Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a Hydrogeologie

Studijní obor: Povrchová a podzemní voda

Eliška Cermanová

Výskyt extrémních hydrologických jevů v povodí horní Ostravice
Extreme hydrological processes in the upper Ostravice River basin

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Praha, 2022

Zadání bakalářské práce

Název práce

Výskyt extrémních hydrologických jevů v povodí horní Ostravice

Cíle práce

1. Rešerše metod analýzy hydrologických extrémních jevů s důrazem na povodně a období sucha
2. Analýza dlouhodobého chodu srážkoodtokového režimu povodí horní Ostravice pro profil Staré Hamry a jeho změn
3. Detekce bodu změny v chodu klimatických charakteristik a využití pro analýzy změn hydrologického režimu v jednotlivých obdobích
4. Analýza vybraných ukazatelů hydrologických extrémních stavů, zejména změny sezonality, frekvence a doby trvání povodňových průtoků a období sucha.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje:

Náplní bakalářské práce je zhodnocení srážko-odtokového režimu povodí Ostravice a jeho změn s ohledem na výskyt hydrologických extrémů. Bakalářská práce má přinést aktuální pohled na dlouhodobý vývoj a změny v dynamice výskytu extrémních hydrologických situací v pramenné oblasti horského povodí s minimálním vlivem činnosti člověka na odtokový režim a ukázat na potenciální vliv klimatické změny na hydrologický režim toku.

Povodí horní Ostravice je území přírodního charakteru nacházející se v pohoří Moravskoslezských Beskyd. Ke zpracování práce budou využita dostupné časové řady denního chodu pozorování ze stanic ČHMÚ od roku 1970. Pro statistickou analýzu dat budou využity dostupné statistické nástroje, konkrétně software KNIME, RStudio, aj.

Datum zadání: 6. prosince 2021

Jméno studenta: Eliška Cermanová

Podpis studenta: ……

Jméno vedoucího práce: prof. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Podpis vedoucího práce: ……...

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla a řádně citovala všechny použité zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného či stejného akademického titulu.

V Praze dne 26. července 2022 Podpis: ……..

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala prof. RNDr. Jakubovi Langhammerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k práci, vyhrazený čas pro konzultace a povzbuzující slova. Dále děkuji rodině a přátelům za plnou podporu a velkou trpělivost při psaní této práce.

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je vyhodnocení srážko-odtokových poměrů s bližším zaměřením na výskyt extrémních hydrologických jevů v horním povodí řeky Ostravice. První část práce je věnovaná literární rešerši o metodách hodnocení povodní a sucha, doplněná rešerší o současných poznatcích týkajících se změn srážko-odtokového režimu. Tato část je zakončená popisem fyzickogeografických poměrů zájmového povodí ilustrovaných mapovými výstupy. V druhé praktické části jsou dostupná data průměrných denních průtoků a denních srážkových úhrnů z ČHMÚ analyzovaná v období 1970-2020. Pettitovým testem homogenity bylo období rozděleno na dvě části (1970-1995 a 1996-2020) pro analýzu změny sezonality odtokového režimu a extrémních jevů. Pozornost je také věnovaná změně poměru základního a přímého odtoku pomocí indexu základního odtoku a odtokového součinitele. Pro detekování změny charakteristik frekvence výskytu, doby trvání a intenzity extrémních jevů byla použitá metoda prahové hodnoty a metoda nedostatkových objemů. Ve výsledku byl detekovaný posun sezonality výskytu povodní do dřívějších měsíců, a značný nárůst počtu a trvání období sucha. Rostoucí trend vykazuje také podíl základního odtoku, naopak trend odtokového součinitele je klesající.

Klíčová slova: hydrologické extrémy, průtok, povodně, sucho, povodí, změna klimatu

ABSTRACT

The main object of this bachelor is the assessment of rainfall-runoff processes with a primary focus on the occurrence of extreme hydrological phenomena in the upper basin of the Ostravice river. The first part of the work is devoted to literature research dealing with the issue of extreme hydrological phenomena and their assessment methods, supplemented by research about current findings regarding changes in the rainfall-runoff regime. This part ends with a description of the physical-geographical conditions of the basin, ilustrated by map outputs. In the second practical part, the available data of average daily flows and daily precipitation totals from the ČHMÚ are analyzed in the period 1970-2020. By Pettit's test of homogeneity, the period is divided into two parts (1970-1995 and 1996-2020) to analyze the change in seasonality of the runoff regime and extreme events. Attention is also paid to the change in the ratio of base and direct runoff using the baseflow index and the runoff coefficient. To detect changes in the characteristics of the frequency of occurrence, duration and intensity of extreme events, the threshold value method and the insufficient volume method were used. As a result, a shift in the seasonality of the occurrence of floods to earlier months and a significant increase in the number and duration of dry periods were detected. An increasing trend is also shown by the share of the base runoff, on the contrary, the trend of runoff coefficient is decreasing.

Key words: hydrological extremes, runoff, floods, droughts, basin, climate change

Obsah

1. Úvod a cíl práce 9
2. Materiál a metody 10
2.1 Extrémní hydrologické jevy 10
2.1.1 Povodně 10
2.1.2 Sucho 11
2.2 Hodnocení extremity odtoku 13
2.2.1 Hodnocení srážko-odtokových poměrů 13
2.2.2 Hodnocení povodní 15
2.2.3 Hodnocení hydrologického sucha 19
2.2.4 Použité metody 22
2.2.4.1 Hodnocení srážko-odtokového režimu 22
2.2.4.2 Hodnocení extrémních hydrologických jevů 25
2.3 Použitá data a nástroje 27
3. Zájmové území 28
3.1 Poloha 28
3.2 Geologické poměry 29
3.3 Půdní poměry 30
3.4 Geomorfologické poměry 33
3.5 Využití území 34
3.6 Klimatické poměry 38
3.7 Hydrologické poměry 39
4. Výsledky 40
4.1 Srážko-odtokový režim a jeho změny 40
4.1.1 Test homogenity 40
4.1.2 Čára překročení a m-denní průtoky 41
4.1.3 Roční odtokové a srážkové poměry 42
4.1.4 Měsíční odtokové a srážkové poměry 45
4.1.5 Index základního odtoku BFI a jeho změny sezonality 47
4.1.6 Odtokový součinitel 50
4.1.7 Součtové čáry 51
4.2 Extrémní hydrologické jevy 52
4.2.1 Hydrologické sucho 52
4.2.1 Epizody vysokých průtoků 58

5. Diskuze 63
6. Závěr 66
7. Literatura 68

1. Úvod a cíl práce

Na stále větší rozkolísanost a amplitudu teploty na zemském povrchu doprovázené zvětšujícím se teplotním rozdílem mezi pevninou a oceánem reaguje zpětnou vazbou i vodní cyklus, a to větším množstvím extrémních událostí měnících se v čase i prostoru (Cílek, Just, Sůvová et al., 2017). Na našem území se tyto procesy projevují formou častějších a ničivějších povodní, zejména od konce 20. století, nebo delšími a častějšími periodami sucha. Tím jsou vodní stavy v tocích stále více rozkolísané a hydrologické extrémy se dále prohlubují (Patera A., 2001). V důsledku je stále větší zájem o extrémní hydrologické jevy a pochopení jejich geneze, stejně jako o schopnost poskytnout dostatečnou prognózu v čase a prostoru společně s vyhodnocením a kvantifikováním všech jejich důsledků.

Na výskytu extrémní hydrologické události se podílí mnoho fyzickogeografických faktorů dohromady v různých poměrech s příspěvkem lidské činnosti, ale zpravidla nejhlavnějším spouštěcím impulsem bývá extrémní meteorologická situace (Čurda, Janský, Kocum, 2011). Ovšem k ovlivňujícím faktorům patří také lidská činnost, například upravování koryt toků formou jejich napřimování a betonování koryt, které v případě povodňové vlny způsobují větší ničivý efekt vlivem změny mnoha faktorů (Langhammer, 2009).

Ke kvantitě a kvalitě extrémních hydrologických jevů přispívá také změna sezónního chodu meteorologických činitelů, jako je například teplota, srážky nebo vítr, a to v podobě posunu o jeden měsíc dřív. Tato změna je nejspíš formovaná klimatickou změnou neboli celkově vyšší teplotou po celé planetě. V důsledku přicházejí falešné začátky jara, stejně tak teplotní rozdíly mezi létem a zimou se stále pomalu snižují vlivem teplejší zimy (Cílek, 2020, s.79-80).

Z výše popsané problematiky vychází také cíle této práce, jejichž výsledky jsou demonstrovány na zájmovém území horní části povodí řeky Ostravice. Tato řeka je analyzovaná převážně v kontextu změny odtoku společně se změnou poměrů vodních ekosystémů vlivem výstavby přehradní nádrže Šance, nebo v kontextu změn odtokových poměrů v důsledku úprav koryta či zavádění protipovodňových opatřeních, protože od přehrady Šance, ležící v horní části povodí, až po ústí je řeka silně ovlivněná lidskou činností. Nicméně nad přehradou je tok stále přírodního charakteru v podobě horské bystřiny, která je více citlivá na změny okolních podmínek neboli vykazuje na změny rychlejší zpětnou vazbu, což je pro vhodné pro zkoumání důsledků změn okolních vlivů.

V této práci je cílem provést zhodnocení srážko-odtokových poměrů s důrazem na hydrologické extrémní jevy. Srážko-odtokový režim je hodnocen v ročním a měsíčním kroku, který je následně zkoumán také z pohledu změny sezónního chodu. V rámci vyhodnocení srážko-odtokového procesu práce dále poskytuje vhled do míry podílu základního odtoku a srážek na celkovém odtoku prostřednictvím indexu základního odtoku a odtokového součinitele a jejich změny. V případě extrémních jevů je cílem jejich určení za pomocí obecně používaných metod, a následně vyhodnocení z pohledu jejich frekvence výskytu, doby trvání nebo závažnosti. Všechny tyto analýzy jsou možné provést díky přítomnosti vodoměrné a srážkoměrné stanice Staré Hamry provozované Českým hydrometeorologickým ústavem s dostupnými časovými řadami průměrných denních průtoků a denních srážkových úhrnů, pokrývajících období 1970-2020.

2. Materiál a metody

2.1 Extrémní hydrologické jevy

2.1.1 Povodně

V České republice se povodně řadí mezi první nejnebezpečnější rizika přírodního charakteru skýtající přímé ohrožení. Obecně se jedná o situaci, kdy protékající voda v toku překročí průtočnou kapacitu koryta z rozličných příčin (Němec, Hladný, 2006, s.82-83). Z legislativního hlediska je povodeň chápána jako „*přechodné výrazné zvýšení hladiny vodních toků nebo jiných povrchových vod, při kterém voda již zaplavuje území mimo koryto vodního toku a může způsobit škody*,“ (§ 64 odst. 1 zákona č. 254/2001 Sb. vodní zákon – znění od 01.02.2022). Zákon od roku 2004 také definuje povodeň jako stav vodního toku po vyhlášení 2. (stav pohotovosti) nebo 3. (stav ohrožení) stupně povodňové aktivity s účinností do jejich odvolání (Čl. 1 bod 49. zákona č. 20/2004 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb. vodní zákon – znění od 28.5.2008).

Faktory ovlivňující vznik povodně se dělí na předběžné a příčinné. Předběžné faktory působí na budoucí událost v předstihu několika dnů až měsíců v podobě míry nasycenosti povodí, objemu koryta vodního toku a jeho předchozí naplněnost, míry promrznutí půdy, výšky sněhové pokrývky, míry intercepce a detence a schopnosti infiltrace. Naopak příčinné faktory ovlivňují povodeň v řádu několika hodin až dní před jejím vznikem, a to dostatečně vysokými teplotami pro tání sněhové pokrývky a dešťovými srážkami (Němec, Hladný, 2006, s.82-83).

Povodně můžeme klasifikovat z různých pohledů, ať už podle příčiny, délky trvání nebo sezóny. Podle meteorologických příčin můžeme povodně rozdělit do čtyř kategorií: povodně sněhové (způsobené tající sněhovou pokrývkou), dešťové, smíšené a ledové (zmenšení průtočnosti koryt ledovou zácpou) (Státníková, 2012, s.7). Každá kategorie povodní je také charakteristická svým výskytem během roku, tedy sezonalitou.

Povodně zapříčiněné táním sněhové pokrývky se vyskytují převážně při jarní oblevě za vzestupu teploty vzduchu do kladných hodnot. Samotné tání není na našem území tak významné, ovšem vzestup teploty přináší srážky v kapalném skupenství, které tání doprovází a urychluje. Tím vznikají nebezpečnější smíšené povodně. Se smíšenými povodněmi se mohou od zimy do jara vyskytovat také ledové povodně. Co se týče dešťových povodní, jejich výskyt je zaznamenáván během celého roku včetně zimního období při přechodném zvýšení teplot, nebo také vzhledem ke stále narůstající průměrné teploty v zimním období ((Němec, Hladný, 2006, s.84-85).

Pokud však k meteorologickým příčinám zařadíme také antropogenní vlivy nebo další přírodní procesy, tak klasifikace je následující (Bolt, 1975, cit. podle Langhammer, 2007):

- povodně z tajícího sněhu nebo ledu (v důsledku ledových zátaras)
- pobřežní povodně
- říční povodně způsobené přívalovými dešti
- povodně ze strukturních poruch přehrad nebo hrází
- povodně vyvolané sesuvy, protržením vulkanického jezera nebo odlomením ledovce

Z pohledu délky trvání se vyskytují povodně dvojího typu, a to povodně z trvalých jednodenních nebo vícedenních dešťových srážek, a povodně z lokálních přívalových srážek v rozsahu jedné či více hodin. V případě druhého typu povodní je účinek přívalových srážek nebezpečný hlavně u menších toků, ve větších povodích nezpůsobují tak výrazný zdvih hladiny (Němec, Hladný, 2006, s.84).

2.1.2 Sucho

Jako další extrém je již zmíněné sucho. Obecně se jedná o stav nedostatku vody pro uspokojení potřeby v určitém čase v určité oblasti (Kašpárek, Novický, 2011, s.77). Protože existuje mnoho definic sucha na základě jeho příčin, projevů či dopadů dotýkajících se

konkrétních zájmových oblastí, tak tímto vznikly řádově desítky definic pro různé obory (Wilhite, Glantz, 1985). Z tohoto důvodu je třeba dát si pozor na různorodost definic, jež vedou k rozdílným závěrům (Hisdal, Tallaksen, 2000).

Willhite a Glantz (1985) ve své studii týkající se problematiky definice sucha vytvořili čtyři kategorie na základě revize více jak 150 publikovaných definic sucha následovně: sucho meteorologické, zemědělské, hydrologické a socioekonomické.

Meteorologické sucho vychází především z frekvence výskytu a velikosti úhrnů srážek společně s hodnotami teploty vzduchu, které značně ovlivňuje proces evapotranspirace. Zemědělské sucho neboli agronomické je určování podle množství dostupné vody pro kultivaci rostlin nebo chov zvěře. Nastává záhy po meteorologickém suchu. Sucho hydrologické se projevuje zpožděně oproti předchozím typům, a to snížením zásob povrchové a podzemní vody v povodí. Nakonec socioekonomické sucho se skládá ze všech zmíněných typů sucha, nedostatek vody se již začíná týkat lidí v běžném životě a fungování hospodářství je tímto omezeno, ne-li pozastaveno (Němec, Hladný, 2006, s.90-92).

Stejným úvodním zamyšlením nad definicí problematiky sucha začíná svou studii Yevjevich (1967), který popisuje sucho z pohledu geofyzika, inženýra, ekonoma a zemědělce se závěrem, že každý uživatel vody má svoji koncepci definice sucha, která se mění podle podmínek jejich činnosti.

Podle Brázdila a Trnky (2015, s.27) můžeme sucho rozdělit dle délky trvání a impaktu na přírodní procesy následovně:

- krátkodobé sucho (meteorologické)
- střednědobé sucho (sucho ovlivňující zemědělskou produkci)
- dlouhodobé sucho (ovlivňující vodní ekosystémy)

Pokud se na sucho zaměříme v rámci časového aspektu, tak zemědělské sucho trvá většinou v řádu několika týdnů až 6-9 měsíců, zatímco hydrologické a socioekonomické sucho se objevuje až po delších intervalech suchých epizod (Brázdil, Trnka 2009).

Nicméně, výskyt meteorologického sucha většinou předchází ostatním kategoriím sucha, proto je důležité nejdříve pochopit meteorologické procesy nad daným územím, a následně jejich vliv na ostatní oblasti přírodních procesů nebo antropogenní činnosti zasažené suchem (Brázdil, 2009).

2.2 Hodnocení extremity odtoku

Pro hodnocení extrémních jevů v odtokovém režimu je nejdříve potřeba pochopit chod samotného odtoku. Každý odtokový režim se řídí podle svého unikátního vzorce, který je formován vnějšími vlivy, jako je geologické podloží, klimatické, půdní a geomorfologické poměry, typ vegetace, velikost povodí, tvar říční sítě, využití území, nebo přítomnost vodních nádrží či jezer. Všechny tyhle faktory je třeba zohlednit při interpretaci dat, ať už sledujeme frekvenci, velikost, nebo sezonalitu extrémních jevů, či jejich změny v čase a prostoru (Baker, Richards, 2004). Proto v následující podkapitole je uvedeno několik příkladných studií týkajících se vlivu fyzickogeografických poměrů na srážko-odtokový režim.

2.2.1 Hodnocení srážko-odtokových poměrů

Vlivem fyzickogeografických poměrů v povodí řeky Vydry na tvorbu odtoku s důrazem na vznik a průběh epizod povodní, a zároveň hodnocením účinnosti dosavadních revitalizací přítomných horských vrchovišť, se zabývá ve své studii Čurda, Janský a Kocum (2011). Odtok ovlivňují především geomorfologické poměry v podobě orograficky zesílených srážek a vegetační poměry přítomností vrchovišť. Role vrchovišť je zde značná především při povodňových situacích, a to zvyšováním extremity povodně. Zvýšení extremity se projevuje obzvlášť v povodích s přítomností původních odvodňovacích kanálů, které byly v rámci revitalizace zahrazené. Revitalizace má na jednu stranu pozitivní účinek na stabilizaci kolísání odtoku, nicméně při povodních může mít negativní efekt. Jak vrchoviště působí na tvorbu odtoku a jeho retenční schopnosti se také zabýval Vlček, Janský, Kocum, Šefrna a Kučerová (2012). Představa o tomto faktoru neboli mínění o jeho pozitivních účincích v průběhu obou hydrologických extrémů byla donedávna ne úplně správná. Retenční schopnost vrchovišť je nepopiratelná, její významnost stoupá v období nízké hladiny podzemní vody, nicméně na povrchovém odtoku se během suchých zimních či letních obdobích vůbec nepodílejí. Podíl na odtoku mají pouze po úplném nasycení za situace extrémních srážek, a to, jak již bylo zmíněno výše, zvyšováním extremity povodně. Tento negativní efekt se dále potvrzuje také ve studii od autorů Vlček a kol. (2021) analyzující problematiku složení odtoku v povodí tvořeného vrchovišti ve spojení s propustnějšími podzolovými půdami.

Protože zájmové povodí této práce se nachází v zalesněném území Moravskoslezských Beskyd, je třeba zmínit vliv lesa, zejména vliv lesní půdy na formování

odtoku, jejíž problematikou se zabývá Bíba a kol. (2006, 2010) v experimentálních povodích Moravskoslezských Beskyd. Tato povodí se nachází převážně půdní typ kambizem s větším podílem humusu a oglejené půdy. Tyto lesní půdy generují povrchový odtok vzácně, a to příkopy a lesními cestami, jinak jsou charakteristické pro svou vysokou schopnost infiltrace. Vysoké kulminační průtoky nastávají v situacích, kdy povodí je již před příčinným vysokým srážkovým úhrnem plně nasyceno, a voda proudí do toku celým půdním profilem. Naopak minimální průtoky nastávají již po pár bezsrážkových dnech nebo malých úhrnech do 1 mm.

Hydroklimatické změny zapříčiněné disturbancí lesa a zvýšené průměrné teploty vzduchu od konce 20. století v povodí horní Vydry analyzoval ve své studii Langhammer, Su a Bernsteinová (2015). Kombinace narušení lesa a zvýšené teploty způsobuje změny v podílu přímého a základního odtoku, kdy podíl základního odtoku se stále zvyšuje, a je také příčinou vyšší variability odtoku během roku. Stejně tak se mění sezónní chod vysokých a minimálních průtoků a jejich četnost výskytu, například sezónní vysoké průtoky jarního tání se přesunují do časnějšího jara, a minimální průtoky z podzimního období do zimního. Analýzu zabývající se vlivem změny hydroklimatických podmínek na odtok provedla také Blahušiaková a Matoušková (2015) v horním povodí řeky Hron na území Slovenska. Hodnoty průtoku jsou nižší zejména od bodu zlomu v 80. letech 20. století (statisticky určený bod v čase, po kterém se průměrná teplota vzduchu pohybuje ve vyšší hladině) vlivem výrazného nárůstu teploty v zimní a letním období, nižší hloubky sněhové pokrývky, menšího počtu dní se sněhovou pokrývkou, a sezónní změny distribuce srážek.

Významnost závislosti ročního chodu odtoku v horských povodích na snížené množství sněhových zásob ze zimního období vlivem klimatické změny dále zkoumá a modeluje ve své studii Jeníček a Ledvinka (2020). Ve výsledku přeměna části sněhových srážek na dešťové způsobuje snížení hladiny podzemní vody, dřívějšího jarní tání a snížení odtoku. V období sucha se hodnoty minimálního průtoku prohlubují, hodnoty tedy nezávisí pouze na množství srážek a teplotě udávající účinek evapotranspirace, ale také závisí na akumulovaných zásobách sněhu z předchozího zimního období. V případě snížení sněhových zásob dochází k prohlubování období sucha. To také prokazuje studie od autorů Blahušiaková, Matoušková, Jeníček, Ledvinka, Kliment a kol. (2020) v rámci horských povodí střední Evropy. Horská povodí jsou na hydroklimatické změny podmínek citlivější, ovšem povodí nacházející se v intervalu nadmořské výšky 1000-1500 m n. m. se zdály být citlivější než povodí nacházející se v nadmořské výšce vyšší než 1500 m n.m. S nárůstem teploty vzduchu a změnou rozložení srážek byla prokázána úzká souvislost mezi letním

období sucha a množstvím akumulované sněhové pokrývky z předcházející zimní sezóny, což může mít do budoucna následky v různých odvětvích od průmyslu, energetiky, zemědělství až po ekologický stav říčních ekosystémů.

Pro vyhodnocení a pochopení odtokového režimu a jeho výkyvů do extrémních hodnot, nebo ekologický stav vodního toku ovlivněný řadou přírodních a antropogenních faktorů, byly v posledních desetiletích vyvinuty či převzaty z jiných oborů různé bezrozměrné indexy. Je však důležité vybrat pro zájmové povodí ty nejvíce klíčové hydrologické indexy, proto Olden a Poff (2003) přichází se studií poskytující přehled 171 hydrologických indexů, které pro porovnání aplikují na data průtoku ze 420 stanic rozmístěných po celém území státu USA. Studie následně poukazuje na redundanci mezi těmito indexy pro lepší orientaci a zjednodušení výběru pro analýzu hydrologických dat.

Hodnocení hydrologického sucha a povodní má několik společných ukazatelů, jako je frekvence výskytu, doba trvání, intenzita, sezonalita, nebo časoprostorové aspekty, které společně doprovází vybrané metody použité k analýze hydrologických extrémních jevů. Nicméně následující podkapitoly budou zaměřeny především na popis vybraných nejpoužívanějších metod a indexů ilustrovaných českými a zahraničními studiemi.

2.2.2 Hodnocení povodní

Povodeň je hodnocena svými charakteristikami, jako je tvar povodňové vlny, rychlost nástupu povodňové vlny, doba trvání povodně, objem vody, který během trvání povodně odtekl, hodnota průtoku určující N-letost povodně, geomorfologické změny v korytě, nebo vzniklé socio-ekonomické škody.

Tvar povodňové vlny neboli průtokové vlny s charakterem povodně (Kemel, Kolář, 1980, s. 182) je ohraničená hodnotou průtoku definující počátek povodně, který tvoří tzv. patu povodňové vlny neboli moment rychlého zvětšování průtoku. Poté následuje vrchol povodně neboli kulminační průtok Q_{max}. Konec povodně je okamžik po rychlém sestupu vysokých hodnot průtoku následovaný již nepatrnými výkyvy průtoku (Netopil a kol., 1984, s.192).

Trvání povodně je dané časovým intervalem ohraničeného počátkem a konec povodně. Doba trvání je ovlivněná fyzicko-geografickými poměry v povodí, obecně však se směrem po toku doba trvání povodní zvětšuje (Netopil a kol., 1984, s.192).

Rychlost průběhu povodně je definovaná jako podíl rozdílu času výskytu kulminačního průtoku mezi 2 stanicemi a délky toku mezi stanicemi (Netopil a kol., 1984, s.193).

