy vegetace a týkají se srážek v průběhu roku, po roce zavedení opatření



Obr. č. 4: Distribuce roční zvýšení vodní zásoby na redukci vegetačního pokryvu (Bosch et Hewlett, 1982)

Po odlesnění ploch s listnatými dřevinami se roční odtok zvýšil o 250 mm a na plochách s jehličnatým porostem se zvýšil o 400 mm. Po odlesnění křovinatých ploch se zvýšil roční odtok o 100 mm.

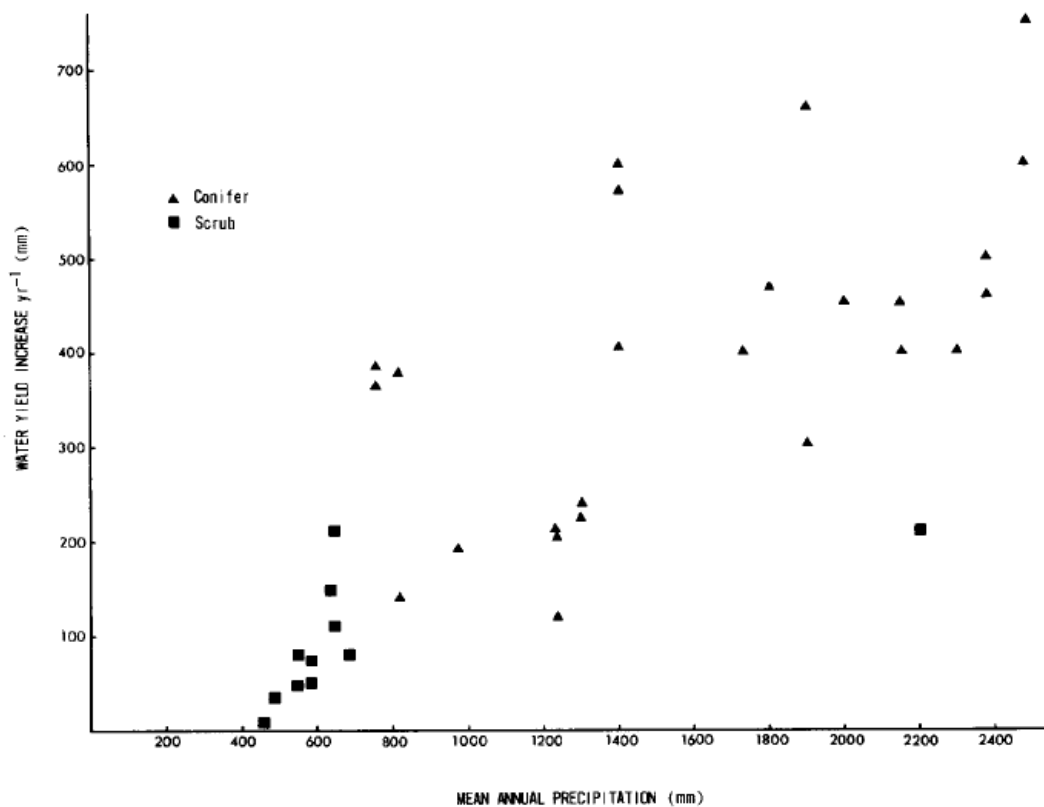
Po lesní těžbě dochází se zvýšení odtoku z povodí a v čase opět klesá, kdy les opět roste (Swift et al., 1981; Zhang et al., 1999; Douglass et Swank, 1972).

Zadržení vody v půdním profilu je vyšší u klečového porostu než u smrkového lesa a louky ve vyšších polohách zadrží více než louky v údolí (Tesař et al., 2004).

Sahin et Hall (1996) při použití lineární regresivní analýzy dosáhli výsledku, kdy se při 10 % snížení pokryvu v jehličnatém porostu zásoba vody zvýšila o 20 – 25 mm, přičemž u eukalyptového lesa se zvýšila pouze o 6 mm. U křovinatých ploch při redukci 10 % pokryvu činí zvýšení pouze 5 mm a u listnatých lesů se bilance vody zvýší o 17 – 19 mm.

V případě, že je odstraněno méně než 10 % plochy lesa v dané zalesněné oblasti, zvýšení odtoku často není možné rozpoznat (McMinn et Hewlett, 1975). Reakce

odtoku povodí na odlesňování při různé intenzitě těžby není lineární. Rovnice pro výpočet je $Y = -1,39 + 0,13 \cdot X$ (Y – zvýšení odtoku po prvním roce po opatření, těžby a X – procentuální redukce plochy u plně listnatých stavů lesa). Rovnice se může použít k určení odtoku po odlesňování (Douglas and Swank, 1972).



Obr. č. 5: Distribuce změn vodní zásoby po těžbě jehličnanů a křovin (Bosch et Hewlett, 1982).

Zásoba vody po těžbě v jehličnatém lese je až 4krát vyšší než u křovin.

Čas, který je potřebný k dosažení rovnováhy na základě trvalé změny ve využívání půdy, se značně liší při analýze roční bilance vody u zalesňování, odlesňování a opětovného zalesnění. Přitom pokusy při odlesňování tohoto času dosáhnou rychleji, než experimenty u zalesnění (Brown et al., 2005).

Sezónní odezvy na bilanci vody interpretuje Brown et al., 2005:

| klima | absolutní odezva | poměrná odezva |
|------------------------------------|---|---|
| tropické / letní dominantní srážky | větší změny v letních měsících, kdy dešťová srážka je větší než průměrná měsíční srážka | 2 typy pozorovaných odezev: 1, podobné změny ve všech měsících 2, větší změny v zimních měsících, kdy je úhrn srážek vyšší než měsíční průměrný |
| povodí se sněhem | největší změny v měsících tání sněhu | větší změny v letním vegetačním období |
| zimní dominantní srážky | největší změny v zimních měsících, kdy je úhrn srážek vyšší než měsíční průměr | největší změna v letních měsících, kdy je srážkový úhrn nižší než měsíční průměrný |
| rovnoměrný úhrn srážek | rovnoměrná změna ve všech ročních obdobích | v listnatém porostu je větší změna v průběhu jarních měsíců, stálezelená vegetace prokazuje změnu ve všech ročních obdobích |

Zvýšení lesního pokryvu na stávajících plochách pastvin může vyvolat snížení ročního odtoku až o 40 % (Calder et Dye, 2001).

Invazivní druhy dřevin mají často mnohem větší spotřebu vody ve srovnání s původní vegetací (Calder et Dye, 2001).

Rovnice pro výpočet vodní bilance na povodí (Best et al., 2003):

$$P = ET + Q + D + \Delta S$$

P ... úhrn srážek

ET ... aktuální evapotranspirace

Q ... odtok

D ... doplnění podzemní vody

ΔS ... změna vody v půdě

Hydrologické procesy mají ve vztahu k vegetaci následující charakteristiky (Best et al., 2003):

- a) změna vegetačního typu v místním měřítku a povodí nemá pravděpodobně vliv na celkové srážky, nicméně regionální a kontinentální změny vegetace mohou celkové srážky změnit
- b) povrchový odtok a rychlý odtok je méně pravděpodobně ovlivněn změnami vegetačního pokryvu než podzemní odtok
- c) změny ve vodní bilanci v důsledku změny vegetace, zejména změn trvalých porostů, se pravděpodobně projeví změnou podzemního odtoku

V případě znovuosídlení holiny vegetací (zejména výmladky) dojde k rychlému snižování zvýšeného odtoku. Každoroční odstraňování výmladků může vést k udržení zvýšeného odtoku na původní výši. Spotřeba vody mladého jehličnatého porostu je vyšší než u původního porostu listnatého (Vacek et Podrázský, 2006).

V Jizerských horách na experimentálních horských povodích probíhají již několik let výzkumy. Sleduje se především úhrn srážek, teplota, sníh, průtok a jakost vody. Další aktivity jsou zaměřeny například na m-denní křivky překročení, výskyt průtoků menších než Q300, Q333, Q355. Za dvacetileté období nebyly zjištěny a prokázány významnější změny stanovených hydrologických charakteristik. Nejdůležitějším faktorem ovlivňující odtok jsou v Jizerských horách srážky a působení jiných faktorů je často ve svém účinku protichůdné. Například snížení výparu z lesních porostů bylo kompenzováno zvýšením výparu z holin vlivem zatravnění. Nebo ve výmolech se zadržovala srážková voda a docházelo k retardaci odtoků oproti urychlení odtoku ze svahů, které bylo způsobeno změnou vegetačního porostu a vzniklými preferenčními cestami (Kulasová et al., 2006).

Negativní dopady má zalesnění na zpustlé orné půdě zejména v místní vodní bilanci. Tento jev má za následek nárůst průměrné roční evapotranspirace téměř o 3,7 % v úplném zalesnění ve srovnání s nezalesněním (Wattebach et al., 2006). U holoseče může být nejvhodnějším způsobem osídlení paseční vegetace, která je schopná rychle zmírnit negativní ekologické důsledky holosečného zásahu, jako

urychlení odtoku, povrchový odtok spojený s erozí, vymývání živin apod. Účinek paseční flóry je významnější v případě strmějších ploch holin a při více narušení půdního povrchu těžbou, vyklizováním a transportem dřevní hmoty (Vacek et Podrázký, 2006).

Náhrada a odstranění vegetačního pokryvu ovlivňuje kulminační průtoky a celkové objemy odtoku, zejména během letních měsíců (v období sucha), protože nejsou v té době kulminační průtoky ovlivněny tolik srážkovým úhrnem jako existencí zásob vody (Meunier, 1996; Pizarro et al., 2005; Laudon et al. 2007). Naopak nejnižší kulminační průtoky se vyskytují na přelomu zimy a jara (Pizarro et al., 2005), přičemž kulminační průtoky nejsou vysoce závislé na hodnotách úhrnu srážek. Kulminační průtoky a specifické odtoky jsou nižší v povodích s nižší lesnatostí. Hodnoty minimálních specifických odtoků a průměrného specifického odtoku jsou vyšší v povodí s vyšší lesnatostí (Valtýni, 1998).

Na povodí jsou velmi důležité změny a výkyvy odtoku. V těchto procesech má vegetace důležitý vliv. Přirozený vegetační kryt zadržuje vlhkost a přispívá k optimalizaci teploty prostřednictvím evapotranspirace a udržuje tak optimální podmínky pro fungování ekosystému (Ripl, 2003).

Celkový roční objem odtoků z lesů činí v průměru 0,75 – 1,04 odtoku ze zemědělských půd, přičemž hodnoty kolísají podle vodnosti jednotlivých let. Horní hranice 1,04 dosahují v suchých letech. Nejnižší celkový odtok vody z lesních porostů oproti zemědělským kulturám je určován především podstatně vyšší intercepcí lesních porostů oproti loukám nebo polním kulturám (Švihla, 2001). Z pozorování v beskydských horských lesích vyplývá, že celkové odtoky z malého povodí mohou být nižší, než naměřené úhrny srážek, což dokazuje významnost zachycení horizontálních srážek lesním kulturami, které se běžným měřením nezaregistrují (Chlebek et al., 1997).

6 Popis experimentálních povodí Modrava

Experimentální povodí Modrava se nacházejí na území NP Šumava, vyhlášeného dne 20. 3. 1991 nařízením vlády ČR č. 163/1991 Sb. Celkem tři experimentální povodí byly vybrány a vybudovány roku 1998 Katedrou biotechnických úprav krajiny FLE ČZU v rámci výzkumných aktivit grantovaného projektu VaV 620/6/97 „Obnova biodiverzity a stability lesních ekosystémů v pásmu přirozeného rozšíření smrku na území NP Šumava“. Samotné realizace přecházel průzkum a výběr vhodných lokalit v horních partiích NP Šumava, který byl uskutečněn o rok dříve před realizací projektu. Měření bylo zahájeno v srpnu 1998. Správa povodí přešla na Katedru vodního hospodářství a environmentálního modelování Fakulty životního prostředí ČZU v Praze. Všechny tři povodí jsou umístěny v blízkosti řeky Modravy. Výběr povodí spočíval v podobnosti základních hydrometeorologických charakteristik (klimatické poměry, geometrické charakteristiky, sklonové poměry, geologické a půdní poměry. Jediný rozdíl na těchto 3 povodích byl v typu pokryvu. Cílem realizace těchto povodí byl popis hydrologické funkce lesních porostů na vybrané složky hydrologického cyklu. Studie se zabývají především detailnějším popisem srážko-odtokového procesu v různém časovém měřítku. Povodí jsou vybavena měřicí soustavou pro kontinuální měření srážko-odtokového procesu. Sestava se skládá z Thomsonova měrného přelivu a srážkoměru. Vzhledem k místním horským podmínkám jsou srážky a odtoky sledovány pouze během období bez souvislé sněhové pokrývky z důvodu dostupnosti území. Stanice byly v počátcích přibližně jednou měsíčně kontrolovány, popř. vyčištěny, a data byla ukládána v paměti centrální sběrné jednotky zkopírována do počítače a odvezena na zpracování na fakultě. Vyhodnocená data jsou zaznamenávána v hodinovém intervalu. V průběhu let se kontrola provádí intenzivněji a množství a kvalita dat je značnější (Kuřík et al., 1999; Pavlásek et al., 2006; ČZU, 2011). V roce 1999 bylo sledováno celkem 130 dní, v roce 2003 téměř 166 dní a v roce 2008 již zhruba 300 dní (Kříž, 2009).

Z geologického hlediska je území Šumavy tvořeno moldanubikem a moldanubickým plutonem. Ten tvoří zejména silně a středně metamorfované horniny

s převahou pararul a migmatitů a granitové masívy. Ze žilných hornin se na tomto území vyskytují žilné žuly a žulové porfyry (Geologická mapa ČR).

Horským charakterem NP Šumava je silně ovlivněno zastoupení půd. Nejčastěji se vyskytují kyselé substráty. Mezi referenční třídy patří leptosoly (půdní typy litozem a ranker), kambisoly (kambizem districká a modální), podzolsoly (kryptopodzol a podzol), fluvisoly (fluvizem) a stagnosoly, resp. pseudoglej a stagnoglej (Klose, 2008).

Podle Albrechta (2003) patří většina Šumavy podle klimatického členění do chladné oblasti, resp. mírně chladného a chladného horského regionu. Podnebí má přechodný charakter mezi kontinentálním a oceánickým klimatem s poměrně malými ročními teplotními rozdíly a s poměrně vysokými a během roku stejnoměrně rozloženými srážkami (in Kříž, 2009). Průměrná roční teplota činí 6 °C v nadmořských výškách kolem 750 m n.m. a 3 °C v nadmořských výškách 1 300 m n.m. Nejnižší hodnoty průměrných ročních srážek se pohybují kolem 800 – 900 mm na severovýchodní oblasti, ovšem směrem na západ srážky činí až 1 600 mm. Během roku je v návětrném pásu Šumavy rozdělení srážek rovnoměrné s nejvýznamnějšími maximy v červnu a červenci, vedlejšími v prosinci. Maximální úhrny připadají v nižších polohách na léto a v pohraničním pásmu na zimu. Extrémní krátkodobé srážky mívají charakter bouřek a denní úhrny přesahují hodnotu 100 mm. Počet dnů se srážkami se pohybuje mezi 170 až 180 dny ve vlhčích a 150 dní v sušších oblastech.

Experimentální povodí Modrava 1 se nachází v pramenné oblasti Roklanského potoka (hydrologické pořadí 1-08-01-006), přibližně 1,5 km východním směrem od vrcholu Velkého Roklanu na hranici se spolkovým státem Bavorsko a zhruba 1 km jižně od Roklanské hájenky. Lokalita je místními známa pod názvem „V Koutě“ a má severní expozici. Toto území bylo vyhlášeno jako bezzásahová zóna NP Šumava. Tuto lokalitu postihla kůrovcová kalamita a zůstal tu pouze stojící odumřelý smrkový les, který podléhá větrným kalamitám a počet stojících stromů v čase postupně klesá. Původní smrkové porosty byly staré přibližně 130 let a pokrývali takřka rovnoměrně celou plochu povodí. V současné době je povrch terénu pokryt travním porostem, popadanými kmeny a větvemi stromů. Na územích s příznivými podmínkami se

postupně uchyťávají smrkové semenáčky. Na povodí Modrava 1 je půdní pokryv tvořen podzoly s větší mírou zrašelinění v nadložních horizontech. Hloubka půdního profilu činí 0,4 až 0,6 m (ČZU, 2011).

Druhé experimentální povodí, resp. Modrava 2, se nalézá na severním svahu Malé Mokrůvky, v pramenné oblasti Ptačího potoka (hydrologické pořadí 1-08-01-002), téměř 5 km jižně od Filipovy Huti, na hranici s Bavorskem. Nese místní název „Medvědí doupe“. V této lokalitě byla po kůrovcové kalamitě povolena těžba napadeného smrkového porostu. Původní porosty smrku byly staré zhruba 160 let a na části plochy se vyskytoval porost starý 26 let. Poté byla paseka zalesněna smrkem, částečně jeřábem a javorem klen. V současnosti tvoří povrch terénu vysazené a náletové dřeviny, travní porost, tlející větve a pařezy zbylé po těžbě. Z půdních typů převažují na povodí Modrava 2 zejména podzoly nebo krytopodzoly s podstatným zastoupením skeletu ve všech půdních horizontech. Půdní profil je hluboký mezi 0,6 až 0,8 m (ČZU, 2011).

U experimentálního povodí Modrava 3 se nachází uzavírající profil na severním svahu Vysokého stolce, necelé 4 km jihovýchodně od obce Kvilda, pod lesní cestou vedoucí z Kvildy do Borových lad, tzv. „Vlasatou cestou“. Povodí bylo vybudováno na vodním toku, který je pravostranným přítokem Teplé Vltavy (hydrologické pořadí povodí 1-06-01-007). V současné době převažuje na povodí smrkový porost ve věku 150 let s příměsí buku starého mezi 110 a 150 lety. Přirozené zmlazení je představováno smrkem, jedlím, bukem a jeřábem. Plocha této lokality nebyla doposud postižena kůrovcovou kalamitou. Povrch terénu tvoří opadavé bukové listy, smrkové jehličí a suché větve s porostem brusnice borůvky. Na povodí jsou půdním typem především krytopodzoly s hloubkou do 1 m (ČZU, 2011).

| Charakteristika | Modrava 1 | Modrava 2 | Modrava 3 |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lokalita | pod Roklanem | pod M. Mokrůvkou | pod Vys. stolcem |
| Lesní pokryv | zmlazený les | paseka | zdravý les |
| Plocha povodí [km ²] | 0,10 | 0,16 | 0,07 |
| Min. nadm. výška [m n.m.] | 1216 | 1197 | 1110 |
| Max. nadm. výška [m n.m.] | 1270 | 1330 | 1251 |
| Délka údolnice [km] | 0,485 | 0,745 | 0,665 |
| Sklon svahu | 0,09 | 0,21 | 0,21 |
| Expozice | severní | severní | severní |

Tab. č. 1: Hydrologické charakteristiky experimentálních povodí Modrava, Modrava 2 a Modrava 3 (Pavlásek et al., 2006).

Ve vegetačním období, tj. od května do dubna, se provádí monitoring dat. Sleduje se výška srážek, průtok, teplota, a od roku 1999 konduktivita pomocí konduktometru GRYF v 3 hodinovém intervalu. Měření z let 1998 – 2003 a jejich souhrnné výsledky uvedli Křovák, Pánková et Doležal (2004). Překlopným nevyhříváním srážkoměrem je měřena výška srážek se záchytnou plochou 0,02 m². Pomocí Thomsonova přelivu se měří průtok a výška přepadového paprsku je měřena pomocí tlakového čidla. Data se ukládají do záznamového média NOEL v časovém intervalu 2 min pro srážky a 4 min pro výšku hladiny. Teplota vzduchu je zaznamenávána v 1 hodinovém intervalu pomocí teploměru (Máca et al, 2005; Hrádek et al., 2000; Pavlásek et al., 2005).

Výsledky měření srážek a průtoků z let 1998 až 2000 uvádí Hrádek et al., 2000. Z výsledku vyplývá, že na všech 3 povodí jsou odtokové poměry velice vyrovnané a nejnižší kulminační průtoky jsou dosahovány ve zdravém lese, resp. na Modravě 3, a na tomto povodí byly zaznamenány nejmenší rozdíly mezi maximálními a minimálními průtoky, ve srovnání s oběma zbylými povodími.

V letech 2002 a 2004 provedli analýzu se zaměřením především na odtokový součinitel Pavlásek et al. (2005). Na povodí se zdravým lesem (Modrava 3) je patrná nižší hodnota odtokového součinitele a má delší reakci na srážkovou událost. Vyšší hodnota objemové součinitele odtoku v květnu 2004 je zapříčiněna odtokem zásob

podzemní vody ze zimy. Podobný odtok byl zaznamenán na povodí s pasekou (Modravě 2). Výrazně nižší odtoky jsou sledovány na povodí Modrava 3, což může být způsobeno nerovnoměrností srážek a jejich rozdílným časovým průběhem nebo jinými pedologickými, geometrickými a orografickými charakteristikami povodí nebo typem vegetačního pokryvu. Vyrovnanější průtoky jsou patrné na povodí Modrava 3, nejvyšší základní odtok na Modravě 2 a nejrychlejší reakci na příčné srážky vykazuje povodí Modrava 1. Rozsah tohoto chování na vegetační pokryv není možné zatím zjistit.

Srážkovým úhrnem se zaměřením na extrémní události v desetiletém období let 1999 až 2008 se zabýval Kříž, 2009. Nejvyšší denní srážka byla zaznamenána v říjnu 2004 náhradním srážkoměrem, který vykazoval vyšší úhrny srážek. Dosažená hodnota činila 143 mm. Běžný srážkoměr zaznamenal denní úhrn 89,2 mm v září 2004. Nejvyšší hodnota hodinové srážky byla zjištěna v srpnu 2008 se srážkovým úhrnem 73,6 mm. Nejvyšší dvouminutová srážka z června 2003 činila 6,2 mm. Rok 2007 byl charakteristický nejčetnější srážkovou událostí s úhrnem nad 10 mm a dobou trvání vyšší než 10 hodin.

Na povodí Modrava 2 je z jedenáctiletého hydrologického monitoringu patrná významná funkce horských oblastí na retenci vody. Průměrná výška retence vody na povodí v rámci srážkoodtokové události ve vegetačním období byla odhadnuta na 84 mm. Nižší retence se projevovала v období s nižší teplotou. U vybraných událostí byl objemový součinitel odtoku pokaždé nižší než 0,5 a jeho hodnota vykazovala závislost zejména na průtoku na počátku hydrogramu. Z toho vyplývá, že i přes vysokou retenční kapacitu nejsou vrcholové partie Šumavy schopny zachytit extrémní úhrny srážek, ovšem přispívají tak ke snížení extrémních odtoků z těchto oblastí (Pavlásek, 2010).

7 Metodická část

7.1 Měření a vyhodnocení srážkoodtokových událostí

U měření srážek a odtoků vč. doplňujících prvků lesního prostředí jsou vysoké nároky na získávání a správnost dat. Proto je nutné zabezpečovat: a, informace o dlouhodobém kolísání klimatu, kterým by mohlo být ovlivněno krátkodobé měření s následným přisouzením rozdílů porostní obnově nebo jiným lesnickým a hospodářským opatřením; b, spolehlivost srážkoměrných měření se zohledněním odvívání srážek po zmýcení porostu (především v zimě), úbytek horizontálních srážek, výskyt a intenzita dešťů a změny mikroklimatických prvků; c, kritické posouzení nečekaného výskytu jiných vnějších činitelů (např. imisí).

Hodnocení srážkoodtokového vztahu je hodnoceno z nepravidelně vyskytujících se srážek. Samotná předpověď není přesná a spolehlivá, jelikož je jejich výskyt nestálý a neustále dochází ke změně jeho výskytu. Odtoky z lesů jsou vlivem retenčních a retardačních vlastností povodí na rozdíl od srážek vyrovnanější. Hodnocení ročního srážkoodtokového vztahu je velmi hrubým měřítkem, které nevystihuje v našem klimatickém pásmu rozdíly teplého a chladného období.

Povrchový odtok je významným hydrologicko-hydraulickým procesem a ovlivňuje ho řada působících faktorů. Nejvýznamnějšími faktory jsou faktory klimatické, faktory souhrnně nazývané geomorfologické a vegetace. Poznání zákonitostí tohoto složitého procesu znesnadňuje zejména stochastický charakter klimatických jevů, počet spolupůsobících faktorů a jejich plošná a časová proměnlivost. Kvantitativní vyjádření charakteristik povrchového odtoku je závislé na pozorování a vyhodnocování srážkových a průtokových údajů. V popředí zájmu je studium zákonitostí procesu povrchového odtoku a odvozování metodických postupů pro stanovení hydrologických charakteristik se zaměřením především na hodnoty maximálních průtoků na malých a velmi malých povodích.

Změny prvků vodní bilance, především výšek odtoků a výparu, jsou statisticky obtížně průkazné v delších obdobích, protože se vlastní rezistencí a rezistencí biosystému mění často nepředvídatelně a jsou mnohokrát nesnadno měřitelné.

Obě vybraná povodí jsou řazeny do kategorie povodí drobných vodních toků.

Rozbor vlastností hydrogramu, resp. časovému průběhu v uzavírajícím profilu povodí, je možné úspěšně provádět pro přírodní povodí pouze tehdy, je-li k dispozici dostatek informací o základních vlastnostech povodí a souběžná pozorování srážek a průtoků. Takové podklady jsou pro velmi malá povodí k dispozici pouze výjimečně na experimentálních povodích obvykle s krátkou dobou pozorování.

7.2 Metodický postup pro vyhodnocení a analýzy

Samotná práce se zabývá analýzou a vyhodnocením několika srážko-odtokovými charakteristikami. Základním krokem bylo zjištění správného chodu a měření jednotlivých přístrojů v hodinovém kroku. Pro stanovení určitých závislostí a pro nejrůznější hydrologické analýzy jsou důležitá přesná, dlouhá a souvislá data. Na experimentálních povodích Modrava 1 a Modrava 2 se kvantita dat postupem let nabývala a počet návštěv na těchto lokalitách roste. To vede nejen ke kvantitě dat, ale i kvalitě, kdy se předchází možným poruchám měřidel nebo k rychlé nápravě a uvedení do provozu.

Kapitoly zaměřená na metodickou část vychází ze dvou základních zdrojů literatury. Vyhodnocení a metodika pro odtok a srážkový úhrn v prvních podkapitolách byla stanovena na základě Kulasové et al. (2006), kde se vyhodnocovali především roční, měsíční průtoků a srážkového úhrnu. Následná část práce vychází ze zdroje Máci et al. (2005) se zaměřením na povodňové vlny a jejich podrobné analýzy.

7.2.1 Základní hydrologické charakteristiky a jejich vyhodnocení

Od roku 1999 do 2009 byly vyšetřovány správně naměřené hodnoty průtoku a srážkového úhrnu, které byly tabelárně zpracované pro experimentální povodí Modrava 1 a Modrava 2.

Následně byly vyhodnoceny roční a měsíční průtoky v letech 2007 – 2009 na obou povodích a vyneseny do grafů v hodinovém kroku.

Práce se dále zaměřila na významnější události s výrazně vyšším průtokem v hodinovém a denním kroku. Vyhodnocoval se 24-hodinový průtok v jednotlivých letech, v případě dostatečných dat a 24-hodinový průtok s hodnotou vyšší než $1\ 000\ \text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ i v případě absence o srážkovém úhrnu. Následoval podrobný rozbor těchto událostí v podobě grafů a tabulek.

Důležitost dostatečných dat je rozhodující, jak již bylo zmíněno, při stanovení podstatných výsledků. Data k povodím postrádají celoroční nebo celosezónní bezchybnou kontinuitu. Proto byly vybrány, vzhledem k potřebě delšího období sledování, takové řady, kde jsou data úplná. Od roku 1999 do roku 2009 se jevilo jako nejvhodnější vybrat období v každém roce od měsíce června do října, kdy pozorování probíhalo vesměs dlouhodobě a bez většího množství chybných dat a výluk měření. Vyšetřován byl odtok o srážkový úhrn.

Pro toto období s větším množstvím dat z obou povodí se vypočítával součinitel odtoku. Ten byl počítán a vyhodnocován jako poměr odtoku a srážky v jednotkách mm.

7.2.2. Vlny s jedním a více vrcholy a jejich analýza

Povodňové vlny jsou ovlivňovány řadou skutečností a okolností jako např. srážkovým úhrnem, jeho časovým a prostorovým rozložením na povodí, geometrickými a orografickými charakteristikami povodí, charakteru povrchu povodí, vláhovými poměry, hydropedologickými a hydrogeologickými podmínkami, antropogenními zásahy aj.

Jednotlivé srážko-odtokové události byly zvoleny z časových řad naměřených na dvou experimentálních povodích Modrava 1 a Modrava 2 s různým vegetačním pokryvem. Při výběru byly zohledněny následující podmínky:

- datový soubor vybraných srážko-odtokových událostí byl dostatečně kompletní (s ohledem na data zaměřených na průtok a srážky)
- příčinná srážkové události měly jasně definovaných začátek
- stoupající větev hydrogramu musí mít jasně definovaný začátek a není významně ovlivněn předchozí srážko-odtokovou událostí
- poklesová větev hydrogramu musí mít přesně definovaný konec a v jejím průběhu byla hlavním aspektem příčinná srážková událost

Vybrané povodňové vlny byly diferencovány na vlny jednoduché vlny s jedním vrcholem a povodňové vlny složené s více vrcholy. Následně byly zkoumány u jednotlivých srážko-odtokových událostí následující charakteristiky:

H_s ... velikost srážkového úhrnu

T_D ... doba trvání srážkové události

i_{MAX} ... maximální intenzita srážky

i_D ... průměrná intenzita srážky

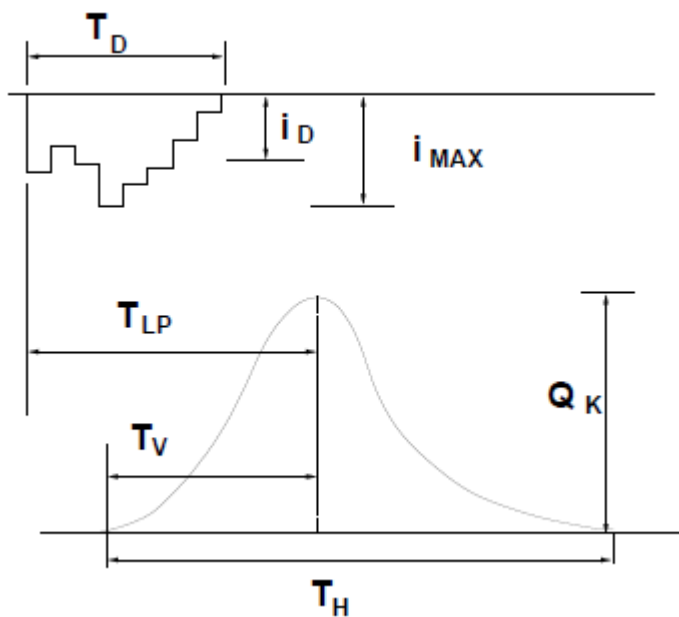
T_H ... doba trvání hydrogramu

Q_K ... kulminační průtok odtokové vlny

T_V ... doba trvání vzestupné větve hydrogramu

T_{LP} ... doba od začátku deště ke kulminaci

T_{SO} ... doba od maximální srážky ke kulminaci



Obr. č. 6: Vyhodnocované charakteristiky srážko-odtokových událostí (in Máca et al., 2005).

V zájmových povodích Modrava 1 a Modrava 2, u charakteristik povodňových vln, byly sledovány četnosti výskytu zvolených tříd souborů sledovaných dat. Velikosti zvolených tříd, do nichž byly rozřídovány charakteristiky srážko-odtokových událostí, byly zvoleny na základě množství posuzovaných dat a jejich rozložení v posuzované časové řadě. Vzájemná závislost vybraných charakteristik srážko-odtokových epizod byla porovnávána pro každou vybranou situaci zvlášť. Pro porovnávání byly vybrány následující charakteristiky:

- 1) závislost doby od začátku deště do doby kulminace na průměrné intenzitě srážek
- 2) závislost doby trvání hydrogramu na době trvání deště
- 3) závislost trvání vzestupné větve hydrogramu na době trvání deště
- 4) závislost velikosti kulminačního průtoku na maximální intenzitě srážek
- 5) závislost velikosti kulminačního průtoku na velikosti srážkového úhrnu
- 6) závislost doby od začátku deště ke kulminaci na době trvání srážky
- 7) závislost součinu maximální intenzity a srážkového úhrnu na kulminační průtok
- 8) závislost doby trvání hydrogramu a doby trvání srážky

Na jednotlivých povodích byly vybrány takové vlny, které splňovali podmínku kompletního datového souboru, a to zejména odtoku a srážky. Na experimentálním povodí Modrava 1 bylo vybráno celkem 10 vln s jedním vrcholem a 14 vln s více vrcholy. Pro druhé povodí Modrava 2 bylo analyzováno taktéž 10 vln s jedním vrcholem a 12 vln s více vrcholy. Při výběru byly zvoleny epizody s hodinovým průtokem vyšším než 10 l.s^{-1} a výše zmíněným kompletním datovým souborem.

Součástí vyhodnocení bylo vytvoření vzájemných závislostí vybraných charakteristik do histogramu.

U těchto vybraných charakteristik byly zkoumány meze ohraničující pole jednotlivých závislostí, tzn. obalové čáry. Meze jsou dány lineárně spojnicemi limitních hodnot jednotlivých závislostí.

8 Výsledky a přínos práce

8.1 Přehled měřených dnů průtoku a srážkového úhrnu

Jednotlivé hydrologické údaje, resp. průtok a srážkový úhrn, byly v jednotlivých letech sledovány a jejich četnost byla vynesena do tabulek a výsledky jsou uvedeny v této kapitole a v příloze. Největší množství dat průtoku bylo zaznamenáno v roce 2009, a to 99,6 % z celého roku na povodí Modrava 1. Naopak nejkratší měření průtoku bylo zjištěno v roce 1999, a to 38,3 % shodně na obou povodích. V průměru bylo zaznamenáno v jedenáctiletém období celkem 58,79 % správných měření průtoku na obou povodích. Hodnoty srážkového úhrnu byly nejčastěji zjišťovány v roce 2009 na povodí Modrava 2 v hodnotě zhruba 78,6 % a nejméně na povodí Modrava 1 necelých 21 %. Průměrná hodnota délky měření srážkového úhrnu na obou povodích činí 49,46 % z celého jedenáctiletého období.

| | průtok [hod] | srážky [hod] | správně [hod] | prům. % z roku Q | prům. % z roku Hs |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Modrava 1 a Modrava 2 | 113 294 | 95 313 | 192 720 | 58,79 | 49,46 |

Tab. č. 2: Průměrné četnosti měření průtoku a srážkové úhrnu v období 1999 – 2009 v hodinách.

Absence mnoha dat byla způsobena tím, že monitoring probíhal v letech 1999 – 2006 neprobíhal koncem podzimu, v zimě a začátkem léta, tzn. během období souvislé sněhové pokrývky. Další výpadky byly způsobeny nevhodnou manipulací s měřidly, zanášením či jiným důvodem.

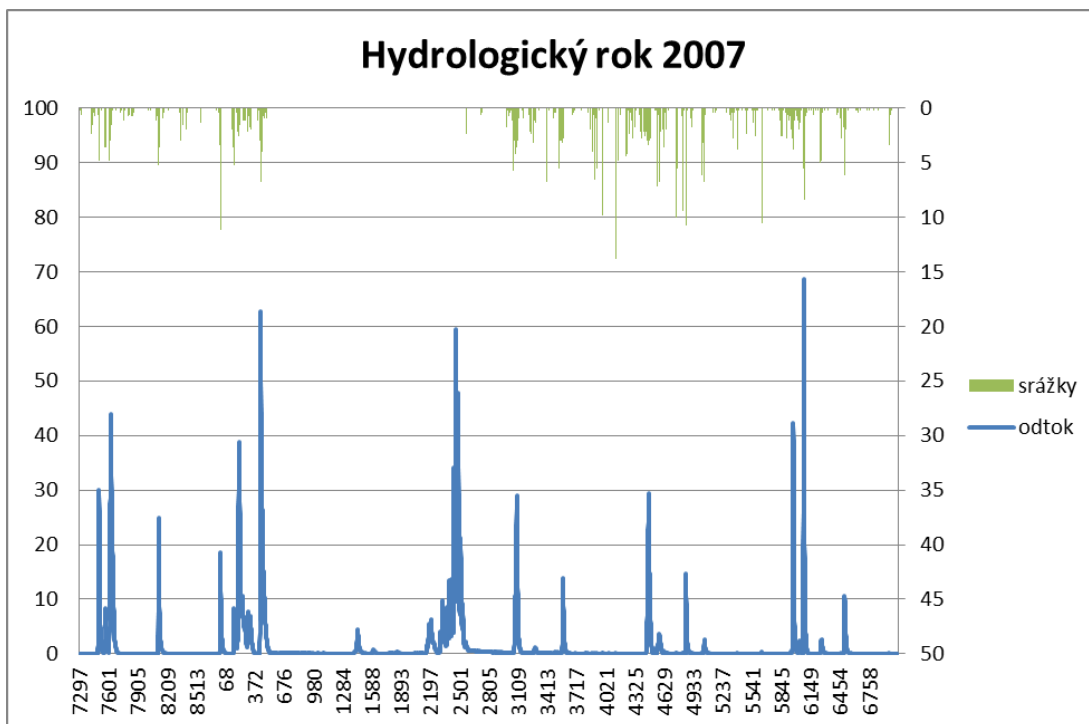
8.2 Vyhodnocení měsíčních hodinových průtoků a srážkového úhrnu

Průtok a srážkový úhrn byl vyhodnocován na povodích Modrava 1 a Modrava 2 v letech 2007 – 2009 v ročním a měsíčním kroku a zpracován následně do grafů.

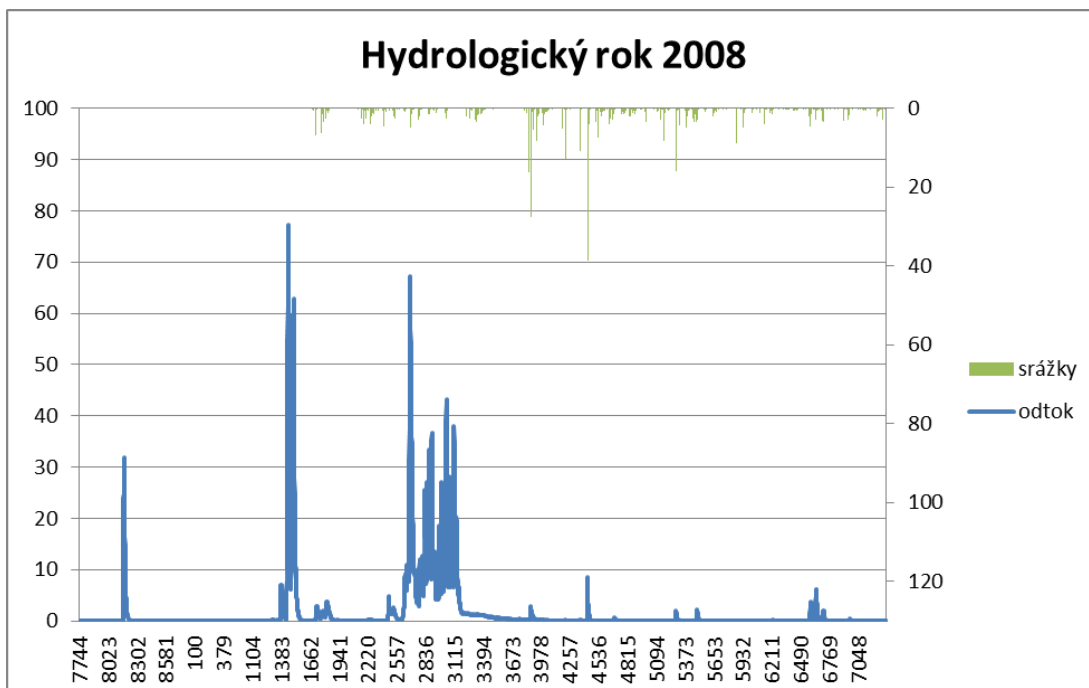
Rok 2008 se vyznačoval na obou povodích nejvyšším povrchovým odtokem, i když naměřený srážkový úhrn byl v obou případech vyšší v roce 2007. Tato skutečnost byla způsobena především vysokou zásobou sněhu v zimě, kde se

projevilo tání sněhu během měsíců března, dubna a května, kde byl zaznamenáný signifikantně vyšší odtok z povodí, než v jiných letech.

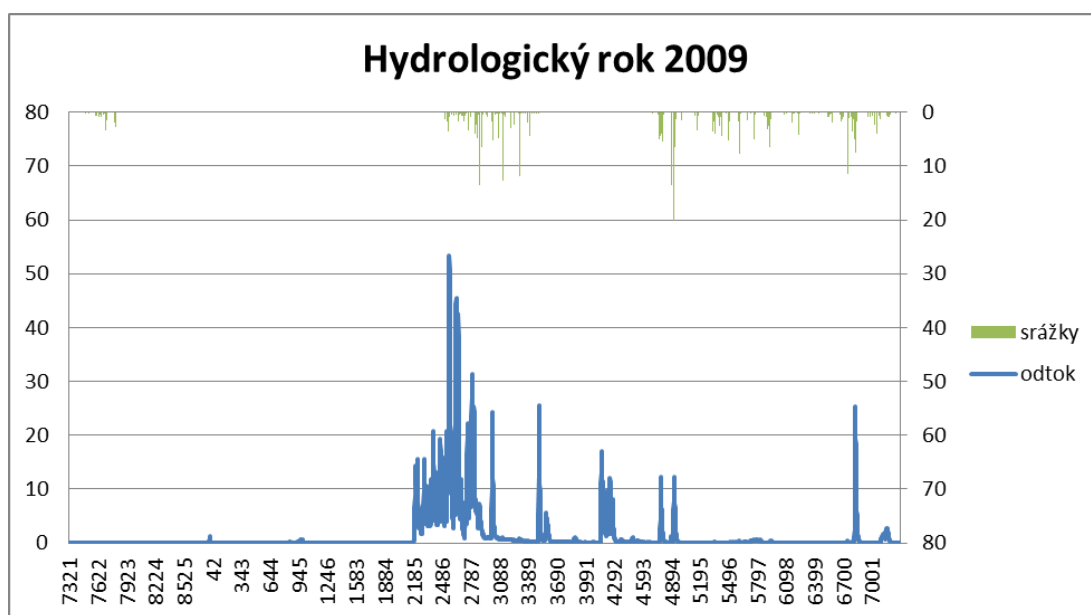
Modrava 1:



Obr. č. 7: Roční odtok z povodí Modrava 1 – hydrologický rok 2007.

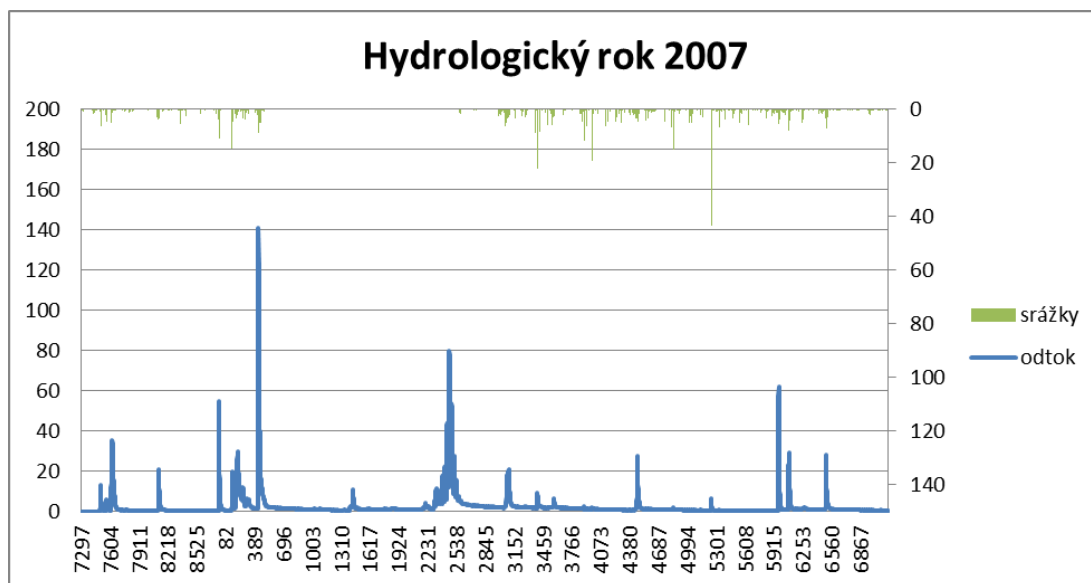


Obr. č. 8: Roční odtok z povodí Modrava 1 – hydrologický rok 2008.

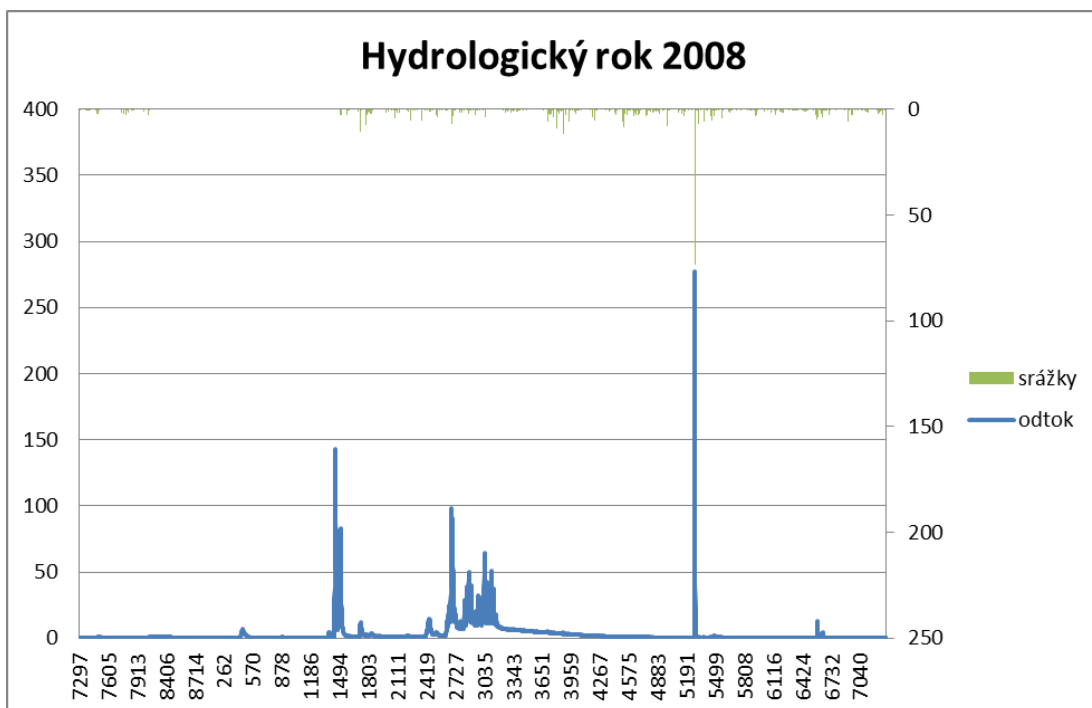


Obr. č. 9: Roční odtok z povodí Modrava 1 – hydrologický rok 2009.

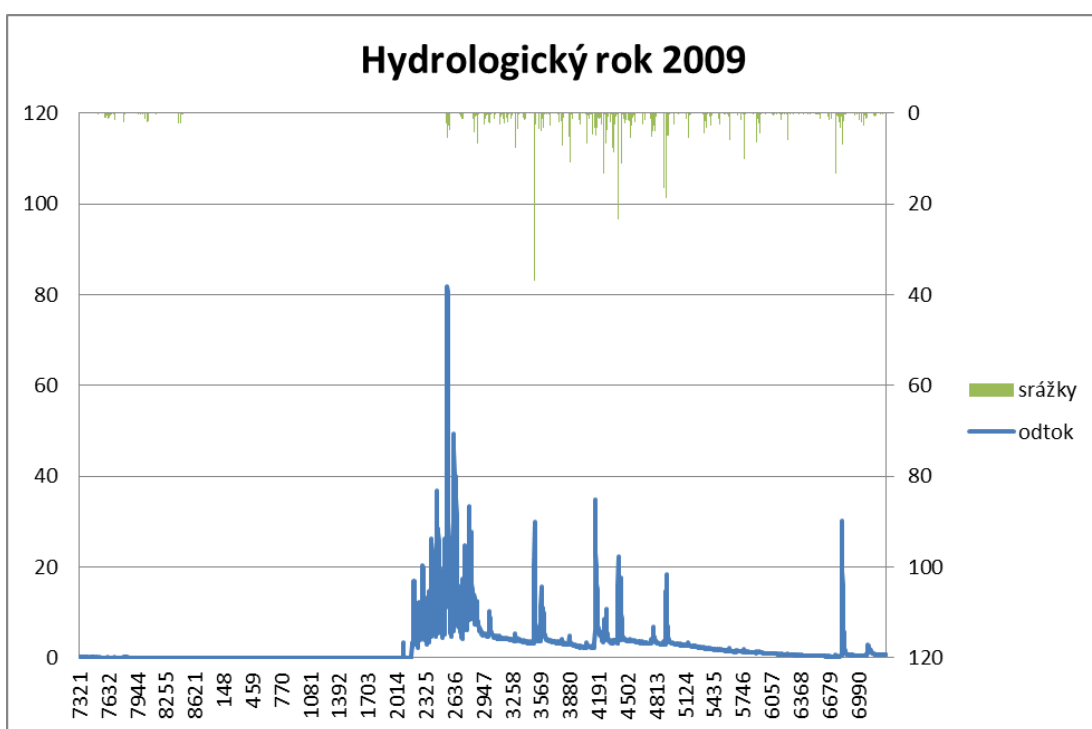
Modrava 2:



Obr. č. 10: Roční odtok z povodí Modrava 2 – hydrologický rok 2007.



Obr. č. 11: Roční odtok z povodí Modrava 2 – hydrologický rok 2008.



Obr. č. 12: Roční odtok z povodí Modrava 2 – hydrologický rok 2009.

| | | Q [l.s ⁻¹] | Hs [mm] |
|-----------|------|------------------------|---------|
| Modrava 1 | 2007 | 11825,3 | 1208,4 |
| | 2008 | 12564,1 | 876 |
| | 2009 | 10378,9 | 640,4 |
| Modrava 2 | 2007 | 20494,7 | 1411,2 |
| | 2008 | 25367,7 | 1038,4 |
| | 2009 | 21284 | 1132,6 |

Tab. č. 3: Celkové roční hodnoty průtoku a srážkové úhru v letech 2007 – 2009.

8.3 Vyhodnocení epizod s extrémním průtokem

V této analýze byl proveden rozbor vybraných epizod s extrémním průtokem. Zaměřilo se na maximální průtok $Q_{24\text{hod}} \geq 1\,000 \text{ l.s}^{-1}$ v letech 1999 – 2009 s následným rozbohem a maximální odtoky v jednotlivých letech.

Studie těchto extrémních průtoků je důležitá především k predikci proti povodním. Tyto významné hydrologické události na malém experimentálním povodí mohou napomoci k predikci a mohou tak zmírnit následné negativní ekologické, ekonomické, sociální, kulturní a jiné následky.

Modrava 1:

| Rok | Q _{max} | Datum |
|------|------------------|--------|
| 1999 | 37,46 | 1.11. |
| 2000 | 21,86 | 14.7. |
| 2001 | 64,71 | 8.9. |
| 2002 | 232,20 | 12.8. |
| 2003 | 33,45 | 10.10. |
| 2004 | 59,63 | 23.9. |
| 2005 | 62,81 | 2.5. |
| 2006 | 148,60 | 27.5. |
| 2007 | 68,61 | 11.9. |
| 2008 | 77,14 | 1.3. |
| 2009 | 53,32 | 17.4. |

Modrava 2:

| Rok | Q _{max} | Datum |
|------|------------------|--------|
| 1999 | 30,23 | 1.11. |
| 2000 | 23,61 | 28.7. |
| 2001 | 59,63 | 8.9. |
| 2002 | 66,92 | 8.11. |
| 2003 | 32,36 | 10.10. |
| 2004 | 80,22 | 23.9. |
| 2005 | 15,87 | 7.5. |
| 2006 | 184,26 | 27.5. |
| 2007 | 141,05 | 19.1. |
| 2008 | 277,01 | 7.8. |
| 2009 | 81,78 | 17.4. |

Tab. č. 4: Hodnota maximálních 24-hodinových odtoků na povodích Modrava 1 a Modrava 2 v jednotlivých letech.

Maximální hodnota odtoku na povodí Modrava 1, zaznamenaná v roce 2002 se překvapivě neprojevila na druhém povodí. Pravděpodobně se jednalo o extrémní srážkovou událost, která se projevila při povodních v tomto roce. Neurčitost výskytu této extrémní srážky na povodí Modrava 2 navíc negativně podporuje nefunkčnost srážkoměru.

Maximální hodnota 277,01 l.s⁻¹ na povodí Modrava 2 se neprojevila na vedlejším povodí z důvodu toho, že se nad povodím nebyla zjištěna extrémní srážka s vysokou intenzitou, která činila na Modravě 2 téměř 100 mm za časový interval zhruba 2 hod.

Modrava 1:

| | Q [l.s ⁻¹] | Datum |
|------|------------------------|-------------|
| 1999 | | |
| 2000 | | |
| 2001 | | |
| 2002 | 2502,9 | 12.8.-13.8. |
| 2003 | | |
| 2004 | | |
| 2005 | | |
| 2006 | 1206,3 | 26.5.-27.5. |
| | | |
| 2007 | | |
| 2008 | 1028,0 | 1.3. |
| | 1037,0 | 3.3.-4.3. |
| | 1131,2 | 21.4.-22.4. |
| 2009 | | |

Modrava 2:

| | Q [l.s ⁻¹] | Datum |
|------|------------------------|---------------|
| 1999 | | |
| 2000 | | |
| 2001 | | |
| 2002 | | |
| 2003 | | |
| 2004 | | |
| 2005 | | |
| 2006 | 1481,6 | 26.5.-27.5. |
| | 1433,0 | 27.5. - 28.5. |
| 2007 | 1070,6 | 18.1.-19.1. |
| 2008 | 1649,5 | 1.3.-2.3. |
| | 1191,2 | 3.3.-4.3. |
| | 1735,6 | 21.4.-22.4. |
| 2009 | 1303,1 | 17.4.-18.4. |

Tab. č. 5: Přehled odtoků z povodí s hodnotou vyšší než 1 000 l.s⁻¹.

Rozbory jednotlivých odtokových událostí jsou uvedeny v přílohách. Rok 2008 byl charakteristický mnoha extrémními odtoky, které byly vyšetřeny v měsíci březnu a dubnu. I zde se projevila vysoká zásoba sněhu ze zimy a tudíž odtokové hodnoty dosahují extrémních hodnot. Nejvyšší hodnota byla naměřena na povodí Modrava 1 v roce 2002 v srpnu. Tato událost se projevila na větší části českého území a

zapříčinila povodně. Srážkoměr v době této události nefungoval, a tudíž lze pouze předpokládat extrémní srážkovou událost, které tomu předcházela. Musela mít velmi vysokou intenzitu a nedošlo ani k nasycení plochy povodí a стекла rychle z povodí v uzavírajícím profilu.

Události s hodnotou vyšší než $1\,000\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ byly při rozboru nahrazeny odtokovou výškou v milimetrech a znázorněny v grafech, které jsou uvedeny v přílohách.

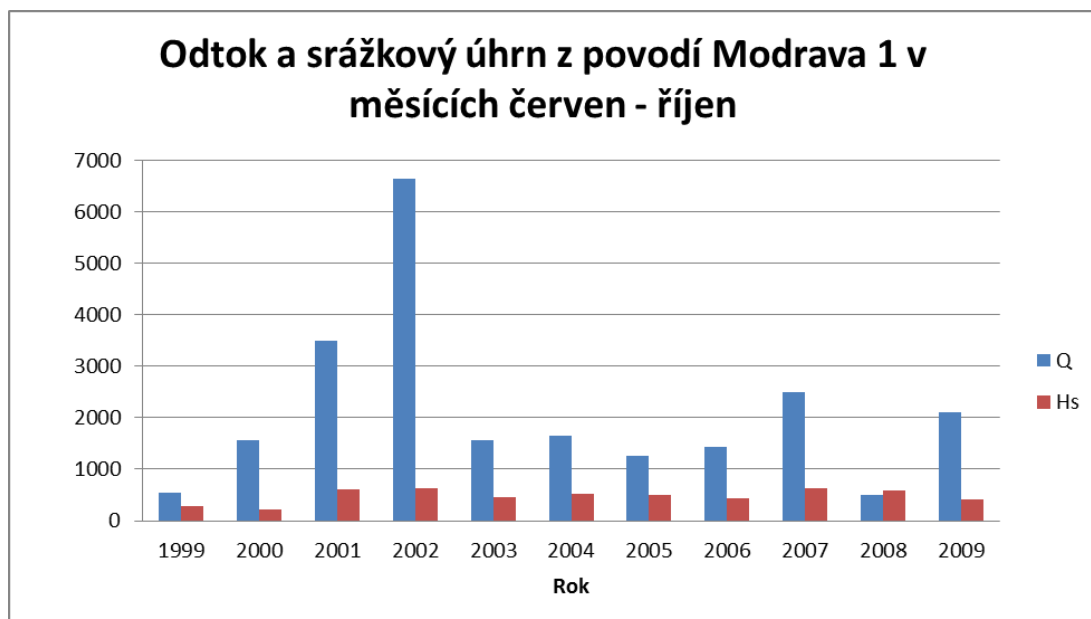
8.4 Analýza ve vegetačním období

Období jako vegetační bylo vybráno mezi měsíci červnem a říjnem, které zároveň vykazovala dlouhodobější soubor dat. Bylo zkoumáno množství dat, které bylo k dispozici a množství odtoku a srážek v povodích. Množství naměřených dat je uvedeno v přílohách a barevně rozlišeno dle jejich kvality, resp. množství a přesnosti. Zelenou jsou znázorněna data s více jak 95 % množství, žlutě od 50 – 95 % a červeně do 50 %.