Význam a velikost povodně jsou označené hodnotou n-letého průtoku (např. 10-letá, 100-letá povodeň). N-letý průtoku je statisticky daná hodnota podle doby opakování v souboru pozorovaných dat o průtoku nebo vodním stavu, podle které je následně určena pravděpodobnost výskytu. Jde ovšem o hodnotu vycházející ze statistické analýzy maximálních průtoků z dostupných časových řad měření, takže hodnoty n-letého průtoku nemusí být překročeny nebo dosaženy pravidelně jednou za *n* let (Kemel, Kolář, 1984, s.183-184).

Povodňové události sebou přináší své obecné charakteristiky, ovšem existují jiné přístupy a metody jejich hodnocení, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

Prahová metoda POT (Peaks Over Threshold)

Tuto metodu použil například Čekal a Hladný (2008) pro výběr dominantních povodní a následnou regionalizaci 181 vybraných povodí na území České republiky, antropogenně neovlivněných, na základě podobnosti sezónního výskytu.

Metoda POT umožňuje výběr událostí, jejichž hodnota průtoku překročila stanovenou hraniční hodnotu. Ovšem po aplikaci této metody autoři upozorňují na úskalí spojené s výběrem prahové (hraniční) hodnoty – pokud je vybraná hodnota příliš nízká, výběr bude obsahovat také epizody přechodně zvýšených průtoků zapříčiněné konvektivní srážkou, namísto pouze dominantních povodní způsobených frontálními srážkami. Ovšem pokud prahová hodnota je moc vysoká, tak pro analýzu bude počet vybraných povodní příliš nízký. V této studii byla vybraná jako nejoptimálnější prahová hodnota 1-letého průtoku.

Ve výsledku v časovém aspektu převažoval výskyt jarních smíšených povodní v zimní části roku, což dokazuje také průměrný den výskytu povodní připadající na 24. dubna. Druhá perioda nejčastějších povodní reprezentují měsíce červenec a srpen způsobené buď dlouhotrvajícími nebo přívalovými srážkami. Naopak s nejmenším výskytem povodní jsou měsíce září a říjen. V prostorovém aspektu analýzy ukázaly velký rozdíl režimů výskytu povodní v povodí Odry ve východní části České republiky a zbytkem území, který má oproti území povodí Odry potenciál výskytu povodně skoro po celý rok.

Mann-Kendallův test

Mann-Kendallův test je neparametrický test používaný k detekování přítomnosti trendu v časových řadách dat, u kterých se nepředpokládá normální rozdělení dat (Wilks, 2011, s. 158,166).

Test pro detekci trendů v hydrologických extrémech a software IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) byl aplikován ve studii od Wang et al. (2015) se zaměřením na změny v odtoku řeky Tarim nacházející se v severozápadní oblasti Číny. Ve výsledku počet trendů vztažených k analýze minimálních průtoků byl vyšší než počet trendů v opačné oblasti. Sezónně největší změny v hydrologických extrémech připadají na zimní období. Dále horní část toku vykazuje zvýšení frekvence výskytu vyšších průtoků, naopak tomu je v dolní části toku, kde se zvýšila frekvence výskytu nízkých průtoků. Všechny tyto změny připisují autoři klimatické změně a stále zvyšujícím se antropogenním aktivitám kolem vodního toku.

Dále byl Mann-Kendallův test a 8 povodňových indikátorů (například maximální roční průtok za daný hydrologický rok a letní/zimní sezóny, počet překročení určené prahové hodnoty aj.) použit ve studii od Petrow a Merz (2009) reagující na zvýšený výskyt povodní ke konci 20. století, s cílem určit, zda frekvence či velikost povodní narůstá.

Detekované trendy byly většinou vzestupného charakteru než sestupného, ovšem růst frekvence a velikosti povodní nebyl všudypřítomný. Oproti severovýchodní oblasti, kde změny v povodňové aktivity jsou malé, tak v severní, západní a centrální oblasti Německa byly detekovány značné změny, projevující se více v zimě než v létě, stejně jako tomu bylo v předchozí studii ze severovýchodní Číny. Prostorové rozložení změn srážko-odtokového procesu autoři vysvětlují změnou frekvence a persistence atmosférické cirkulace, která je také ovlivněná orografickými poměry. Tímto autoři zdůrazňují důležitost analýz změn chování povodní při řešení protipovodňových opatřeních.

3.2.3 Index extremity kulminačního průtoku

Index extremity kulminačního průtoku (Čurda, Janský, Kocum, 2011), popisující míru extremity povodně, se skládá z podílu maximální dosažené hodnoty desetiminutového průtoku pocházející z časového intervalu ohraničeného předcházejícím dnem před dnem kulminačního průtoku a dnem kulminačního průtoku, označený KP, a průměrné hodnoty průtoku z časového úseku 7 dní před příchodem povodňové vlny, značené jako PP.

$$I_{EKP} = \frac{KP}{PP}$$

Tento index byl aplikován ve studii zkoumající extremitu povodí v povodí Vydry v souvislosti s fyzickogeografickými faktory povodí (Čurda, Janský, Kocum, 2011). Ve výsledku míra extremity povodně značně závisela na míře výskytu horských vrchovišť společně s faktorem míry revitalizačních opatření, zahrnujících hrazení dřívějších melioračních kanálů odvodňujících přítomná vrchoviště. Tyto revitalizace na jednu stranu snižují rozkolísanost odtoku a vyvažují sezóny průměrné vodnosti, na druhou stranu po překročení jisté míry průtoku je účinek opačný a podporuje extremitu povodně.

R-B index

S indexem popisující frekvenci a rychlost změn v proudění přišel v roce 2004 Baker et al. ve studii „*A New Flashiness Index: Characteristics and Applications to Midwestern Rivers and Streams.“.* R-B index neboli index „bleskovosti“ je vyjádřen následujícím vzorcem:

$$R - B\ index = \frac{\sum_{n-1}^{n} |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^{n} q_i}$$

Vzorec představuje poměr absolutních denních fluktuací průtoku vzhledem k celkovému průtoku za daný interval, přičemž hodnota průtoku je denní průměr. Index poskytuje výsledky hodnot v intervalu 0–2, přičemž čím se výsledná hodnota blíží k nule, tím je průtok vyrovnanější. Výsledné hodnoty indexu jsou ovlivňovány využitím a způsobem obhospodařování území, dále negativně koreluje se vzrůstající plochou povodí.

Pomocí R-B indexu ve vybraných slovenských a rakouských povodí hodnotil Holko et al. (2011) prostorové a časové změny fluktuace proudění. Negativní korelace s narůstající plochou povodí byly potvrzeny, stejně jako s čtvrtohorním geologickým podložím, se vzrůstajícím procentuálním zastoupením lesa v povodí, nebo zemědělskou půdou. Naopak pozitivní korelace vykazovalo podloží třetihorní a vápencové, stejně tak i bouřkové události. U většiny povodí byly prokázány trendy vysoké proměnlivosti proudění zapříčiněné převážně lidskou činností (výstavba vodní nádrže, provoz vodní elektrárny). Provoz vodních elektráren byl v Rakousku hlavní příčinou vysoké fluktuace proudění, a to především v zimních obdobích. U menšího počtu povodí vykazující trend fluktuace proudění byly způsobeny sezonalitou srážek.

2.2.3 Hodnocení hydrologického sucha

Hydrologické sucho se vyznačuje výskytem minimálních průtoků. Minimální průtoky se vyskytují v období sucha, a s narůstající dobou trvání období se stále snižují. Stejně tak má na minimální průtoky zásadní vliv aktuální zásoby podzemní vody, které v období sucha tvoří na odtoku většinový podíl. Například povodí tvořeno špatně propustným flyšem, jako je tomu i v případě zájmového území této práce, jsou zásoby podzemní vody chudé, a tím je chod průtoků více nevyrovnaný, a v období sucha charakteristický svými velice nízkými průtoky (Kemel, Kolář, 1980, s.214).

Obecně používaná hranice, jejíž překročení charakterizuje začátek suchého období, je hodnota Q_{355} neboli průtoky překročené 355 dní v roce. (Netopil a kol., 1984, s.194). Další kritérium suchého období je jeho doba trvání, a to například alespoň 4 dny za sebou (Kemel, Kolář, 1980, s.215) nebo 3 dny (Netopil a kol., 1984, s.194). Jakými dalšími metodami se hydrologické sucho může hodnotit se zabývají následující podkapitoly.

Metoda nedostatkových objemů

Tato metoda vychází z principu výše zmíněné POT metody neboli prahové metody. Zvolená limitní prahová hodnota, která definuje začátek a konec suché epizody, je nejčastěji hodnota průtoku s pravděpodobností překročení 97,15 % neboli hodnota průtoku Q_{355}. Následně je výpočty určena velikost periody sucha pomocí nedostatkového (doplňkového) objemu (Brázdil, Trnka, 2015, s. 45-46). Výběr epizod sucha může být opět ovlivněn zvolenou prahovou hodnotou, nebo také zvoleným počtem po sobě jdoucích dní pod prahovou hodnotou definující periodu sucha – například Hladný (2009) používá dobu 5 dní, ale Řičicová et al. (2003) zase dobu 3 dní.

Metodu nedostatkových objemů použil Strnad et al (2017) pro podobnou regionalizaci jednotlivých povodích jako Čekal a Hladný (2008). Tato regionalizace poskytuje časoprostorové informace o riziku výskytu sucha a odhad jeho N-letosti. Metoda nedostatkových objemů je zde charakterizovaná jako součet měsíčních doplňujících odtoků pod 20% kvantilem měsíčních odtoků.

Autoři mezi hlavní charakteristiky této metody zařazují následující ukazatele, jako je doba trvání období, velikost nedostatkového objemu, poměr nedostatkového objemu k průměrnému odtoku, intenzita období sucha (poměr velikosti NO ku době trvání období), nebo relativní intenzita.

Dále bylo chování povodí v době sucha stanovené pomocí shlukové analýzy na základě dat celkového a základního odtoku, výparu, srážek a hydrogeologických rajónů. Jako nejvíce náchylná oblast k výskytu sucha vyšla oblast Středočeského a Jihomoravského kraje (celkem 44 povodí z 133 analyzovaných je ve stavu ohrožení) a jako nejméně náchylné oblasti horské pohraniční povodí (36 povodí bez rizika).

Dále s metodou nedostatkových objemů se můžeme setkat ve studii zabývající se porovnáváním period sucha z 20. století s periodami sucha z 90. let a na přelomu 20. a 21. od Tremla (2012). Vymezené období mezním limitním průtokem jsou charakterizovány buď pomocí objemu vody chybějícímu k doplnění hodnoty limitního průtoku (Q_{330}, Q_{355}, Q_{360}), pomocí délky trvání, nebo data výskytu období podlimitního průtoku. Pro výpočet nedostatkových objemů autor předkládá následující vzorec:

$$NO = \sum_{i=1}^{t} (LQ - Q_i) \times 24 \times 3600$$

, kde *t* představuje počet dní trvání období pod hodnotou limitního průtoku, *LQ* je velikost limitního průtoku ve zvolených jednotkách, Q_i je průtok i-tého dne období s průtokem nižším, než je limitní průtok. Nejvýznamnější periody sucha ve 20. století vyšly v letech 1947,1953 a 1921. Všechny roky se nacházejí v první polovině 20. století. To autor vysvětluje výstavbou přehrad od 50. let, které pomáhají nadlepšovat průtoky dodnes. Nejvíce suché roky v druhé polovině 20. století až prvního desetiletí 21. století vychází 2003, 1992 a 1983. Ve výsledku s porovnáním extrémních hydrologických period sucha z období 20. století jsou období sucha z konce 20. století a začátku 21. století méně významná (Treml, 2012). Elleder (2003) srovnává hydrologické sucho v roce 2003 s delším časovým obdobím stavů hladin Labe v Děčíně, a opět i periody sucha v druhé polovině 19. století vycházejí jako výraznější.

Pro podobné porovnávání period sucha byla metoda nedostatkových objemů využita také ve studii Řičicová et al. (2003) společně s analýzou a trvání deficitních období pomocí programu LOWFESTIM, denních minimálních průtoků, a N-letých minimálních průtoků. Pro analýzy byly vybrané povodí s přirozeným odtokovým režimem na území České republiky. Jak autoři hned v úvodu předkládají, tento rok byl významný z hlediska velkého deficitu úhrnu srážek, konkrétně od ledna do září 2003 spadlo o 500 mm méně, než je dlouhodobý roční průměr. S kombinací kladné odchylky teploty do 2 °C od dlouhodobého průměru se prudký pokles hladin vody v hlavních povodích začal projevovat již od května a

vrcholil v průběhu srpna. Měsíční průtoky tedy dosahovaly pouze 25-40 % Q_m, menší vodní toky, jako například řeka Opavice, dosáhla pouze 3 % dlouhodobého měsíčního průměru. Po porovnání hodnot minimálních průtoků z roku 2003 a minimálních průtoků z celého sledovaného období vychází, že pouze toky jako Otava, Skalice a Svatava v povodí Labe, nebo toky Moravská Sázava a Morava v povodí řeky Moravy dosáhly v roce 2003 vůbec nejnižšího průtoku za sledované období. Nicméně dosažené minimální hodnoty v roce 2003 byly u většiny toků dosaženy již v předchozích letech. N-leté minimální průtoky byly určeny tak, že z klouzavých průměrů byly vybrány nejmenší průměry, kterým byla přiřazená daná doba opakování.

Metoda klouzavých průměrů

Předchozí zmíněná metoda pro vyhodnocení hydrologického sucha opírající se o princip prahové metody může být zavádějící z důvodu vysoké fluktuace hodnot průtoku. Proto například Tallaksen et al. (1997) ve své studii používají metodu klouzavých průměrů, a to z důvodu, že průtok dosahuje prahové hodnoty během velice krátké doby, a rozděluje tak jednu epizodu sucha na menší časové intervaly na sobě závislých. Metoda klouzavých průměrů byla zde použita se zvoleným průměrujícím časovým krokem 10 dní, tím byly lépe identifikovány nezávislé epizody sucha.

Indexy hydrologického sucha

Zda indexy vycházejí pouze z hodnot sledované veličiny ve vztahu s jejím dlouhodobým normálem, nebo se snaží postihnout celý srážko-odtokový proces, můžeme rozdělit na indexy prosté a komplexní (Brázdil, Trnka, 2015 s. 45):

- **Indexy prosté**

Do této kategorie spadá například odtokový index sucha (SDI – Streamflow Drought Index). Tento index byl poprvé představený ve studii od Nalbantis a Tsakiris (2009).
K výpočtu jsou použity časové řady měsíčních průtoků $Q_{i,j}$, přičemž *i* představuje hydrologický rok a *j* měsíc v hydrologickém roce (na území České republiky j=1 pro listopad a j=12 pro říjen):

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \ , \ \ i = 1,2, \ldots \ \ j = 1,2, \ldots 12 \ \ \ k = 1,2,3,4$$

, kde $V_{i,k}$ představuje kumulativní objem průtoku pro i-tý hydrologický rok a k dané období (k=1 pro listopad-leden, k=2 pro listopad-duben atd.). Pro každé referenční období i-tého hydrologického roku je SDI vypočítán podle vzorce:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{s_k}, \qquad i = 1, 2, \ldots \quad k = 1, 2, 3, 4$$

, kde V_k je průměr a s_k standartní odchylka kumulativního objemu proudění za referenční období k (Nalbantis, Tsakiris, 2009).

Dále se do této kategorie řadí například index regionálního nedostatku odtoku (RSDI), standardizovaný index odtoku (SRI), index bazálního odtoku (BFI) nebo index nízkého průtoku (LFI).

- **Indexy komplexní**

Mezi komplexní indexy využívajících vícero veličin patří například Palmerův index intenzity sucha PDSI (Palmer Drought Severity Index), který použil ve své analýze výskytu sucha na území České republiky například Brázdil et al. (2009) spolu s indexem SPI (Standardized Precipitation Index). Výpočet Palmerova indexu vychází z vodní bilance obsahující úhrn srážek většinou za jeden měsíc, dále aktuální obsah vody v půdě, a evapotranspiraci určenou Thornwaitovou metodou (Brázdil, Trnka, 2015, s. 37-38). Jako nejsušší periody z analyzovaného období 1861-2006 vychází polovina 30.let, konec 40. let až začátek 50, konec 80.let do začátku 90 a začátek 21. století. Po porovnání těchto dvou indexů index SPI mnohem víc kolísá, protože do jeho výpočtu vstupují pouze srážky, a jakýkoliv náhlý vysoký úhrn významně ovlivní celkový výsledek. Kolísání indexu se však může redukovat pomocí průměrování nebo braní v potaz delší časový interval. Z tohoto důvodu autoři hodnotí Palmerův index jako vhodnější k určení trvání suché periody (Brázdil et al., 2009).

Dalším komplexním indexem je také index dodávek povrchové vody nebo index náhrad sucha.

2.2.4 Použité metody

2.2.4.1 Hodnocení srážko-odtokového režimu

Čára překročení a m-denní průtoky

Výpočet a konstrukce čáry překročení určuje, jak často byla dosáhnuta nebo překročena daná hodnota průtoku, tedy její pravděpodobnost výskytu ve sledovaném

souboru průtokových hodnot. Výpočet byl v této práci proveden vzorcem dle Čegodajeva (Kemel, Kolář, 1980, s. 18-21):

$$p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \times 100\ [\%]$$

, kde *m* je pořadová hodnota průtoku seřazeného sestupně, a *n* je počet členů. Pro převedení z procentuálně vyjádřené pravděpodobnosti na počet dní je třeba výsledné hodnoty *p* vydělit stem a ty následně vynásobit počtem dní v roce, tedy 365. Po vynesení počtu dní na osu *x* a příslušných hodnot průtoků na osu *y* je možné množinu bodů proložit hledanou empirickou čárou (Kemel, Kolář,1980, s.21).

Po převedení doby překročení z procent na dny je již možné ze souboru hodnot tvořící čáru překročení vyčíst m-denní průtoky neboli průměrné denní hodnoty průtoku, které byly dosaženy *m* počet dní.

Hodnocení vodnosti let

Početní postup vychází opět z pravděpodobnosti překročení průtokové hodnoty dle výše zmíněného Čegodajeva vzorce, ale tentokrát zde vstupují hodnoty ročního průměrného průtoku Q_r na místo denního Q_d. Výsledné hodnoty se rozdělují do následujících kategorií viz tabulka č. 1 (Netopil a kol., 1984, s.189).

P [%]	Slovní ohodnocení	Symbolické hodnocení
0-10	mimořádně vodný rok (MV)	MV
11-40	vodný rok (V)	V
41-60	průměrně vodný rok (P)	P
61-90	málo vodný rok (S)	S
91-100	mimořádně málo vodný rok (MS)	MS

Tabulka č.1: Hodnocení vodnosti (Netopil a kol., 1984, s.189)

Součtové čáry

Součtové čáry jsou dvojího typu: jednoduché a podvojné. Konstrukce jednoduché součtové čáry spočívá v postupném přičítáním hodnot v chronologickém pořadí, a ve výsledném grafu zobrazuje vývoj hodnot vybrané veličiny v čase. V případě přímkového tvaru čáry nedochází k výrazným změnám v chování hodnot, ale přítomnost výrazného zlomu indikuje změnu chování hodnot například vlivem změny okolních podmínek (Kaňok, 1997 cit. dle Volková, 2010, s.19). V této práci se tímto způsobem zkoumají hodnoty průtoku, a v případě její výrazné kostrbatosti je nutno prověřit chování srážek v bodě zlomu nebo dalších okolních vlivů.

Do konstrukce podvojné součtové čáry vstupují dvě časové řady odlišných veličin, postupně nasčítané stejně jako v případě jednoduché součtové čáry. Rozdíl spočívá v tom, že nasčítané hodnoty jsou v grafu vyneseny proti sobě, a bod zlomu poukazuje na nehomogenitu zkoumané časové řady hodnot *A* vůči předpokládané homogenní časové řadě hodnot *B* (Kaňok, 1997 cit. dle Volková, 2010, s.). V rámci zkoumání změn ve srážko-odtokovém režimu je zvolena jako časová řada hodnot A hodnoty průtoku a časová řada hodnot *B* hodnoty úhrnů srážek, jako to aplikuje například Kliment, Matoušková, Královec a Ledvinka (2008) ve své studii o změně odtokového režimu v pramenných oblastech vodních toků.

Odtokový součinitel φ

Součinitel odtoku nebo také koeficient odtoku je hodnotou poměru odtokové výšky H_o a výšky srážek H_s :

$$\varphi = \frac{H_o\,[mm]}{H_s\,[mm]} \times 100\,[\%]$$

Výsledná hodnota stanovuje množství spadlých srážek účastnících se na odtokovém procesu v povodí (Netopil, 1981, s.36-37).

Vstupní hodnota výšky srážek je roční suma spadlých srážek v povodí v milimetrech. Hodnota výšky srážek H_o reprezentuje výšku vrstvy vody, většinou udávané v milimetrech za rok, která je rovnoměrně rozprostřená po celé ploše povodí (Netopil, 1981, s.36). Lze ji vypočítat následujícím vztahem:

$$H_o = \frac{Q_r\,[m^3/s] \times 31{,}5 \times 10^6}{10^3 \times P\,[km^2]}$$

Index základního odtoku

Index základního odtoku BFI (*Base Flow Index)* určuje v jaké míře se na celkovém odtoku podílí základní odtok, tedy odtékající voda pocházející ze zásob podzemní vody (Eckhardt, 2005). Pro oddělení základního odtoku od celkového byla v této práci použita metoda rekurzivní digitální filtrace hydrografu, jejímž vývojářem je K. Eckhardt (2004), dostupná prostřednictvím online nástroje WHAT (*Web-based Hydrograph Analysis Tool).* Časová řada denních průtoků byla analyzována podle následujícího vzorce dle Eckhardt (2004):

$$b_k = [(1 - BFI_{max}) \times a \times b_{k-1} + (1 - a) \times BFI_{max} \times y_k]/(1 - a \times BFI_{max})$$

kde,

b_k: základní odtok v čase k,

b_{k-1}: základní odtok v čase $k-1$,

y_k: celkový průtok v čase k,

BFI_{max}: index základního odtoku (poměr základního odtoku k celkovému),

a: filtrační parametr (0,98).

Co se týče BFI_{max}, jeho hodnota je určena dle hydrologických a hydrogeologických charakteristik povodí dle následující tabulky:

Hodnota BFI_{max}	**Typ povodí**
0,80	Perénní řeky s vysoce propustným kolektorem
0,50	Efemerní řeky s vysoce propustným kolektorem
0,25	Perénní řeky s méně propustným kolektorem

Tabulka č. 2: Hodnoty BFI_{max} pro metodu rekurzivní digitální filtrace (Eckhardt, 2005, viz online nástroj WHAT)

V této práci byla použita hodnota 0,25 vzhledem k přítomnosti nepropustných jílovitých břidlic ve flyšových Karpatech, které tvoří podloží zájmového povodí.

2.2.4.2 Hodnocení extrémních hydrologických jevů

Prahová metoda POT

Tato metoda je v této práci použita pro definování obou extrémů – období hydrologického sucha a období vysokých průtoků. Pro detekci vysokých průtoků byla použita prahová hodnota vycházející z metody Minimax (Langhammer, Su, Bernsteinová, 2015) neboli nejmenší hodnota z řady maximálních ročních průtoků, v tomto případě Q = 6,2 m^3/s z roku 2003. Prahová hodnota vybraná touto metodou zajišťuje, aby v každém roce se vyskytla aspoň jedna hodnota, a bylo tak dostatečné množství dat k analýze. Pokud by se použila hodnota 1-letého průtoku Q_1 dle ČHMÚ (viz tabulka hodnot č. 3), byla by odfiltrována většina hodnot, protože hodnoty jsou počítány z průtokových dat měřených v kratším časovém kroku, než je denní průměr.

Q_N	**Q [m^3/s]**
Q_1	27,7
Q_2	44,8
Q_5	69,9
Q_{10}	90,4
Q_{50}	143
Q_{100}	167

Tabulka č. 3: Hodnoty n-letých průtoků (ČHMÚ, 2022)

Dále pro určení jednotlivých epizod vysokých průtoků byla zpřísněná prahová hodnota, a to na hodnotu Q = 8,89 m^3/s z roku 1994, která představuje druhou nejmenší hodnotu v řadě maximálních ročních průtoků. Posunutí prahové hodnoty je z důvodu dodání určeným epizodám více povodňového charakteru, a zároveň zachování dostatečného množství dat. Kritérium doby trvání bylo určené na 2 dny z důvodu získání vyššího množství dat, a také vzhledem ke schopnosti povodí rychleji reagovat na srážkové procesy vlivem vyšší morfologické členitostí a sklonitosti.

Pro výběr epizod hydrologického sucha byla zvolena obecně používaná hranice hodnoty průtoku Q_{355} neboli průtok dosažený nebo překročený po dobu 355 dní v roce, v tomto případě hodnota 0,120 m^3/s. Jako druhá hranice prahové hodnoty byla zvolená hodnota indexu základního odtoku ≥ 99 % z důvodu zjištěné provázanosti vysokých hodnot BFI a nízkých průtoků během analýz, a také na základě tvrzení přítomnosti vyššího podílu podzemních vod v odtoku od Kemel a Kolář (1980, s.214) v předchozí kapitole. Dále jednotlivé epizody hydrologického sucha musí splňovat kritérium minimálně tří po sobě jdoucích dní.

V obou případech jsou detekované epizody zkoumány z pohledu jejich frekvence, doby trvání a sezonality a její změny.