Ze samostatného vyhodnocení vyplývá, že nejvodnějším rokem ve vegetačním období byl rok 2002, který byl již zmíněn v souvislosti s povodněmi.

| rok | $Q_{VI-X} [\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$ | $Hs_{VI-X} [\text{mm}]$ |
|------|---|-------------------------|
| 1999 | 546,54 | 290,8 |
| 2000 | 1564,90 | 224,4 |
| 2001 | 3496,30 | 617,4 |
| 2002 | 6647,07 | 622,0 |
| 2003 | 1562,12 | 460,4 |
| 2004 | 1646,17 | 513,8 |
| 2005 | 1253,91 | 497,4 |
| 2006 | 1440,14 | 435,2 |
| 2007 | 2497,08 | 626,4 |
| 2008 | 489,67 | 587,4 |
| 2009 | 2111,65 | 415,2 |

Tab. č. 6: Přehled odtoku a srážkového úhrnu ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 1.



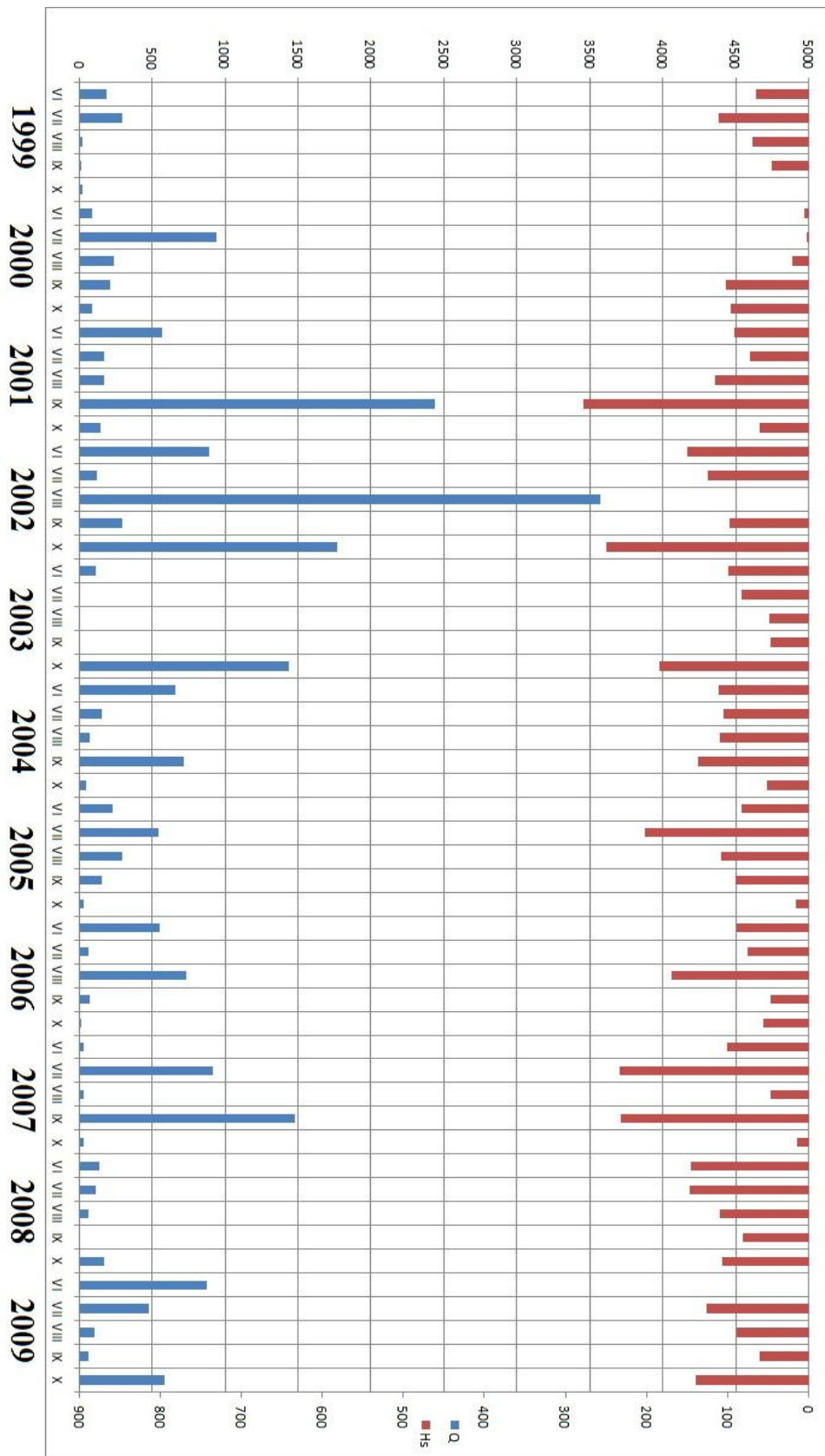
Obr. č. 13: Odtok a srážkový úhrn ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 1.

Vodnost roku 2002 je nezpochybnitelná i s vlivem na následných povodních. Období v roce 2008 vykazuje vyšší srážkový úhrn než samotný odtok (s ohledem na rozdílné jednotky, popř. převést na $\text{mm}\cdot\text{hod}^{-1}$, resp. vydělit hodnotou 277,77778). Tato skutečnost byla ovlivněna vysokou sněhovou pokrývkou během zimy v hydrologickém roce 2008.

Výsledky naznačují, že žádný měsíc z vegetačního období signifikantně nevykazuje odtok než v měsících jiných. Měsíci z nejvyšším odtokem v tomto období se jeví srpen a září. Hodnoty srážkového úhrnu byly naměřeny nejvíce v červnu a září.

| | Q [l.s ⁻¹] | Hs [mm] |
|------|------------------------|---------|
| VI | 4341,18 | 937,2 |
| VII | 3806,03 | 1280,8 |
| VIII | 5303,81 | 883,4 |
| IX | 5452,82 | 1217,2 |
| X | 4351,71 | 971,8 |

Tab. č. 7: Přehled sum odtoku a srážkového úhrnu ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 1.



Obr. č. 14: Odtok a srážkový úhrnu ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava I vyjádřené v jednotlivých měsících.

| rok | Q _{VI-X} [l.s ⁻¹] | Hs _{VI-X} [mm] |
|------|--|-------------------------|
| 1999 | 1655,64 | 341,2 |
| 2000 | 3715,22 | 462,4 |
| 2001 | 7076,97 | 549,4 |
| 2002 | 6425,08 | 505,8 |
| 2003 | 2071,28 | 490,2 |
| 2004 | 5503,84 | 780,6 |
| 2005 | 5553,66 | 635,2 |
| 2006 | 6632,29 | 560,6 |
| 2007 | 4999,69 | 715,4 |
| 2008 | 3963,90 | 623,8 |
| 2009 | 8542,44 | 751,6 |

Tab. č. 8: Přehled odtoku a srážkového úhrnu ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 2.

Období sucha v letech 1999 a 2003 na českém území potvrzují naměřené hodnoty z těchto experimentálních povodí. Hodnoty za vyšetřovaných 5 měsíců téměř nepřekračují hodnotu 2 000 l.s⁻¹.

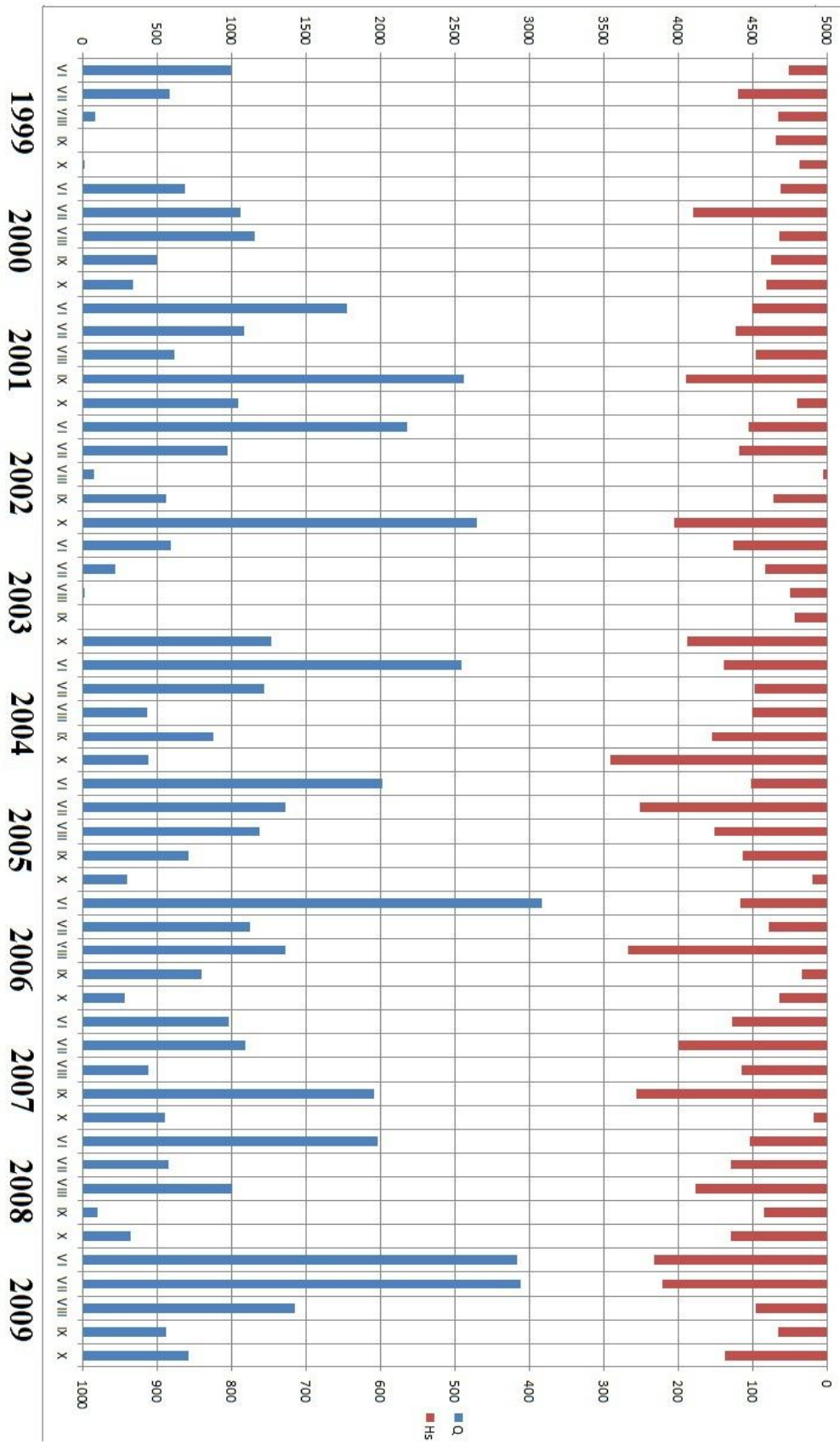


Obr. č. 15: Odtok a srážkový úhrn ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 2.

Nejvodnější měsíc je především červen a červenec, což může být ještě ovlivněno z tání sněhu. Srážkový úhrn je velmi vyrovnaný na tomto povodí.

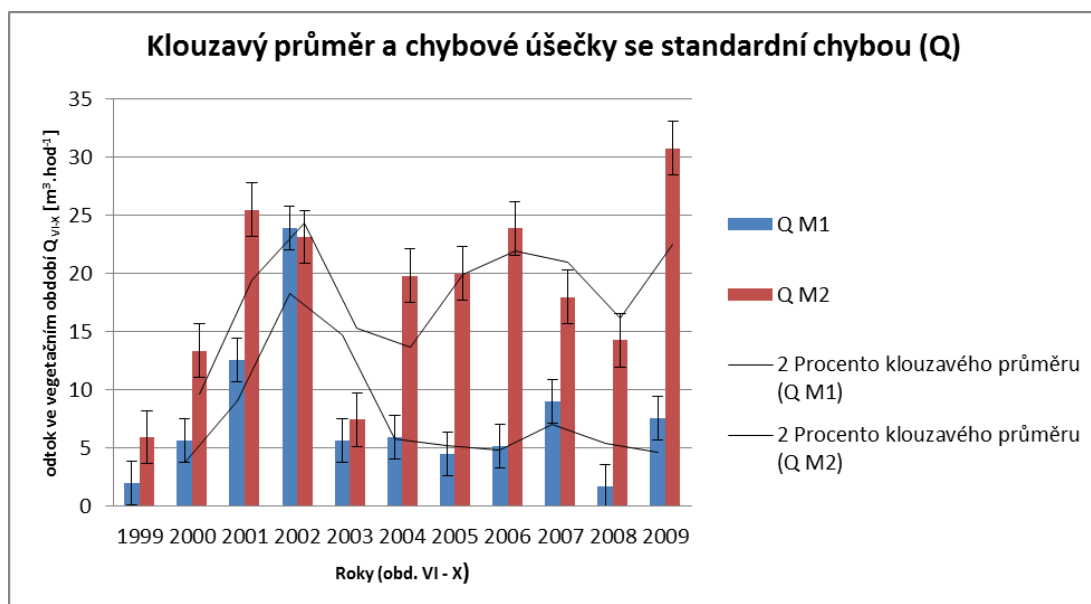
| | Q [l.s ⁻¹] | Hs [mm] |
|------|------------------------|---------|
| VI | 19713,67 | 1265,8 |
| VII | 12197,15 | 1599,8 |
| VIII | 7750,8 | 1185,2 |
| IX | 8595,38 | 1154 |
| X | 7883,01 | 1211,4 |

Tab. č. 9: Přehled sum odtoku a srážkového úhrnu ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 2.

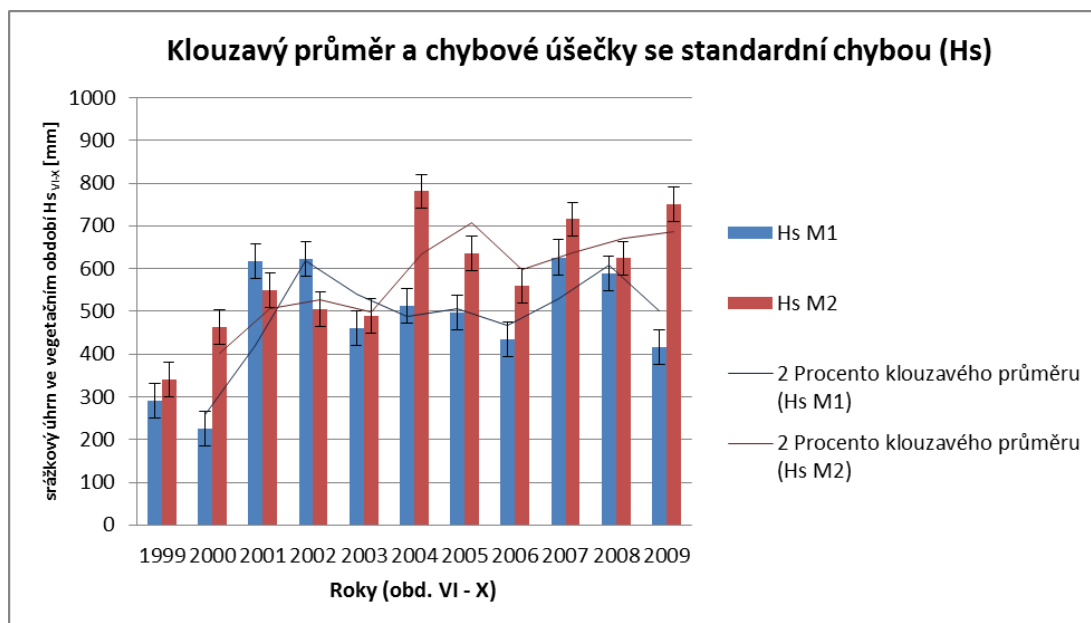


Obr. č. 16: Odtok a srážkový úhrn ve vegetačním období (červen – říjen) v letech 1999 – 2009 na povodí Modrava 2 vyjádřené v jednotlivých měsících.

Pro vyrovnání pozorovaných souborů a veličin bylo stanoveno u vyjádření odtoku a srážkového úhrnu pro roky 1999 – 2009 ve vegetačním období, tj. od června do října, vyrovnání klouzavými průměry. Vyrovnání bylo provedeno u homogenních souborů uvedených hydrologických veličin, kde byly hodnoty jevu vynášeny ve stejných časových intervalech (roky). Byly vypočteny postupné průměry z 11-ti letého období za sebou jdoucích prvků, vypočtený průměr se přisuzuje středu zvoleného intervalu období. Vyjádření klouzavých průměru udávají grafy č. 15 a 16. Součástí grafů jsou chybové úsečky se standardní chybou, vyjádřená svislou úsečkou.



Obr. č. 17: Znárodnění klouzavého průměru a chybových úseček se standardní chybou pro odtok na povodích Modrava 1 a Modrava 2 v letech 1999 – 2009 v období červen - říjen.



Obr. č. 18: Znázornění klouzavého průměru a chybových úseček se standardní chybou pro srážkový úhrn na povodích Modrava 1 a Modrava 2 v letech 1999 – 2009 v období červen - říjen.

Znázorněné a vypočtené klouzavé průměry tvoří nový a vyrovnanější soubor.

Součinitel odtoku pro povodí Modrava 1 a Modrava 2 ve vegetačním období v letech 1999 až 2009 znázorňuje následující tabulka:

| M1 | Q [l.s ⁻¹] | srážky [mm] | odtok [mm] | odt.souč. |
|------|------------------------|-------------|------------|--------------|
| 1999 | 546,54 | 290,8 | 1,968 | 0,007 |
| 2000 | 1564,9 | 224,4 | 5,634 | 0,025 |
| 2001 | 3496,3 | 617,4 | 12,587 | 0,020 |
| 2002 | 6647,07 | 622 | 23,929 | 0,038 |
| 2003 | 1562,12 | 460,4 | 5,624 | 0,012 |
| 2004 | 1646,17 | 513,8 | 5,926 | 0,012 |
| 2005 | 1253,91 | 497,4 | 4,514 | 0,009 |
| 2006 | 1440,14 | 435,2 | 5,185 | 0,012 |
| 2007 | 2497,08 | 626,4 | 8,989 | 0,014 |
| 2008 | 489,67 | 587,4 | 1,763 | 0,003 |
| 2009 | 2111,65 | 415,2 | 7,602 | 0,018 |

Tab. č. 10: Výsledky součinitele odtoku na povodí Modrava 1 v jednotlivých letech (červen – říjen).

| M2 | Q [l.s ⁻¹] | srážky [mm] | odtok [mm] | odt.souč. |
|------|------------------------|-------------|------------|--------------|
| 1999 | 1655,64 | 341,2 | 5,960 | 0,017 |
| 2000 | 3715,22 | 462,4 | 13,375 | 0,029 |
| 2001 | 7076,97 | 549,4 | 25,477 | 0,046 |
| 2002 | 6425,08 | 505,8 | 23,130 | 0,046 |
| 2003 | 2071,28 | 490,2 | 7,457 | 0,015 |
| 2004 | 5503,84 | 780,6 | 19,814 | 0,025 |
| 2005 | 5553,66 | 635,2 | 19,993 | 0,031 |
| 2006 | 6632,29 | 560,6 | 23,876 | 0,043 |
| 2007 | 4999,69 | 715,4 | 17,999 | 0,025 |
| 2008 | 3963,9 | 623,8 | 14,270 | 0,023 |
| 2009 | 8542,44 | 751,6 | 30,753 | 0,041 |

Tab. č. 11: Výsledky součinitele odtoku na povodí Modrava 2 v jednotlivých letech (červen – říjen).

Povodí pokryté pasekou Modrava 2 vykazuje výrazně vyšší hodnoty součinitele odtoku než povodí Modrava 1 s odumřelým lesem, resp. zmlazeným lesem. Celkový průměrný součinitel odtoku na M1 činí 0,016 a na M2 0,031. Nejvyšší hodnota v rámci stanoveného intervalu (červen – říjen) v jednotlivých letech na obou povodích činí 0,046 shodně na povodí M2 v letech 2001 a 2002. Naopak nejnižší hodnota byla zaznamenána na povodí Modrava 1 v roce 2008 v hodnotě 0,003.

8.5 Povodňové vlny a vlny s velmi vysokým odtokem

Na experimentálních povodích Modrava 1 a Modrava 2 byly sledovány a vyšetřovány vybrané povodňové vlny a vlny s velmi vysokým odtokem. Studie se zaměřila na vlny s bezchybným datovým podkladem. Na povodí Modrava 1 bylo vybráno celkem 10 vln s jedním vrcholem a 14 vln s více vrcholy. Na povodí Modrava 2 se zvolilo celkem 10 vln s jedním vrcholem a 12 vln s více vrcholy. Pro všechny vlny s jedním vrcholem se uvažovala studie v rámci 72 hodinového intervalu. Vlny s více vrcholy měly dobu trvání 72 hodin až 216 hodin a nesměly být významně ovlivněny táním sněhu nebo nejasnými srážkovými úhrny, které přecházely kulminačními odtoku. Pro výběr vln byl důležitý kulminační průtok vyšší

než hodnota $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato podmínka byla stanovena na základě potřeby vyhodnocování extrémnějších podmínek.

Vlny dostaly označení podle následujících parametrů (charakteristik): první 2 znaky (označení povodí), následující dvojčíslí (hydrologický rok), poslední čtyřciferné číslo (počátek vlny v relativním čase).

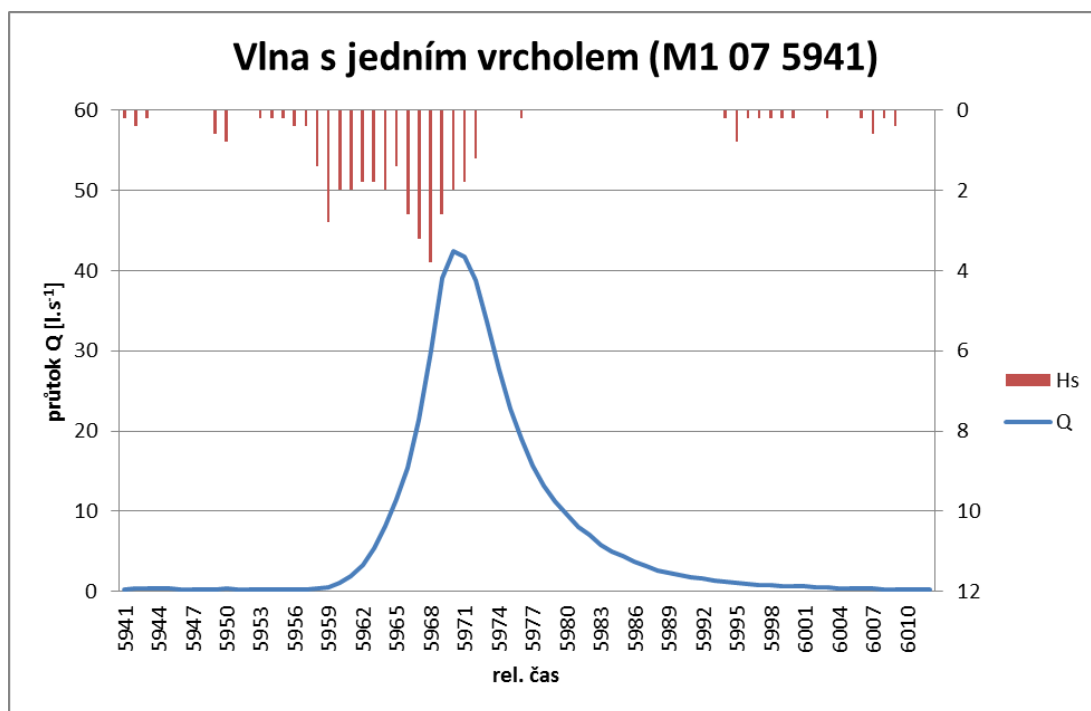
Např.: M1 07 5941

M1 ... označení povodí = Modrava 1

07 ... hydrologický rok = 2007

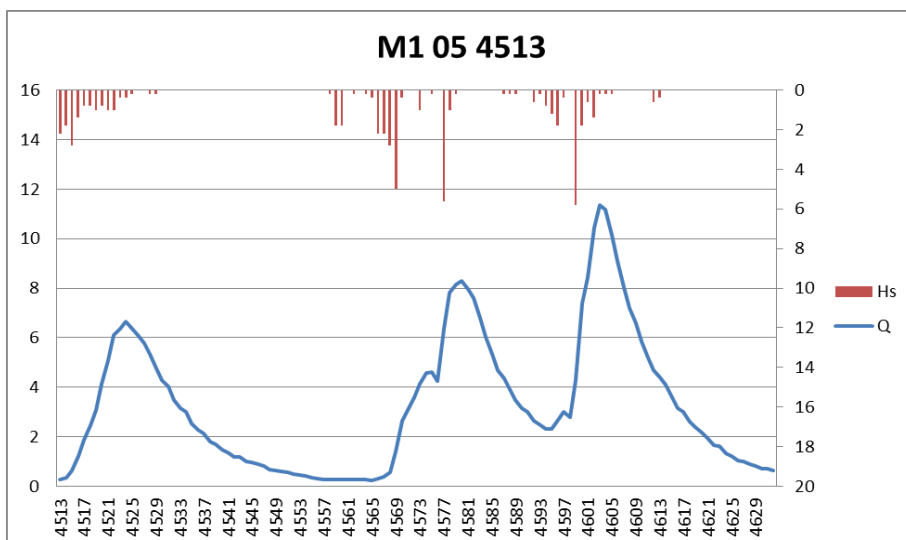
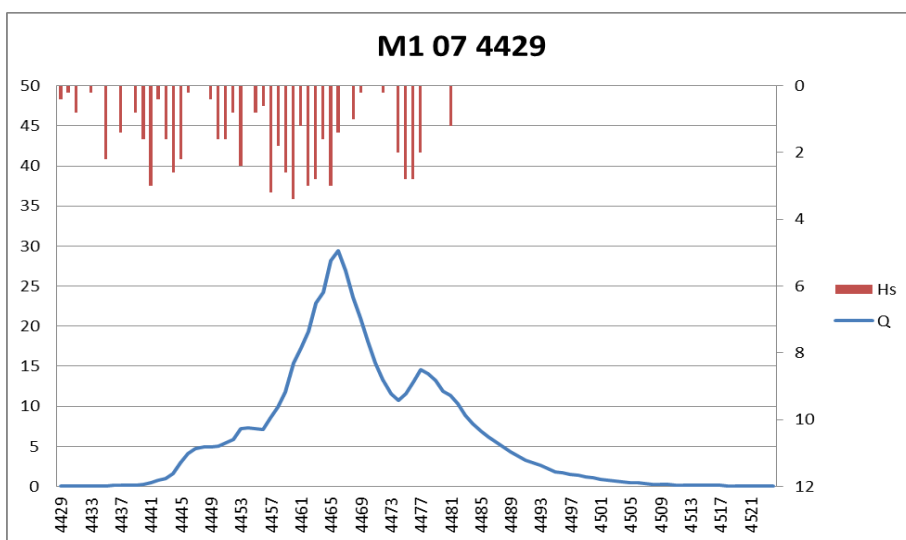
5941 ... počátek vlny = relativní čas 5941 (datum 5. 9. 2007 13:00)

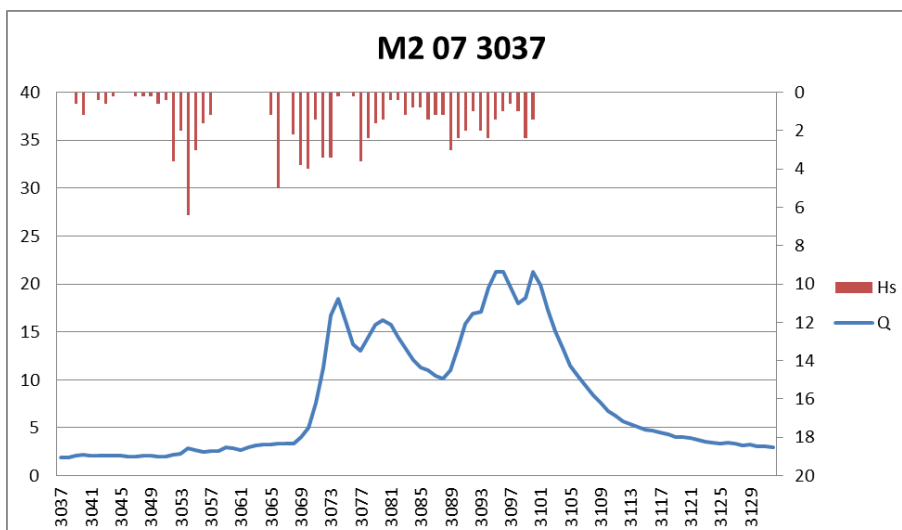
Vlny s jedním vrcholem měli téměř ve všech případech na obou povodích podobný časový průběh a tvar. Na ukázkou je uvedena jedna událost a ostatní vlny jsou vyjádřeny v příloze.



Obr.č. 19: Vlna s jedním vrcholem (M1 07 5941) – pouze pro ilustraci.

Vlny s více vrcholy měli vždy rozdílný čas trvání, resp. pozorování. Jejich kulminační průtok byl buď hned na začátku (projevil se ihned po srážce) nebo mu předcházela zvýšený průtok s následným odtokovým poklesem a po něm až následovala kulminace. Třetí možností byla událost s více kulminačními vrcholy za sebou. Typické epizody znázorňují následující grafy. Ostatní vlny s více vrcholy jsou uvedeny v příloze.





Obr.č. 20: Vlny s více vrcholy – pouze pro ilustraci.