Metoda nedostatkových objemů

Metoda nedostatkových objemů byla vypočítaná podle již zmíněného vzorce (Treml, 2012):

$$NO = \sum_{i=1}^{t} (LQ - Q_i) \times 24 \times 3600$$

Hodnota velikosti chybějícího objemu je počítána jako celkový chybějící objem v jednotkách m^3 za jednu epizodu sucha, která je definovaná prahovou metodou v předchozí podkapitole, tedy Q_{355} = 0,120 m^3/s. Dále je vypočítaná intenzita každé epizody podílem celkového chybějícího objemu a počtem dní trvání.

R-B Index

Co se týče hodnocení povodní, v této práci je použit R-B index v rámci vybraných povodňových událostí pro popis rychlosti změny průtoku, definovaný vzorcem:

$$\text{R-B index} = \frac{\sum_{n-1}^{n} |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^{n} q_i}$$

Bližší popis R-B indexu se nachází v kapitole o rešerši hodnocení povodní.

Test homogenity

Test homogenity spočívá ve statistickém testu homogenity časových řad a v případě potvrzení nehomogenity určení bodu zlomu (*change point*). Testy homogenity se dělí na dva typy: absolutní, například Wilcoxonův dvouvýběrový test, metoda von Neumanna nebo Pettitův test. Druhým typem je test relativní homogenity, jako je Alexanderssonův test nebo Wilcoxonův jednovýběrový test (Kliment, Matoušková, 2009).

V této práci byl použit absolutní Pettitův test homogenity, který funguje na základě určení maximální hodnoty testovací charakteristiky K_T , který definuje pravděpodobný bod zlomu podle dvou na sobě nezávislých výběrů $X_1, ..., X_t$ a $X_{t+1}, ..., X_N$, kde N představuje délku časové řady a t rok pravděpodobné změny (Kliment, Matoušková, 2009).

Test byl proveden na časové řadě průměrných denních teplot 1961-2021 z meteorologické stanice Lysá hora. V programu *R studio* k tomu byla použita funkce *pettit.test,* která následně testuje nulovou hypotézu H_0 – žádná změna, proti alternativní hypotéze H_A potvrzující přítomnost změny. Tato funkce je v programu definovaná podle následujícího vzorce ze studie od Verstraeten et al. (2006), vycházející ze studie Pettitt (1997), kde pořadí $X_i,\ldots, X_n$ je $r_1, \ldots., r_n$:

$$U_k = 2\sum_{i=1}^{k} r_i - k(n+1) \qquad k = 1,..n$$

2.3 Použitá data a nástroje

Pro zpracování kapitoly o fyzickogeografických poměrech v povodí horního toku Ostravice byly použity v prostředí ArcGIS následující datasety: ArcČR 500 v3.2, DIBAVOD a CORINE Land Cover 1990 a 2018 služby CENIA. Pro zmapování geologických a půdních poměrů byly použity WMS služby prostřednictvím České geologické služby.

Pro hlavní praktickou část této práce hodnotící srážko-odtokový režim a výskyt extrémních hydrologických jevů byla použitá časová řada období 1970-2020 průměrných denních průtoků a průměrných denních srážkových úhrnů vodoměrné a srážkoměrné stanice Staré Hamry, provozované českým hydrometeorologickým ústavem ČHMÚ. Pro detekci

bodu zlomu testem homogenity byla použita časová řada průměrných denních teplot z meteorologické stanice ČHMÚ Lysá hora z období 1961-2021.

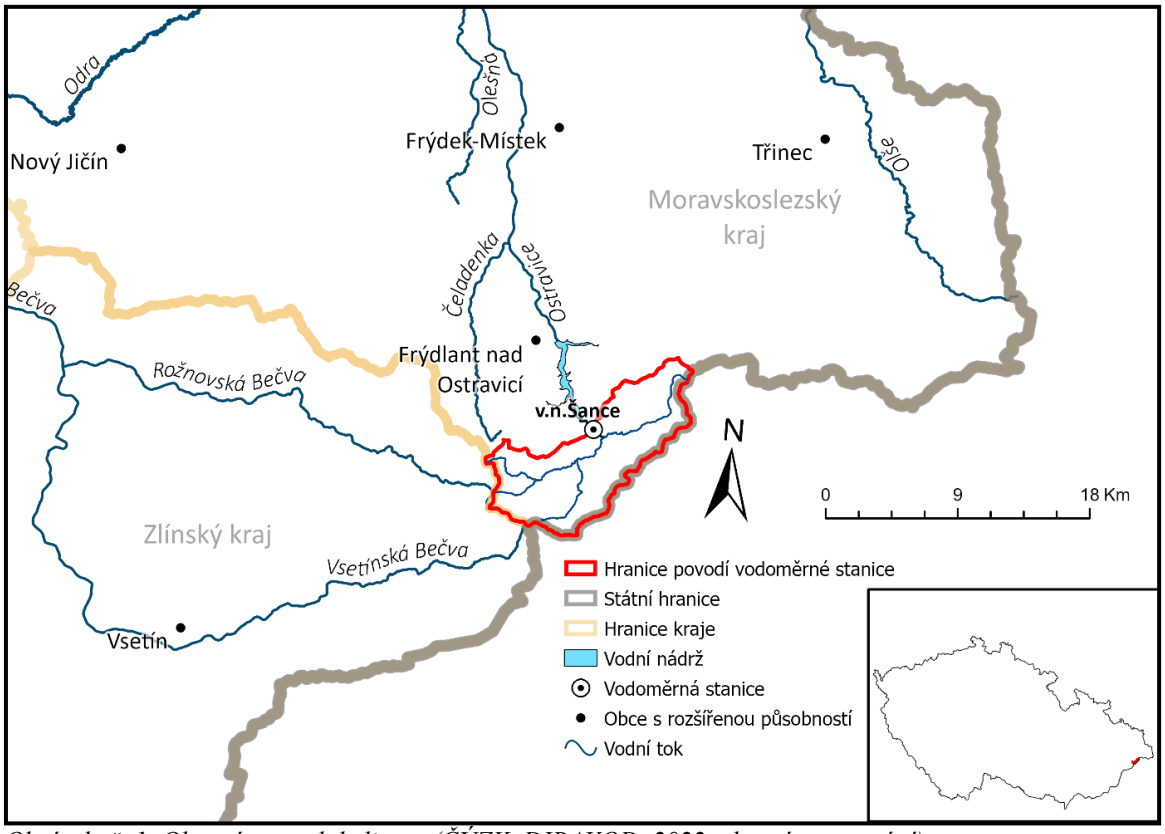
Pro analýzu dat průměrných denních průtoků a denních úhrnů srážek byl použit software KNIME 4.3.2 a tabulkový procesor Microsoft Excel, pro provedení testu homogenity byl použit nástroj R studio 1.4.1103.

3. Zájmové území

V této kapitole bude hlavním předmětem zájmu stručný popis fyzickogeografických charakteristik zájmového území, a to zejména ty, které ovlivňují průběh srážko-odtokového režimu.

3.1 Poloha

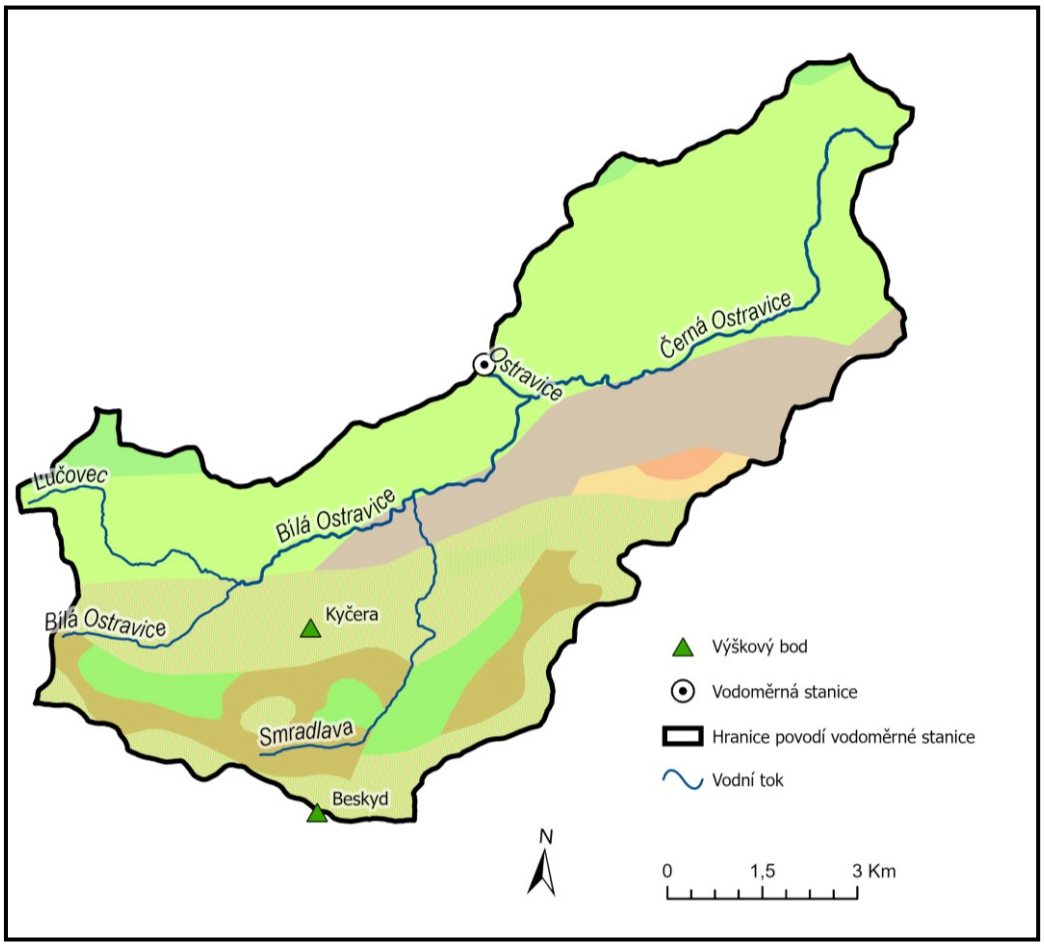
Území povodí horní Ostravice se nachází na východě České republiky v Moravskoslezském kraji u hranice se Slovenskem v pohoří Moravskoslezských Beskyd (viz obrázek č.1). Dále zájmové území spadá do chráněné krajinné oblasti Beskydy. Oblast je rozptýleně osídlená, nejsouvislejší osídlená oblast je obec Bílá ležící na Bílé Ostravici.



Obrázek. č. 1: Obecná mapa lokalizace (ČÚZK, DIBAVOD, 2022, vlastní zpracování)

3.2 Geologické poměry

Povodí horní Ostravice nad vodní nádrží Šance je tvořeno flyšovými komplexy paleogenního a křídového stáří, které jsou součástí flyšového pásma Západních Karpat. Litologicky je složena ze sedimentárních komplexů magurského flyše, formovaného jílovci a arkózovými pískovci se slepenci, a podmenilitové vrstvy, která se skládá převážně z jílovců a pískovcových proložek (Buzek, 1981, s. 8-9). Prostorové rozložení jednotlivých hornin ilustruje obrázek č. 2.



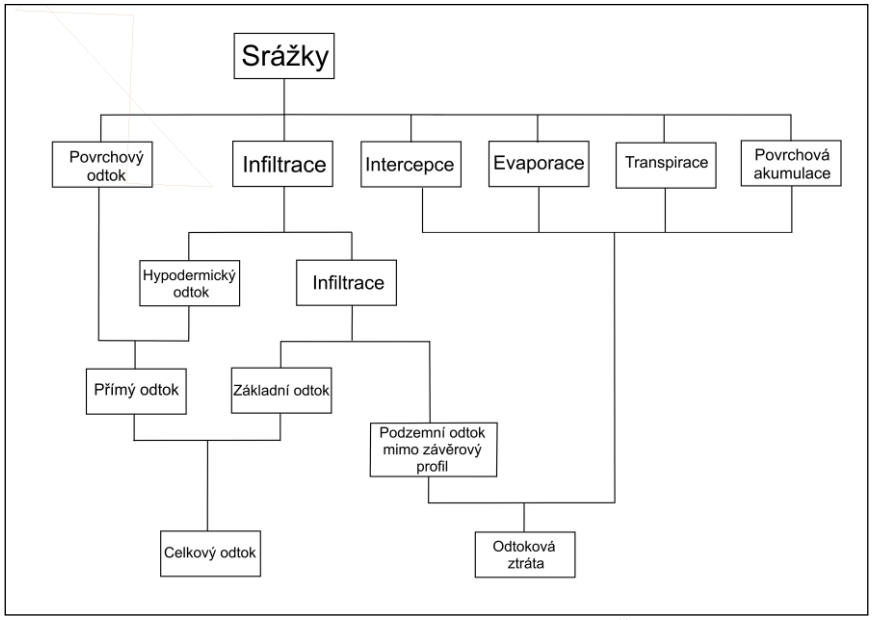
Obrázek. č. 2: Geologické poměry povodí horního toku Ostravice (Česká geologická služba, DIBAVOD, ČÚZK, 2022, vlastní zpracování)

Legenda

- pískovce, jílovce, slepence
- pískovce, jílovce, zřídka slepence
- jílovce, z části vápnité a pestré, pískovce
- jílovce, zčásti vápnité a pestré, podřízeně pískovce
- jílovce, silicity, vápence, podřízeně pískovce
- vápnité jílovce, pískovce, podřízeně slepence
- tmavé jílovce, podřadně křemité pískovce
- pestré jílovce, dílem vápnité, podřadně pískovce

3.3 Půdní poměry

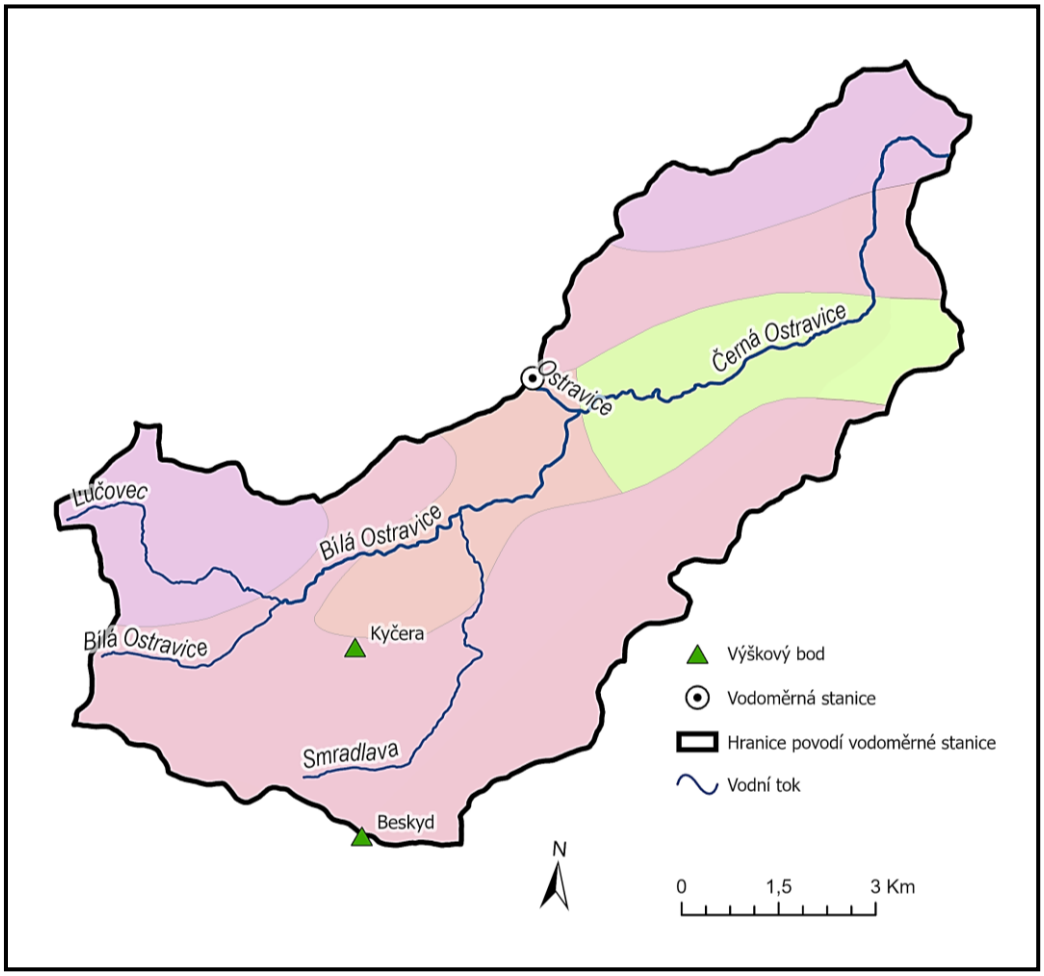
Z pohledu vztahu půdy a vody můžeme půdu charakterizovat jako nádrž o určitém objemu schopnou akumulovat vodu po určitý čas (Kutílek, 1978). Srážková voda dopadající na vrstvu půdy se stane součástí celkového odtoku buď cestou infiltrace následovanou přímým odtokem (hypodermický odtok v nenasycené zóně a povrchový odtok) nebo základním odtokem v nasycené zóně viz obrázek č. 3 zobrazující schéma odtokového procesu dle ČSN 73 6511.



Obrázek č. 3: Schéma odtokového procesu upravené dle ČSN 73 6511 (Schwarzová, 2021)

Každý půdní typ se liší svou interakcí s vodou díky různým fyzikálním a chemickým vlastnostem, ať už je to při infiltraci vody, její zadržování nebo vedení. Hlavní roli hraje

především fyzikální vlastnosti jako například struktura, která při zásadní změně může změnit i vodní režim toku (Kemel, Kolář, 1980, s.153). Tuto interakci zároveň ovlivňují vlastnosti srážkové epizody (intenzita, doba trvání), sklon reliéfu nebo typ vegetačního pokryvu (Nassif, Wilson, 1975). Ve výrazně zalesněných oblastech, jako tomu je v případě zájmového povodí v této prací, mají lesní půdy oproti půdám v jiných typech prostředí několikanásobněji vyšší retenční schopnost (Bíba a kol., 2010).



Obrázek č. 4: Půdní poměry povodí horního toku Ostravice (Česká geologická služba, DIBAVOD, ČÚZK, 2022, vlastní zpracování)

Legenda

- Dystrická kambizemě
- Fluvizemě
- Hnědozemě
- Kryptopodzoly s podzoly

V zájmovém území se nachází následující typy půd (viz obrázek č. 4):

- Fluvizemě kolem dolního toku Černé Ostravice

Tento půdní typ z referenční třídy fluvisolů se nachází se hlavně v záplavových území říčních niv, charakteristický svým vysokým podílem organické hmoty. Usazují se zde aluviální hlíny a záplavové kaly při povodňových epizodách (Rejšek, Vácha, 2018, s. 268).

- Hnědozemě kolem dolního toku Bílé Ostravice a horního toku Ostravice

Hnědozemě patřící do referenční třídy luvisolů se vyskytují na většině zemědělských pozemcích České republiky, jejichž A-horizont je strukturní, tmavý, zrnitostně střední, následovaný B-horizontem bohatší na jíl, který má nižší infiltrační rychlost, a při větších srážkových epizodách může generovat povrchový odtok (Rejšek, Vácha, 2018, s. 275).

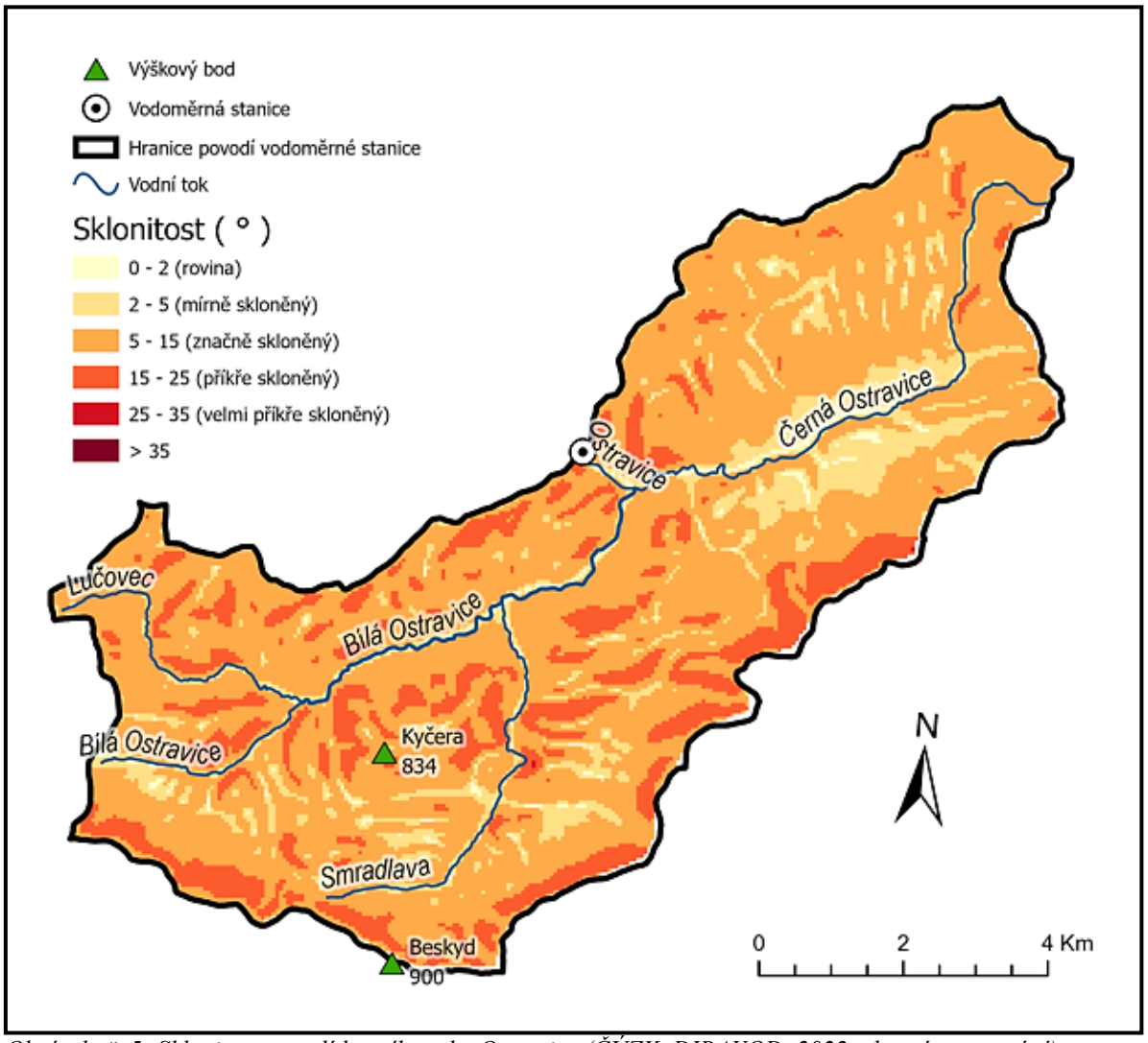
- Dystrická kambizemě kolem horního toku Černé Ostravice

Kambizemě z třídy kambisolů se vyznačuje procesem braunifikace neboli hnědnutí na nejílové substrátu, kdy zvětrávají minerály s primárním železem za vzniku dvojmocného železa, nebo s přítomností vody za vzniku sekundárních trojmocných hydroxidů. Druhý případ s přítomností vody je nejběžnějším procesem v lesní půdě na území České republiky (Rejšek, Vácha, 2018, s. 276-277).

- Podzoly a kryptopodzoly kolem horního toku Černé Ostravice a kolem toku Lučovec

Oba půdní typy pochází z třídy podzosolů, jejichž společným prvkem je proces podzolizace. Podzolizace probíhá v písčitých, minerálně chudých substrátech za přítomnosti vysokých úhrnů srážek, které následně infiltrují a vyluhují do půdy horní vrstvu humusu. Podzoly vznikají při samotném procesu podzolizace, ovšem při podzolizaci s braunifikací již vzniká kryptopodzol, který již nedisponuje výrazným iluviálním horizontem oproti podzolu (obohacený půdní horizont, pozn. autora). Oba půdní typy jsou výrazně kyselé, nenasycené a propustné. Vyskytují se převážně v oblasti hor nebo v hustě zalesněných oblastech (Rejšek, Vácha, 2018, s.279-280).

3.4 Geomorfologické poměry



Obrázek. č. 5: Sklonitost povodí horního toku Ostravice (ČÚZK, DIBAVOD, 2022, vlastní zpracování)

Zájmovou oblastí geomorfologie je obecně hodnocení a identifikace reliéfu země na základě geneze, stáří a vzhledu (Demek, 1987, s.37). Ovšem z této rozsáhlé oblasti zájmu budou k interpretaci průtokových dat nejvíce klíčové znalosti o spádu povrchu neboli výškový rozdíl mezi horním a dolním profilem daného toku, který ovlivňuje míru dynamiky tekoucí vody (Kemel, Kolář, 1980, s.89). V případě zájmového území je rozdíl mezi maximální a minimální nadmořskou výškou je 425 m.

Jako dalším důležitým geomorfologickým faktorem je sklon svahů v povodí. Čím víc je plocha skloněná, tím rychleji voda teče, a má méně času na vsak. Tím hodnota odtokového součinitelu (poměr odtokové výšky vůči srážkovému úhrnu) stoupá neboli množství srážek účastnící se odtoku roste (Kemel, Kolář, 1980, s. 152). Ovšem jak již bylo

v předchozí podkapitole zmíněno, jaké množství srážek se bude podílet na odtoku ovlivňuje řada dalších faktorů.

Zájmové území je z pohledu geomorfologického členění součástí provincie Západní Karpaty, dále součástí subprovincie Vnější Západní Karpaty, která je následně formovaná celkem Moravskoslezské Beskydy. Území je následně rozdělené na 3 podcelky: Radhošťská hornatina na západě území, Lysohorská hornatina na severovýchodě, a Klokočovská hornatina na jihu a jihovýchodě zájmového povodí (CENIA, 2002).

Výškové poměry jsou tvořeny výškovým rozpětím 525-950 m.n.m. s nejvyšším výškovým bodem, který představuje hora Beskyd s výškou 900 m n. m. Z typologického hlediska členění reliéfu spadá území spíše pod typ vyšší vrchovina neboli území s převažující výškovou členitostí 200-300 m v nadmořské výšce 750-900 m (Czudek, 2005, s. 177). Stejně tak území spadá do typologické charakteristiky vrchoviny v díle od Balatky a Kalvody (2006, s.15), kde výšková členitost je daná intervalem 150-300 m v nadmořské výšce 600-900 m.

Jak již bylo výše zmíněno, sklonitost svahů představuje důležitý faktor geomorfologického hlediska pro odtokový režim. Rozlišení mezi svahem a rovinou udává hranice sklonu plochy 2°, neboli plochy se sklonem vyšším než 2° jsou již charakterizovány jako svahy (Křížek, Uxa, Mida, 2016, s.55). Sklonitost zájmového území je zobrazena na obrázku č. 5. Většina území je značně skloněné (5-15 °), méně příkře či mírně. Čím větší sklon svahu, tím rychleji je dosažen vrchol odtoku. Velikost dosaženého vrcholu odtoku se nezvětšuje – velikost vrcholu odtoku je více ovlivněná intenzitou srážek, typem půdy a vegetačním pokryvem (Nassif, Wilson, 1975).

3.5 Využití území

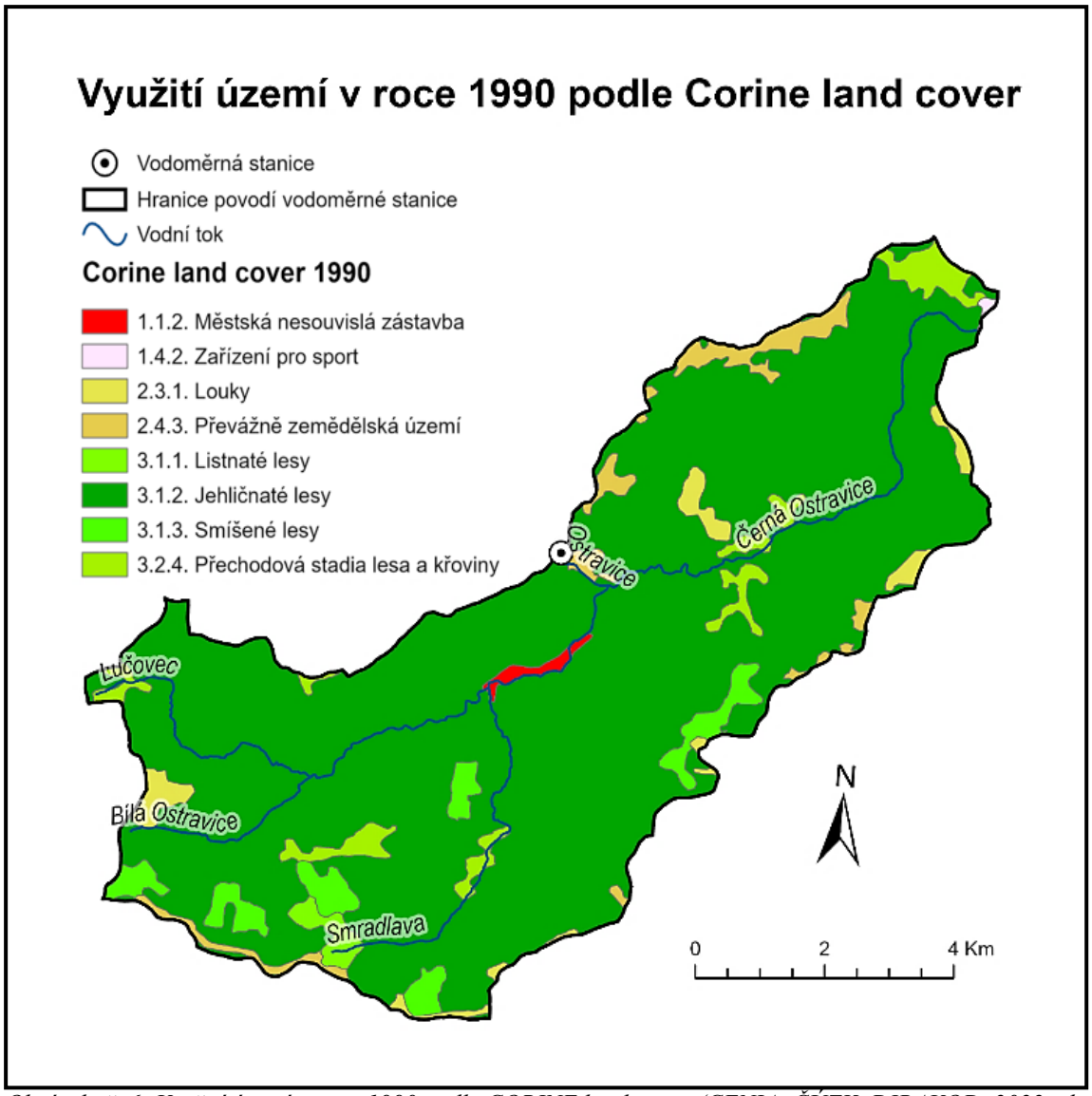
Zda se na území zájmového povodí vyskytují převážně antropogenně využívané plochy, nebo jsou spíš přírodního charakteru, je důležitá znalost pro interpretaci srážko-odtokových procesů. V povodí horního toku Ostravice dominují lesy (jehličnaté, listnaté smíšené) pokrývající 97 % území. To představuje přítomnost procesu intercepce neboli zachycování srážkové vody vegetací, jež má zmírňující vliv na kulminační průtoky, stejně jako lesní porézní půda s různě mocnými vrstvami jehličí a přítomném humusu v různém stupni rozkladu též vázající vodu (Kemel, Kolář, 1980, s.154, Kutílek, 1978). Intercepce jako hlavní ovlivňující faktor pro srážko-odtokový proces v zalesněném povodí řeky Vydry

je zdůrazněná také ve studii od autorů Čurda, Janský a Kocum (2011), kdy při běžné intenzitě deště je víc srážek zadrženo v povodí.

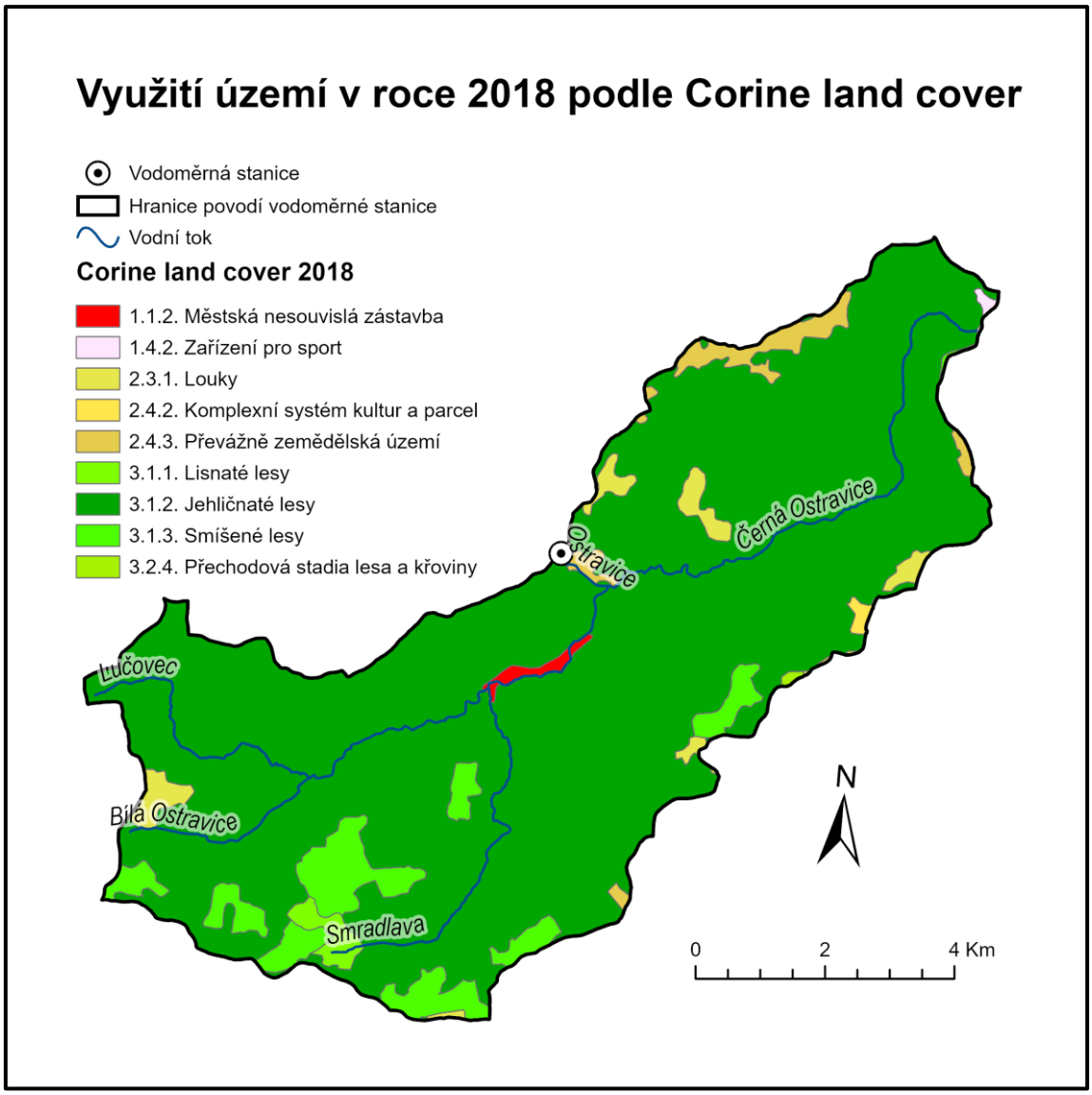
Příznivý vliv lesa na srážko-odtokový proces a jeho zpětné reakce na jeho změnu struktury ukazuje například studie Bíby a kol. (2010) zabývající se horským experimentálním povodím Červík v Moravskoslezských Beskydech, jehož území je úplně pokryto lesy, jako tomu skoro je v zájmovém povodí této práce. Z dlouhodobého měření byly potvrzené zmírňující schopnost při minimálních a maximálních průtocích. Stejně tak Netopil a kol. (1984, s.167) vyzdvihuje příznivý vliv lesa na vodní bilanci, a to díky již zmíněné intercepci, zvýšené akumulační schopnosti podporující infiltraci vody do podzemí díky vyšší intenzitě vsakování vlivem lesního opadu a humusu. Odtok z povrchu je v lesním prostředí snížený díky heterogenitě reliéfu lesní půdy.

Proces evapotranspirace je zde nižší než v jiných prostředích díky vyššímu zastínění povrchu, a udržování prostředí vyšší vlhkosti při nižší teplotě.

Celkově lesní prostředí přispívá vyrovnanosti odtoku, nicméně je třeba brát v úvahu, o jakou skladbu lesa a v jakém prostředí se jedná. Například smrkové monokultury vysazené v nepřirozeně nižších nadmořských výškách působí na vodní bilanci negativně vlivem vyššího prosychání lesního opadu a zpomalování tlejících procesů, které vedou k nižší infiltraci srážkové vody do podzemí (Netopil a kol., 1984, s.167-168).



Obrázek. č. 6: Využití území v roce 1990 podle CORINE land cover (CENIA, ČÚZK, DIBAVOD, 2022, vlastní zpracování)



Obrázek. č. 7: Využití území v roce 2018 podle CORINE land cover (CENIA, ČÚZK, DIBAVOD, 2022, vlastní zpracování)

Kategorie	Název	Rozloha [Ha] v r. 1990	Rozloha [Ha] v r. 2018	Procentuální podíl [%] v r.1990	Procentuální podíl [%] v r.2018
1.1.2.	Městská nesouvislá zástavba	31,54	31,54	0,05	0,06
1.4.2.	Zařízení pro sport	44,73	36,85	0,08	0,06
2.3.1.	Louky	721,94	274,85	1,22	0,48
2.4.2.	Komplexní systém kultur a parcel		291,75		0,51
2.4.3.	Převážně zemědělská území	826,96	719,24	1,40	1,27
3.1.1.	Listnaté lesy	53,90	54,87	0,09	0,10
3.1.2.	Jehličnaté lesy	56459,86	54695,23	95,71	96,22
3.1.3.	Smíšené lesy	432,51	705,15	0,73	1,24
3.2.4.	Přechodová stadia lesa a křoviny	418,61	32,10	0,71	0,06
Celkem		58990,05	56841,59	100	100

Tabulka. č. 4: Podíl rozložení kategorií CORINE land cover v r.1990 a 2018

Jak již bylo zmíněno výše, tak velká většina území je zalesněna, a zbytek území je rozptýleno mezi 8 kategoriemi, z nichž nejvíce plochy zaujímá kategorie *převážně*

zemědělská území a *louky*. Území v letech 1990-2018 nebylo poznamenáno výraznými změnami ve využití území, nicméně nejvíce se zmenšila plocha kategorie louky, a naopak zvětšila plocha smíšených lesů. Ovšem obě tyto největší změny nedosahují ani 1 % procentuálního podílu.

3.6 Klimatické poměry

Klimatické poměry mají vysoký vliv na velikost a časové rozložení odtoku, a to především roční chod a intenzita srážek dotující naše řeky společně s ročním chodem teploty a jejím sytostním doplňkem, která naopak způsobuje ztráty v podobě výparu (Netopil a kol., 1984, s.166).

Podle Köppenovy klasifikace území spadá do pásma D podtyp Dfc boreální klima, které je charakterizované jako velice chladná zima a krátké chladné nebo mírné léto. Podle Quittovy klasifikace území v nižších nadmořských výškách patří do oblasti MT2 a MT10 (mírně teplé oblasti), ve vyšších nadmořských výškách do oblasti CH4 (chladné oblasti) (Tolasz et al., 2007 s. 231, Němec, Kopp, Bartoš, 2009, s. 230).

Index kontinentality, který vyjadřuje jak moc je území ovlivněno vzduchovými hmotami vytvořené buď nad oceánem nebo nad kontinentem, je podle Chromova v České republice 75-80 % neboli přechod z oceánity ke kontinentalitě. Zájmové území leží na úplném východě Česka na hranici se Slovenskem, to znamená jeho vyšší kontinentalitu a tím pádem vyšší teplotní a srážkovou rozkolísanost (Němec, Hladný, 2006, s. 15).

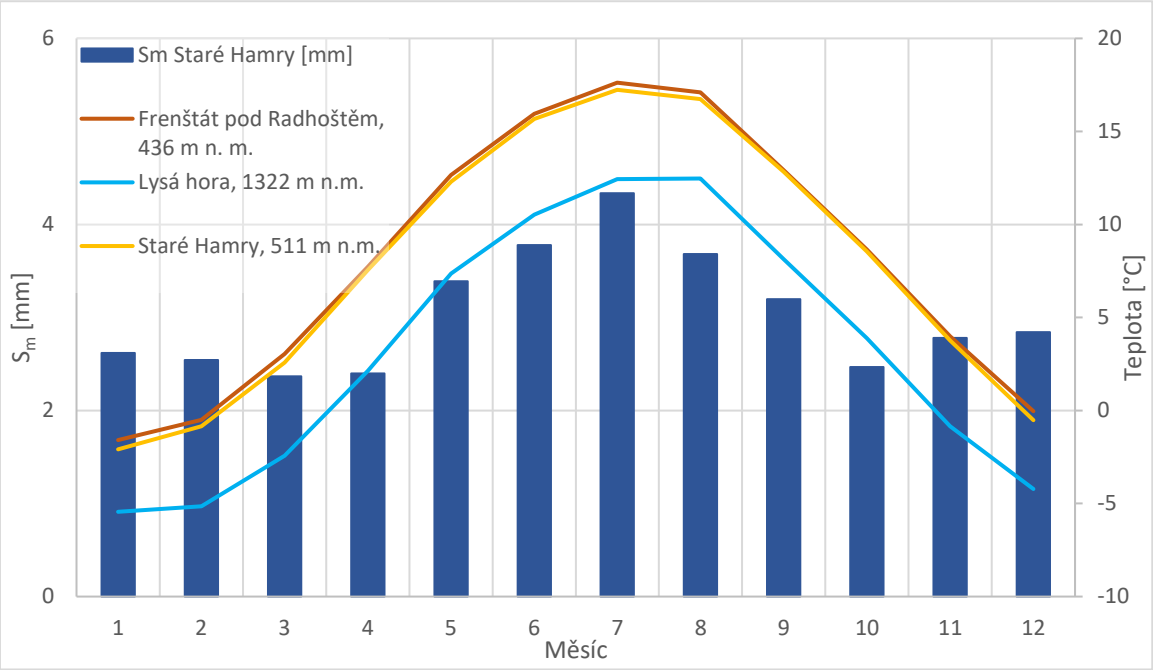
Povětrnostní podmínky typické pro tuto oblast během letní sezóny jsou příčinou letních povodní, konkrétně se jedná o severní a severovýchodní proudění s postupem tlakových níží po dráze Vb. s přítomností návětrného efektu Beskyd.

Období	Min [mm]	Max [mm]	Průměr [m^3/s]	Střední odchylka	Rozptyl	Koeficient šikmosti
1970-2020	0	167.4	3.04	6.98	48.72	6.55
1970-1995	0	120.1	2.9	6.33	40.07	5.34
1996-2020	0	167.4	3.18	7.6	57.6	7.1

Tabulka č. 5: Statistické údaje ze datového souboru denních srážkových úhrnů

Celkový průměr úhrnu denních srážek je 3,04 mm, pozdější období vykazuje ještě vyšší, než průměr celkového a dřívějšího období, a to 3,18 mm. Společně s vyšší hodnotou střední odchylky a větším rozptylem (míra vzdálenosti hodnot od průměru) to vypovídá opět o možné větší proměnlivosti hodnot.

Nedostupnost delší časové řady denních průměrných teplot v oblasti srážkoměrné stanice Staré Hamry byla vyřešena přepočtem teplot podle nadmořské výšky (Staré Hamry 515 m n.m.) pomocí lineární regresní analýzy se vstupujícími časovými řadami denních průměrných teplot ze stanic ČHMÚ Lysá hora (1322 m n.m.) a Frenštát pod Radhoštěm (436 m n.m.). Sezónní chod teploty a úhrnů srážek zobrazuje následující graf:



Graf č. 1: Klimagram – roční chod srážek a teploty pro období 1970-2020 (vlastní zpracování)

3.7 Hydrologické poměry

Povodí řeky Ostravice je součástí hlavního povodí řeky Odry, a také jejím pravostranným přítokem s délkou 64 km. Ostravice vzniká soutokem Černé Ostravice pramenící severovýchodně od soutoku na jižním svahu kopce Smrkovina, a Bílé Ostravice, která pramení jihozápadně od soutoku na úbočí vrcholu Čarták, a je zároveň pokládána za pramenný zdroj Ostravice. Řeka je tvořena převážně pravostrannými přítoky, z nichž největšími jsou Morávka a Lučina. Mezi levostranné velikostně významnější toky patří například Olešná a Čeladenka.

Mezi 45,8 a 51,7 kilometrem se nachází vodní nádrž Šance s rozlohou 146,3 km^2 a objemem 57,2 mil. m^3, jejíž funkce je zásobárna pitné vody pro Ostravský oblastní vodovod spolu s dalšími přehradami. Před realizací přehrazování toku patřila Ostravice mezi značně rozkolísané toky a v důsledku většího spádu měly povodňové události podstatné následky. (Povodí Odry s.p., 2016).

Horní část povodí je součástí chráněné krajinné oblasti CHKO Beskydy a území chráněné oblasti přirozené akumulace vod CHOPAV Beskydy. Záplavová území v horní zájmové části povodí vlivem bystřinnému charakteru toku jsou přítomna až za výpustí přehrady Šance, kde již území není tak strmé a umožňuje tak toku případnému rozlivu při vysokých průtocích. Z tohoto důvodu je od výpustě až k ústí koryto regulováno jezy a upravováno po celé délce (Povodí Odry s.p., 2016).

Průměrné denní hodnoty průtoku

Období	Min	Max	Průměr	Střední odchylka	Rozptyl	Koeficient šikmosti
1970-2020	0.01	57	1.46	2.34	5.48	6.96
1970-1995	0.01	57	1.50	2.21	4.89	6.24
1996-2020	0.04	57	1.43	2.47	6.09	7.46

Tabulka č. 6: Statistické údaje ze datového souboru průměrných denních průtoků

Průměrný dlouhodobý průtok Q_a řeky Ostravice činí 1,46 m^3/s, maximální hodnoty dosahují hodnot 57 m^3/s a minimální hodnoty 0,01 m^3/s (viz tabulka č. 6). Mezi jednotlivými obdobími určených bodem zlomu z testu homogenity se minimální a maximální hodnoty liší minimálně nebo vůbec. V případě stejného maximálního průtoku je to dáno stejnou dosaženou hodnotou ve dnech 19.7. 1970 a 7.7. 1997.

Průměrný průtok za celé pozdější období (1996-2020) je nižší než v dřívějším (1970-1995), naopak tomu je u koeficientu šikmosti, který popisuje symetrii rozdělení. Vyšší směrodatná odchylka v pozdějším období vypovídá o větší odlišnosti průtokových hodnot než v období 1970-1995, můžeme tedy předpokládat méně vyrovnaný chod průtoku.

4. Výsledky

4.1 Srážko-odtokový režim a jeho změny

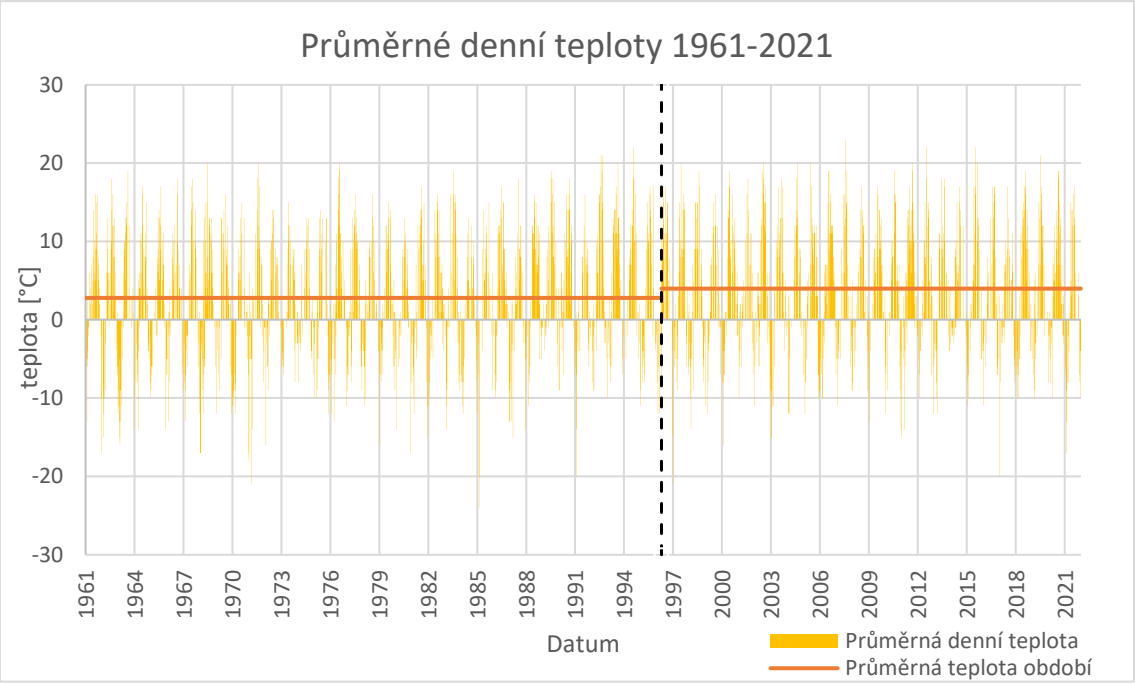
4.1.1 Test homogenity

Pettitův test homogenity byl proveden na časové řadě průměrných teplot vzduchu ze stanice ČHMÚ Lysá hora. Výsledná p-hodnota testu $1{,}01 \times 10^{-4}$ je výrazně nižší než hladina testu 0.05. Tímto je nulová hypotéza H_0 (žádná změna) zamítnuta, a alternativní hypotéza přijata. Test určil bod zlomu (*change point*) datum **17.4. 1996**, tímto je sledované období rozděleno na ‚dřívější' období 1970-1995 před bodem zlomu, a ‚pozdější' období 1996-2020 po bodu zlomu.