Vyjádření vybraným povodňových vln a vln s velmi zvýšeným průtokem jsou znázorněny v tabulce. Jedná se o charakteristiky se uvedené v metodické části s vysvětlením parametrů.

Modrava 1:

| ozn. | t | měsíc | i_{MAX} | Q_K | i_D | Hs | T_{LP} | T_D | T_H | T_V | T_{SO} |
|-------------------|-----------|------------|--------------------|-------------------|--------------------|------|----------|-------|-------|-------|----------|
| | hod | | mm.h ⁻¹ | l.s ⁻¹ | mm.h ⁻¹ | mm | hod | hod | hod | hod | hod |
| M1 99 7297 | 72 | XI | 9,6 | 37,46 | 5,23 | 26,4 | 1 | 6 | 7 | 1 | 0 |
| M1 02 7441 | 72 | IX | 6,6 | 75,02 | 2,13 | 81 | 28 | 38 | 54 | 25 | 16 |
| M1 02 3769 | 72 | VII | 6,6 | 64,71 | 3,07 | 73,6 | 16 | 24 | 42 | 7 | 13 |
| M1 02 6937 | 72 | X | 5,8 | 27,86 | 1,34 | 34,8 | 26 | 26 | 46 | 7 | 4 |
| M1 04 6361 | 72 | IX | 7,4 | 59,63 | 3,13 | 84,4 | 27 | 27 | 42 | 18 | 2 |
| M1 07 7477 | 72 | XI | 4,8 | 30,06 | 1,89 | 13,2 | 7 | 7 | 23 | 7 | 5 |
| M1 07 8101 | 72 | XII | 5,2 | 24,98 | 2,32 | 39,4 | 17 | 17 | 32 | 6 | 7 |
| M1 07 0001 | 72 | I | 11,2 | 18,59 | 2,75 | 33 | 13 | 12 | 20 | 4 | 3 |
| M1 07 5941 | 72 | IX | 3,8 | 42,37 | 1,71 | 30,8 | 18 | 18 | 36 | 11 | 2 |
| M1 09 2989 | 72 | V | 5,2 | 24,21 | 2,63 | 15,8 | 6 | 6 | 17 | 6 | 4 |

Tab. č. 12: Přehled vybraných vln s jedním vrcholem na povodí Modrava 1.

| ozn. | t | měsíc | i_{MAX} | Q_K | i_D | Hs | T_{LP} | T_D | T_H | T_V | T_{SO} |
|------------|-----|-------|--------------------|-------------------|--------------------|------|----------|-------|-------|-------|----------|
| | hod | | mm.h ⁻¹ | l.s ⁻¹ | mm.h ⁻¹ | mm | hod | hod | hod | hod | hod |
| M1 99 4537 | 72 | VII | 6,8 | 14,38 | 1,11 | 39,8 | 36 | 31 | 41 | 17 | 1 |
| M1 01 3841 | 72 | VII | 1,6 | 12,06 | 0,74 | 23 | 31 | 31 | 55 | 22 | 2 |
| M1 01 6661 | 72 | X | 5,4 | 53,08 | 2,39 | 62,2 | 26 | 26 | 46 | 16 | 1 |
| M1 04 3673 | 144 | VI | 4,2 | 20,32 | 1,48 | 37 | 25 | 25 | 51 | 18 | 2 |
| M1 05 4513 | 120 | VII | 5,8 | 11,37 | 0,88 | 40,6 | 46 | 31 | 55 | 35 | 4 |
| M1 06 5713 | 120 | VIII | 6,8 | 34,01 | 0,98 | 48,2 | 49 | 29 | 51 | 26 | 1 |
| M1 07 0409 | 96 | I | 6,8 | 62,81 | 1,14 | 26,2 | 23 | 17 | 85 | 11 | 1 |
| M1 07 4429 | 96 | VII | 3,4 | 29,37 | 1,31 | 49,8 | 38 | 31 | 58 | 24 | 6 |
| M1 07 7585 | 96 | XI | 4,8 | 43,88 | 1,83 | 45,8 | 25 | 24 | 68 | 21 | 23 |
| M1 07 3049 | 96 | V | 5,8 | 29,03 | 1,42 | 72,4 | 51 | 42 | 59 | 30 | 46 |
| M1 07 4825 | 72 | VII | 10,8 | 14,6 | 3,88 | 31 | 8 | 5 | 24 | 7 | 7 |
| M1 07 6049 | 72 | IX | 8,4 | 68,61 | 3,29 | 49,4 | 15 | 13 | 38 | 11 | 2 |
| M1 09 4753 | 72 | VII | 5 | 12,36 | 2,04 | 53 | 26 | 23 | 27 | 5 | 21 |
| M1 09 4897 | 72 | VII | 20,2 | 12,36 | 3,4 | 30,6 | 10 | 7 | 19 | 9 | 8 |

Tab. č. 13: Přehled vybraných vln s více vrcholy na povodí Modrava 1.

Modrava 2:

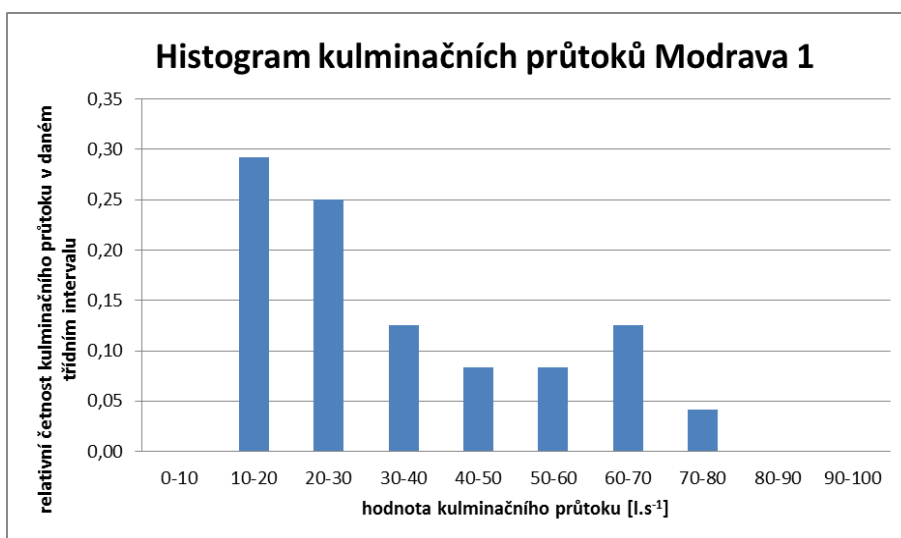
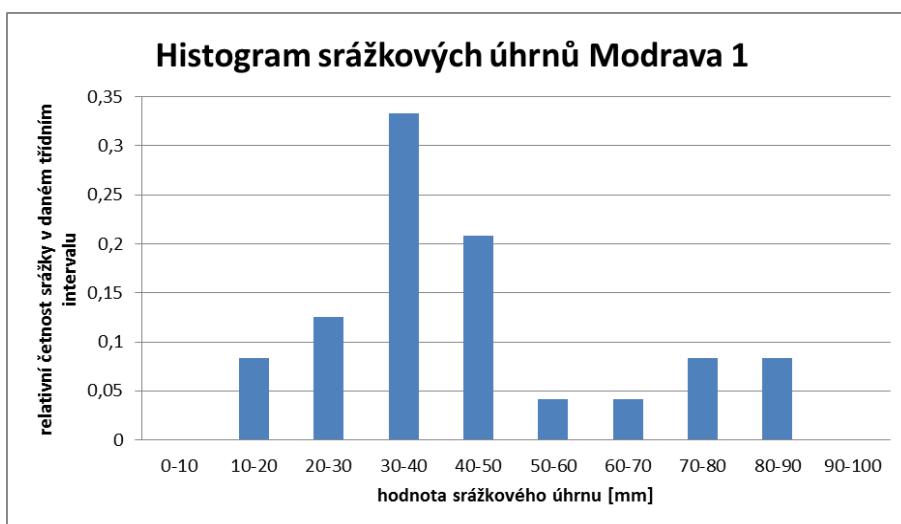
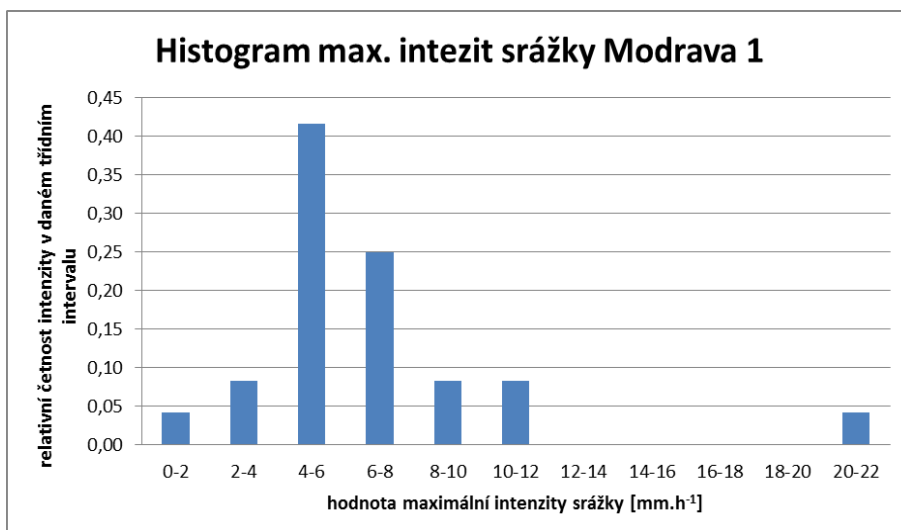
| ozn. | t | měsíc | i_{MAX} | Q_K | i_D | Hs | T_{LP} | T_D | T_H | T_V | T_{SO} |
|------------|-----|-------|--------------------|-------------------|--------------------|------|----------|-------|-------|-------|----------|
| | hod | | mm.h ⁻¹ | l.s ⁻¹ | mm.h ⁻¹ | mm | hod | hod | hod | hod | hod |
| M2 99 7297 | 72 | XI | 15,8 | 30,23 | 4,64 | 23,2 | 5 | 5 | 14 | 5 | 0 |
| M2 00 5005 | 72 | VII | 4,8 | 23,61 | 2,13 | 19,2 | 24 | 8 | 62 | 8 | 1 |
| M2 07 7477 | 72 | XI | 6,4 | 13,29 | 1,97 | 13,8 | 7 | 7 | 19 | 7 | 5 |
| M2 07 7600 | 72 | XI | 5,2 | 35,71 | 2,99 | 41,8 | 49 | 14 | 85 | 22 | 18 |
| M2 07 0001 | 72 | I | 10,8 | 55,04 | 4,12 | 49,4 | 12 | 12 | 41 | 6 | 1 |
| M2 07 4411 | 72 | VII | 4,8 | 27,86 | 2,3 | 27,6 | 12 | 12 | 29 | 9 | 3 |
| M2 07 5929 | 72 | IX | 5,6 | 62 | 3,22 | 54,8 | 17 | 17 | 44 | 10 | 2 |
| M2 08 1693 | 72 | III | 10,6 | 12,06 | 5,36 | 48,2 | 13 | 9 | 44 | 11 | 10 |
| M2 08 6553 | 72 | IX-X | 5 | 12,77 | 2,52 | 42,8 | 17 | 17 | 24 | 5 | 8 |
| M2 09 6793 | 72 | X | 7 | 30,23 | 3,7 | 29,8 | 8 | 8 | 41 | 4 | 1 |

Tab. č. 14: Přehled vybraných vln s jedním vrcholem na povodí Modrava 2.

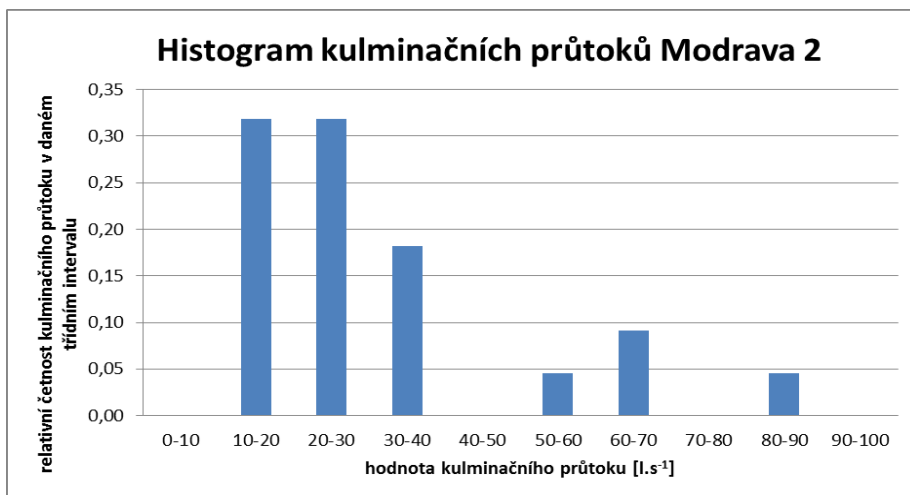
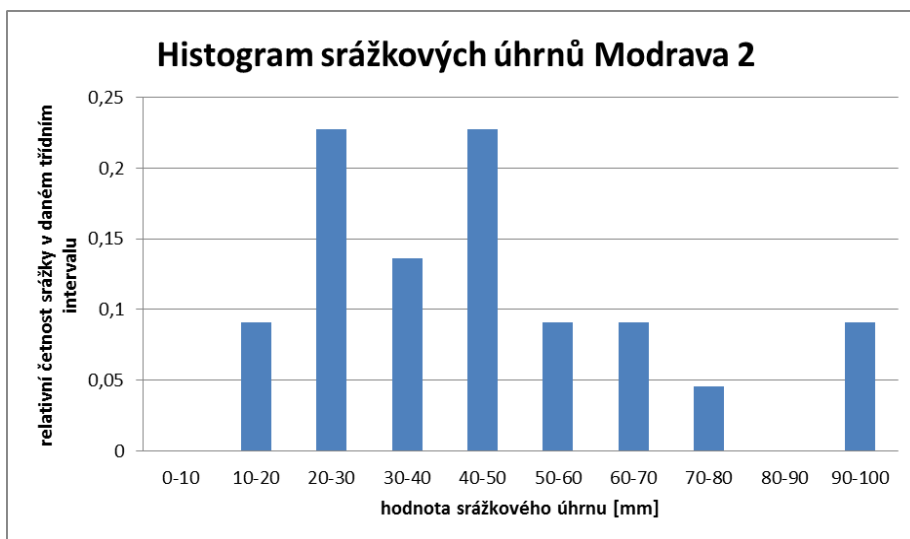
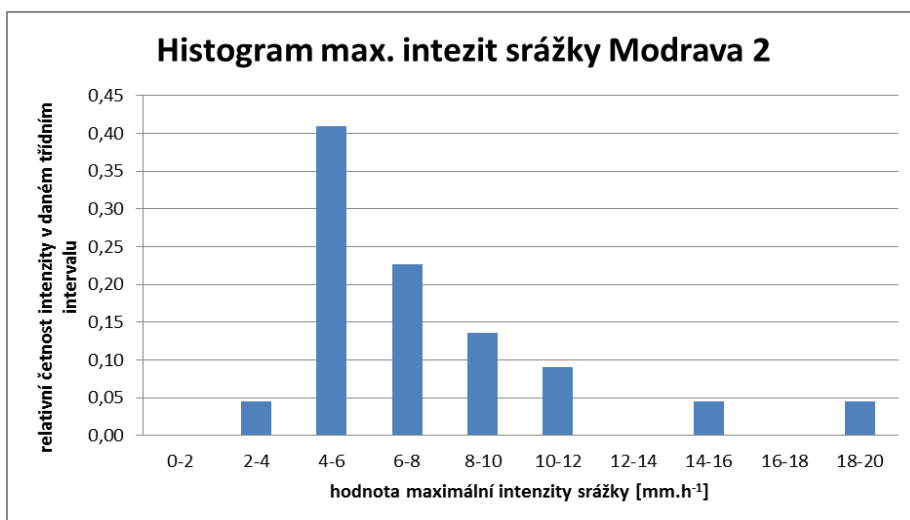
| ozn. | t | měsíc | i_{MAX} | Q_K | i_D | Hs | T_{LP} | T_D | T_H | T_V | T_{50} |
|-------------------|------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | hod | | mm.h ⁻¹ | l.s ⁻¹ | mm.h ⁻¹ | mm | hod | hod | hod | hod | hod |
| M2 99 4537 | 72 | VII | 8,6 | 12,67 | 1,4 | 50,4 | 36 | 33 | 43 | 19 | 1 |
| M2 01 3793 | 144 | VI | 3,8 | 17,95 | 0,67 | 48,8 | 73 | 50 | 95 | 47 | 54 |
| M2 02 7441 | 72 | XI | 5,8 | 66,92 | 1,83 | 60,4 | 33 | 33 | 73 | 20 | 7 |
| M2 02 6433 | 72 | IX | 9,6 | 11,27 | 0,98 | 28,4 | 30 | 27 | 36 | 18 | 24 |
| M2 02 6661 | 72 | X | 4 | 22,14 | 1,21 | 32,8 | 27 | 25 | 51 | 12 | 1 |
| M2 02 6933 | 72 | X | 4,8 | 22,72 | 0,97 | 27,2 | 28 | 24 | 47 | 6 | 4 |
| M2 03 6649 | 216 | X | 6 | 30,06 | 1,42 | 92 | 65 | 57 | 29 | 10 | 0 |
| M2 03 3649 | 192 | VI | 5,6 | 29,88 | 1,22 | 61 | 50 | 34 | 58 | 19 | 1 |
| M2 04 6373 | 72 | IX | 7,4 | 80,22 | 3,01 | 99,4 | 33 | 31 | 45 | 17 | 18 |
| M2 07 3037 | 96 | V | 6,4 | 21,29 | 1,36 | 77,8 | 57 | 45 | 67 | 33 | 41 |
| M2 07 6025 | 96 | IX | 8 | 29,37 | 2,61 | 39,2 | 15 | 13 | 36 | 11 | 10 |
| M2 09 4897 | 96 | VII | 18,8 | 18,33 | 2,7 | 30 | 11 | 9 | 21 | 9 | 8 |

Tab. č. 15: Přehled vybraných vln s více vrcholy na povodí Modrava 2.

Vyhodnocení a zpracování vybraných charakteristik bylo stanoveno v metodice. Veškeré výsledky jsou uvedené v této kapitole. Jedná se především o vyhodnocení histogramů vybraných hydrologických jednotek a různých závislostí s obalovými čarami.



Obr. č. 21: Grafy histogramů (relativních četností) se zaměřením na maximální intenzitu, srážkový úhrn a kulminační průtok na povodí Modrava 1.



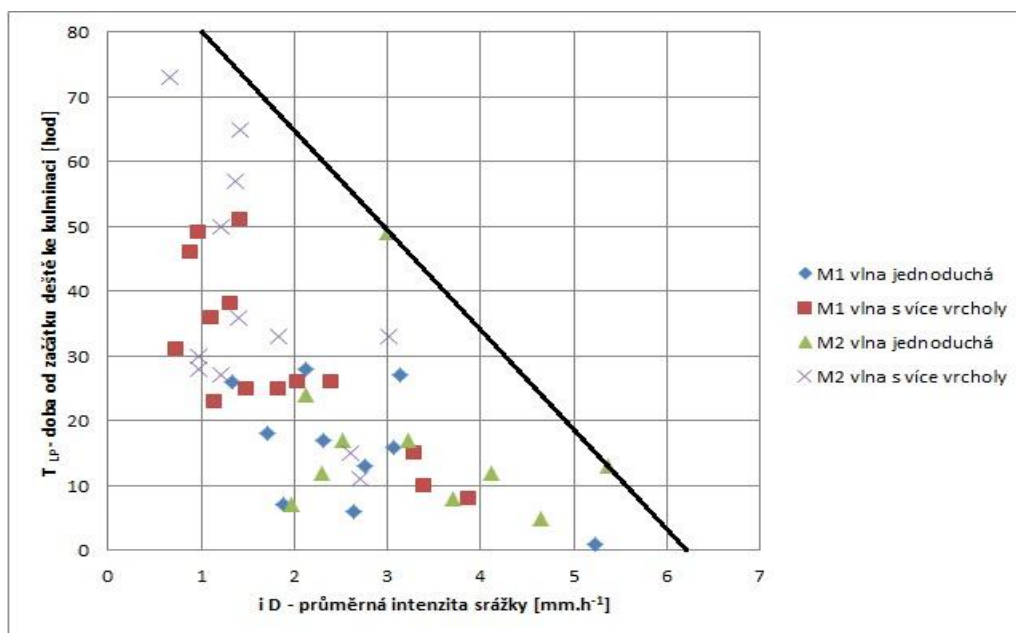
Obr. č. 22: Grafy histogramů (relativních četností) se zaměřením na maximální intenzitu, srážkový úhrn a kulminační průtok na povodí Modrava 2.

Nejvyšší relativní četnost maximálních intenzit se pohybuje na obou povodích v intervalu 4 – 6 mm.hod⁻¹ a dosahuje téměř 50 % četnosti vzhledem ke zbývajícím hodnotám. Lze tedy předpokládat, že intenzita u těchto vybraných vln a dosahuje nejčastěji hodnotu kolem 5 mm.hod⁻¹ a nejvyšší naměřená intenzita činila zhruba 20,2 mm.hod⁻¹.

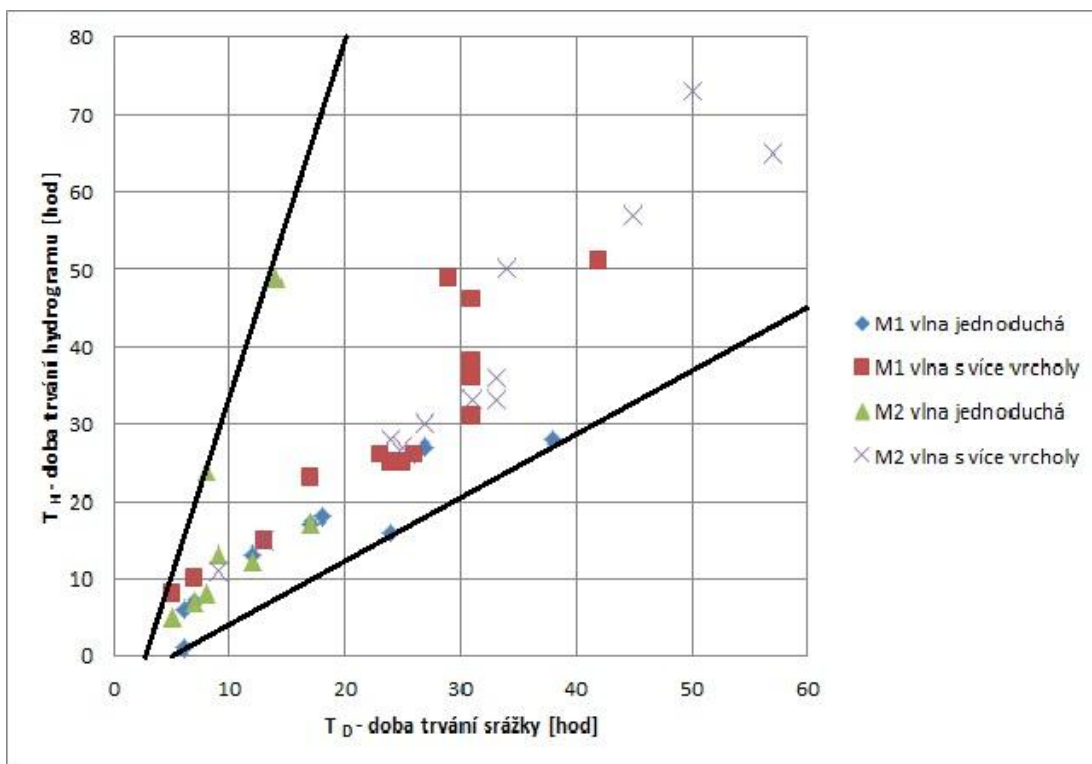
Četnost srážkového úhrnu u vybraných vln byla zjištěna ve více intervalech. Za nejčetnější hodnoty lze považovat širší interval mezi 20 – 50 mm. Jiné významnější výsledky nebyly s ohledem na srážkový úhrn v těchto vlnách zjištěny.

Relativní četnost pro kulminační průtok vykazuje nejčetnější hodnoty kolem 20 l.s⁻¹ a významný podíl tvoří interval 60 – 70 l.s⁻¹.

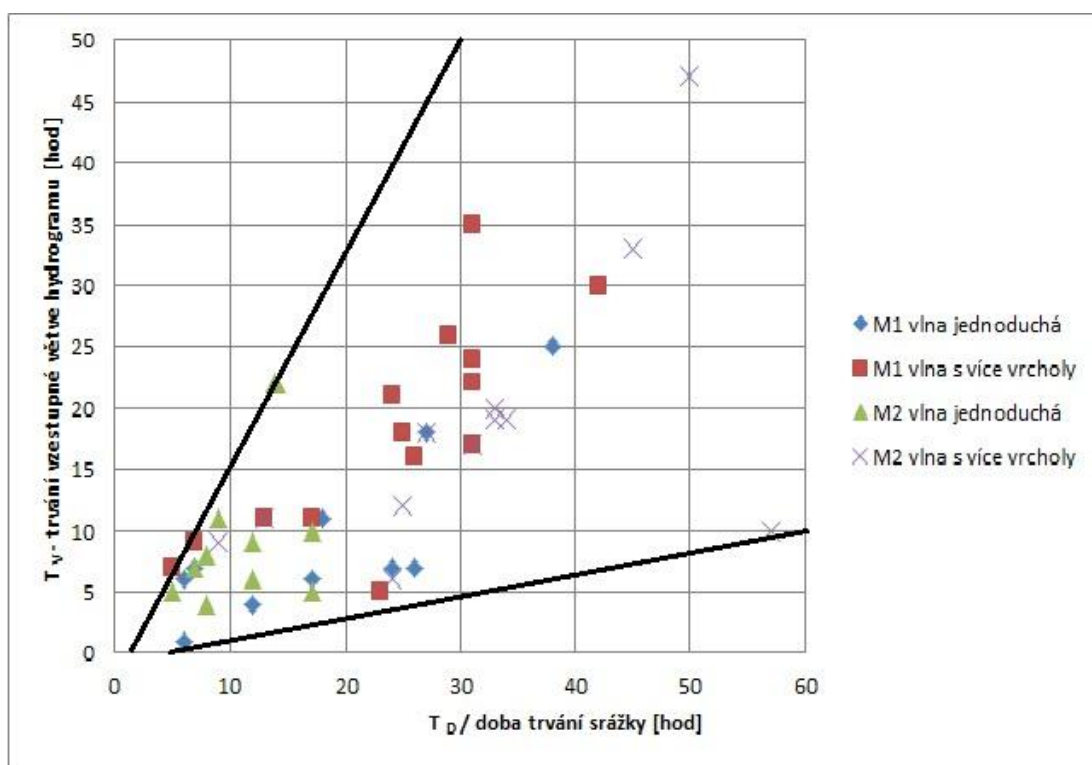
Závislosti vybraných charakteristik srážko-odtokových epizod zaznamenaných na experimentálních povodích Modrava 1 a Modrava 2 jsou uvedeny na obrázcích 23 až 30. V grafech jsou znázorněny předpokládané limitní hodnoty (obalové čáry) jednotlivých závislostí spojitou černou čarou. Data z jednoduchých průtokových vln a vln s více vrcholy jsou na obrázcích rozdílně označena data z jednotlivých experimentálních povodí.



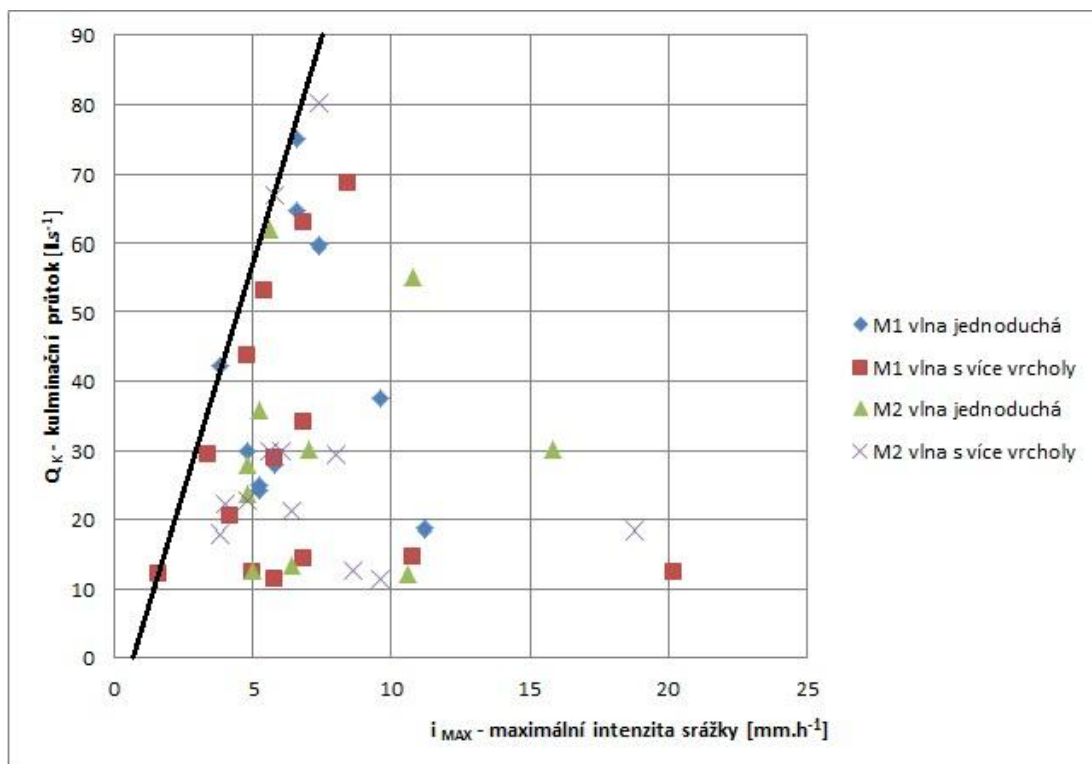
Obr. č. 23: Závislost doby od začátku deště do doby kulminace na průměrné intenzitě srážek.