Období	Průměr teploty [C°]
1961-1996	2.79
1997-2020	3.96

Tabulka č. 7: Průměrné teploty období před a po bodu zlomu

Průměrná teplota se v období po bodu zlomu zvýšila o 1,17 °C. Průběh průměrné denní teploty je znázorněné v následujícím grafu společně s celkovými průměrnými teplotami za jednotlivá období a bodem změny.

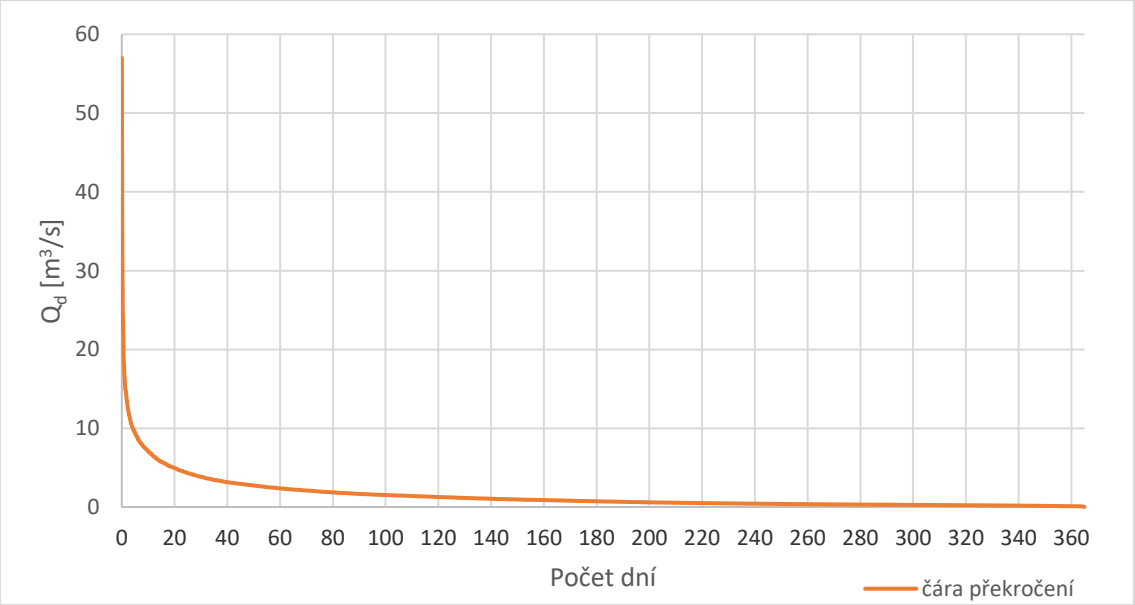


Graf č. 2: Průměrné denních teploty a průměrné teploty jednotlivých období (vlastní zpracování)

4.1.2 Čára překročení a m-denní průtoky

M-denní průtoky byly vyčteny z vypočítaných hodnot pro sestavení čáry překročení podle metody popsané v předchozí kapitole. Čáry překročení byly zkonstruovány pro celé časové období 1970-2020 a následně pro 2 období vycházející z celkového období rozděleného bodem zlomu.

Čára překročení pro období 1970-2020



Graf č. 3: Čára překročení průměrných denních průtoků v období 1970-2020 (vlastní zpracování)

M-denní průtok	Q30	Q60	Q90	Q120	Q150	Q180	Q210	Q240	Q270	Q300	Q330	Q355	Q364
Q [m3/s]	3.85	2.37	1.66	1.27	0.95	0.73	0.54	0.42	0.34	0.27	0.20	0.12	0.08

Tabulka č. 8: Hodnoty m-denních průtoků v období 1970-2020

Pro porovnání změny hodnot m-denních průtoků mezi dřívějším a pozdním obdobím byly vypočteny hodnoty čáry překročení pro každé období. Hodnoty m-denních průtoků pro každé období je vidět v následující tabulce:

M-denní průtok	Q_{30}	Q_{60}	Q_{90}	Q_{120}	Q_{150}	Q_{180}	Q_{210}	Q_{240}	Q_{270}	Q_{300}	Q_{330}	Q_{355}	Q_{364}
Q [m³/s] 1970-1995	3.93	2.48	1.76	1.24	1.00	0.77	0.58	0.45	0.37	0.30	0.20	0.16	0.13
Q [m³/s] 1996-2020	3.74	2.22	1.54	1.31	0.85	0.68	0.51	0.39	0.31	0.24	0.18	0.11	0.07

Tabulka č. 9: M-denní průtoky období 1970-1995 a 1996-2020

Všechny hodnoty m-denních průtoků v období 1996-2020 vykazují pokles, kromě hodnoty Q_{120}, která je vyšší.

4.1.3 Roční odtokové a srážkové poměry

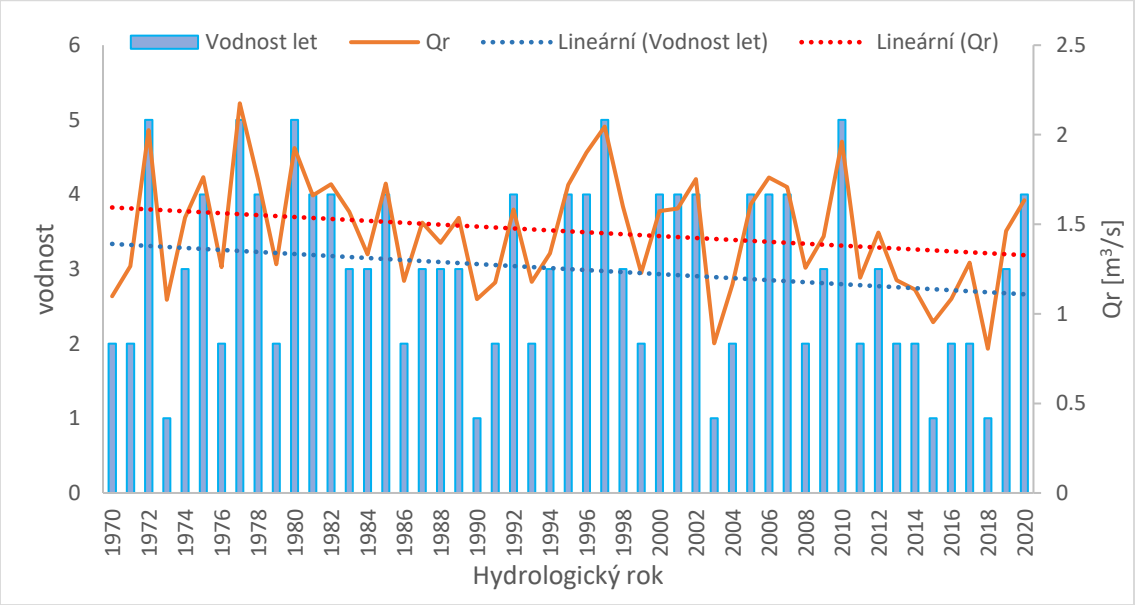
Vodnost jednotlivých let a průměrný roční průtok

Pro celkové zhodnocení jednotlivých hydrologických let byly vybrány hodnoty průměrného průtoku Q_r a metoda hodnocení vodnosti roku. Tyto dvě řady hodnot pro každý rok byly spojeny do jednoho grafu pro znázornění jejich vzájemné pozitivní korelace.

K tabulce s procentuálními intervaly a slovnímu hodnocení bylo přidáno číselné ohodnocení od 1 do 5 (1- velice suchý rok, 5- velice vodný rok) z důvodu přehlednějšího znázornění v grafu. Z obou veličin byl pak vypozorován a znázorněn lineární trend.

P [%]	Slovní ohodnocení	Číselné ohodnocení pro grafickou vizualizaci
0-10	mimořádně vodný rok (MV)	5
11-40	vodný rok (V)	4
41-60	průměrně vodný rok (P)	3
61-90	málo vodný rok (S)	2
91-100	mimořádně málo vodný rok (MS)	1

Tabulka č. 10: Systém hodnocení vodnosti jednotlivých let, upraveno dle Netopil a kol. (1984, s.189)



Graf č. 4: Vodnost jednotlivých let a průměrných ročních průtoků (vlastní zpracování)

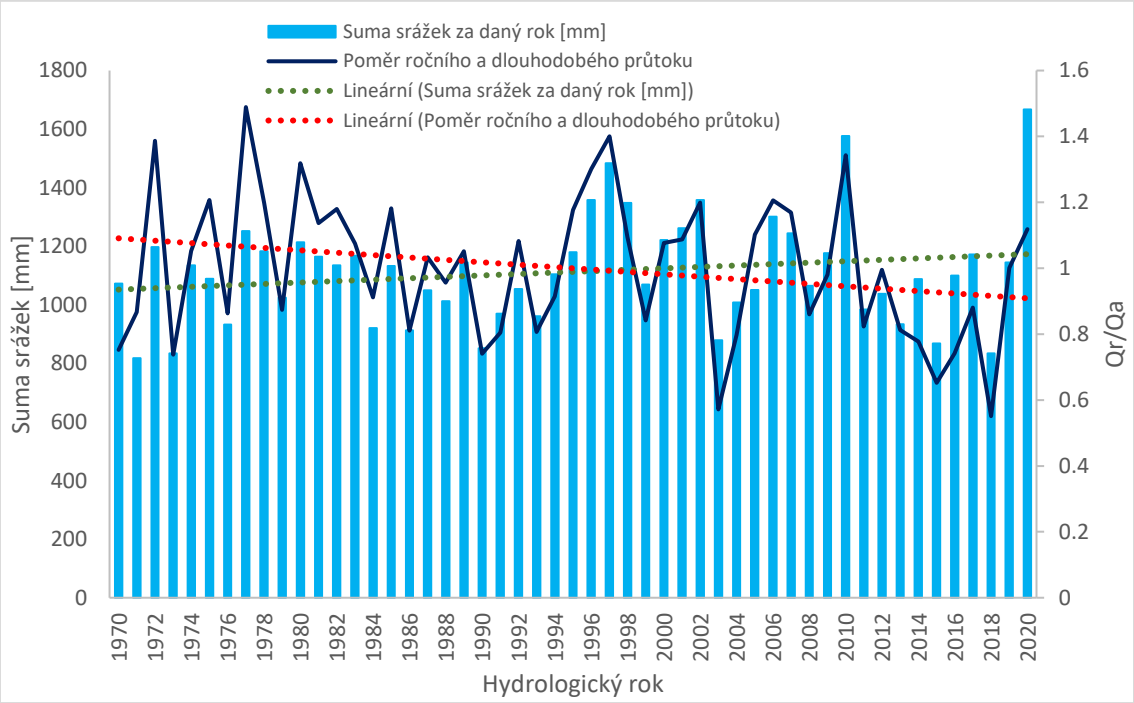
Mezi nejvíce vodné roky a zároveň roky s největšími průměrnými ročními průtoky patří rok 1972, 1977, 1980, 1997 a 2010. Naopak skupinu nejméně vodných let zahrnuje roky 1973, 1990, 2003, 2015 a 2018.

Nejdelší řady po sobě jdoucích vodných let (hodnota 3-5) se objevují v letech 1980-1985, 1994-1998 a poté kratší řady po třech letech 2000-2002 a 2005-2007. Málo vodné roky (hodnota 1-2) se v první polovině celkové sledované časové řady neobjevují více jak po dvou letech. Ovšem v druhé půlce období již i vysoké průměrné roční průtoky jsou nižší než v první půlce, a frekvence málo vodných let stoupá. To ilustruje například řada po sobě jdoucích málo vodných let 2011-2018 a klesající lineární trendy obou veličin.

Pro vysvětlení míry vodnosti jednotlivých let je třeba se podívat na jeden z hlavních meteorologických vlivů, a to roční úhrny srážek, které jsou zobrazeny následovně.

Roční suma srážek a poměr Qr a Qa

Protože zájmové povodí se nachází v oblasti, kde jediným dotačním zdrojem vody jsou srážky, tak je třeba znát, jaké množství srážek mělo povodí k dispozici za daný rok k dalším transformačním procesům. Celková suma srážek v jednotlivých letech je zobrazena v následujícím grafu spolu s výslednými hodnotami poměru ročního průtoku Q_r a dlouhodobého Q_a hodnotící rok z pohledu jeho nadprůměrnosti (hodnoty >1) nebo naopak podprůměrnosti (hodnoty <1).



Graf č. 5: Roční suma srážek [mm] a výsledek poměru Q_r a Q_a (vlastní zpracování)

Obě veličiny disponují pozitivní korelací neboli s vyšším úhrnem srážek stoupá i poměr Q_r / Q_a. Protože lineární trend průměrného ročního průtoku (červeně) je povahy klesající, tak i zde lineární trend směřuje z hodnot vykazující nadprůměrnost průměrného ročního průtoku k podprůměrným hodnotám. Naopak lineární trend ročních sum úhrnů srážek je stoupající.

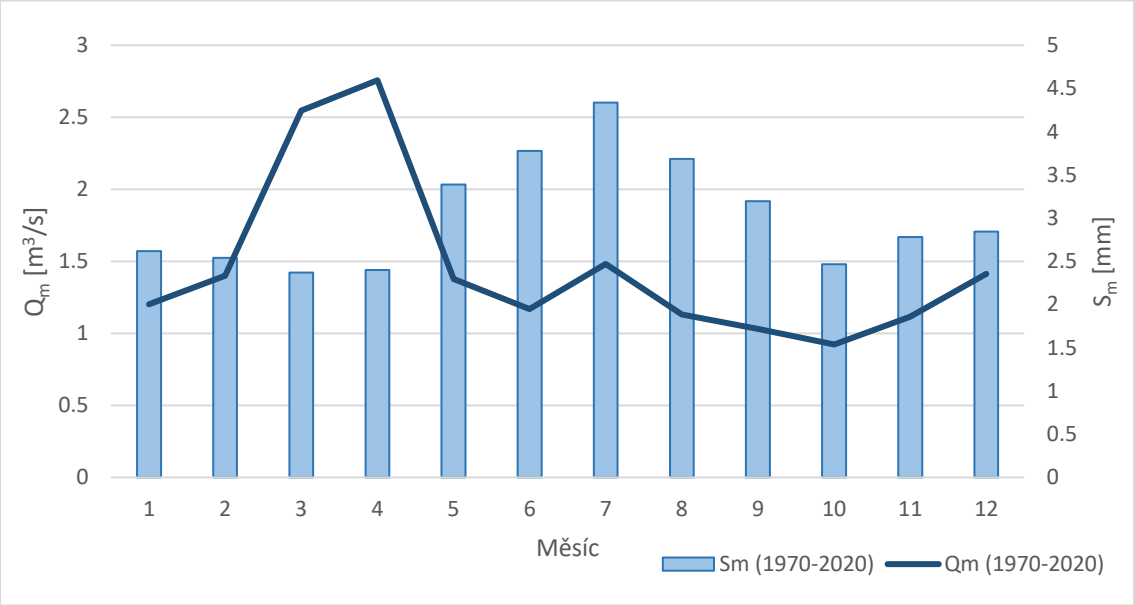
Co se týče srážkových úhrnů, tak výsledky jsou analogické, jako u předchozího hodnocení vodnosti neboli roky s největšími celkovými úhrny jsou 1972, 1977, 1980, 1997-1998, 2000-2002 a 2020, a roky s nejmenšími úhrny srážek jsou stejné jako roky s hodnocením jako mimořádně málo vodní rok a málo vodný rok.

Závislost průtokových hodnot na množství srážek je jednoznačná, každý následující rok s velkým poklesem úhrnu srážek znamená i prudký pokles průměrného ročního průtoku.

4.1.4 Měsíční odtokové a srážkové poměry

Průměrná nebo celková roční hodnota nevypovídá o rozložení hodnot během roku, například většina srážek může spadnout během tří měsíců a zbytek roku je srážkově chudý, nebo roční průměrná hodnota průtoku skryje průměrná maxima a minima vyskytujících se během roku. Pro pochopení sezónního rozložení vybraných veličin zobrazených v předchozích grafických výstupech pomáhá průměrná měsíční hodnota daného měsíce. V této práci tím získáme pohled do uspořádání výskytu nízkých a vysokých hodnot průtoku a úhrnů srážek během roku, tedy jejich sezonalitu. Sezonalita se ovšem během času mění, proto jsou vždy znázorněné nejdříve hodnoty vycházející z celkového období 1970-2020 a následně hodnoty z 2 období 1970-1995 a 1996-2020 neboli celkové období rozdělené v bodě změny vygenerovaného z již zmíněného testu homogenizace.

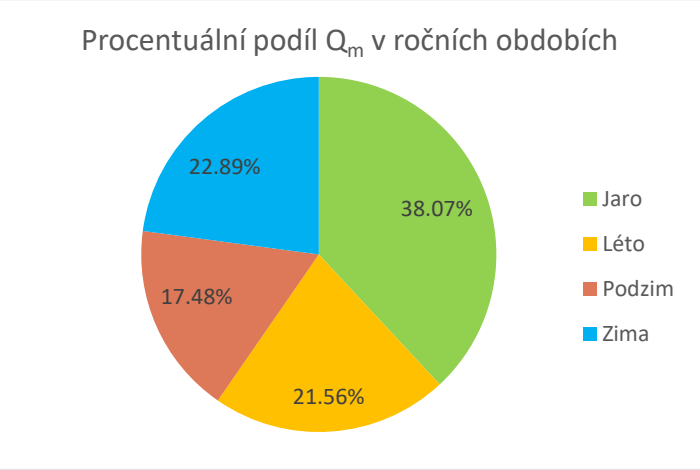
Sezonalita průtoku Q_m a úhrnů srážek S_m období 1970-2020



Graf č. 6: Sezonalita průtoku Q_m a S_m v období 1970-2020 (vlastní zpracování)

Roční chod průtoku je odlišný od ročního chodu srážek. Největší průtok se vyskytuje v období jara, konkrétně v měsíci duben a březen navzdory naopak nejnižším srážkovým úhrnům v tomto ročním období. Po jarních maximech průtokové hodnoty prudce klesají zpátky na lednovou úroveň, kde po zbytek roku zůstávají s již menšími fluktuacemi, kromě výskytu druhého, ale již menšímu vrcholu v červencovém měsíci.

Od červencového do lednového měsíce již jdou průtokové a srážkové hodnoty společně, tedy od července do října klesají a poté do prosince zvolna stoupají. Od ledna se zase hodnoty rozchází – průtok strmě stoupá k hodnotám jarního tání a úhrny srážek klesají.

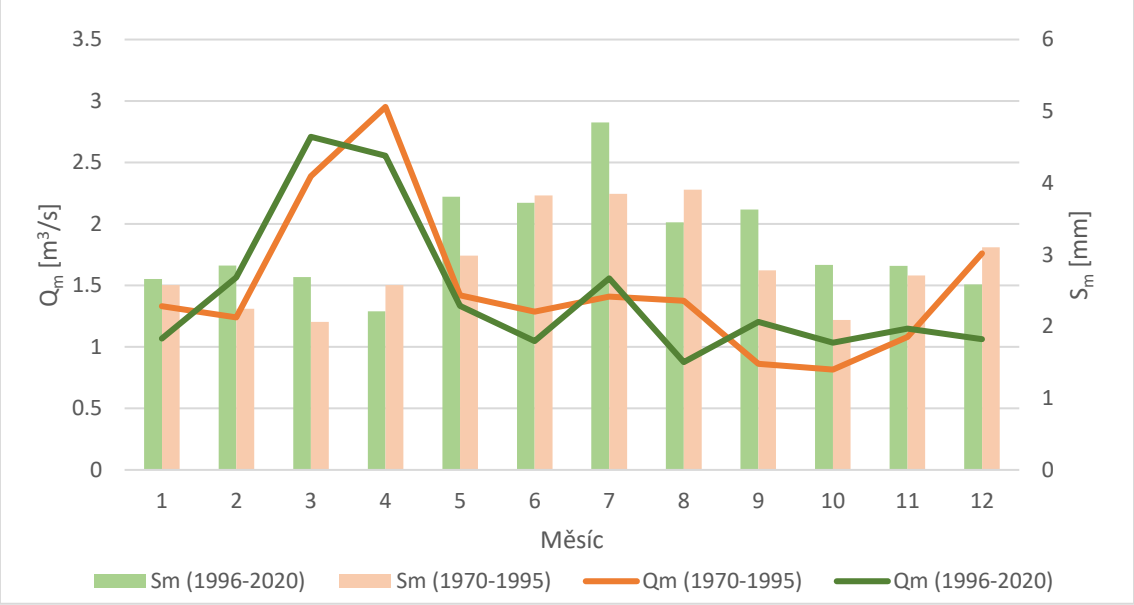


Graf č. 7: Procentuální podíl Q_m v ročních obdobích (vlastní zpracování)

Po zahrnutí jednotlivých měsíců do kategorií ročních období vyvstává stejná informace, jako v předchozím grafu – největší část odtoku se generuje v jarním období. Zbytek roku je procentuální podíl víceméně vyrovnaný, kromě nejslabšího podzimního období.

Změny sezonality průtoku a úhrnů srážek

Jak se sezónní chod průtoku Q_m a srážek S_m mění zobrazuje následující graf č. 8, sledující sezonalitu v období 1970-1995 znázorněné oranžovou barvou, a období 1996-2020 znázorněné barvou zelenou.



Graf č. 8: Změna sezonality Q_m a S_m (vlastní zpracování)

Na první pohled rozdíly mezi křivkami průměrných měsíčních průtoků Q_m za jednotlivá období jsou značnější než mezi hodnotami průměrných měsíčních srážek S_m.

Sezonalita průtoku v dřívějším období (1970-1995) se charakterizuje svým dubnovým maximem a říjnovým minimem, dále pak druhým menším maximem v měsíci červenec a druhým minimem v září. Srážek s každým měsícem přibývá od dubnového minima a vrcholí v červenci, pak následuje opět pozvolný pokles.

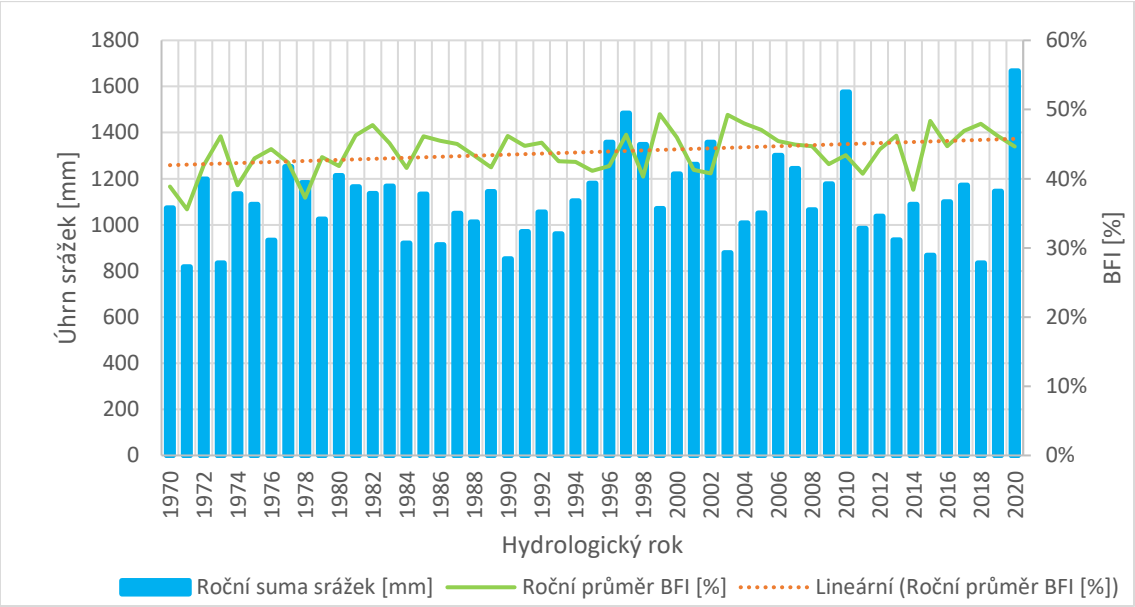
V porovnání s hodnotami průtoku pozdějšího období (1996-2020) mají hodnoty z období dřívějšího větší rozpětí a od května do konce roku vyrovnanější chod. V pozdějším období se maximum Q_m přesouvá z dubna na březen, a snižuje svou hodnotu. V pozdějším období je fluktuace hodnot vyšší. Druhé maximum zůstává jako v předchozím období v měsíci červenec, ovšem nástup maxima je prudší, stejně tak jako následný prudký pokles k celkovému minimu v měsíci srpen. Celkově je sezónní chod v pozdějším období méně vyrovnaný.

Rozdíl mezi obdobími v míře rozpětí průtokových hodnot Q_m se mění také v případě srážkových hodnot S_m. Rozpětí hodnot je zde vyšší v pozdějším období, stejně jako vyšší proměnlivost. Většinou jsou hodnoty v pozdějším období vyšší, kromě měsíce duben, červen, srpen a prosinec. Větší jsou také v zimním období, a to v měsíci leden a únor.