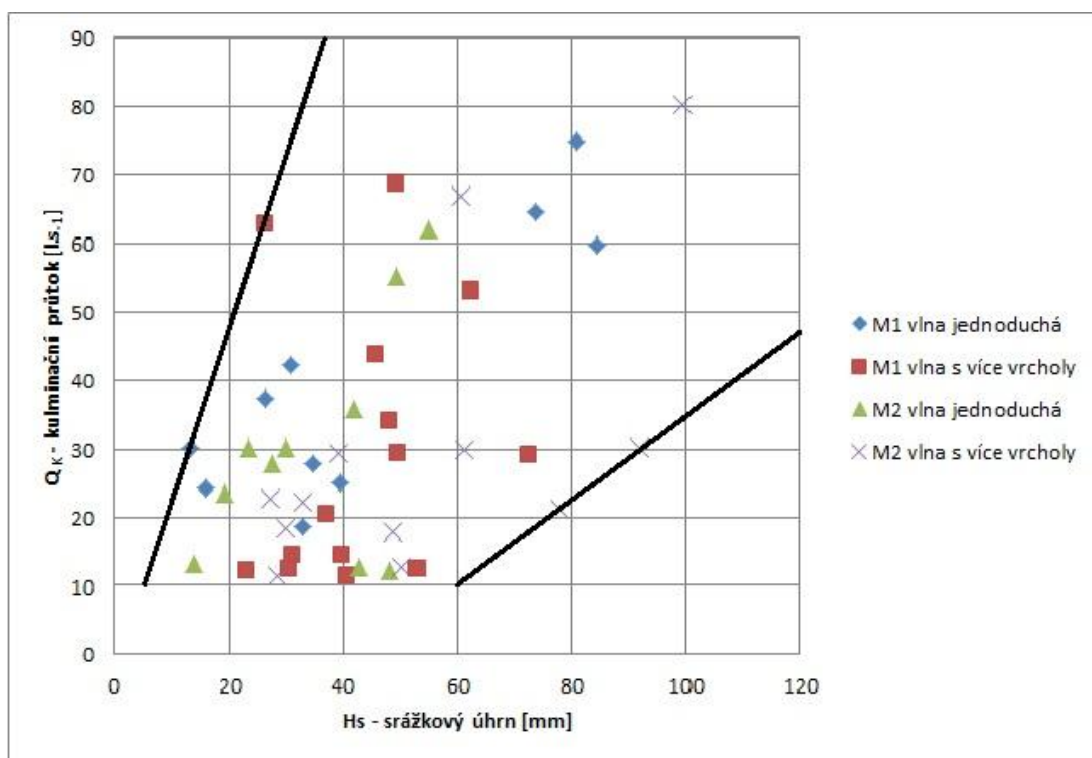
Obr. č. 24: Závislost doby trvání hydrogramu na době trvání srážek.



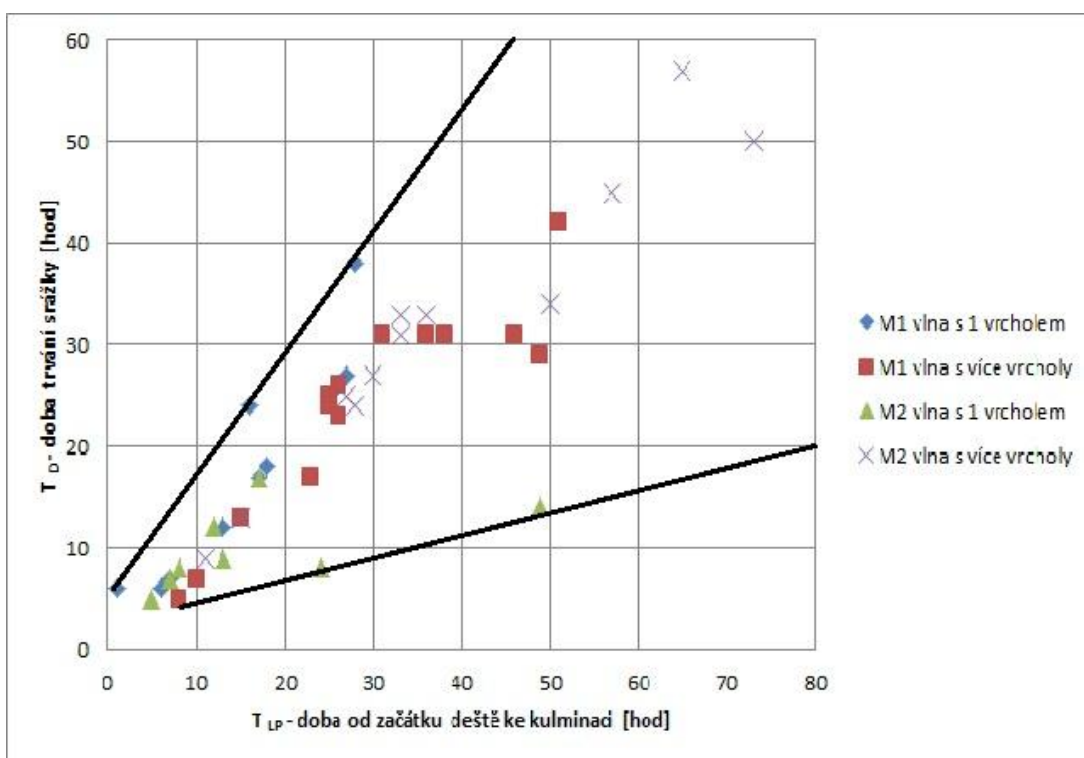
Obr. č. 25: Závislost doby trvání vzestupné větve hydrogramu na době trvání srážek.



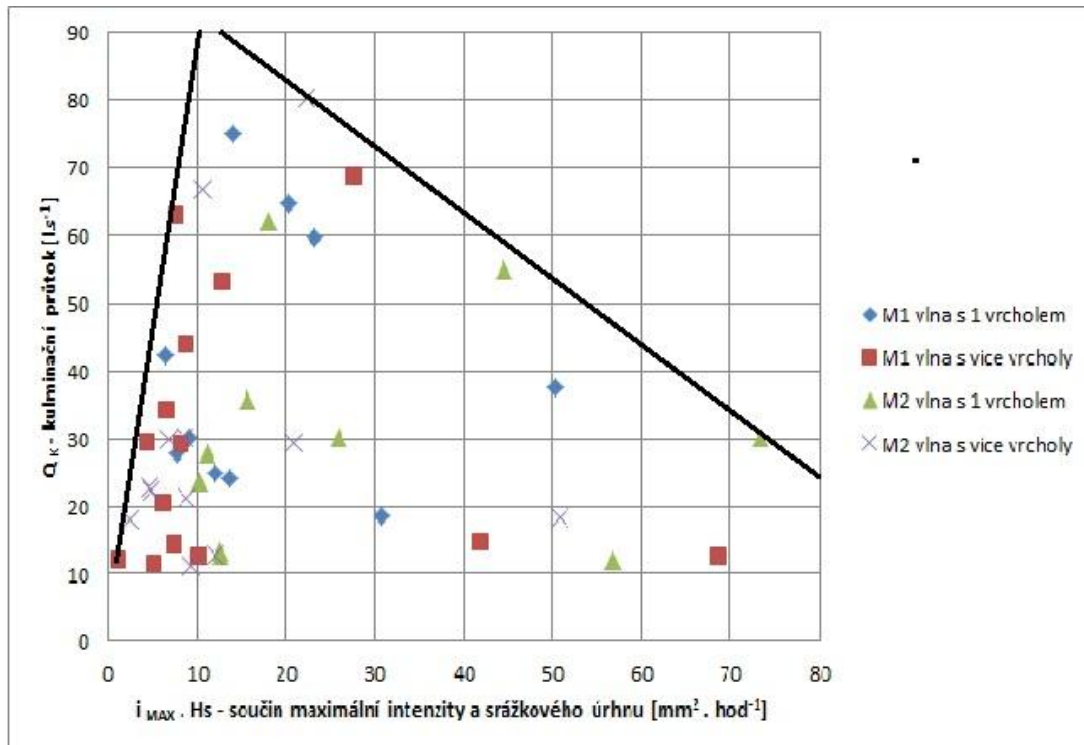
Obr. č. 26: Závislost velikosti kulminačního průtoky na maximální intenzitě srážek.



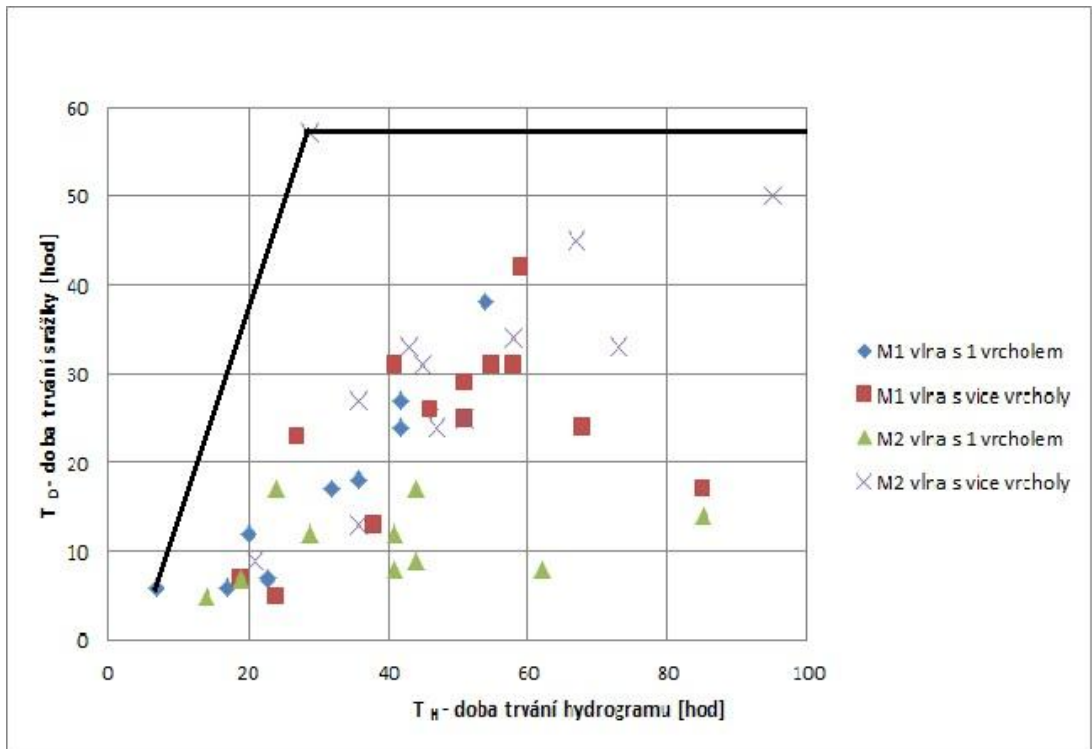
Obr. č. 27: Závislost velikosti kulminačního průtoky na velikosti srážkového úhrnu.



Obr. č. 28: Závislost doby od začátku deště ke kulminaci na době trvání srážky.



Obr. č. 29: Závislost součinu maximální intenzity a srážkového úhrnu na kulminační průtok.



Obr. č. 30: Závislost doby trvání hydrogramu a doby trvání srážky.

9 Diskuze

Po vybudování experimentálních povodí České zemědělské univerzity v Praze, kterou dnes spravuje Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování, uplynulo již přes téměř 14 let. Účel objasnění účinků hydrologických funkcí rozdílných kultur lesa na srážkoodtokovou bilanci dosud nebyl prokázán. Při vybudování vybraných experimentálních povodí ve vyšších partiích Šumavy se předpokládalo, že budou mít pro porovnávání hydrologických charakteristik obdobné vlastnosti a vykazovat rozlišné výsledky podle rozlišnosti vegetačního krytu. Vzdálenost mezi povodími Morava 1 a Modrava je vzdušnou čarou přibližně 6 km. Nejdůležitějším faktorem v těchto lokalitách ovlivňující odtok jsou srážky.

Veškeré parametry vycházejí z uvedených zdrojů uvedených v rešeršní části a především v části metodické. Z porovnání srážkových charakteristik a odtoků za tříleté období (2007 – 2009) vyplývá, že nejvyšší úhrny byly zaznamenány v roce 2007, což se neprojevovalo v takové míře na odtok, jelikož nejvyšší odtok byl zaznamenán v roce 2008. Důvodem může být vysoká zásoba sněhu v zimě, kterou srážkoměr nezaznamená a následné tání sněhu během jarních měsíců v roce 2008 s velmi vysokým odtokem.

Zaměření na extrémní odtokové události v jedenáctiletém období potvrzují následné povodňové události a období sucha. Extrémní odtok z roku 2002 na povodí Modrava 1 byl zapříčiněn pravděpodobně extrémní srážkovou událostí, kterou bohužel nelze podpořit údajem ze srážkoměru, který byl mimo provoz. Tato událost se podílela na povodních v České republice v uvedeném roce. Další 3 události s odtokem vyšším než $1\,000\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ v rámci roku 2008 na obou povodích byly způsobeny táním sněhu v měsících březnu a dubnu. Souvisejší data byla zaznamenávána v letech 1999 až 2009 v měsících červnu až říjnu. Toto období bylo označeno jako vegetační a z výsledků vyplývá, že nejvodnějším rokem byl opět rok 2002. Nejdeštivějším měsícem byl vyhodnocen červenec, což potvrzuje Albrecht (2003). Hodnota odtokového součinitele prokazuje, že retenční schopnost obou

horských povodí je velmi vysoká. Povodí Modrava 2 má podobnou reakci na srážkovou událost než povodí Modrava 1.

Z histogramů jsou patrné pravděpodobné znaky chování sledovaných veličin, i když statistické charakteristiky vybraných hodnot vykazují rozdílnost hlavním měřených veličin v běžné hydrologické praxi. Při porovnání histogramu (četností) maximálních intenzit je patrná podoba obou povodí. Většina (téměř 50%) maximálních intenzit se pohybuje v intervalu 4 až 6 mm.hod⁻¹, což bylo způsobeno především výběrem vln s vyšší hodnotou než 10 l.s⁻¹ za 1 hodinu. Většina (až 80 %) kulminačních průtoků měla hodnotu do 40 l.s⁻¹. Výskyt vyšších kulminačních průtoků byl vždy spojen s extrémními srážkovými úhrny. Z histogramů lze nalézt určité souvislosti a pravděpodobné znaky chování sledovaných veličin. K podobným závěrům na stejných povodích dospěl Máca et al. (2005).

V kapitole výsledky jsou mezi posledními vyhodnoceními znázorněny nejruznější závislosti hydrologických veličin a charakteristik. Z obrázku č. 23 vyplývá, že se doba od počátku deště ke kulminaci zkracuje se zvyšující se hodnotou průměrné intenzity příčinné srážky. Toto zkrácení doby je zapříčiněno nárůstem podílu povrchového odtoku na celkovém odtoku z povodí a potvrzuje jej Máca et al. (2005) a Pavlásek et al. (2006). Na obrázku je znázorněna čára, která udává jakousi horní hranici této závislosti. Další 3 závislosti (T_D/T_H , T_D/T_V a T_{LP}/T_D) ukazují na obrázcích č. 24, 25 a 28 spíše lineární závislosti dvou veličin. Závislost doby trvání hydrogramu na době trvání srážek (T_D/T_H) roste lineárním trendem. Hodnoty dob jsou téměř totožné, ovšem se zvyšující dobou trvání srážky postupně roste doba trvání hydrogramu přibližně o 10 hodin. Závislost mezi srážkovým úhrnem a kulminačním průtokem vykazuje minimální a maximální možnou hodnotu kulminačního průtoku při dané intenzitě srážek. Nepotvrdila se teze, že by se mohl kulminační průtok zvýšit s rostoucí intenzitou. Jedná se tedy spíše o 2 nezávislé veličiny, které mohou a nemusí být v užším společném vztahu. Limitní hodnoty ostatních závislostí mají spíše širší charakter a rozpětí a nelze z nich s určitostí vyvodit určité závěry.

10 Závěr

Diplomová práce byla věnována srážko-odtokovým událostem na malých horských povodích na Šumavě s rozdílným vegetačním pokryvem. Při analýzách hydrologických dat bylo zpracováno jedenáctileté období v letech 1999 až 2009 na experimentálních povodích Modrava 1 a Modrava 2. Požadavky na porovnání hydrologických charakteristik se podařilo splnit a výstupem práce jsou grafy v hodinových, dvaceti čtyřhodinových, měsíčních, pětíměsíčních a ročních intervalech. Dalšími výstupy jsou tabulky a podrobnější rozborů vybraných charakteristik.

Tato práce prokázala, že malá experimentální povodí mohou sloužit jako důvěryhodný zdroj informací pro mnoho oborů. Výsledky ukazují, že například povodním z roku 2002 na českém území předcházely zaznamenané extrémní odtokové události, naměřené v srpnu na povodí Modrava 1. Dalším poznatkem je skutečnost, že povodí pokryté pasekou vykazuje téměř dvakrát menší retenční schopnost než povodí s mladým podrostem.

Při analýze povodňových vln a vln s velmi vysokým průtokem byly zjišťovány relativní četnosti a závislosti vybraných charakteristik, u nichž byly stanoveny obalové čáry, resp. mezní hodnoty v grafech.

Diplomová práce navázala na bakalářskou práci a vytyčené cíle byly splněny. Přínosem této práce je prohloubení poznatků z malých horských povodí a určení předpokládaného vývoje při extrémnějších srážko-odtokových událostí, resp. jak se povodí může chovat při určitých hydrologických hodnotách. Veškeré výsledky se většinou shodovali s jinými autory na podobnou problematiku.

Z důvodů poměrně krátkého kontinuálního měření nelze stále vyvodit exaktní vliv vegetačního pokryvu na režim povodí, ale určité analýzy již naznačili rozdílné vlastnosti povodí. Od roku 2007 probíhá celoroční měření průtoku a úhrnu srážek na obou povodích a v budoucnu bude více podkladů a poznatků k diferencii těchto

povodí a jejich vlivu. Veškerá data mohou být poskytnuta se souhlasem KVHEM ke studijním a jiným účelům.

11 Přehled literatury

- 1) Balek J., 2006: Malá povodí jako trvalý zdroj informací. J. Hydrol. Hydromech. 54 (2), s. 96-105.
- 2) Best A., Zhang L., McMahon T., Western A. et Vertessy R., 2003: A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Murray-Darling Basin Commission, Canberra, ISBN 1 876 830 57 3.
- 3) Bíba M., Jařabáč M. et Vřcha Z., 2006: Poznatky z padesátiletého lesnicko-hydrologického výzkumu v Beskydských experimentálních povodích. In Zprávy lesnického výzkumu, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti Jíloviřtě-Strnady, Svazek 51, Číslo 1, s. 44-53, ISSN 0322-9688.
- 4) Bosch J.M. et Hewlett J.D., 1982: A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation. Journal of Hydrology 55, s. 3-23.
- 5) Brown A. E., Zhang L., McMahon T. A., Western A. W., Vertessy R. A., 2005: A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alternations in vegetation. Journal of Hydrology 310, s. 28-61.
- 6) Calder I. et Dye P., 2001: Hydrological impacts of invasive alien plants. Land Use and Water Resources Research 1 (7), s. 1-12.
- 7) ČZU, 2011: Experimentální povodí Modrava. FŽP ČZU KHVEM, Praha, cit. [27.2:2011], online: <http://www.kvhem.cz/vyzkum/povodi-modrava/>
- 8) Douglass J. E. et Swank W. T., 1972: Streamflow modification through management of eastern forest. Southeast. Forest Exp. Stn., USDA Forest Serv. Res. Pap. SE-94, 15 str.

- 9) Gallart F., Llorens P., Latron J. et Regüés D., 2002: Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (3), s. 527-537.
- 10) Geologická mapa ČR, [cit.: 22.2.2011], online:
http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g500&y=670000&x=1070000&r=250000&s=0
- 11) Hibbert A. R., 1967: Forest treatment effects on water yield. *International Symposium For Hydrology*, Pergamon, Oxford, s. 527-543.
- 12) Hrádek F., 1990: Maximální odtok z velmi malých povodí. *Disertační práce*, Vysoká škola zemědělská, Praha, 324 str.
- 13) Hrádek F. et Kuřík P., 2008: *Hydrologie*. 3. vydání, Skriptum FŽP ČZU, Praha, 272 str., ISBN 978-80-213-1744-4.
- 14) Hrádek F., Kuřík P., Pánková E. et Korytář M., 2000: Vliv změny lesních ekosystémů na hydrický režim krajiny. In Podrázský V., Ryšánková H., Vacek S. et Ulrichtová I., 2000: *Monitoring, výzkum a management ekosystémů Národního parku Šumava*, Sborník celostátní konference, Kostelec nad Černými lesy, ČZU, Lesnická práce, s. 38-43, ISBN 80-213-0674-2.
- 15) Chlebek A., Jařabáč M. et Hošek A., 1997: Dlouhodobé odtoky z malých lesnatých povodí. *Lesnictví-Forestry*, Volume 43, No. 10, s. 433-440.
- 16) Jačka L. et Pavlásek J., 2010: Vybrané hydropedologické charakteristiky podzolů v centrální oblasti NP Šumava. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. 52, č. 5, s.17-19, ISSN 0322-8916.
- 17) Jařabáč M., 2005: Povodně v malých lesnatých povodích. In *Zkušenosti z odstraňování škod po povodních*, Česká lesnická společnost a Jesenická lesnická společnost Lesy ČR, Sborník referátů ze semináře, Běla pod Pradědem – Filipovice, s. 37-40, ISBN 80-02-01702-1.

- 18) Kantor J., Krečmer V., Šach F. et Švihla V., 2003: Lesy a povodně. Souhrnná studie. MŽP, Praha, 48 str., ISBN 80-7212-255-X.
- 19) Kloze Z., 2008: Kvantitativní vývoj sněhové pokrývky na experimentálních povodích Modrava 2. Diplomová práce, FŽP ČZU, Praha, 70 str.
- 20) Kříž L., 2009: Vyhodnocení srážkových událostí na experimentálních povodích Modrava. Bakalářská práce, FŽP ČZU, Praha, 57 str.
- 21) Křovák F., Pánková E. et Doležal F., 2004: Vliv lesních ekosystémů na hydrický režim krajiny. Aktuality šumavského výzkumu II, Sborník z konference, Praha, s. 44-48.
- 22) Kulasová A., Pobřísllová J., Jiráček J., Hancvencel R., Bubeníčková L. et Bercha Š., 2006: Experimentální hydrologická základna Jizerské hory. J. Hydrol. Hydromech. 54 (2), s. 163-182.
- 23) Kuráž M., 2006: Hydrologické charakteristiky malého horského povodí. Vodní hospodářství, roč. 56, č. 8, s. 273-276.
- 24) Kuřík P., Pánková E., Křovák F. et Korytář F., 1999: Vliv změněných podmínek prostředí na hydrický režim krajiny. In Podrázský V., Vacek S. et Ulbrichtová I., 1999: Monitoring, výzkum a management ekosystémů Národního parku Šumava, Sborník celostátní konference, Kostelec nad Černými lesy, ČZU, Lesnická práce, s. 24-28, ISBN 80-213-0566-5.
- 25) Lane P., Best A., Hickel K. et Zhang L., 2003: The effect of afforestation on flow duration curves. Technical Report 03/13, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Clayton, Victoria, 25 str., ISBN 1 920813 03 9.
- 26) Laudon H., Sjöblom V., Buffam I., Seibert J. et Mörth M., 2007: The role of catchment scale and landscape characteristics for runoff generation of boreal streams. Journal of Hydrology 344, s. 198-209.
- 27) Máca P., Pavlásek J., Roub R., Ředinová J. et Skalská P., 2005: Analýza vybraných povodňových epizod. Zpráva spoluřešitele grantového projektu NAZV 1G46040 za aktivitu A02/05, KVH FLE, ČZU v Praze, Praha, 91 str.

- 28) Máca P., Ředinová J. et Pavlásek J., 2005: Analýza hydrologických dat z Modravských povodí. Sborník konference Hydrologie malého povodí, Praha, str. 209-216.
- 29) McMinn J. W. et Hewlett J. D., 1975: First-year rater yield increase after forest cutting: An alternative model, *Journal of Forestry* Vol. 73 No. 10, s. 654-655.
- 30) Meunier M., 1996: La cubierta forestal y las credits en las pequeñas cuencas de montaña. *Revista Unasyva* 47 (185), s. 29-37.
- 31) Myrabø S., 1986: Runoff studies in a small catchment. *Nordic Hydrology* 17, s. 335-346.
- 32) Pavlásek J., Máca P. et Ředinová J., 2006: Analýza hydrologických dat z Modravských povodí. *J. Hydrol. Hydromech.* 54 (2), s. 207-216.
- 33) Pavlásek J., Máca P., Křovák F., Pánková E. et Doležal F., 2005: Hydrologická funkce lesa na Modravských povodí. In *Sledování dynamiky obnovy lesa v oblasti postižené kůrovcem v Národním parku Šumava. Sborník referátů k VaV 620/8/03, ČZU, Praha, s. 17-23, ISBN 80-213-1410-9.*
- 34) Piñol J., Lledó M. J. et Escarré A., 1991: Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, northeast Spain). *Hydrological Sciences Journal* 36, s. 95-107.
- 35) Pizarro R., Araya S., Jordán C., Farias C., Flores J. P. et Bro P. B.: The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydorlogy* 327, s. 249-257.
- 36) Procházka J. et Brom J., 2008: Porovnání a dlouhodobý trend látkových toků tří malých povodí na Šumavě. In Šír M., Tesař M. et Lichner L., 2008: *Hydrologie malého povodí 2008. Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Praha, s. 247-254, ISBN 978-80-87117-03-0.*

- 37) Procházka J., Brom J. et Pechar L., 2009: The comparison of water and matter flows in three small catchments in the Šumava mountains. *Soil & Water Res.* 4 (Special Issue 2), s. 75-82.
- 38) Ripl W., 2003: Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transaction, the Royal Society of London B*, s. 1921-1934.
- 39) Sahin V. et Hall M., 1996: The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology* 178, s. 293-309
- 40) Soukup M. et Hrádek F., 1999: Optimální regulace povrchového odtoku z povodí. VÚMOP, Praha, 98 str., ISSN 1211-3972.
- 41) Swank W. T. et Johnson C. E., 1994: Small catchment research in the evaluation and development of forest management practices. In Moldan B. et Cerny J (eds): *Biogeochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research*, Chichester, Wiley, s. 383-408.
- 42) Swift L. W. et Swank W. T., 1981: Long term responses of streamflow following clearcutting and regrowth. *Hydrological Sciences – Bulletin* 26 (3), s. 245-256.
- 43) Švihla V., 2001: Vliv lesa na odtokové poměry na malém povodí. *Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy*, roč. 80, č. 2, cit.: [12.3.2011], online :
<http://lesprace.silvarium.cz/content/view/1328/85/>
- 44) Tesař M., Šír M., Dvorák I. J. et Lichner L., 2004: Influence of vegetative cover changes on the soil regime in headwater regions in the Czech Republic. *German IHP/HWRP National Committee to Unesco, Koblenz*, s. 57-72, ISSN 1614-1180.
- 45) Tesař M., Šír M., Krejča M. et Váchal J., 2008: Influence of vegetation cover on air and soil temperatures in Šumava mts. (Czech Republic). In *Conference papers, XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Ljubljana : Slovenian National Committee for the IHP Unesco, 8 str., ISSN 1755-1307.

- 46) Toebes C. et Ouryvaev V., 1970: Representative and experimental basins – A international guide for research and practice. Unesco, Paris, 348 str.
- 47) Unucka J., Hanzlová M., Židek D. et Adamec M., 2008: Modelování vlivu lesa na srážkoodtokové vztahy s pomocí GIS. *Vodní hospodářství*, roč. 58, č. 7, s. 225-231.
- 48) Vacek S. et Podrázský V., 2006: Přírodě blízké lesní hospodářství v podmínkách střední Evropy. *Lesnická práce*, ČZU v Praze, 74 str., ISBN 80-213-1561-X.
- 49) Valtýni J., 1998: Príspevok k poznaniu vplyvu lesnatosti malého povodia na odtok. *Lesnictví-Forestry*, Volume 44, No. 1, s. 23-31.
- 50) Vertessy R. A., 1999: The impacts of forestry on streamsflow: a review. *Forest Management for the Protection of Water Quality and Quantity – Proceedings of the Second Erosion in Forest Meeting*, Warburton, Victoria, Australia, s. 93-109.
- 51) Wattenbach M., Zebisch M., Hattermann F., Gottschalk P., Goemann H., Kreins P., Badeck F., Lasch P., Suckow F. et Wechsung F., 2007: Hydrological impact assessment of afforestation and change in tree-species composition – A regional case study for the Federal State of Brandenburg (Germany). *Journal of Hydrology* 346, s. 1-17.
- 52) Zhang L., Dawes W. R. et Walker G. R., 1999: Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. *Technical Report 99/12*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Clayton, Victoria, 35 str.