4.1.5 Index základního odtoku BFI a jeho změny sezonality

Podíl základního odtoku je variabilní v závislosti na množství přímého odtoku – v období větších úhrnů srážek nebo odtávání akumulovaných srážek v podobě sněhové pokrývky tvoří celkový odtok převážně přímý odtok. Nicméně v době většího deficitu přímého odtoku je celkový odtok tvořen z větší části základním odtokem, tedy odtékající voda v korytě vodního toku je složena primárně z podzemní vody.

Pro určení podílu základního odtoku na celkovém byly vypočteny hodnoty indexu základního odtoku BFI (Base Flow Index) pomocí online nástroje WHAT popsané v kapitole o použitých vybraných metodách. Tyto hodnoty v podobě ročního průměru jsou znázorněny v následujícím grafu společně s celkovými ročními úhrny srážek.

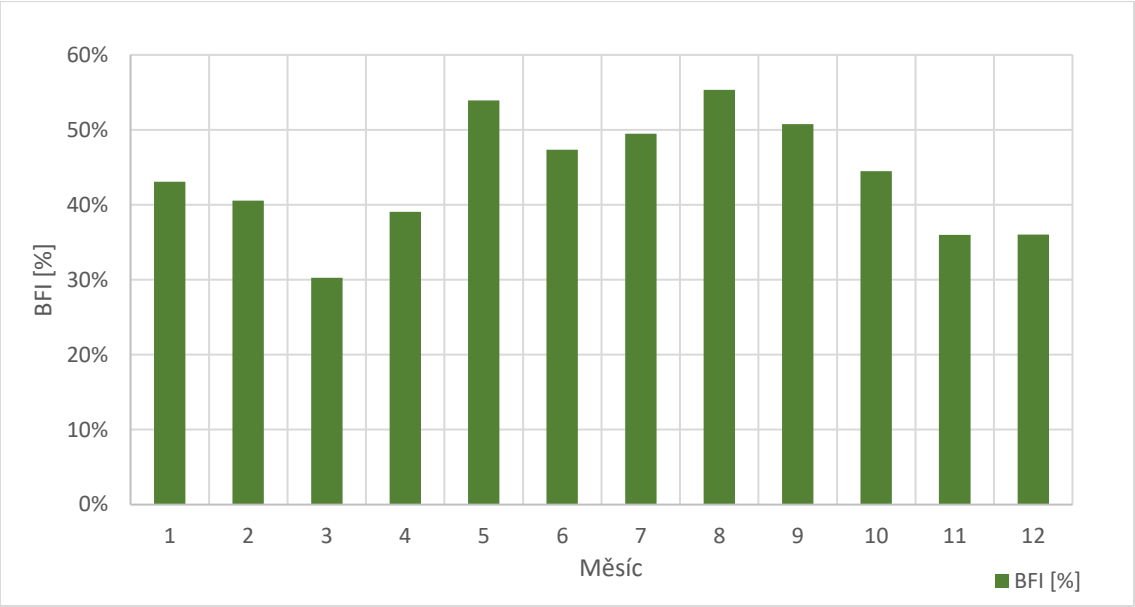


Graf č. 9: Roční suma srážek a roční průměr indexu základního odtok (vlastní zpracování)

Z předchozích podkapitol a grafů byl pozorován přímý vztah ročních srážkových úhrnů a celkové vodnosti hydrologického roku. Vztah těchto veličin s indexem základního odtoku vykazuje na základě výsledků zobrazených v grafu č. 9 nepřímo úměrný vztah, tedy nárůst vodnosti a srážkových úhrnů doprovází pokles podílející se složky základního odtoku na celkovém odtoku.

Nejnižší hodnoty BFI se pohybují v intervalu 36-42 % (roky 1970-1972, 1975, 1977, 1980, 1982, 1995, 1998, 2002, 2008, 2010), což indikuje vyšší vodnost roku s vyšším ročním úhrnem srážek. Ve výčtu vyjmenovaných let můžeme pozorovat od začátku 80. let nižší frekvenci výskytu roku s hodnotou BFI ve zmíněném intervalu, výčet končí rokem 2010. To vytváří stoupající lineární trend vyšších hodnot neboli podíl základního odtoku na celkovém odtoku stále stoupá.

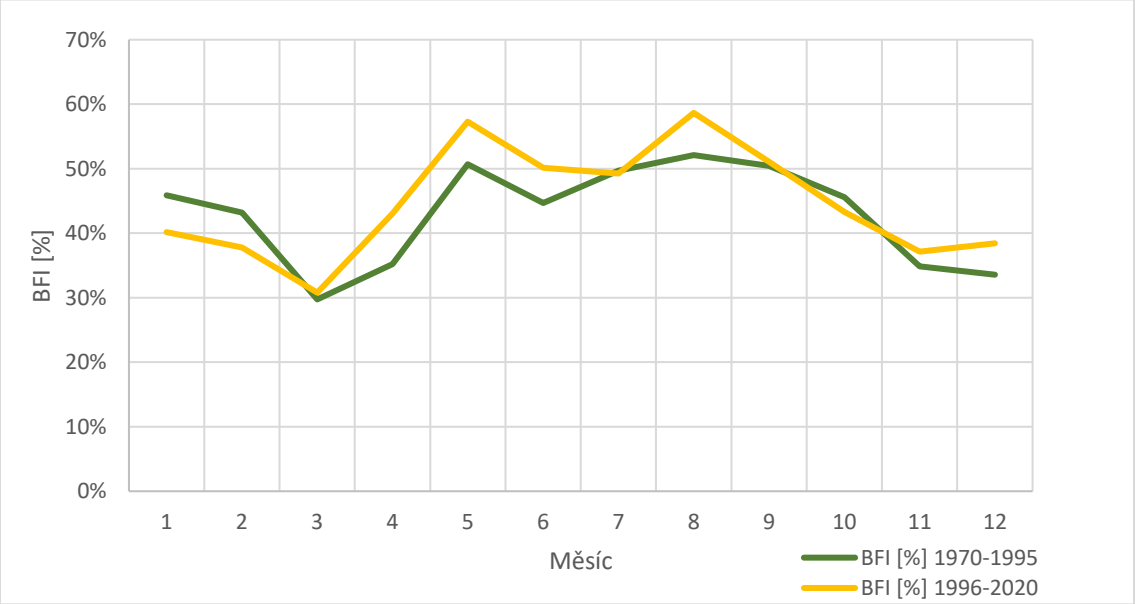
Míra dotace vodního toku podzemní vodou se během roku liší v závislosti na ročních období, které jsou charakteristické pro odlišné srážkové úhrny a teploty. Chod hodnot indexu základního odtoku je zobrazen v následujícím grafu.



Graf č. 10: Sezonalita indexu základního odtoku v období 1970-2020 (vlastní zpracování)

Hodnoty se většinu roku pohybují nad 30 % kromě měsíce březen. Nejméně se složka podzemní vody podílí na celkovém odtoku v jarních měsících březen a duben (30 % a 39 %) a v listopadu a prosinci (oba 36 %). Zbytek roku jsou hodnoty vyšší pohybující se v intervalu 47-55 %.

Zda se mění roční chod hodnot BFI během desetiletí ilustruje následující graf, kdy průměrné měsíční hodnoty byly vypočítány zvlášť pro období 1970-1995 a období 1996-2020.

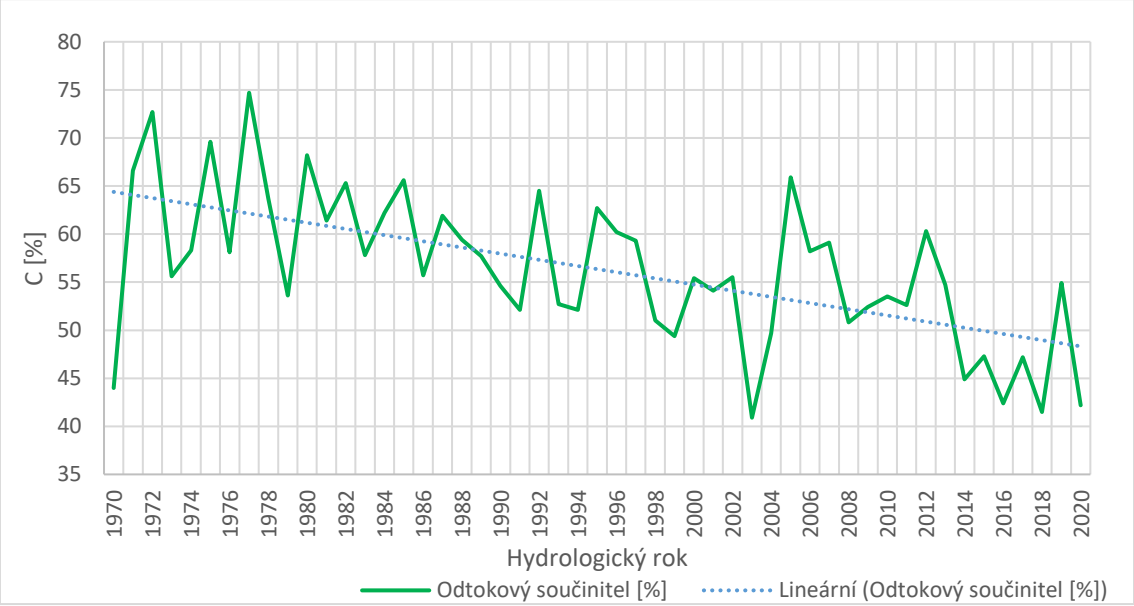


Graf č. 11: Změna sezonality indexu základního odtoku (vlastní zpracování)

Hodnoty v pozdějším období (1996-2020) se od dubna do srpna se za prvé výrazně zvýšily, a za druhé se zvýšila jejich proměnlivost a rozpětí hodnot. Průběh hodnot má dva vrcholy, a to v měsíci květen a srpen, stejně jako v dřívějším období. V měsíci leden a únor se hodnoty v pozdějším období naopak snížily.

4.1.6 Odtokový součinitel

Odtokový součinitel tvořený z hodnot průtoku a srážkových úhrnů pomáhá určit, jak velká část spadlých srážek bylo transformováno v odtok. V tomto případě jsou hodnoty vypočítány v rámci jednotlivých let sledovaného období, vyjádřeny v procentech.



Graf č. 12: Roční odtokový součinitel C [%] (vlastní zpracování)

Hodnoty odtokového součinitele disponují vysokou proměnlivostí. Každý rok se liší, někdy až skokovým nárůstem (např. 1970 a 1971, 1979 a 1980) nebo poklesem (např. 1972 a 1973, 2002 a 2003). Nicméně celkově podle lineárního trendu hodnoty s přibývajícím časem klesají neboli podíl srážek na odtoku je stále nižší.

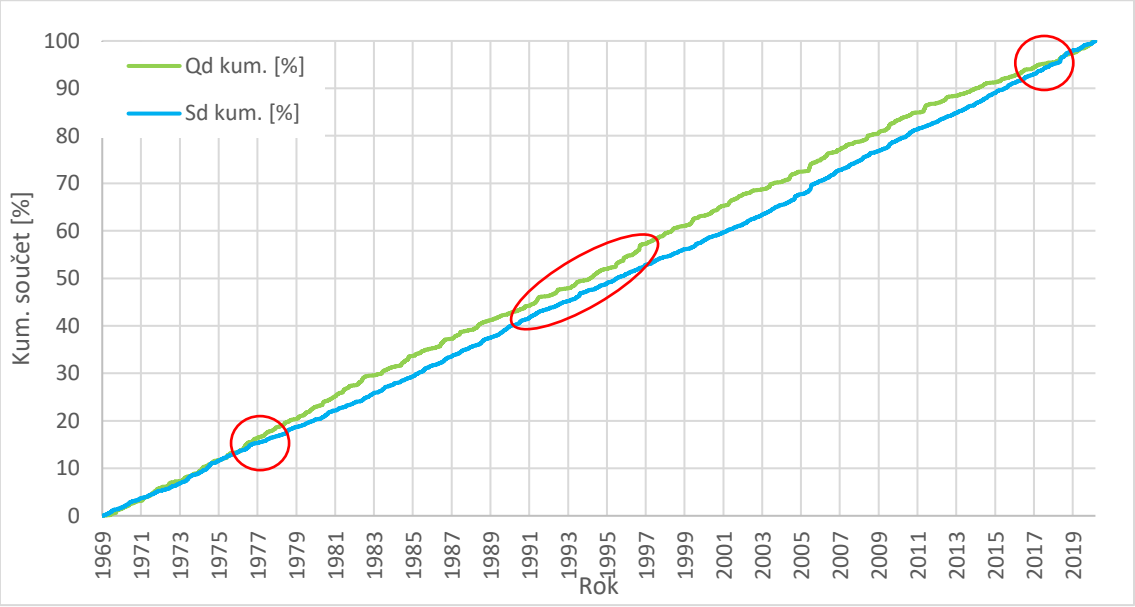
Z předchozích grafů znázorňujících průměrné roční průtoky a celkové srážky jsou známy roky s minimálními Q_r: 1973, 1990, 2003, 2015 a 2018. Roky s nízkými úhrny srážek jsou identické. Tyto roky v případě odtokového součinitele také vykazují nízké hodnoty, a to v intervalu 40-56 % oproti vyšším hodnotám v intervalu 60-75 %. To znamená, že ve slabších letech hodnot průtoků a srážek se na průtoku podílí méně srážek.

Vysvětlení této vzájemné korelace z pohledu výpočtu je taková, že vstupující hodnota odtokové výšky H_o je počítána z průměrného ročního průtoku (m^3/s) převedeného

na celkové množství vody vynásobením počtem sekund v roce, to celé vztažené na plochu povodí. Protože trend průměrné roční hodnoty průtoku je klesající, stejně tak bude klesající odtokový součinitel a vykazovat korelaci s průměrným ročním průtokem.

4.1.7 Součtové čáry

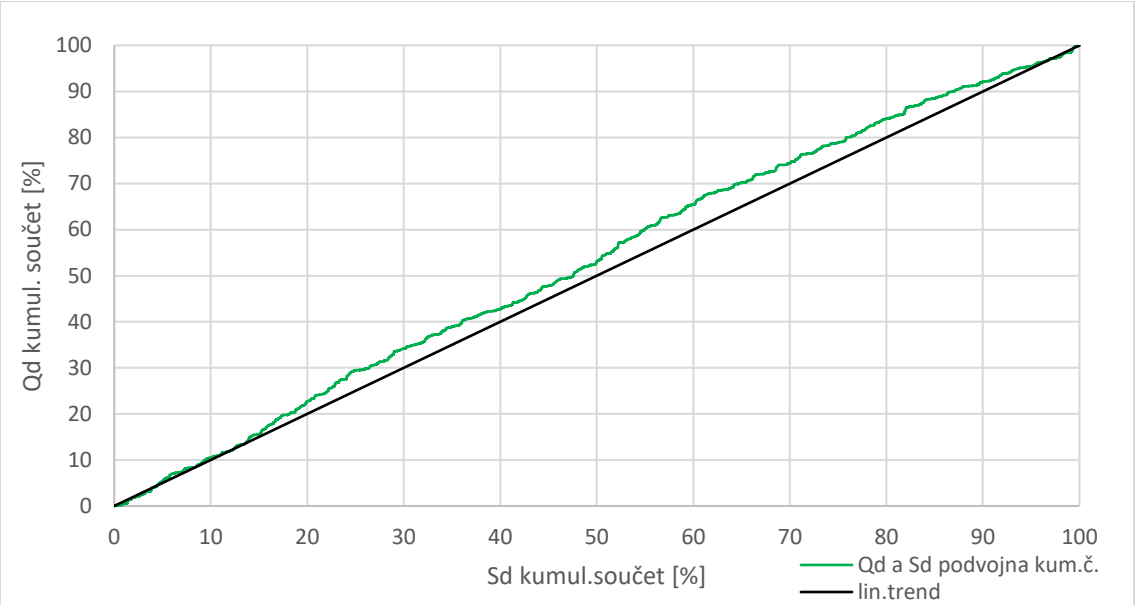
Jako další nástroj pro detekování změn v odtokovém režimu toku je metoda jednoduchých a podvojných součtových čar konstruované podle postupu popsaného v kapitole o použitých metodách. Nejprve byla zkonstruovaná jednoduchá součtová čára denních průměrných průtoků Q_d a denních srážkových úhrnů S_d za sledované období.



Graf č. 13: Jednoduché součtové čáry Q_d a S_d pro období 1970-2020 (vlastní zpracování)

Součtová čára denních úhrnů srážek je vyrovnanější a více se blíží k přímce, než je tomu u součtové čáry průtokových hodnot. Malé skoky nejspíš představují extrémní povodňové situace, jinak průběh čáry není poznamenán výraznými změnami. Nicméně do roku 1976 jdou součtové čáry společně a od roku 1977 se rozdvojují až do roku 2019 s menším přiblížením v letech 1990-1996, poté se průtoková čára opět odchyluje pravděpodobně vlivem povodní z roku 1996 a 1997.

Pro lepší určení výskytu bodů zlomu slouží podvojná čára graficky znázorněna v následujícím grafu.



Graf č. 14: Podvojná součtová čára Q_r a S_r pro období 1970-2020 (vlastní zpracování)

Podvojná součtová čára nevykazuje ostré změny, nicméně jsou patrné dvě vlny, které byly viditelné u jednoduché součtové čáry průtoku neboli první vlna v období 1977-1994 a druhá vlna v období 1995-2017.

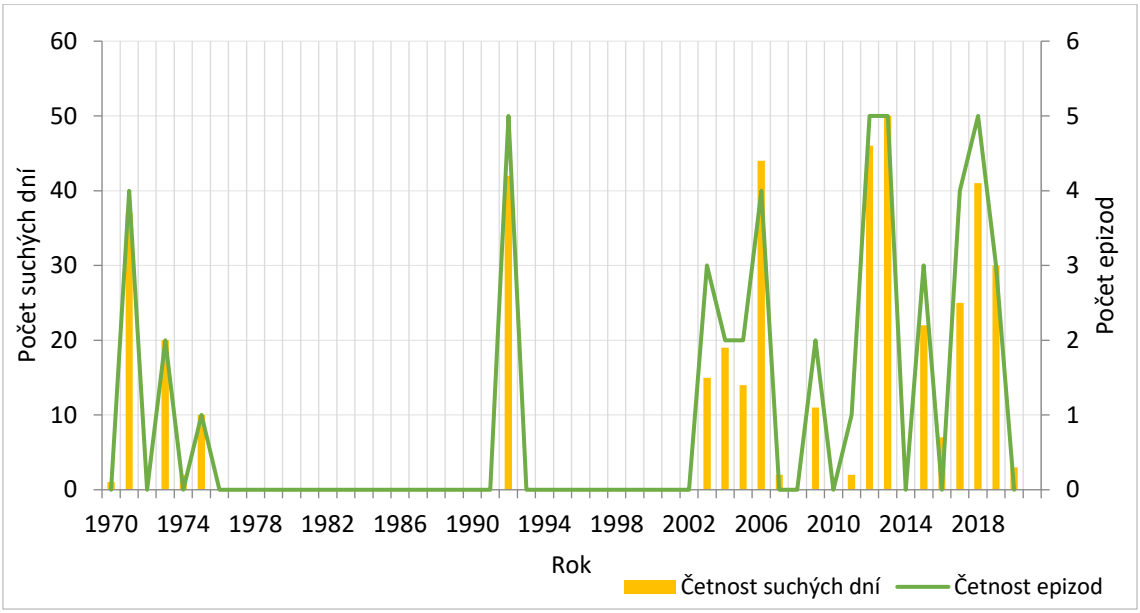
4.2 Extrémní hydrologické jevy

4.2.1 Hydrologické sucho

Již v předchozí kapitole hodnotící srážko-odtokový režim byly označené roky potýkající se s nižší vodností, nižšími úhrny srážek, a definovány byla sezonalita výskytu sucha a její změny. Tato kapitola ovšem bude zaměřená na výběr epizod hydrologického sucha pomocí prahové metody a metody nedostatkových objemů.

Metoda prahové hodnoty

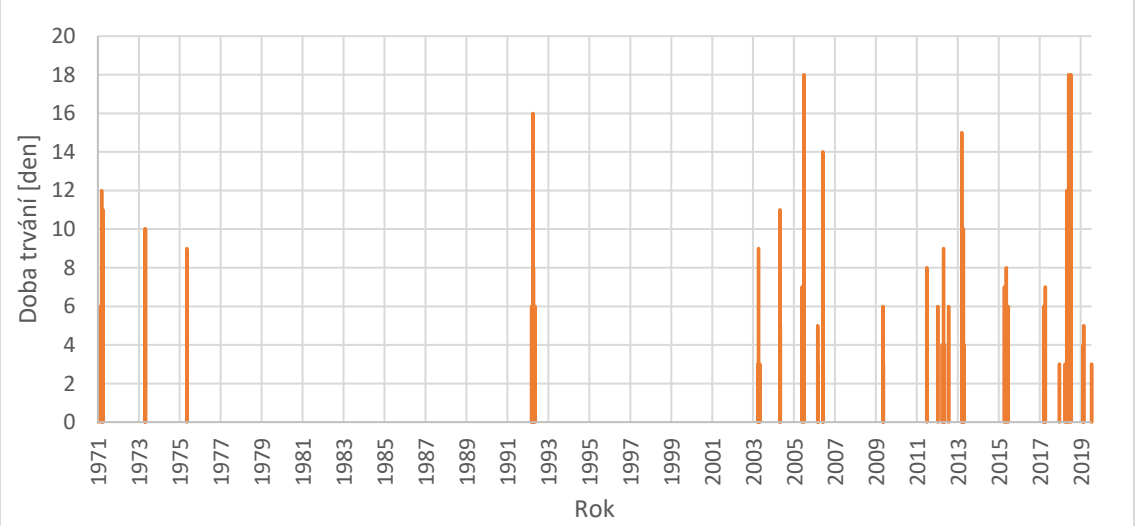
Počet dní, kdy průtok přesáhl nebo dosáhl prahovou hodnotu Q_{355} po dobu nejméně 3 dní, je zobrazen v následujícím grafu společně s počtem epizod hydrologického sucha. Epizody v sobě nezahrnují data všech suchých dní, suché dny vyskytující se samotně nebo po dvou byly vyřazeny dle stanoveného kritéria zmíněného výše.



Graf č. 15: Četnosti suchých dní a epizod sucha v jednotlivých letech (vlastní zpracování)

Frekvence výskytu epizod sucha je značně větší v druhé polovině sledovaného období než v první. Stejně tak narůstá počet dní nízkých průtoků, rok 2014 vykazuje největší počet dní a to 50, druhé maximum je hned předchozí rok 2013 s počtem 46. Naopak období let 1976-1991 nevykazuje žádný den alespoň dosahující prahové hodnoty.

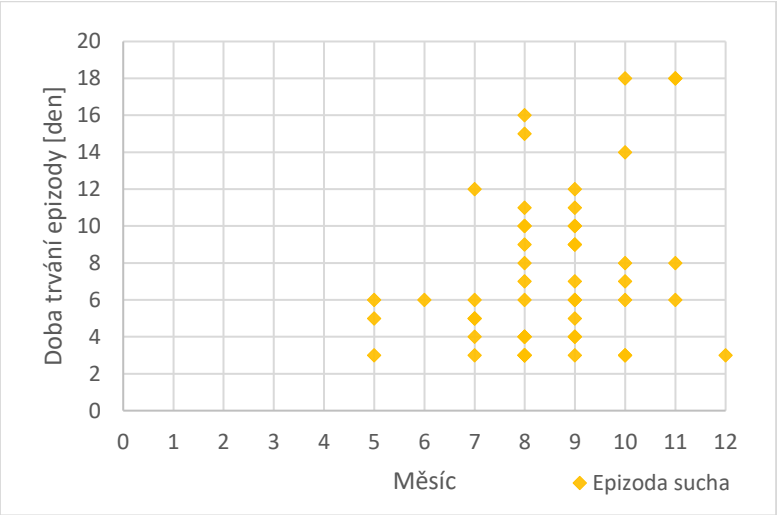
Poměr počtu suchých dní (1-50 dní) a počtu epizod nepřesahující hranici pěti naznačuje vcelku delší trvání jednotlivých epizod znázorněné v následujícím grafu:



Graf č. 16: Doba trvání epizod hydrologického sucha (vlastní zpracování)

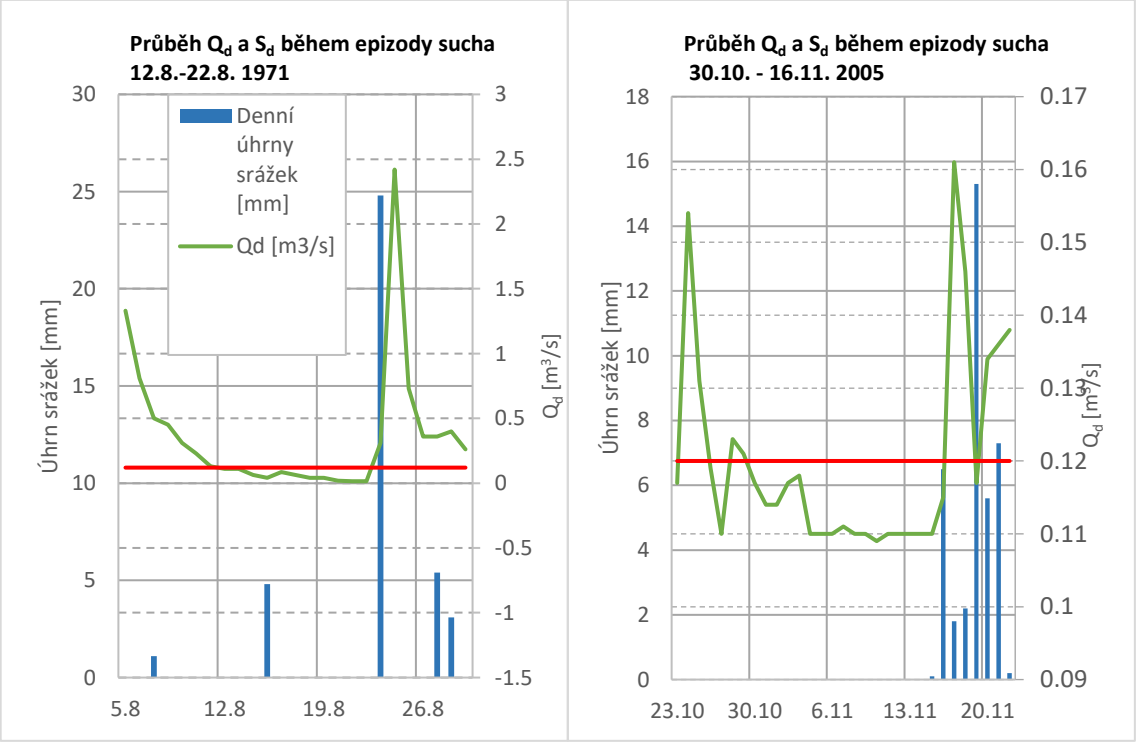
Stejně jako frekvence, tak i doba trvání epizod nízkých průtoků v průběhu času narůstá. Nejdelší řada po sobě jdoucích dní nízkých průtoků je 18 dní, vyskytující se 30.10. – 16.11. 2005, 6.10. – 23.10 2018, 13.11 – 30.11 2018.

Zda se nejdelší periody nízkých průtoků vyskytují hlavně v podzimním období znázorňuje následující menší graf:



Graf č. 17: Doba trvání epizod sucha v jednotlivých měsících (vlastní zpracování)

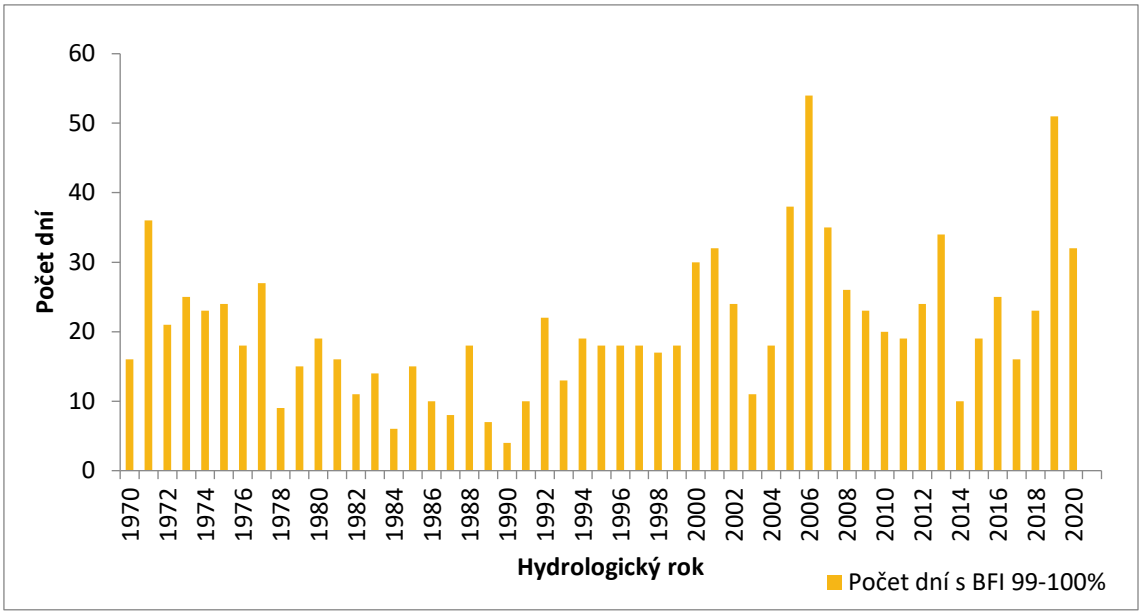
Výskyt period sucha se koncentruje do druhé půlky roku, tedy od května do prosince, zmíněné periody nejdelšího trvání nedoprovází tolik dalších epizod, jako tomu je v měsíci srpen a září. Vzniklé periody sucha jsou zapříčiněné absencí srážek, což znázorňuje následující graf č. 18 a 19 s dvěma vybranými epizodami hydrologického sucha, konkrétně letní epizoda z 12.8.-22.8. 1971 a podzimní z 30.10.-16.11. 2005.



Graf č. 18 a 19: Průběh Q_d a S_d během vybraných epizod sucha (vlastní zpracování)

V grafech je rovněž znázorněný průběh průtoku a srážek týden před a po epizodě hydrologického sucha. Grafy ukazují vysokou citlivost vodního toku na příchozí srážek nebo jejich absenci. Několik po sobě jdoucích dní beze srážek způsobí s vysokou pravděpodobností, že hodnoty průtoku překročí prahovou hodnotu. Naopak při příchodu srážkové epizody hodnoty průtoku ihned stoupají vysoko nad prahovou hodnotu Q_{355}.

Jako druhá zvolená prahová hodnota byl interval 99-100 % indexu základního odtoku jako indikátor pro určení období sucha.



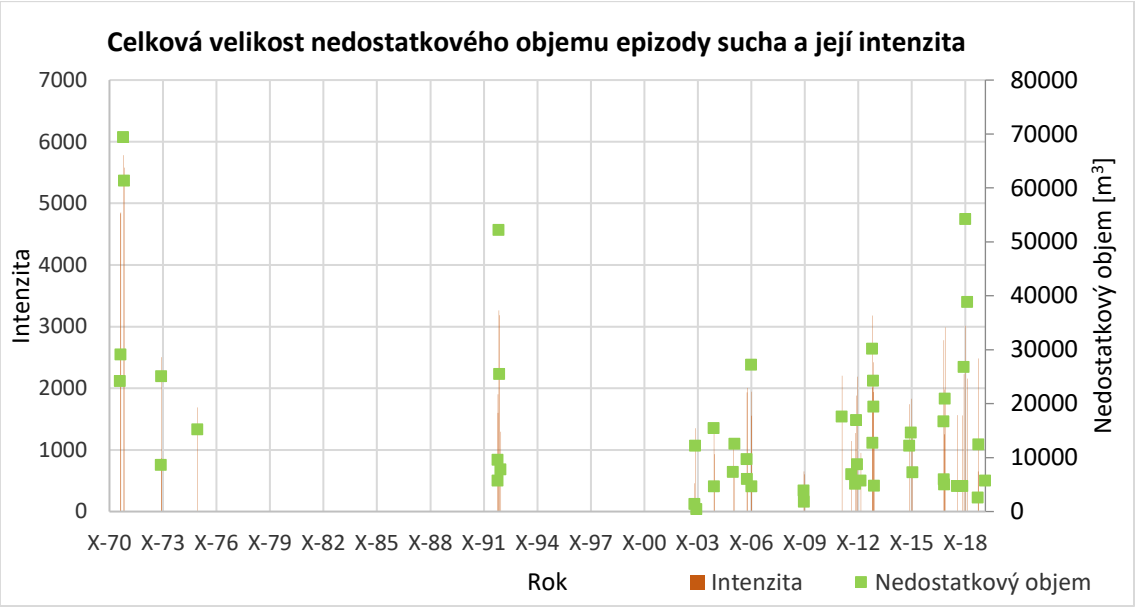
Graf č. 20: Počet dní s BFI 99-100 % v jednotlivých letech (vlastní zpracování)

Výskyt dní, kdy je celkový odtok zcela nebo z 99 % dotovaný základním odtokem, je frekventovanější, než tomu bylo u předchozí prahové hodnoty Q_{355}. V průměru za celé období se za rok vyskytne 20 dní, v dřívějším období 35 a v pozdějším 53. To znamená, že trend počtu dní za rok je stoupající, jak je to v grafu znázorněné.

S nejvyšším počtem dominují roky 2006, 2019, 2005 a 1971, naopak nejnižší počet dní vykazují roky 1984, 1990, 2003 a 2014.

Metoda nedostatkových objemů

V následujícím grafickým výstupu je znázorněná velikost nedostatkového objemu, tedy velikost průtoku chybějícího do prahové hodnoty Q_{355} = 0,120 m^3/s, společně s intenzitou jednotlivých epizod.

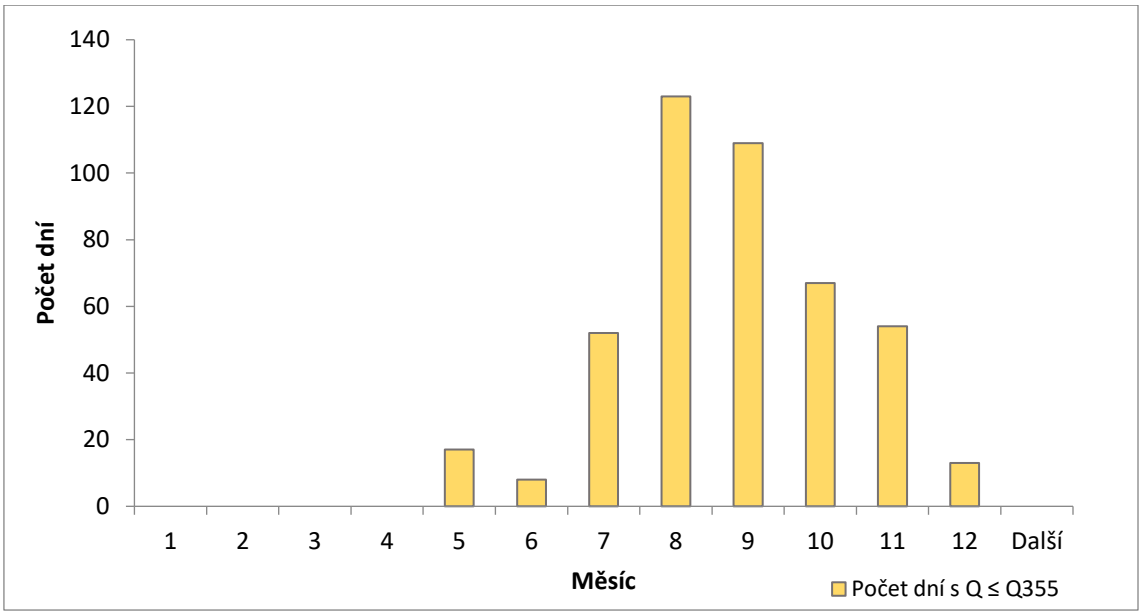


Graf č. 21: Celková velikosti nedostatkového objemu epizody sucha a její intenzity (vlastní zpracování)

Největší intenzity sucha stejně jako velikost chybějících objemů se vyskytuje na začátku sledovaného období, tedy na začátku sedmdesátých let. Tyto epizody pocházejí z konce měsíce května a července. Druhou největší hodnotu intenzity vykazuje rok 1992 s epizodou na konci srpnového měsíce. V druhé polovině sledovaného období, převážně od roku 2003, se již nevyskytují takto vysoké hodnoty intenzity, protože doba trvání suché periody je stále delší (viz graf č. 16), a vyšší hodnoty chybějícího objemu se tak více časově rozloží. Hodnoty chybějícího objemu také klesají, až na výjimku v roce 2018, který vykazuje druhý největší chybějící objem v periodě sucha ke konci říjnového měsíce. Hodnoty sledovaných veličin klesají, naopak se zvyšuje frekvence výskytu epizod.

Sezonalita hydrologického sucha a její změny

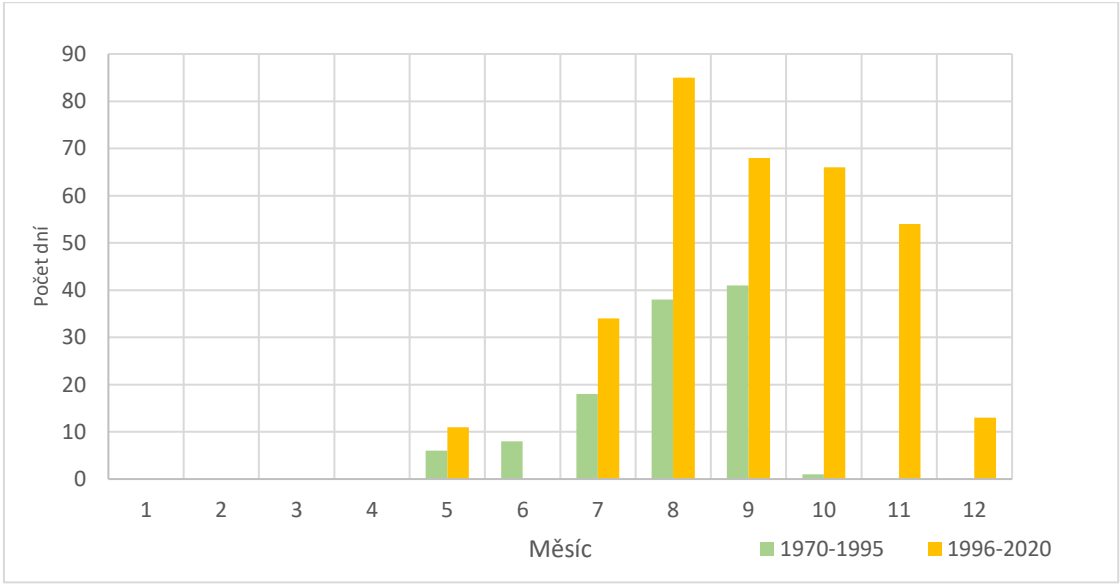
Výskyt dní s nízkým průtokem během roku již nastínil graf č. 17 zobrazující výskyt epizod v jednotlivých měsících společně s informací o jejich trvání. Následující graf zahrnuje informaci o všech dní s nízkým průtokem a jejich sezónní výskyt během roku.



Graf č. 22: Počet suchých dní v jednotlivých měsících v období 1970-2020 (vlastní zpracování)

Největší počet dní s průtokem ≤ Q_{355} se vyskytuje v měsíci srpen a září – s nárůstem teplot v předchozích jarních a letních měsících je průtok stále víc oslabován stejně jako množství podzemní vody tvořící základní odtok, který během suchých period dotuje vodní tok nejvíce v srpnovém měsíci, a to z 55 % (graf. č. 10 sezonality BFI). Od září s postupně snižující se teplotou výskyt dní s nízkým průtokem klesá, v první čtvrtině roku se již nevyskytují žádné suché dny.

Výskyt dní s nízkým průtokem během roku se mění, proto následující graf zobrazuje sezonalitu výskytu v období 1970-1995 a 1996-2020.



Graf č. 23: Změna sezonality výskytu období sucha (vlastní zpracování)

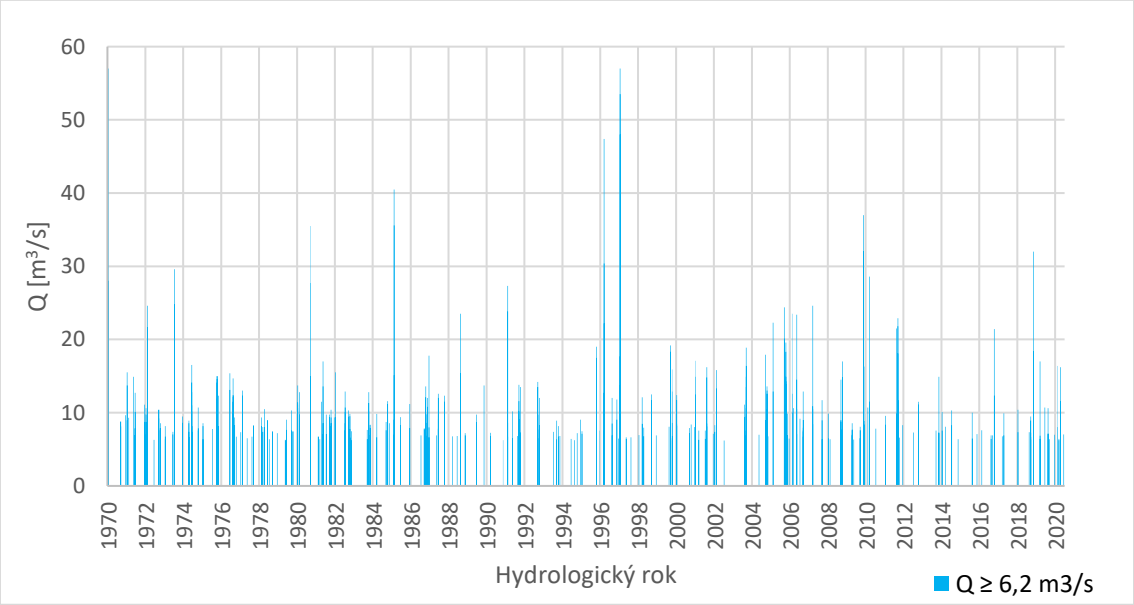
Do pozdějšího období spadá mnohem víc dní nízkého průtoku s maximem v měsíci srpen a září. Maximum v dřívějším období je v měsíci září. Tyto změny v sezónním výskytu odpovídají změnám sezonality indexu základního odtoku viz graf č. 11.

4.2.1 Epizody vysokých průtoků

V této kapitole bude předmětem zájmu detekování druhého extrému, a to period vysokých průtoků, jejich časový výskyt, frekvence a sezonalita včetně její změny. Stejně jako v případě detekce suchých period, i v tomto případě jsou periody vysokých průtoků určeny pomocí prahové metody.

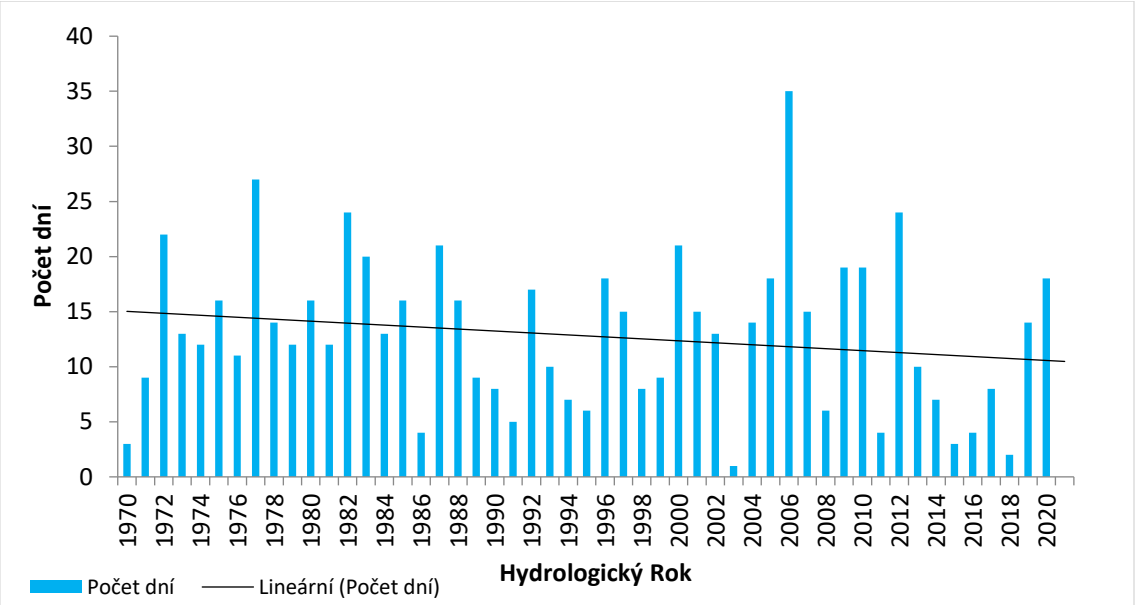
Metoda prahové hodnoty

Následující graf č. 24 nabízí pohled do výskytu průtokových hodnot během sledovaného období spadajících do výběrového kritéria, tedy Q ≥ 6,2 m^3/s. Prahová hodnota byla vybrána pomocí metody Minimax Q = 6,2 m^3.



Graf č. 24: Výskyt hodnot průtoku ≥ 6,2 m^3/s (vlastní zpracování)

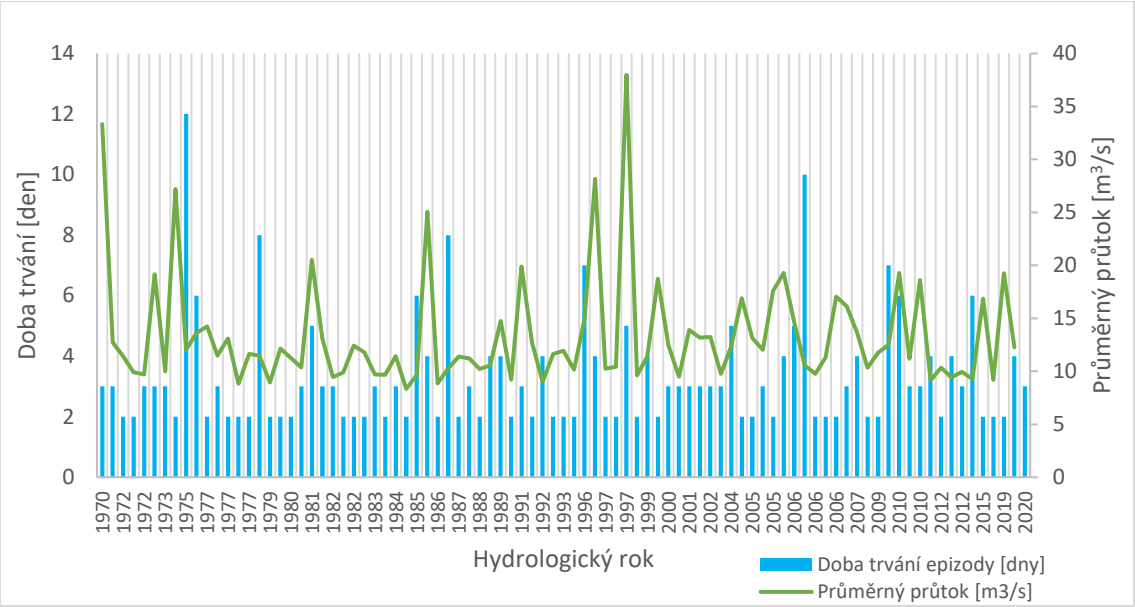
Největší hodnoty průměrného denního průtoku jsou stejné, a to Q = 57 m^3/s. V obou případech hodnoty pochází z červencových povodní roku 1970 a 1997. V dřívějším období je frekvence výskytu vyšších průtoků vyšší než v pozdějším, s výjimkou roku 2006. Frekvenci výskytu lépe zobrazuje následující graf znázorňující počet dní vysokého průtoku v jednotlivých letech:



Graf č. 25: Počet dní s průtokem ≥ 6,2 m^3/s v jednotlivých letech (vlastní zpracování)

Nejslabší roky jsou 1970 (3 dny), 1986 (4 dny), 1991 (5 dní), 2003 (1 den), 2011 (4 dny), 2015 (3 dny), 2016 (4 dny) a 2018 (2 dny). Trend je tedy mírně klesající se snižující se frekvencí výskytu vysokých průtoků. V dřívějším období 1970-1995 se slabší rok (rok s méně nebo rovno 5 dnům zvýšeného průtoku) vyskytoval jednou za desetiletí. S koncem 20. století a začátku 21. století frekvence slabších let narůstá.

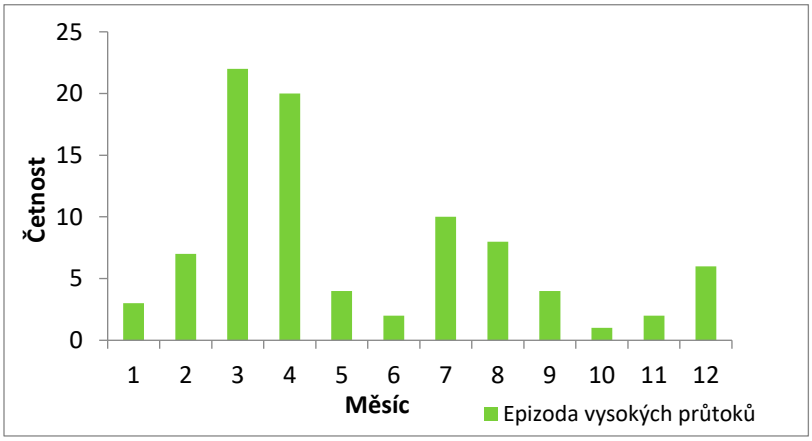
Stejně jako v případě určení period sucha, i v tomto případě byly určeny jednotlivé epizody zvýšeného průtok podle pozměněných kritérií popsaných v kapitole o použitých metodách, tedy Q = 8,89 m^3/s a minimální doba trvání epizody 2 dny. V následujícím grafu jsou zobrazeny jednotlivé epizody a jejich doba trvání, časový výskyt a průměrný průtok za celou epizodu, který vypovídá o tom, zda epizoda trvala krátce s velmi vysokými průtoky nebo naopak.