12 Přílohy

12.1 Přehled měřených dnů průtoku a srážkového úhrnu

Modrava 1:

| | měsíc | průtok | srážky |
|------|----------|--------|--------|
| 1999 | listopad | 229 | 229 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 529 | 529 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 704 | 704 |
| | září | 541 | 506 |
| | říjen | 608 | |

| | měsíc | průtok | srážky |
|------|----------|--------|--------|
| 2000 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 553 | 192 |
| | červenec | 732 | |
| | srpen | 734 | 192 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 734 | 734 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2001 | listopad | 228 | 228 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 586 | 586 |
| | červenec | 742 | 742 |
| | srpen | 743 | 743 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2002 | listopad | 350 | 350 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 418 | 418 |
| | červen | 718 | 718 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 742 | 132 |
| | září | 718 | 102 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2003 | listopad | 108 | 108 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 202 | 202 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 742 | 742 |
| | srpen | 743 | 743 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2004 | listopad | 108 | 108 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 610 | 610 |
| | červen | 543 | 543 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 683 | 683 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 514 | 514 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2005 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | 7 | 7 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 744 | 744 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 499 | 499 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2006 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | 488 | 488 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 719 | 719 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 408 | 408 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2007 | listopad | 720 | 720 |
| | prosinec | 733 | 733 |
| | leden | 744 | 641 |
| | únor | 627 | |
| | březen | 743 | |
| | duben | 720 | 560 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 744 | 744 |
| | září | 719 | 719 |
| | říjen | 508 | 508 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2008 | listopad | 273 | |
| | prosinec | 744 | |
| | leden | 385 | |
| | únor | 609 | |
| | březen | 744 | 539 |
| | duben | 662 | 662 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 694 | 694 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 743 | 743 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2009 | listopad | 720 | 489 |
| | prosinec | 744 | |
| | leden | 744 | |
| | únor | 672 | |
| | březen | 708 | |
| | duben | 720 | 440 |
| | květen | 744 | 716 |
| | červen | 720 | |
| | červenec | 744 | 426 |
| | srpen | 744 | 744 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

Modrava 2:

| | měsíc | průtok | srážky |
|------|----------|--------|--------|
| 1999 | listopad | 231 | 231 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 529 | 529 |
| | červenec | 743 | 743 |
| | srpen | 704 | 704 |
| | září | 565 | 565 |
| | říjen | 583 | 583 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2001 | listopad | 227 | 227 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 586 | 586 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 742 | 742 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 743 | 743 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2003 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 205 | 205 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 741 | 741 |
| | září | 719 | 719 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2005 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 589 | 589 |
| | červen | 719 | 719 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 743 | 743 |
| | září | 720 | 720 |

| | měsíc | průtok | srážky |
|------|----------|--------|--------|
| 2000 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | | |
| | červen | 553 | 553 |
| | červenec | 734 | 734 |
| | srpen | 733 | 733 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2002 | listopad | 348 | 348 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 421 | 421 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 131 | 131 |
| | září | 301 | 301 |
| | říjen | 736 | 736 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2004 | listopad | 108 | 108 |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | | |
| | květen | 613 | 613 |
| | červen | 543 | 543 |
| | červenec | 742 | 742 |
| | srpen | 681 | 681 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 514 | 514 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2006 | listopad | | |
| | prosinec | | |
| | leden | | |
| | únor | | |
| | březen | | |
| | duben | 513 | 513 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 744 | 744 |

| | | |
|-------|-----|-----|
| říjen | 498 | 498 |
|-------|-----|-----|

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2007 | listopad | 720 | 720 |
| | prosinec | 734 | 734 |
| | leden | 744 | 610 |
| | únor | 672 | |
| | březen | 744 | |
| | duben | 720 | 563 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 744 | 744 |
| | září | 689 | 689 |
| | říjen | 613 | 613 |

| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2009 | listopad | 719 | 719 |
| | prosinec | 689 | 689 |
| | leden | 744 | |
| | únor | 672 | |
| | březen | 744 | |
| | duben | 720 | 444 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 744 | 744 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

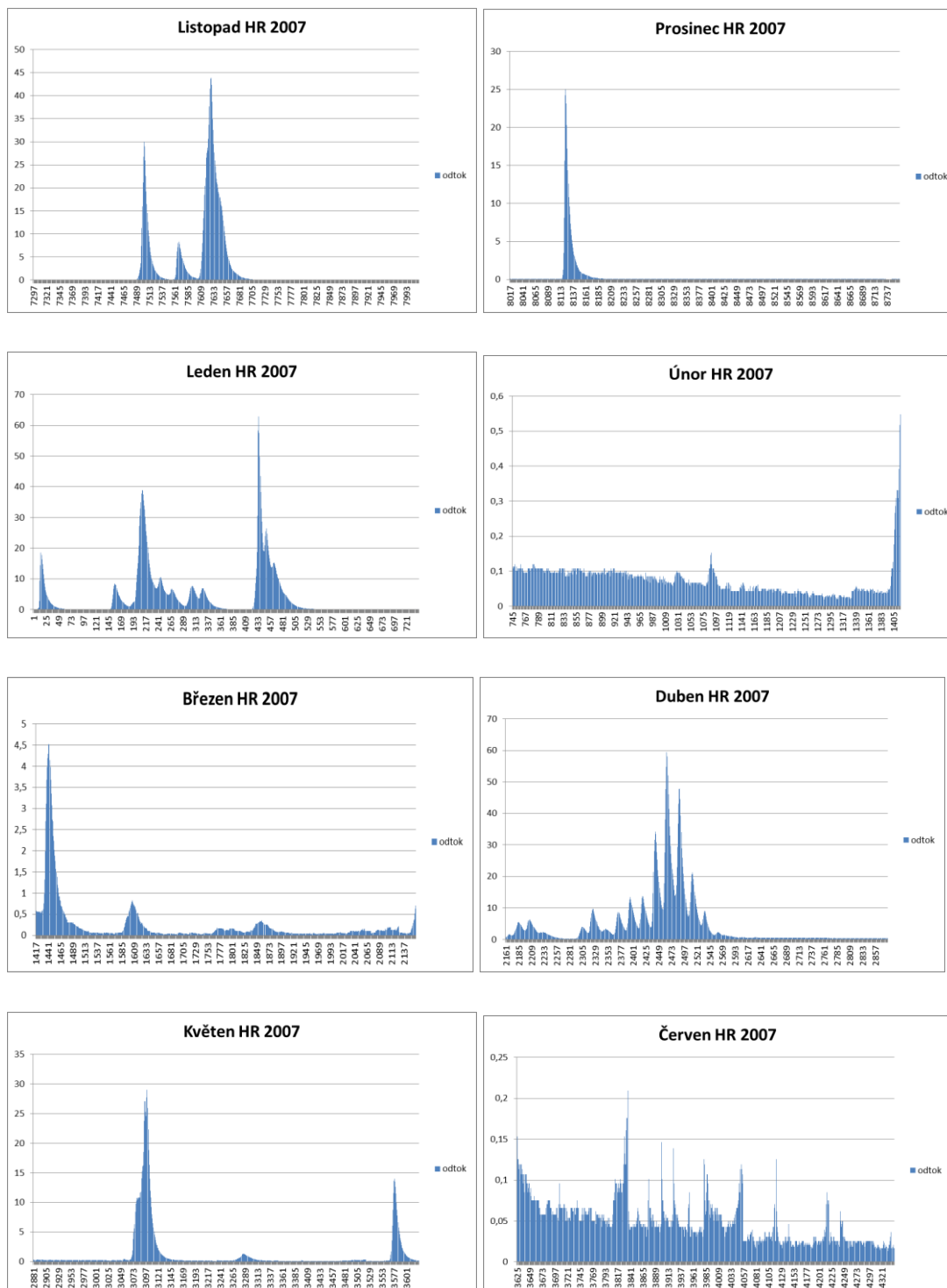
| | | |
|-------|-----|-----|
| září | 720 | 720 |
| říjen | 744 | 744 |

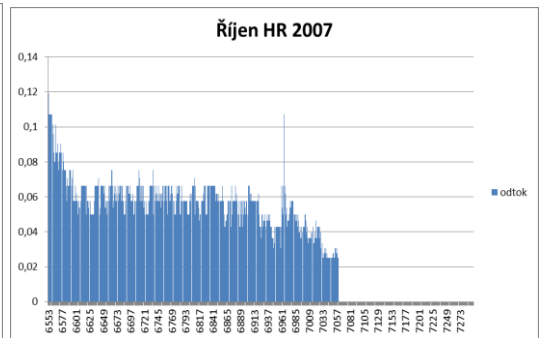
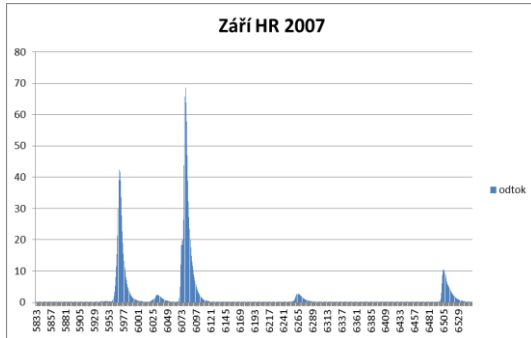
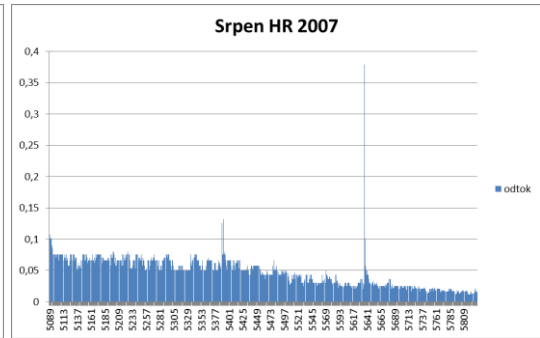
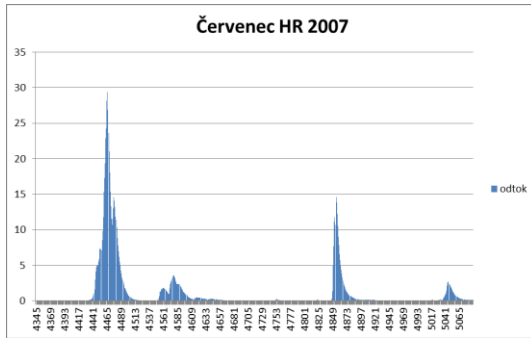
| | | | |
|------|----------|-----|-----|
| 2008 | listopad | 720 | 720 |
| | prosinec | 559 | 19 |
| | leden | 744 | |
| | únor | 696 | |
| | březen | 743 | 683 |
| | duben | 720 | 720 |
| | květen | 744 | 744 |
| | červen | 720 | 720 |
| | červenec | 744 | 744 |
| | srpen | 743 | 743 |
| | září | 720 | 720 |
| | říjen | 744 | 744 |

12.2 Vyhodnocení měsíčních hodinových průtoků a srážkového úhrnu

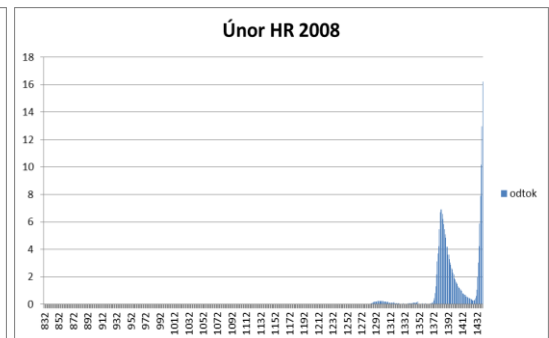
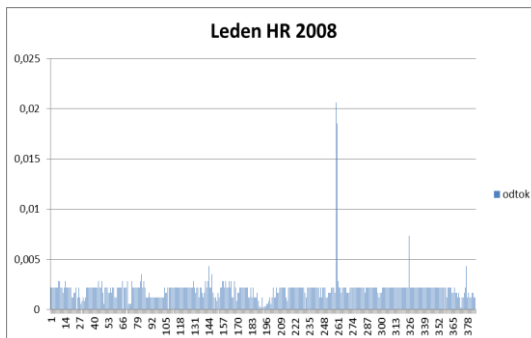
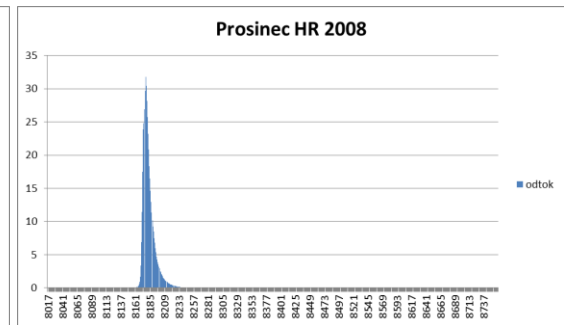
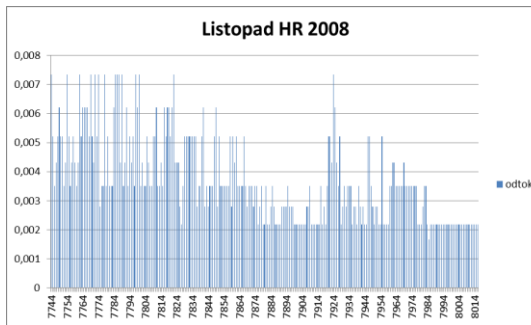
Modrava 1:

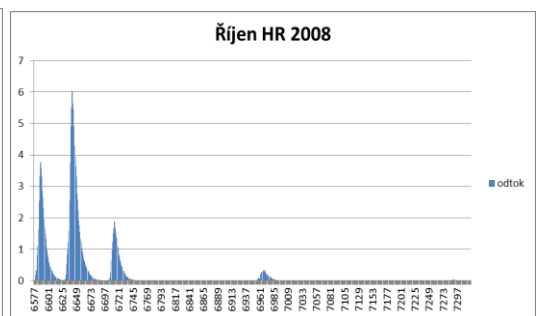
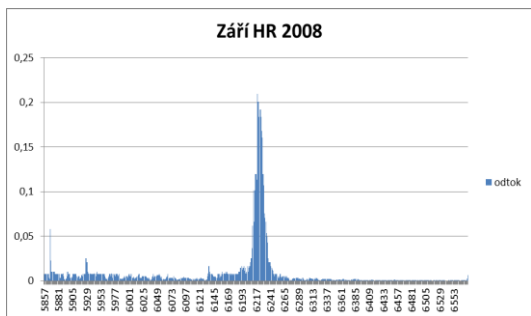
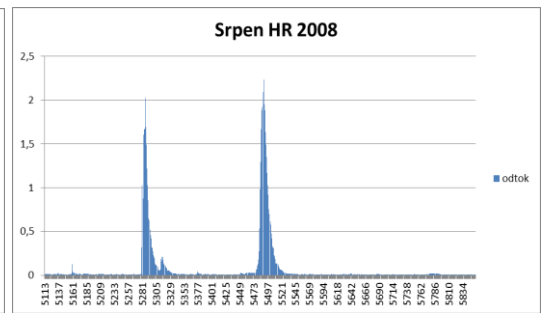
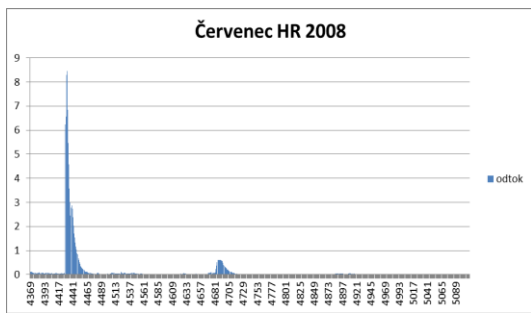
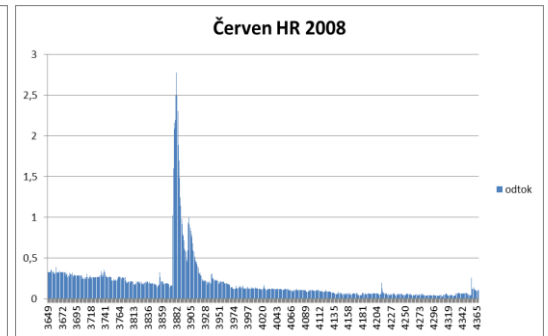
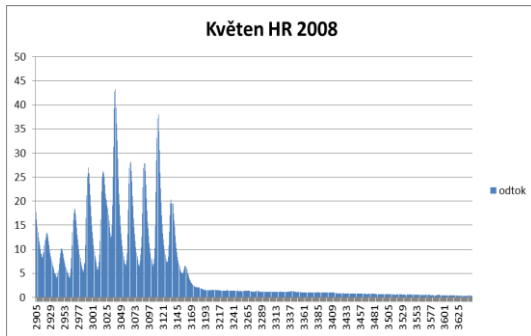
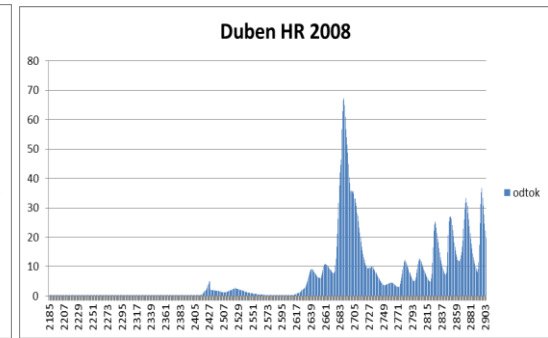
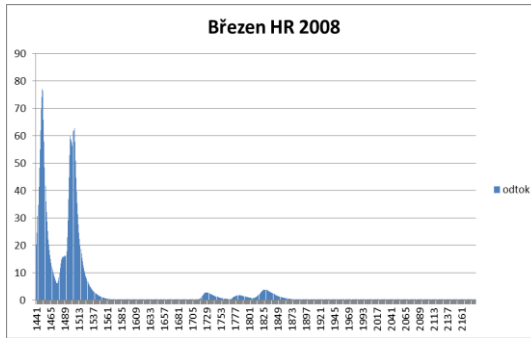
Hydrologický rok 2007



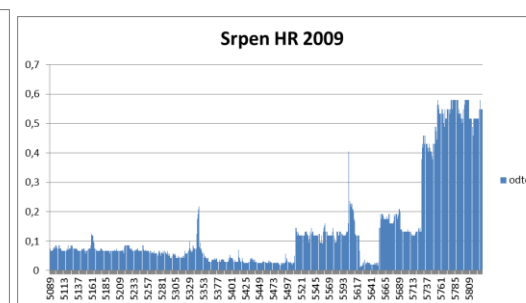
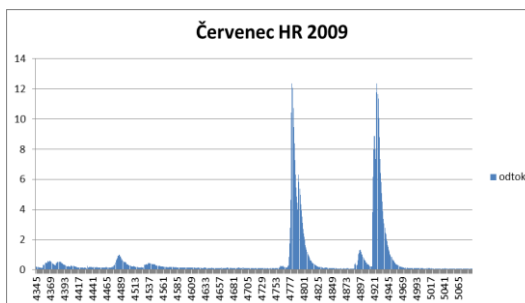
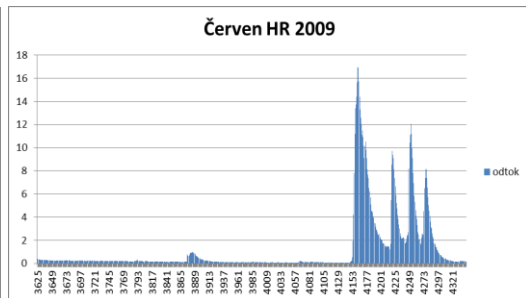
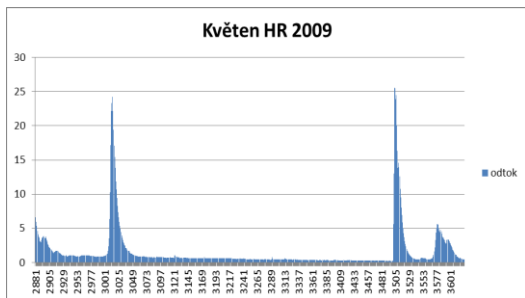
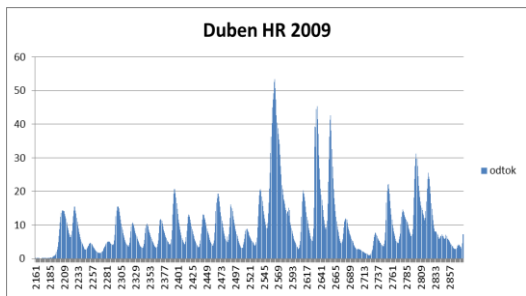
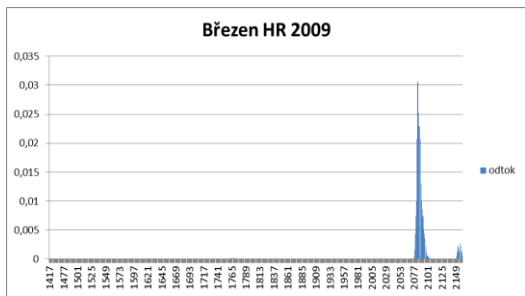
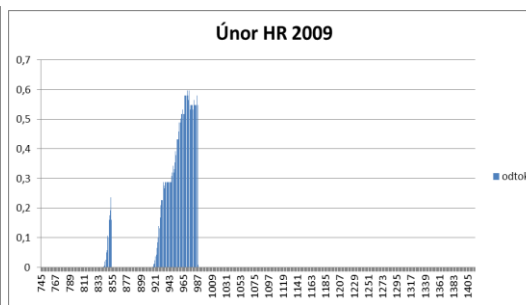
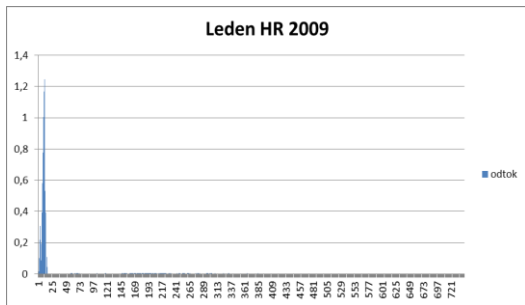
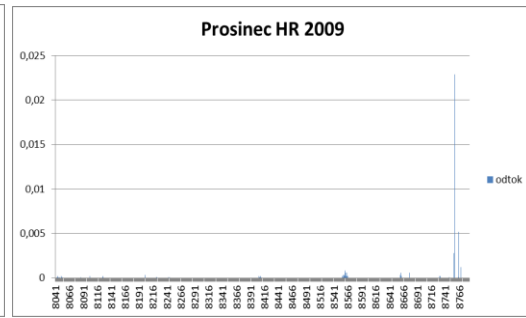
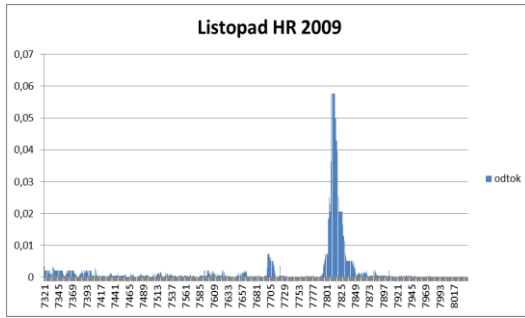


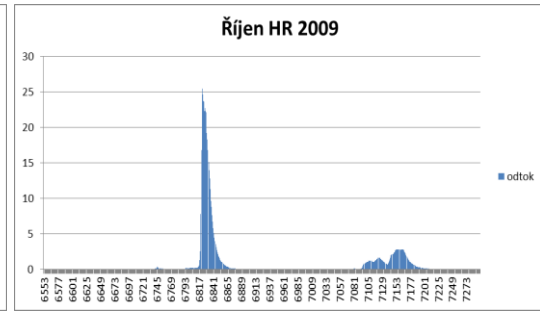
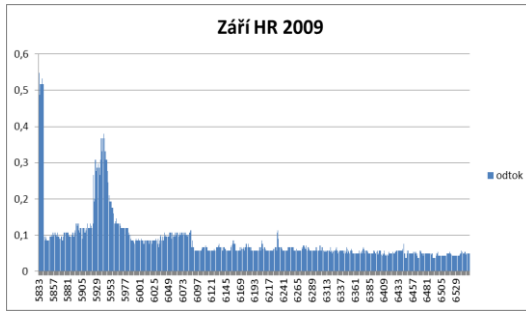
Hydrologický rok 2008





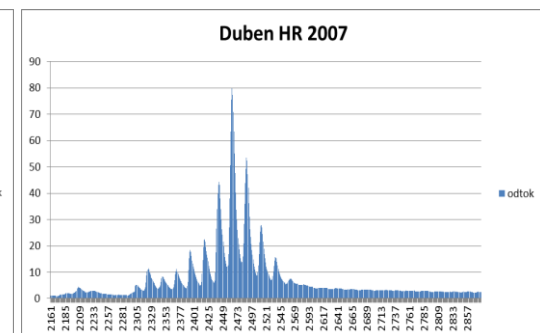
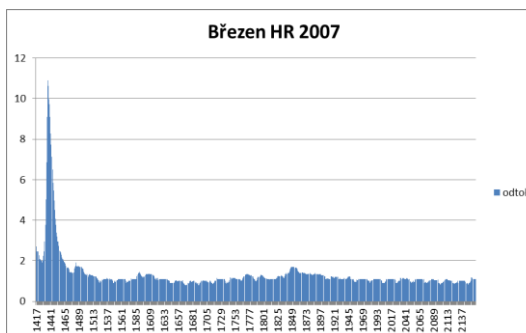
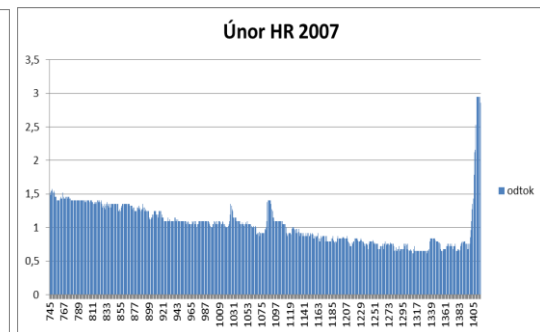
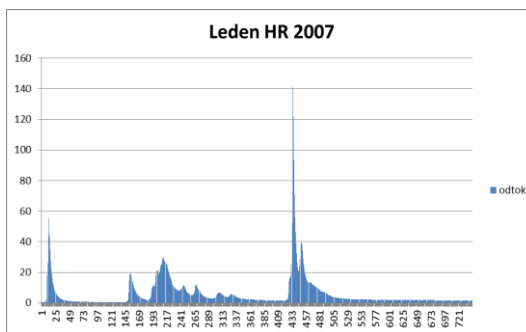
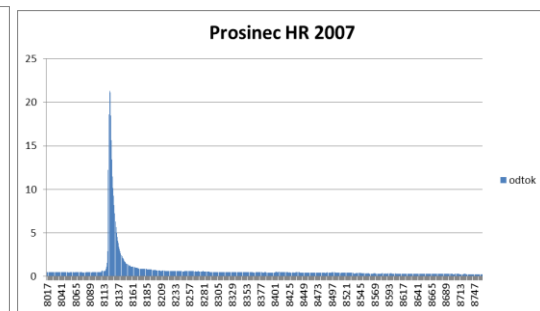
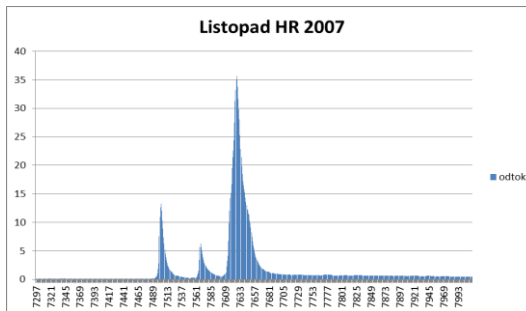
Hydrologický rok 2009

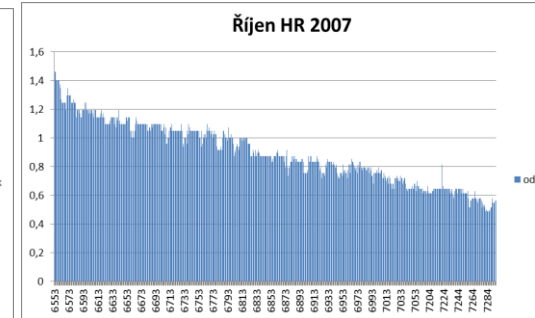
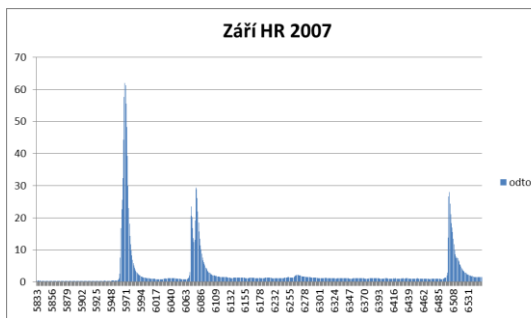
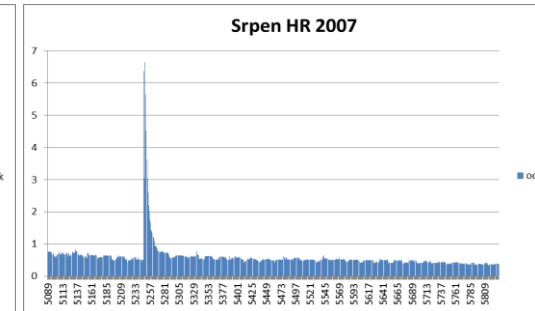
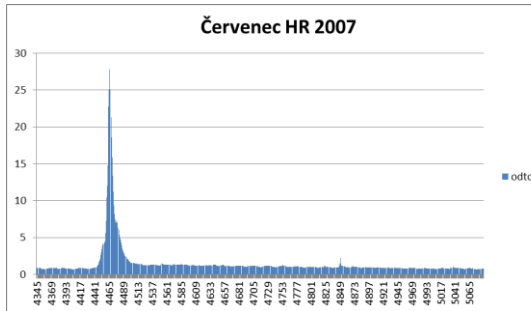
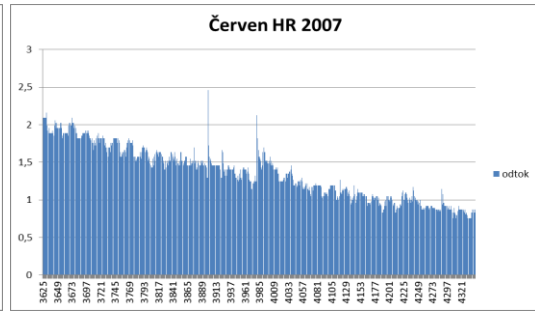
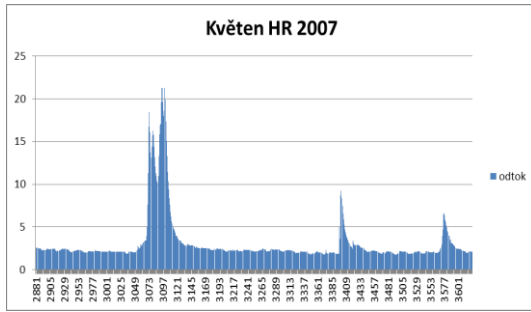




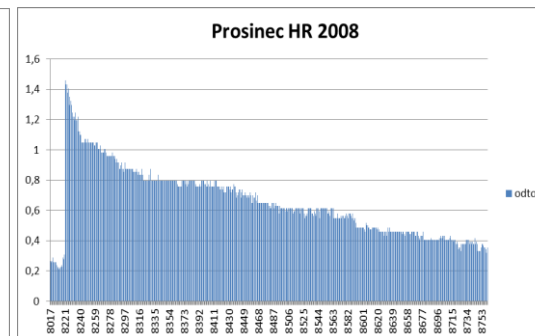
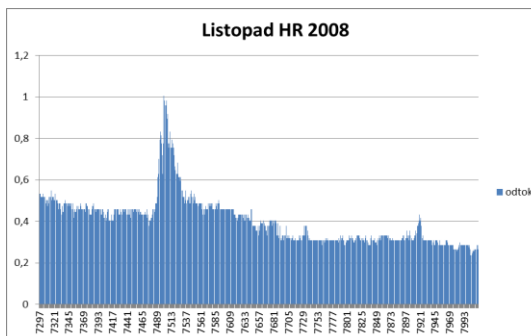
Modrava 2:

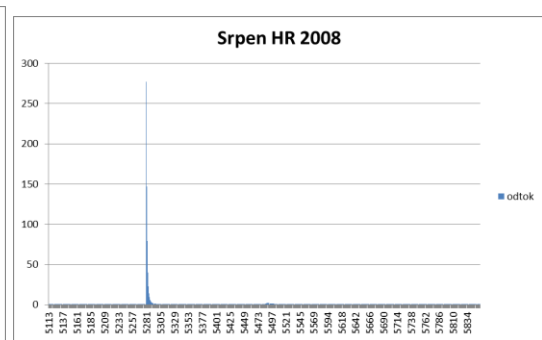
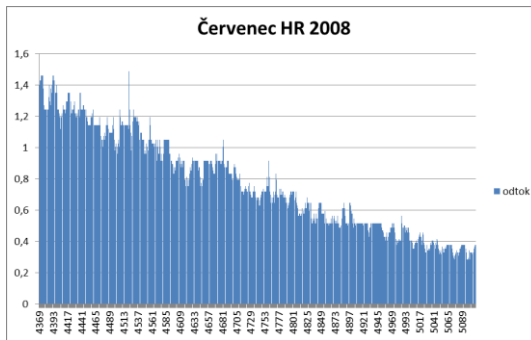
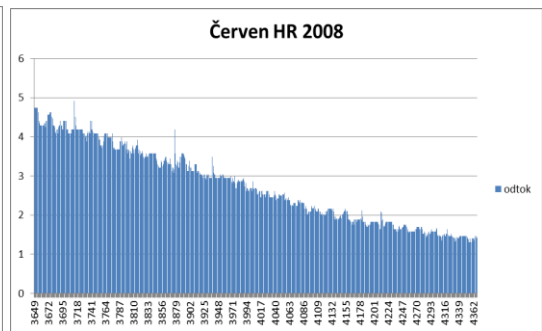
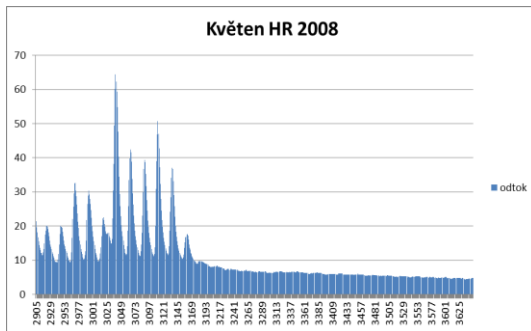
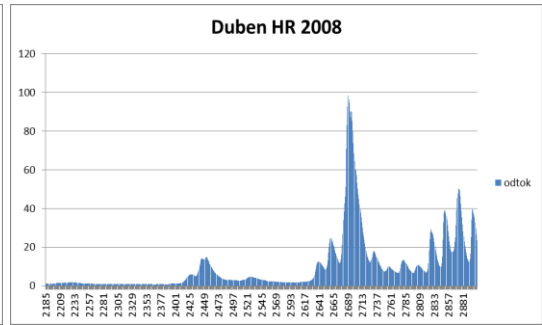
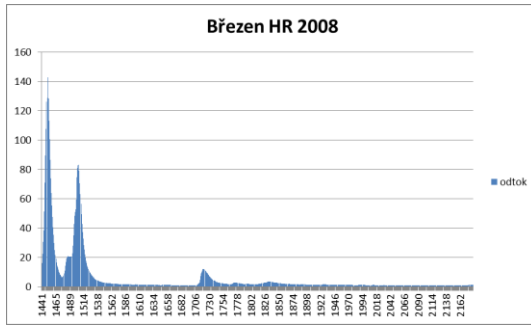
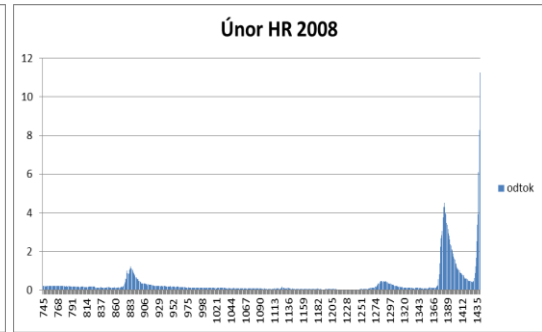
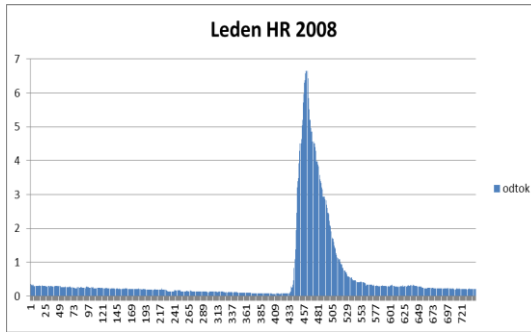
Hydrologický rok 2007

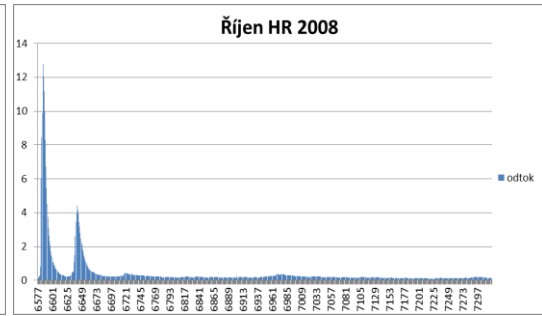
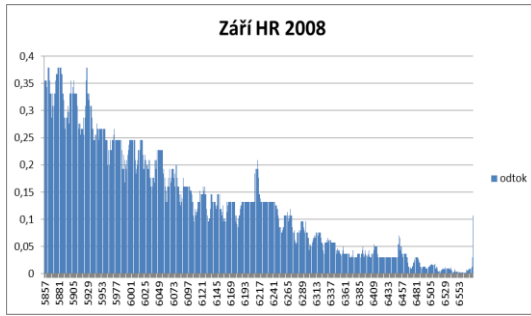




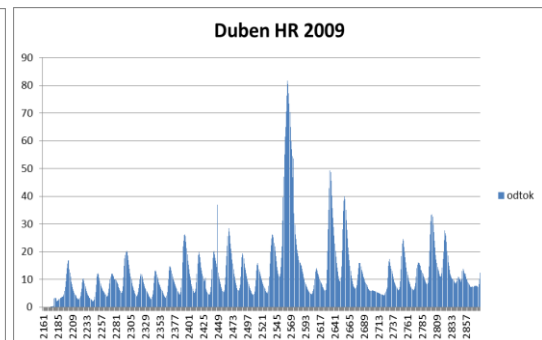
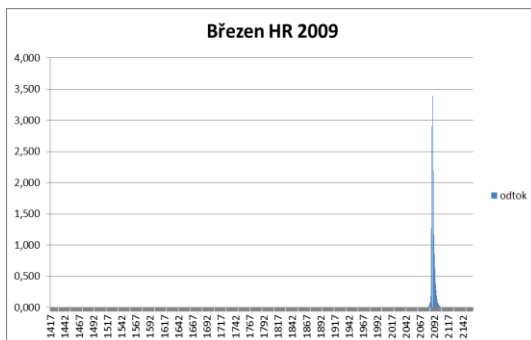
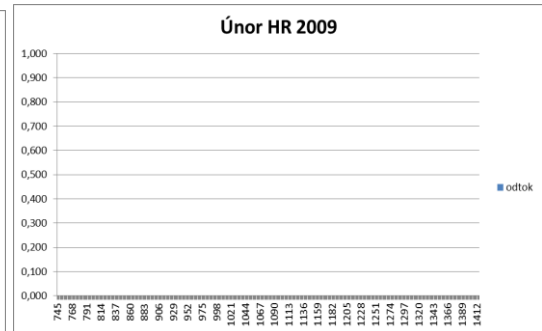
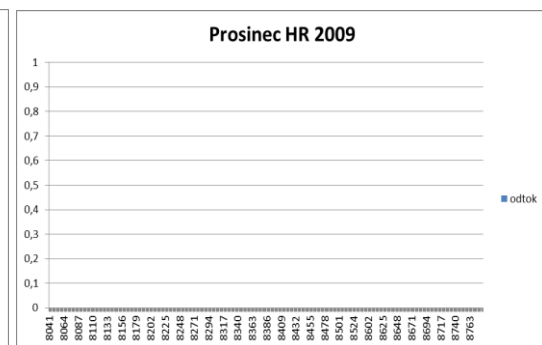
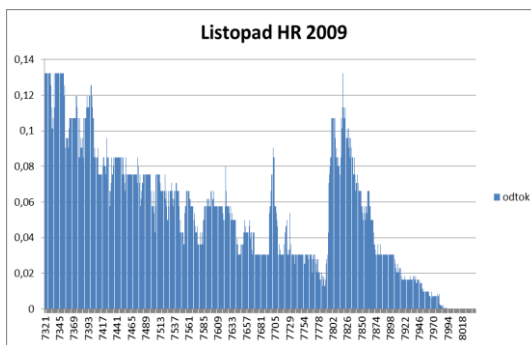
Hydrologický rok 2008

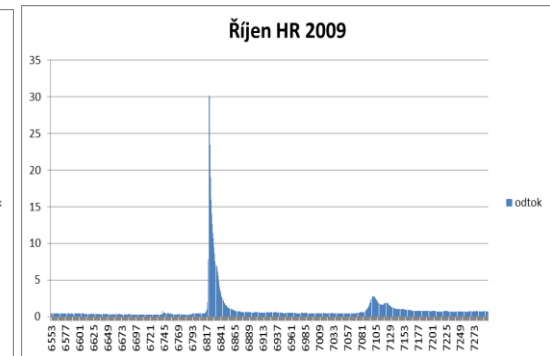
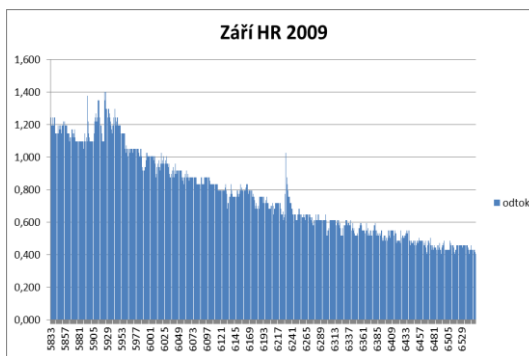
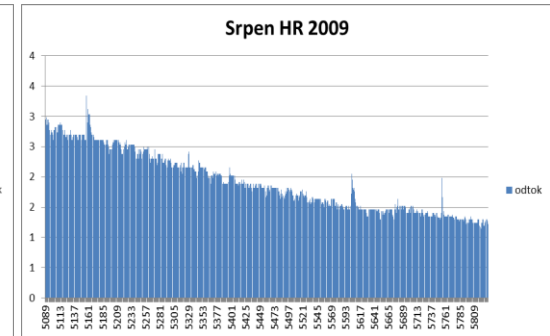
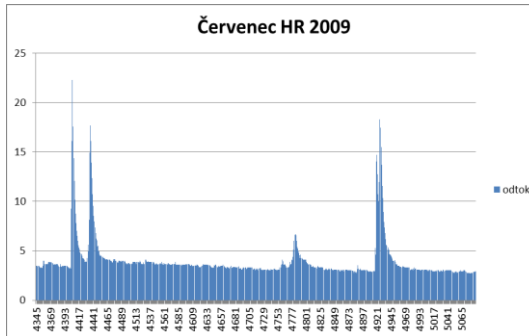
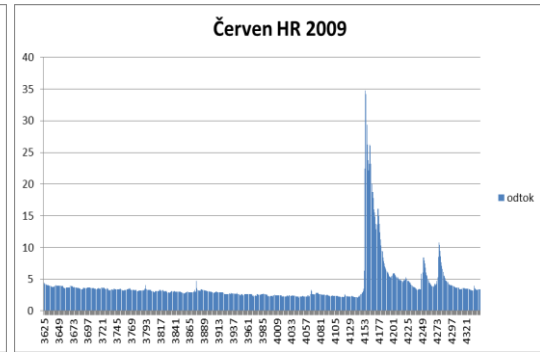
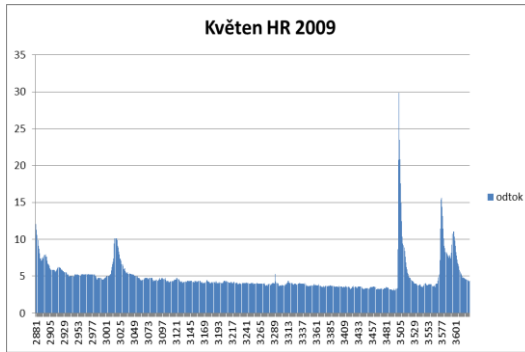




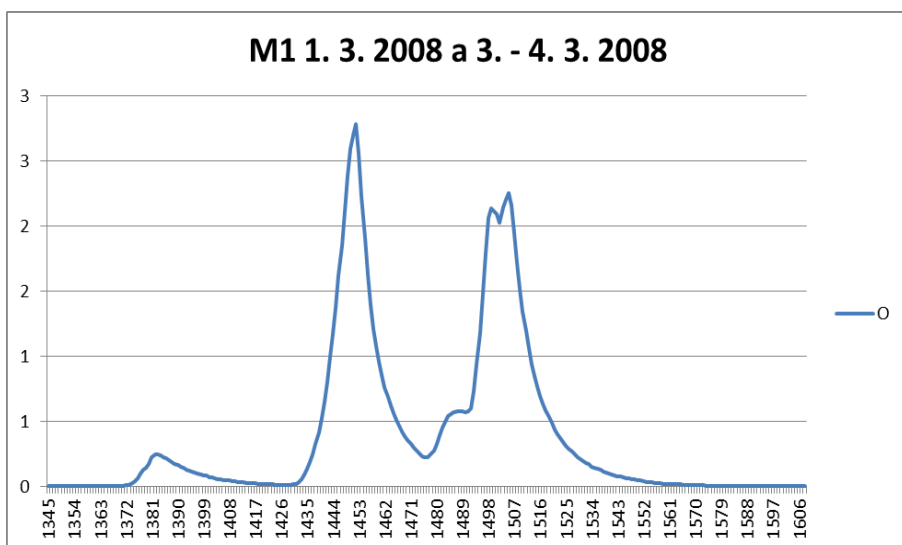
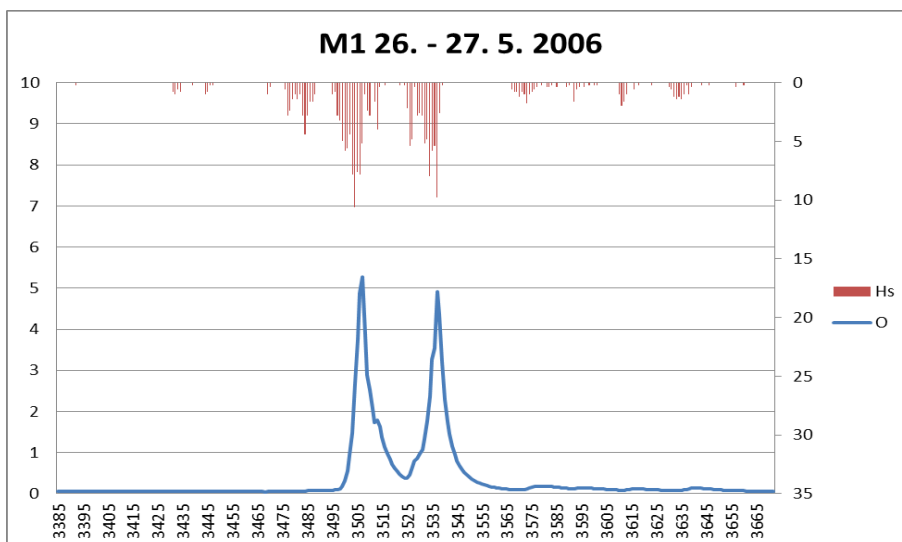
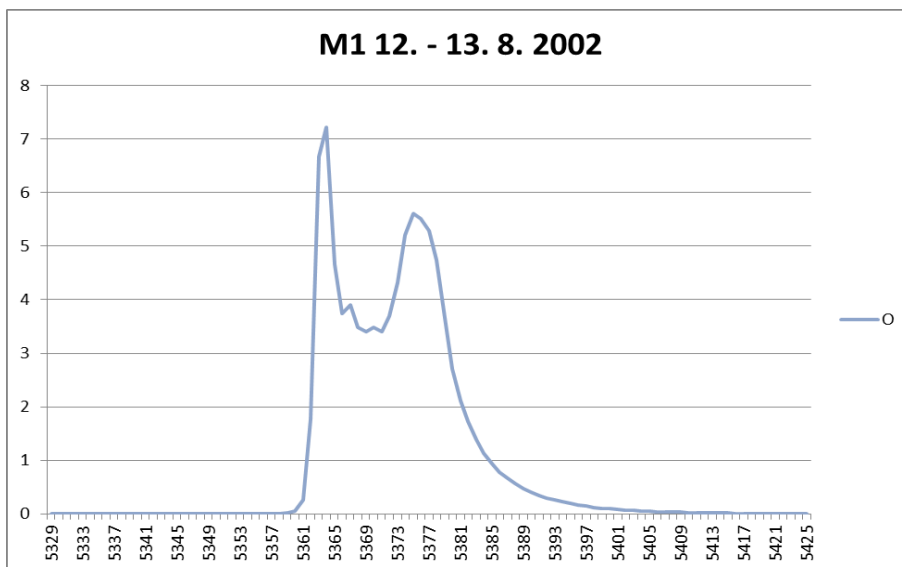


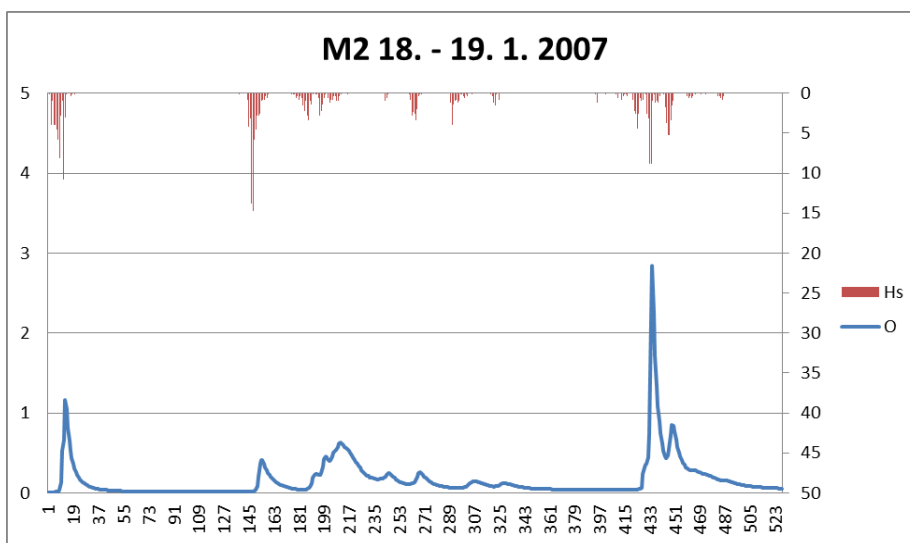
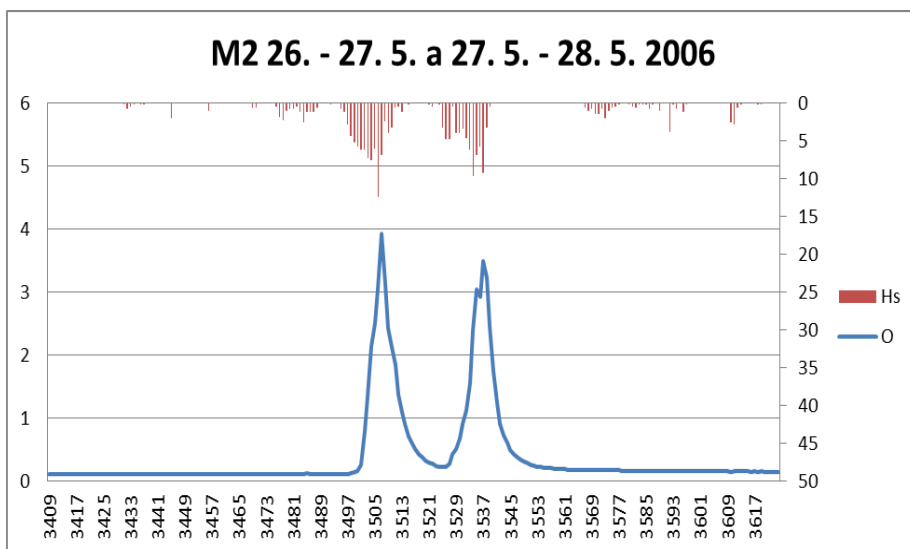
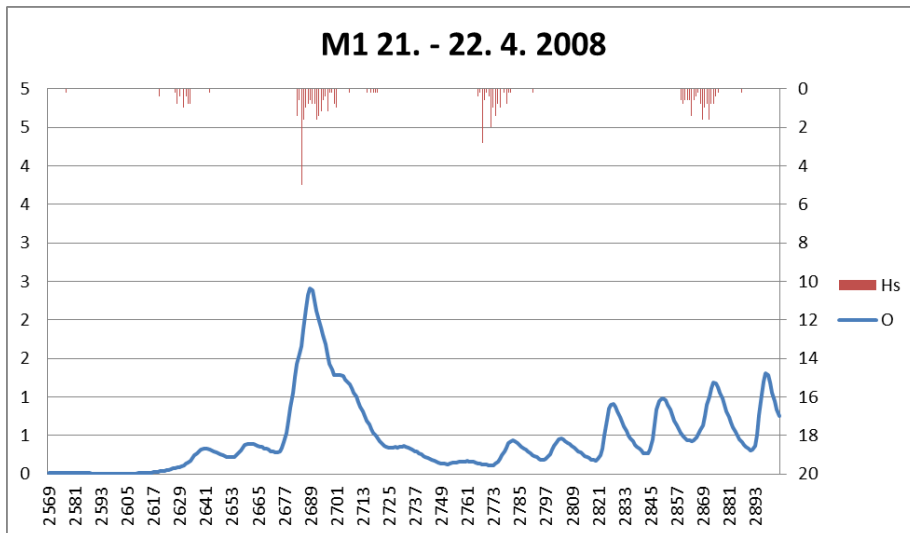
Hydrologický rok 2009

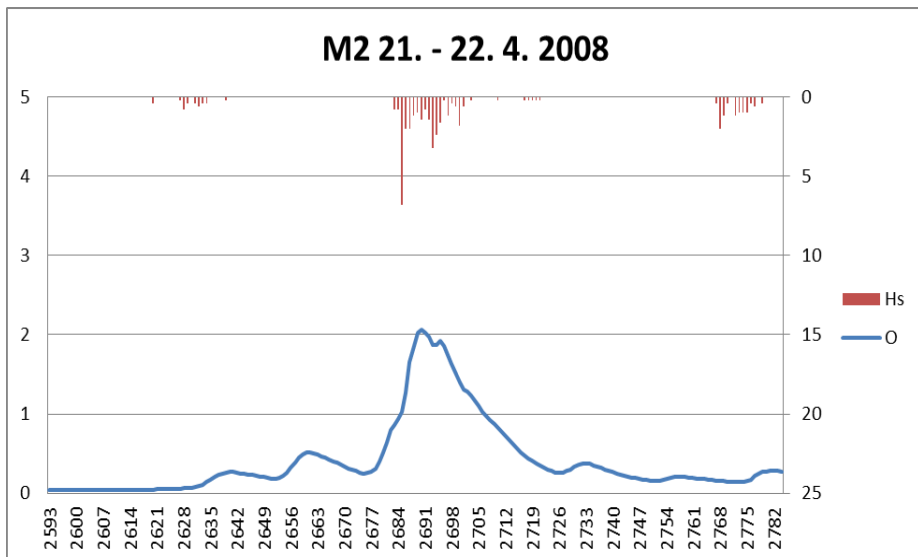
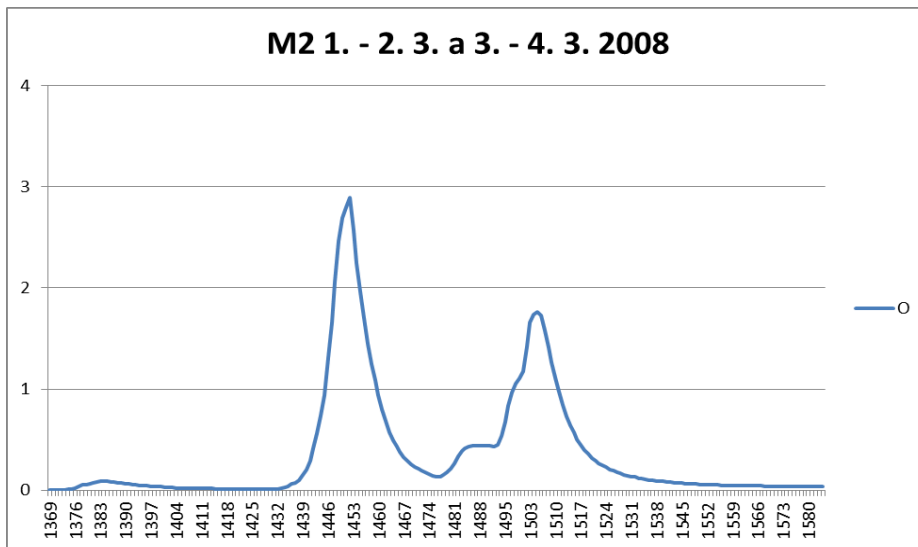




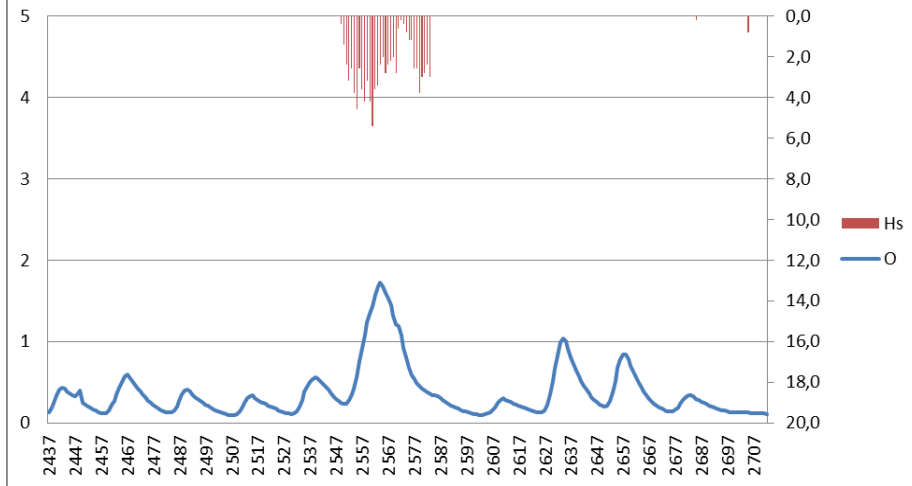
12.3 Rozbor odtokových epizod s $Q_{24\text{hod}} \geq 1\,000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (vyj. výškou odtoku)







M2 17. - 18. 4. 2009



12.4 Analýza ve vegetačním období v letech 1999 – 2009 (červen – říjen)

Modrava 1 – naměřené hodnoty průtoku a úhrnu srážek v letech 1999 – 2009

(VI – X)

| | měsíc | průtok | srážky | Q | Hs | počet dní v měs | Q | Hs |
|------|----------|--------|--------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| | | | | sled. | sled. | | skut. | skut. |
| 1999 | červen | 529 | 529 | 22,0 | 22,0 | 30 | 73,5 | 73,5 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 704 | 704 | 29,3 | 29,3 | 31 | 94,6 | 94,6 |
| | září | 541 | 506 | 22,5 | 21,1 | 30 | 75,1 | 70,3 |
| | říjen | 608 | 0 | 25,3 | 0,0 | 31 | 81,7 | 0,0 |
| 2000 | červen | 553 | 192 | 23,0 | 8,0 | 30 | 76,8 | 26,7 |
| | červenec | 732 | 0 | 30,5 | 0,0 | 31 | 98,4 | 0,0 |
| | srpen | 734 | 192 | 30,6 | 8,0 | 31 | 98,7 | 25,8 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 734 | 734 | 30,6 | 30,6 | 31 | 98,7 | 98,7 |
| 2001 | červen | 586 | 586 | 24,4 | 24,4 | 30 | 81,4 | 81,4 |
| | červenec | 742 | 742 | 30,9 | 30,9 | 31 | 99,7 | 99,7 |
| | srpen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2002 | červen | 718 | 718 | 29,9 | 29,9 | 30 | 99,7 | 99,7 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 742 | 132 | 30,9 | 5,5 | 31 | 99,7 | 17,7 |
| | září | 718 | 102 | 29,9 | 4,3 | 30 | 99,7 | 14,2 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2003 | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 742 | 742 | 30,9 | 30,9 | 31 | 99,7 | 99,7 |
| | srpen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2004 | červen | 543 | 543 | 22,6 | 22,6 | 30 | 75,4 | 75,4 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 683 | 683 | 28,5 | 28,5 | 31 | 91,8 | 91,8 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 514 | 514 | 21,4 | 21,4 | 31 | 69,1 | 69,1 |
| 2005 | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 499 | 499 | 20,8 | 20,8 | 31 | 67,1 | 67,1 |
| 2006 | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 719 | 719 | 30,0 | 30,0 | 30 | 99,9 | 99,9 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 408 | 408 | 17,0 | 17,0 | 31 | 54,8 | 54,8 |

| | | | | | | | | |
|------|----------|-----|-----|------|------|----|-------|-------|
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2007 | listopad | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | prosinec | 733 | 733 | 30,5 | 30,5 | 31 | 98,5 | 98,5 |
| | leden | 744 | 641 | 31,0 | 26,7 | 31 | 100,0 | 86,2 |
| | únor | 627 | 0 | 26,1 | 0,0 | 28 | 93,3 | 0,0 |
| | březen | 743 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 99,9 | 0,0 |
| | duben | 720 | 560 | 30,0 | 23,3 | 30 | 100,0 | 77,8 |
| | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 719 | 719 | 30,0 | 30,0 | 30 | 99,9 | 99,9 |
| | říjen | 508 | 508 | 21,2 | 21,2 | 31 | 68,3 | 68,3 |
| 2008 | listopad | 273 | 0 | 11,4 | 0,0 | 30 | 37,9 | 0,0 |
| | prosinec | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | leden | 385 | 0 | 16,0 | 0,0 | 31 | 51,7 | 0,0 |
| | únor | 609 | 0 | 25,4 | 0,0 | 29 | 87,5 | 0,0 |
| | březen | 744 | 539 | 31,0 | 22,5 | 31 | 100,0 | 72,4 |
| | duben | 662 | 662 | 27,6 | 27,6 | 30 | 91,9 | 91,9 |
| | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 694 | 694 | 28,9 | 28,9 | 30 | 96,4 | 96,4 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2009 | listopad | 720 | 489 | 30,0 | 20,4 | 30 | 100,0 | 67,9 |
| | prosinec | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | leden | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | únor | 672 | 0 | 28,0 | 0,0 | 28 | 100,0 | 0,0 |
| | březen | 708 | 0 | 29,5 | 0,0 | 31 | 95,2 | 0,0 |
| | duben | 720 | 440 | 30,0 | 18,3 | 30 | 100,0 | 61,1 |
| | květen | 744 | 716 | 31,0 | 29,8 | 31 | 100,0 | 96,2 |
| | červen | 720 | 0 | 30,0 | 0,0 | 30 | 100,0 | 0,0 |
| | červenec | 744 | 426 | 31,0 | 17,8 | 31 | 100,0 | 57,3 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |

Modrava 2 – naměřené hodnoty průtoku a úhrnu srážek v letech 1999 – 2009

(červen – říjen)

| | měsíc | průtok | srážky | Q sled. | Hs sled. | počet dní v měs | Q skut. | Hs skut. |
|------|----------|--------|--------|------------|-------------|--------------------|------------|-------------|
| 1999 | červen | 529 | 529 | 22,0 | 22,0 | 30 | 73,5 | 73,5 |
| | červenec | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | srpen | 704 | 704 | 29,3 | 29,3 | 31 | 94,6 | 94,6 |
| | září | 565 | 565 | 23,5 | 23,5 | 30 | 78,5 | 78,5 |
| | říjen | 583 | 583 | 24,3 | 24,3 | 31 | 78,4 | 78,4 |
| 2000 | červen | 553 | 553 | 23,0 | 23,0 | 30 | 76,8 | 76,8 |
| | červenec | 734 | 734 | 30,6 | 30,6 | 31 | 98,7 | 98,7 |
| | srpen | 733 | 733 | 30,5 | 30,5 | 31 | 98,5 | 98,5 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2001 | červen | 586 | 586 | 24,4 | 24,4 | 30 | 81,4 | 81,4 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 742 | 742 | 30,9 | 30,9 | 31 | 99,7 | 99,7 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| 2002 | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 131 | 131 | 5,5 | 5,5 | 31 | 17,6 | 17,6 |
| | září | 301 | 301 | 12,5 | 12,5 | 30 | 41,8 | 41,8 |
| | říjen | 736 | 736 | 30,7 | 30,7 | 31 | 98,9 | 98,9 |
| 2003 | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 741 | 741 | 30,9 | 30,9 | 31 | 99,6 | 99,6 |
| | září | 719 | 719 | 30,0 | 30,0 | 30 | 99,9 | 99,9 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2004 | červen | 543 | 543 | 22,6 | 22,6 | 30 | 75,4 | 75,4 |
| | červenec | 742 | 742 | 30,9 | 30,9 | 31 | 99,7 | 99,7 |
| | srpen | 681 | 681 | 28,4 | 28,4 | 31 | 91,5 | 91,5 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 514 | 514 | 21,4 | 21,4 | 31 | 69,1 | 69,1 |
| 2005 | květen | 589 | 589 | 24,5 | 24,5 | 31 | 79,2 | 79,2 |
| | červen | 719 | 719 | 30,0 | 30,0 | 30 | 99,9 | 99,9 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 498 | 498 | 20,8 | 20,8 | 31 | 66,9 | 66,9 |
| 2006 | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |

| | | | | | | | | |
|------|----------|-----|-----|------|------|----|-------|-------|
| 2007 | listopad | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | prosinec | 734 | 734 | 30,6 | 30,6 | 31 | 98,7 | 98,7 |
| | leden | 744 | 610 | 31,0 | 25,4 | 31 | 100,0 | 82,0 |
| | únor | 672 | 0 | 28,0 | 0,0 | 28 | 100,0 | 0,0 |
| | březen | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | duben | 720 | 563 | 30,0 | 23,5 | 30 | 100,0 | 78,2 |
| | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 689 | 689 | 28,7 | 28,7 | 30 | 95,7 | 95,7 |
| | říjen | 613 | 613 | 25,5 | 25,5 | 31 | 82,4 | 82,4 |
| 2008 | listopad | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | prosinec | 559 | 19 | 23,3 | 0,8 | 31 | 75,1 | 2,6 |
| | leden | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | únor | 696 | 0 | 29,0 | 0,0 | 29 | 100,0 | 0,0 |
| | březen | 743 | 683 | 31,0 | 28,5 | 31 | 99,9 | 91,8 |
| | duben | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 743 | 743 | 31,0 | 31,0 | 31 | 99,9 | 99,9 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| 2009 | listopad | 719 | 719 | 30,0 | 30,0 | 30 | 99,9 | 99,9 |
| | prosinec | 689 | 689 | 28,7 | 28,7 | 31 | 92,6 | 92,6 |
| | leden | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | únor | 672 | 0 | 28,0 | 0,0 | 28 | 100,0 | 0,0 |
| | březen | 744 | 0 | 31,0 | 0,0 | 31 | 100,0 | 0,0 |
| | duben | 720 | 444 | 30,0 | 18,5 | 30 | 100,0 | 61,7 |
| | květen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | červen | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | červenec | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | srpen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |
| | září | 720 | 720 | 30,0 | 30,0 | 30 | 100,0 | 100,0 |
| | říjen | 744 | 744 | 31,0 | 31,0 | 31 | 100,0 | 100,0 |

Modrava 1 – naměřené hodnoty ve vegetačním období

| | | Q hod | Hs hod | Q [l.s ⁻¹] | Hs [mm] |
|------|------|-------|--------|------------------------|---------|
| 1999 | VI | 529 | 529 | 184,29 | 65,2 |
| | VII | 744 | 744 | 299,48 | 111,2 |
| | VIII | 704 | 704 | 22,68 | 69 |
| | IX | 541 | 506 | 13,86 | 45,4 |
| | X | 608 | 0 | 26,23 | 0 |
| 2000 | VI | 553 | 192 | 85,12 | 4,8 |
| | VII | 732 | 0 | 940,36 | 2,6 |
| | VIII | 734 | 192 | 235,14 | 20 |
| | IX | 720 | 720 | 214,48 | 101,4 |
| | X | 734 | 734 | 89,8 | 95,6 |
| 2001 | VI | 586 | 586 | 570,38 | 91,4 |
| | VII | 742 | 742 | 174,35 | 72,2 |
| | VIII | 743 | 743 | 170,43 | 114,8 |
| | IX | 720 | 720 | 2435,12 | 278,2 |
| | X | 744 | 744 | 146,02 | 60,8 |
| 2002 | VI | 718 | 718 | 890,06 | 149,4 |
| | VII | 744 | 744 | 118,5 | 124,8 |
| | VIII | 742 | 132 | 3570,1 | 0 |
| | IX | 718 | 102 | 297,31 | 98 |
| | X | 744 | 744 | 1771,1 | 249,8 |
| 2003 | VI | 720 | 720 | 114,85 | 98,8 |
| | VII | 742 | 742 | 6,15 | 82,8 |
| | VIII | 743 | 743 | 0,47 | 48 |
| | IX | 720 | 720 | 0,46 | 47,4 |
| | X | 744 | 744 | 1440,19 | 183,4 |
| 2004 | VI | 543 | 543 | 656,33 | 111,2 |
| | VII | 744 | 744 | 152,15 | 105,4 |
| | VIII | 683 | 683 | 75,29 | 109,4 |
| | IX | 720 | 720 | 718,76 | 137 |
| | X | 514 | 514 | 43,64 | 50,8 |
| 2005 | VI | 720 | 720 | 231,72 | 82,2 |
| | VII | 744 | 744 | 541,03 | 201,6 |
| | VIII | 744 | 744 | 295,53 | 108,2 |
| | IX | 720 | 720 | 153,68 | 90,4 |
| | X | 499 | 499 | 31,95 | 15 |
| 2006 | VI | 719 | 719 | 555,45 | 88,6 |
| | VII | 744 | 744 | 64,16 | 74,6 |
| | VIII | 408 | 408 | 733,23 | 169,6 |
| | IX | 720 | 720 | 69,25 | 46,8 |
| | X | 744 | 744 | 18,05 | 55,6 |
| 2007 | VI | 720 | 720 | 35,19 | 101 |

| | | | | | |
|------|------|-----|-----|---------|-------|
| | VII | 744 | 744 | 916,39 | 232,8 |
| | VIII | 744 | 744 | 34,98 | 46,6 |
| | IX | 719 | 719 | 1481,81 | 231,2 |
| | X | 508 | 508 | 28,71 | 14,8 |
| 2008 | VI | 694 | 694 | 140,51 | 144,6 |
| | VII | 744 | 744 | 112,41 | 146,6 |
| | VIII | 743 | 743 | 61,38 | 108,8 |
| | IX | 720 | 720 | 6,02 | 81,2 |
| | X | 744 | 744 | 169,35 | 106,2 |
| 2009 | VI | 720 | 0 | 877,28 | 0 |
| | VII | 744 | 426 | 481,05 | 126,2 |
| | VIII | 744 | 744 | 104,58 | 89 |
| | IX | 720 | 720 | 62,07 | 60,2 |
| | X | 744 | 744 | 586,67 | 139,8 |

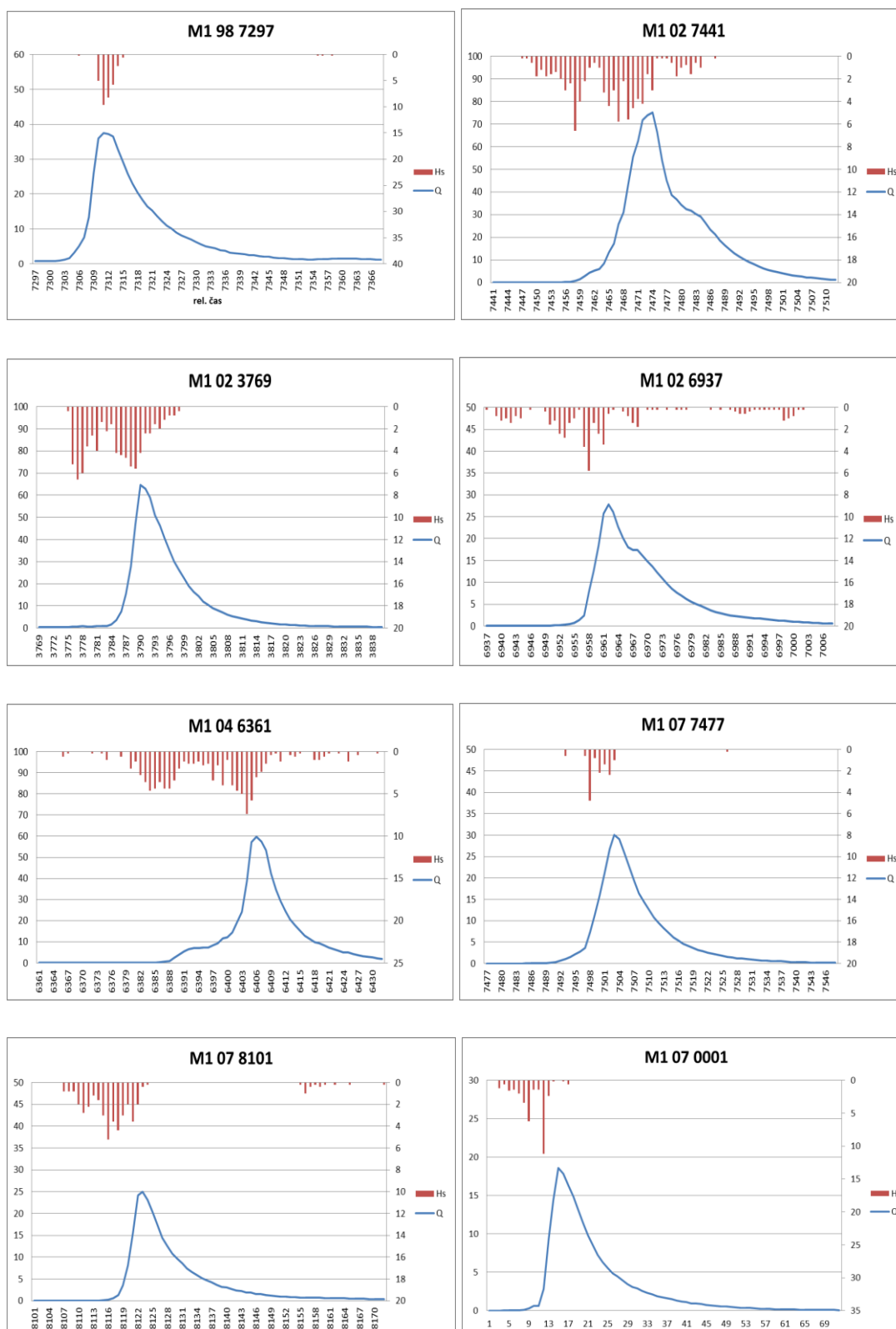
Modrava 2 – naměřené hodnoty ve vegetačním období

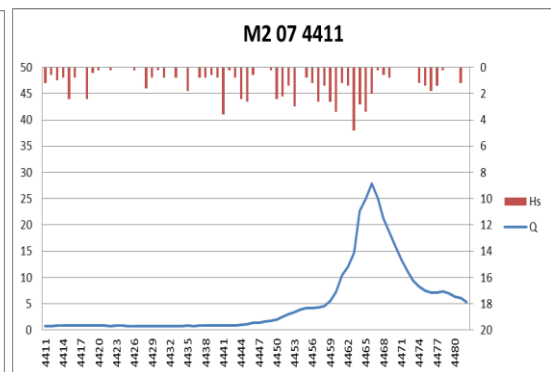
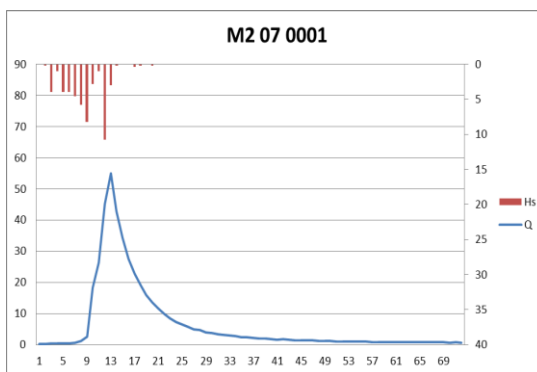
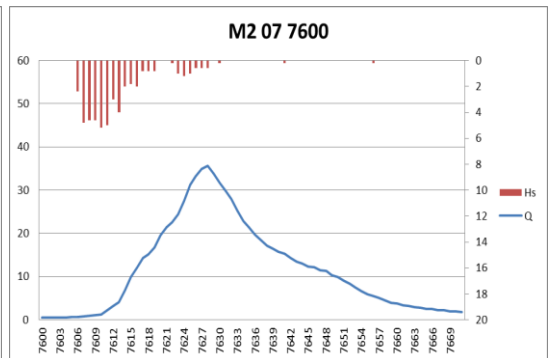
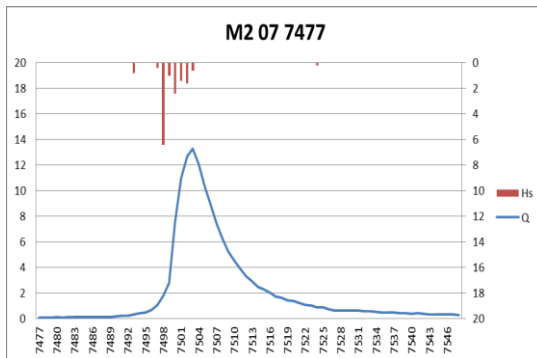
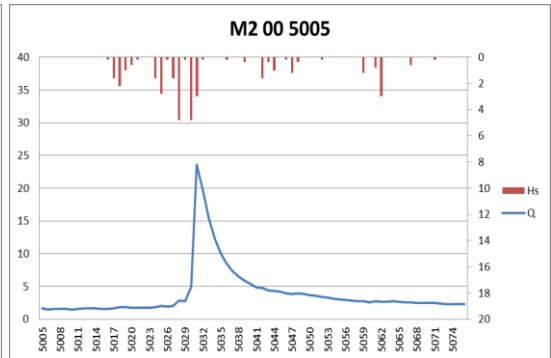
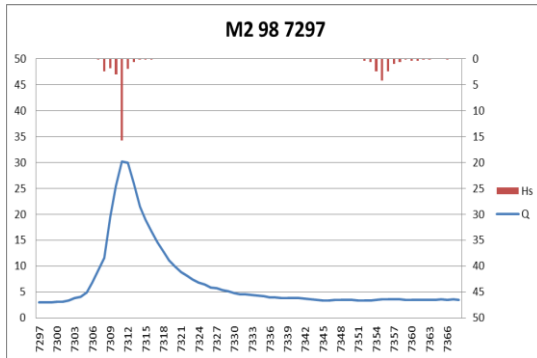
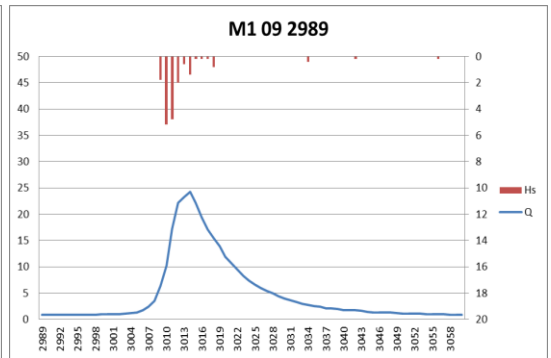
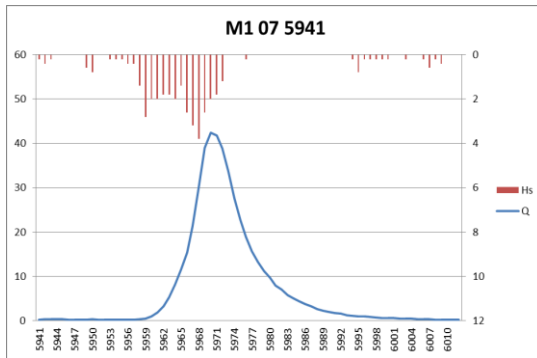
| | | Q hod | Hs hod | Q [l.s ⁻¹] | Hs [mm] |
|------|------|-------|--------|------------------------|---------|
| 1999 | VI | 529 | 529 | 991,54 | 51,4 |
| | VII | 743 | 743 | 580,18 | 118,8 |
| | VIII | 704 | 704 | 76,95 | 65 |
| | IX | 565 | 565 | 0 | 69,2 |
| | X | 583 | 583 | 6,97 | 36,8 |
| 2000 | VI | 553 | 553 | 680,29 | 62,2 |
| | VII | 734 | 734 | 1055,97 | 179,8 |
| | VIII | 733 | 733 | 1151,66 | 63,2 |
| | IX | 720 | 720 | 495,21 | 75,4 |
| | X | 744 | 744 | 332,09 | 81,8 |
| 2001 | VI | 586 | 586 | 1776,52 | 100,4 |
| | VII | 744 | 744 | 1079,76 | 123 |
| | VIII | 742 | 742 | 615,04 | 95,8 |
| | IX | 720 | 720 | 2560,95 | 189,4 |
| | X | 743 | 743 | 1044,7 | 40,8 |
| 2002 | VI | 720 | 720 | 2177,32 | 105,8 |
| | VII | 744 | 744 | 966,73 | 118 |
| | VIII | 131 | 131 | 72,33 | 4,8 |
| | IX | 301 | 301 | 559,33 | 71,2 |
| | X | 736 | 736 | 2649,37 | 206 |
| 2003 | VI | 720 | 720 | 587,06 | 126,6 |
| | VII | 744 | 744 | 216,66 | 83,4 |
| | VIII | 741 | 741 | 3,96 | 48,8 |
| | IX | 719 | 719 | 0 | 42,8 |
| | X | 744 | 744 | 1263,6 | 188,6 |

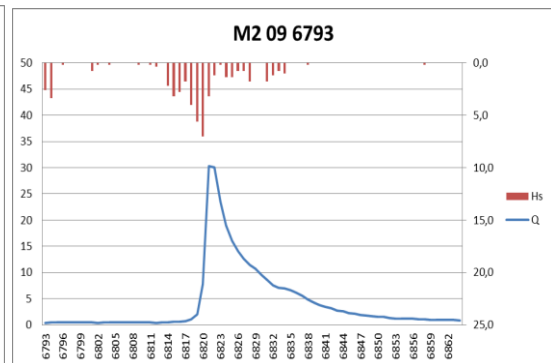
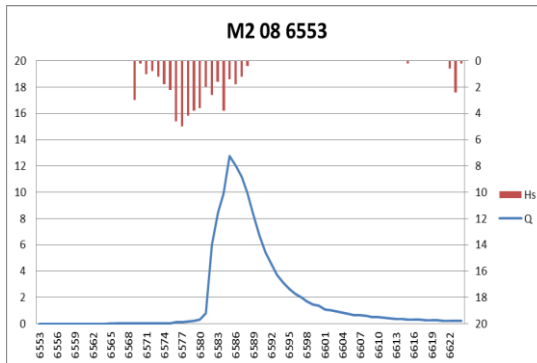
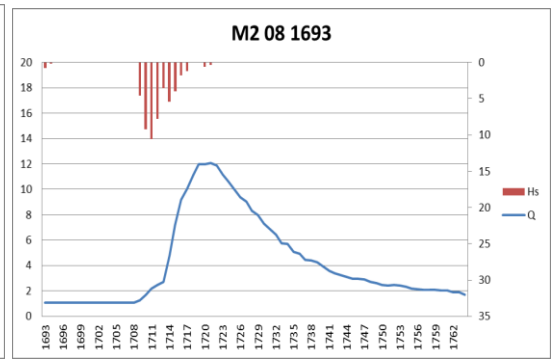
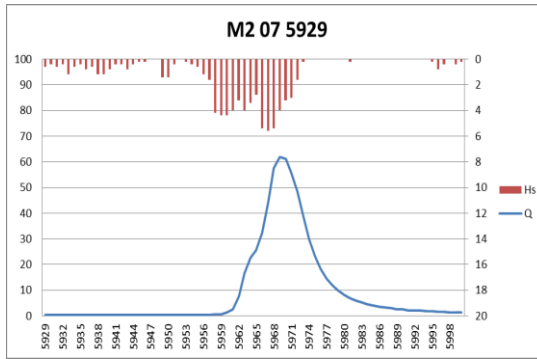
| | | | | | |
|------|------|-----|-----|---------|-------|
| 2004 | VI | 543 | 543 | 2540,53 | 137,8 |
| | VII | 742 | 742 | 1217,52 | 97,2 |
| | VIII | 681 | 681 | 431,34 | 100 |
| | IX | 720 | 720 | 873,8 | 155 |
| | X | 514 | 514 | 440,65 | 290,6 |
| 2005 | VI | 719 | 719 | 2012,47 | 101,4 |
| | VII | 744 | 744 | 1356,09 | 251 |
| | VIII | 743 | 743 | 1181,44 | 151,6 |
| | IX | 720 | 720 | 710,13 | 112,4 |
| | X | 498 | 498 | 293,53 | 18,8 |
| 2006 | VI | 720 | 720 | 3080,43 | 117 |
| | VII | 744 | 744 | 1123,05 | 78,8 |
| | VIII | 744 | 744 | 1358,75 | 267,6 |
| | IX | 720 | 720 | 794,97 | 33,8 |
| | X | 744 | 744 | 275,09 | 63,4 |
| 2007 | VI | 720 | 720 | 975,64 | 126,8 |
| | VII | 744 | 744 | 1086,86 | 199 |
| | VIII | 744 | 744 | 435,99 | 115,2 |
| | IX | 689 | 689 | 1953,7 | 256 |
| | X | 613 | 613 | 547,5 | 18,4 |
| 2008 | VI | 720 | 720 | 1978,46 | 103,8 |
| | VII | 744 | 744 | 575,64 | 129,2 |
| | VIII | 743 | 743 | 998,46 | 177,2 |
| | IX | 720 | 720 | 93,14 | 84 |
| | X | 744 | 744 | 318,2 | 129,6 |
| 2009 | VI | 720 | 720 | 2913,41 | 232,6 |
| | VII | 744 | 744 | 2938,69 | 221,6 |
| | VIII | 744 | 744 | 1424,88 | 96 |
| | IX | 720 | 720 | 554,15 | 64,8 |
| | X | 744 | 744 | 711,31 | 136,6 |

12.5 Povodňové vlny a vlny s velmi vysokým odtokem

Vlny s jedním vrcholem







Vlny s více vrcholy