Graf č. 26: Jednotlivé epizody povodní v čase a jejich doba trvání (vlastní zpracování)

Nejdelší periody vysokých průtoků s délkou 12 dní vykazuje rok 1975 a s délkou 10 dní rok 2006, 8 dní rok 1977 a 1987. Ovšem tyto epizody díky svému delšímu trvání více rozkládají zvýšený hodnoty průtoku v čase. Proto větší hodnoty průměrného průtoku vykazují epizody s více časově koncentrovanějšími hodnotami, jako například v roce 1997 (Q = 37,98 m^3/s, 5 dní), 1970 (Q = 33,33 m^3/s, 3 dny), 1996 (Q = 28,17 m^3/s, 4 dny) a v roce 1985 (Q = 25,065 m^3/s, 4 dny).

V jakých měsících se epizody vyskytovaly, to znázorňuje následující graf:

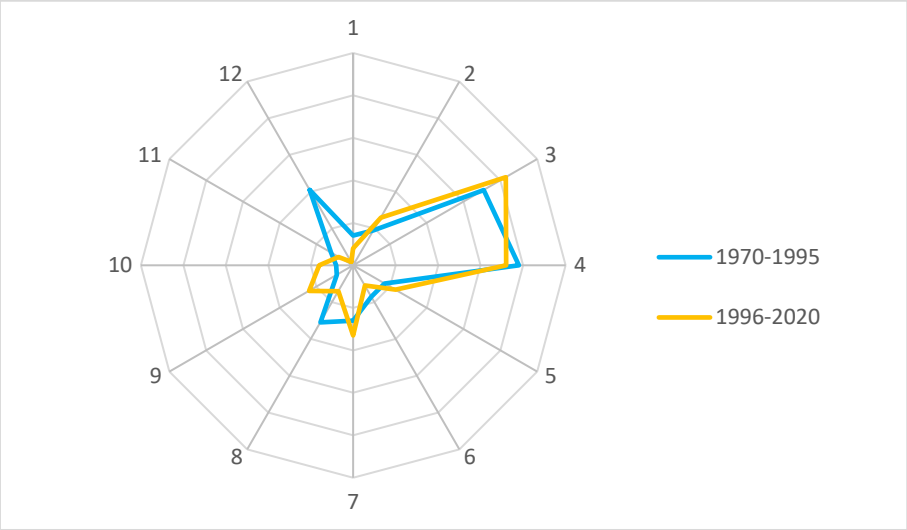


Graf č. 27: Sezónní výskyt epizod vysokých průtoků (vlastní zpracování)

Sezonalitě period vysokých průtoků dominují jarní měsíce březen a duben a jako druhý nejčastější sezónní výskyt vykazují letní měsíce červenec a srpen nebo zimní měsíc prosinec.

Sezonalita a její změny

Již v předchozí podkapitole byla prezentována sezonalita za celkové sledované období 1970-2020 v podobě zobrazení sezónního výskytu všech epizod vysokých průtoků. Pro zobrazení změny sezonality byly použity hodnoty z metody Minimax pro detailnější výstup z více hodnot, protože prahová hodnota $Q \geq 6{,}2\ m^3/s$ je mírnější kritérium. Následující graf zobrazuje četnost dní s vysokým průtokem v jednotlivých měsících v období 1970-1995 a 1996-2020.



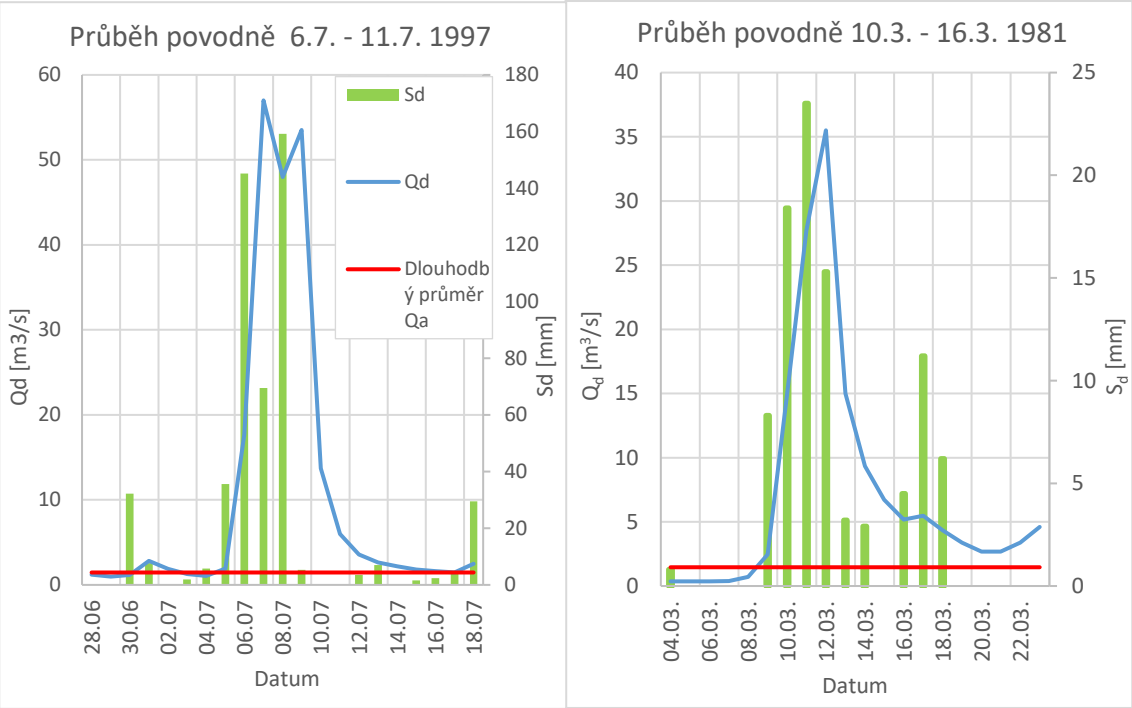
Graf č. 28: Změna sezonality vysokých průtoků (vlastní zpracování)

Výrazná změna spočívá ve změně měsíce s nejfrekventovanějším výskytem dní s vysokým průtokem v jarním období, a to z měsíce dubna na březen. Dny s vysokými průtoky přichází v období 1996-2020 dříve než v dřívějším období. V letním období se také posunul největší výskyt povodní, a sice ze srpna na červenec, v měsíci srpen je v pozdějším období výrazný pokles následovaný vzestupem v měsíci září, kdy v dřívějším období naopak vodnost klesala. S dřívější jarní oblevou tedy následuje dřívější letní maximum výskytu vysokých průtoků. Vzestup vodnějších dní v měsíci září také ilustrují předchozí výsledky změny sezonality úhrnů srážek viz graf č. 8 – září vykazuje v pozdějším období větší úhrn, než tomu bylo dříve. V zimním období nedochází k žádným přesunům frekvence výskytu, ale k výraznému snížení oproti dřívějšímu období. Podle zmíněného grafu č. 8 se v období 1996-2020 v zimních měsících úhrny srážek mírně snížily.

Vybrané povodňové epizody

Pro detailnější přiblížení, jak povodí reaguje v různých obdobích na větší úhrny srážek o větší intenzitě, byly vybrány dvě povodňové epizody zobrazené následujícími

grafy. První povodeň je letního dešťového typu z 6.7. – 11.7. 1997. Druhá povodeň pochází z časového úseku 10.3. – 16.3. 1981, jedná se tedy o jarní smíšenou povodeň. Pro každou situaci byl vypočítán R-B index pro dodání informace o „bleskovosti“ nástupu povodně.



Graf č. 29 a 30: Průběh hodnot srážek a průtoku při vybraných povodních (vlastní zpracování)

Letní povodeň (graf č. 29 zleva) z první půlky července roku 1997 disponuje nejvyšším naměřeným průměrným denním průtokem 57 m^3/s (7.7. 1997) ve zkoumaném časovém období, nicméně denní úhrn srážek nedosahuje svého maxima. Nástup povodňové vlny je ostrý, během dvou dnů průtok pohybující se okolo dlouhodobého průměr (1,46 m^3/s) vystoupá ke zmíněnému vrcholu. Menší vrchol celé povodňové vlny se vyskytuje dva dny po úplném maximu s hodnotou 57 m^3/s (9.7. 1997), obě maxima se vyskytují den po vysokých srážkových úhrnech. Pro tuto epizodu byla vypočtena hodnota R-B indexu 0,56.

Oproti tomu jarní povodeň z první půlky března roku 1981 (graf č. 30 zprava) je především dotovaná odtávající sněhovou pokrývkou, v důsledku denní srážkový úhrn nemusí dosahovat tak vysokých hodnot jako v předchozím případě pro vytvoření vysokých průtokových hodnot. Vrchol povodňové vlny vykazuje hodnotu průtoku 35,5 m^3/s (12.3. 1981) den po maximálním úhrnu srážek 23.5 mm. Ke konci povodňové epizody je nadále vidět náznak pokračující rozkolísanost toku vlivem tání sněhu. Pro tuto povodeň vychází hodnota R-B indexu menší než v předchozí situaci, a to 0,48.

5. Diskuze

Z hodnocení vodnosti v ročním kroku, je zřejmé, že vodné roky kopírují výskyt vysokých srážkových úhrnů. Odtok z povodí je tedy značně závislý na velikosti úhrnů srážek. Nicméně detekovaný klesající trend průměrného ročního průtoku Qr vůči stoupajícímu trendu celkových ročních srážkových úhrnů může poukazovat na opak. Ovšem je třeba vzít v úvahu, že lineární trend mohou silně ovlivňovat roky s velice vysokými ročními úhrny srážek v druhé půlce sledovaného období (1997, 2010, 2020) navzdory přítomnosti skupiny za sebou jdoucích let (například mezi roky 2010 a 2020) s nižšími úhrny než v letech v první půlce sledovaného časového období. To je první možný faktor způsobující stoupající lineární trend srážek. Kombinaci klesajícího trendu Qr a stoupajícího trendu Sr můžou vysvětlit roční hodnoty odtokového součinitele, jejichž trend je klesající neboli ze spadlých srážek se na odtoku podílí stále menší část.

Uvedené změny mohou být ovlivněny rostoucí průměrnou teplotou vzduchu – období rozlišená bodem změny se liší průměrnou hodnotou teploty o 1,2 °C. Vyšší teplota následně navyšuje efektivitu procesu evapotranspirace způsobující ztráty vody výparem z povrchů a využíváním vody vegetací. Dále vyšší teplota může také přispívat k přeměně sněhových srážek na dešťové, a v důsledku srážkově bohatší roky jsou tímto ještě umocněny. Posledním faktorem může být změna distribuce srážek během roku a na to v reakci je transformován sezónní chod hodnot průtoku.

Průměrné hodnoty měsíčních úhrnů srážek jsou v pozdějším období celkově vyšší kromě prosince a srpna, velký rozdíl je především v měsících květen, červenec, únor a březen. Protože jarní hodnoty srážek se markantně zvýšily a v měsíci listopad a leden také, ačkoliv mírně, tak to může vypovídat o sníženém množství sněhových srážek a jejich přeměnu ve srážky dešťové. Snížená mocnost sněhové pokrývky následně urychluje tání, což ilustruje posun jarního maxima průtoku z dubna do březnového měsíce, stejně jako tomu je ve studii od Jeníčka a Ledvinky (2020). Kdysi pozdější dubnová maxima průtoku jsou ovlivněna vyšší nadmořskou výškou povodí a jeho i dodnes hustému souvislému zalesnění – sněhová pokrývka nacházející se v zastíněném prostředí lesa je zachována po delší dobu. Nicméně při snížení její mocnosti vlivem zvýšené teploty vzduchu samotný stín lesa již nemá takový efekt. Naopak změna sezonality minimálních měsíčních průtoků se přesunul z podzimního období do zimního. Stejné posuny v sezónním chodu odtoku také zaznamenali

Langhammer a Bernsteinová (2015) ve studii zkoumající vliv hydroklimatických změn na odtok v horských povodích střední Evropy.

Výsledky analýzy indexu základního odtoku (BFI) ukazují, že základní odtok se nejvíce podílí na celkovém odtoku v období nižších průtoků, respektive nejvyšší hodnoty se vyskytují v letním období, kdy přívalové nebo frontální srážky nevyváží předchozí dny s vysokými teplotami a nižšími srážkovými úhrny, a odtok je tvořený převážně podzemní vodou. Druhé maximum nastává v měsíci lednu, kdy hodnoty průtoku jsou též nízké z důvodu sezónní nízké teploty přinášející srážky v pevném skupenství, které se neúčastní odtoku až do doby tání. Základní odtok se nejméně podílí v době, kdy je celkový odtok tvořen převážně přímým odtokem vlivem odtávání sněhové pokrývky v jarním období. V reakci na klesající trend průměrného ročního průtoku a odtokového součinitele vykazují roční průměrné hodnoty BFI rostoucí trend, který detekoval také Langhammer a Bernsteinová (2015). V rámci sezónního chodu hodnoty v pozdějším období vykazují zvýšení, a to převážně v období maxim o 6-7 %, jinak v sezónním chodu nebyly zaznamenány výrazné změny, kromě vyšší rozkolísanosti. To se děje pravděpodobně v reakci na dřívější březnové tání a nižší množství sněhových zásob, které by v první půlce roku podporovaly odtok formou přímého odtoku. Zmíněné trendy srážko-odtokového režimu zároveň nastavují podmínky pro vznik extrémních hydrologických jevů neboli povodní a sucha.

V rámci hodnocení suchých období byla zvolena obecně používaná hodnota $Q_{355,}$ která umožnila vyfiltrovat dostatečný počet dní pro jejich analýzu. Kritérium pro dobu trvání epizody 3 dny také nebylo problémem pro jednotlivé epizody naplnit, protože se dny s nízkým průtokem vyskytovaly většinou společně, až na malé výjimky. Frekvence výskytu suchých období v druhé polovině sledovaného období značně narůstá, v první polovině období se vyskytlo 112 epizod sucha a druhé polovině trojnásobně více – 331 epizod. Stejně tak se navýšil počet epizod s delším trváním, nicméně když se vypočte průměr trvání za jednotlivé poloviny celého období, vyjde stejný počet dní, a to 8. To je z důvodu vyššího počtu epizod v druhé polovině období s kratším trváním, které celkový průměr doby trvání snižují. S navyšující se dobou trvání klesá i intenzita epizod sucha, nicméně klesá také chybějící objem. V dřívějším období byl tedy výskyt období sucha více ojedinělý a samostatný, v pozdější době vzhledem k 3krát vyšší frekvenci výskytu jsou epizody více provázané. Nejdelší doba trvání období sucha je 18 dní, která se dvakrát vyskytuje v podzimním období v roce 2018 a jednou v podzimním období roku 2005. Během roku se

období sucha vyskytují nejčastěji v měsíci srpen a září, kdy předcházející teplé měsíce snížily vodní zásoby v povodí. Změna sezonality spočívá v přesunu vrcholu nejvyššího počtu epizod ze září do srpna, a ve výrazném navýšení výskytu epizod sucha v podzimních měsících.

Naopak kritérium doby trvání v případě epizod povodní bylo sníženo na 2 dny, protože v tomto ohledu je odtok více proměnlivý. Navzdory zpřísnění prahové hodnoty jakožto kritéria pro definování epizod povodňového charakteru nebyla buď zdaleka přísná tak jako u prahové hodnoty Q_{355} pro výběr sucha, nebo se nízké průtoky s porovnáním se zvýšenými vyskytují méně. To se ovšem může v budoucnosti změnit vzhledem ke nárůstu frekvence výskytu období sucha společně s počtem suchých dnů a ke klesajícímu trendu počtu dní s vysokým průtokem.

Sezónní výskyt povodní během roku je nejvyšší v jarním období s v důsledku odtávání zimní sněhové pokrývky vlivem vyšší teploty a dešťových srážek. Druhý nejčastější sezónní výskyt povodní vykazují letní měsíce červenec a srpen vlivem letních přívalových nebo dlouhotrvajících frontálních srážkách. Vcelku vysoký výskyt povodní v zimních měsících je zapříčiněn přechodným abnormálním zvýšením teploty vzduchu způsobující krátkodobou oblevu, nebo také ledové zátarasy snižující průtočnost koryta. Naopak sezónní výskyt období sucha je koncentrován zejména do měsíců srpen a září, kdy již vysoké teploty z předchozích měsíců snížily zásoby dostupné vody pro odtok ze zimní sezóny a dešťové epizody nedorovnávají ztrátu vody prostřednictvím evapotranspirace, která je s vyšší teplotou efektivnější. Změny sezónního výskytu povodní jsou ekvivalentní ke změnám výskytu sezónních maxim průtoku neboli v druhé půlce sledovaného období se nejvyšší četnost povodní přesouvá z dubna do března v důsledku dřívějšího jarního tání.

Z pozorovaného vztahu mezi výskytem nízkých průtoků a zároveň vysokými hodnotami indexu základního odtoku BFI byla testovaná prahová hranice 99-100 %. Počet dní s touto hodnotou vykazuje také narůstající trend jako tomu je u období sucha, nicméně tato prahová hodnota se ukázala být jako mnohem citlivější, a tedy i spíše nepoužitelná v případě horského povodí s rychlejší zpětnou vazbou na meteorologické podmínky, protože bylo touto hranicí odfiltrováno mnohem méně hodnot. Po bližším zkoumání průběhu srážek a takto vysokých hodnot BFI bylo zjištěno, že stačí několik bezsrážkových dní, aby hodnoty BFI vystoupaly takto vysoko. BFI indikátor je tedy velmi citlivý i na malý pokles průtoku. Průměr hodnot průtoku *Qd* s BFI 99-100 % je 0,29 m^3/s neboli o 17 desetin vyšší než

hodnota $Q_{355.}$ Tento indikátor tedy není vhodný pro určování hydrologického sucha jako takového, jako spíš pro detekci snížených průtoků. Je možné, že v případě povodí vyskytující se v nižších nadmořských výškách a méně citlivější na srážkové epizody by tato prahová hranice mohla fungovat lépe

6. Závěr

Cílem této práce bylo zhodnocení srážko-odtokových poměrů v horním povodí řeky Ostravice se speciálním zaměřením na extrémní hydrologické jevy a jejich charakteristiky zahrnující frekvenci výskytu, dobu trvání, intenzitu a změnu sezónního výskytu. Horní povodí řeky Ostravice bylo vybrané pro jeho přírodní antropogenně neovlivněný charakter s bohatým neporušeným zalesněním. Jako vstupní data pro zmíněné analýzy byly použity časové řady průměrných denních průtoků a denních úhrnů srážek v období 1970-2020 z vodoměrné a srážkoměrné stanice Staré Hamry provozované Českým hydrometeorologickým ústavem.

První část této práce byla zaměřená na seznámení a podrobnější popis problematiky týkající se hydrologických extrémů neboli povodní a hydrologického sucha. Popsaná teorie byla doplněná rešerší studií nejprve vypovídajících o aktuálních poznatcích v rámci hodnocení srážko-odtokových poměrů a jejich změn, následně byly popsány metody používané pro hodnocení hydrologických extrémů ilustrované rešerší studií, ve kterých byly aplikované. Zájmové území bylo popsáno a vlastními mapovými výstupy ilustrováno také z hlediska fyzickogeografických poměrů a jeho změn společně s jejich možným vlivem na odtok.

Druhá část práce byla věnovaná popisu a interpretaci výsledků z praktické části této práce zahrnující v prvé řadě vyhodnocení srážko-odtokového režimu a jeho změny v sezónním chodu a poměru podílejících se složkách na celkovém odtoku použitím hodnot odtokového součinitele a indexu základního odtoku.

Na základě Pettittova testu homogenity byl identifikován bod zlomu v časové řadě 1961-2020 průměrných denních teplot vzduchu na rok 1996, po kterém se projevuje výrazný nárůst teploty vzduchu. Rok 1996 byl proto následně použit pro analýzu změn srážkoodtokových charakteristik a extrémních průtoků v období před a po tomto zlomovém bodu.

Společně s vyšší rozkolísaností odtoku mezi obdobími před a po bodu zlomu byly detekované posuny maximálních a minimálních sezónních průtoků, respektive jarní vrcholící průtok se přesunul z dubna do března, a nejnižší průtoky se přesunuly z podzimního období do zimního. Co se týče složek odtoku, tak na základě výsledného stoupajícího trendu hodnot indexu základního odtoku a klesajícího trendu hodnot odtokového součinitele se na odtoku stále víc podílí základní odtok.

Pomocí prahové metody byly určeny povodňové epizody a období sucha, hydrologické sucho bylo pro bližší charakteristiku doplněno o metodu nedostatkových objemů. Následně byly definované epizody obou extrémů hodnoceny v rámci frekvence, doby trvání, intenzity a změny sezonality. Dny s vysokým průtokem nad zvolenou prahovou hranicí vykazovaly klesající trend výskytu, nicméně v ohledu době trvání nebo velikosti povodně nebyly zjištěny klesající ani stoupající trendy. Sezónní chod epizod se celý posunul o jeden měsíc dřív a zmizel výskyt zimních povodní. Naopak v případě období sucha se frekvence v druhé polovině sledovaného období třikrát zvýšila, intenzita jednotlivých období se snížila vlivem jejich delšího trvání. Sezónní chod byl také posunut do dřívějšího měsíce srpen z měsíce září a markantně narostl výskyt v podzimní části roku.

Závěrem, v důsledku navýšení průměrné teploty vzduchu o 1,17 °C se jarní maxima průtoku vyskytují o měsíc dříve, a období sucha se po bodu zlomu vyskytují 3krát častěji. Ačkoliv vlivem zvýšené teploty je více srážek v důsledku přeměny sněhových srážek na dešťové, tak průměrně roční průtoky nadále klesají, a následně průměrná hodnota průtoku v období 1996-2020 je o 0,062 m^3/s = 62 l/s nižší než v období před bodem zlomu. Podíl základního odtoku je v období po bodu zlomu rostoucí, výskyt dní s podílem základního odtoku z 99-100 % je skoro 2krát vyšší než v první půlce sledovaného období. Oproti tomu hodnoty odtokového součinitele jsou v období po bodu zlomu v průměru o 8 % nižší.

Vzhledem k nezjištěné změně ve využití území zájmového povodí jsou hlavním faktorem změn odtokových poměrů a výskytu extrémních hydrologických jevů hlavně klimatické činitele, konkrétně nárůst teploty vzduchu v období po roce 1996. Pomocí nástrojů poskytujících predikci změn chování těchto meteorologických veličin lze také předvídat změny v odtokových poměrech v budoucnosti, a následně navrhovat příslušná opatření, která by předešla aspoň zčásti predikovaným následkům.

7. Literatura

§ 64 odst. 1 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) - znění od 1. 2. 2022. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 30. 3. 2022]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254#p64-1

BAČOVÁ-MITKOVÁ V., ONDERKA M. (2010): *Analysis of extreme hydrological Events on the danube using the Peak Over Threshold method.* Vodohospodársky časopis Vol. 58 (2), s.88-101. Dostupné z: doi:10.2478/v10098-010-0009-x

BAKER, D., RICHARDS, R., LOFTUS, T., KRAMER, J. (2004): *A New Flashiness Index: Characteristics and Applications to Midwestern Rivers and Streams.* JAWRA Journal of the American Water Resources Association, Vol. 40, s. 503–522. Dostupné z: doi: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.

BALATKA, B., KALVODA J. (2006): *Geomorfologické členění reliéfu Čech*. Praha: Kartografie Praha, 79 s., ISBN 80-7011-913-6.

BÍBA, M., OCEÁNSKÁ, Z., VÍCHA, Z., JAŘABÁČ, M. (2006): Lesnicko-hydrologický výzkum v beskydských experimentálních povodích. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 54, 2, 113–122.

BÍBA M., VÍCHA Z., JANOVÁ K., JAŘABÁČ M. (2010): *Obnova lesa v experimentálním povodí Červík a její vliv na odtokový proces.* Zprávy lesnického výzkumu, svazek 55., č. 2, s. 126–132, dostupné online: https://www.vulhm.cz/zlv_online_detail/obnova-lesa-v-experimentalnim-povodi-cervik-a-jeji-vliv-na-odtokovy-proces/

BLAHUŠIAKOVÁ, A., MATOUŠKOVÁ, M. (2015): *Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia).* Journal of Hydrology and Hydromechanics [online]. B.m.: Journal of Hydrology and Hydromechanics, roč. 63, č. 3, s. 183–192. ISSN 0042-790X. Dostupné z: doi:10.1515/johh-2015-0030

BLAHUŠIAKOVÁ, A., MATOUŠKOVÁ, M., JENÍČEK, M., LEDVINKA, O., KLIMENT, Z., PODOLINSKÁ, J., SNOPKOVÁ, Z. (2020): *Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe.* Hydrological Sciences Journal [online]. B.m.: Hydrological Sciences Journal, roč. 65, č. 12, s. 2083–2096. ISSN 0262-6667. Dostupné z: doi:10.1080/02626667.2020.1784900

BOLT, B., A. (1975): *Geological hazards: Earthquakes, Tsunamis, Volca-noes, Avalanches, Landslides, Floods*. Springer, Berlin, 8, 328 s. In: LANGHAMMER, J. (2007): *Hydrologické extrémy*. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha. [online]. [cit. 15. 4. 2022]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_2_Langhammer_extremy_hydrografie.pdf

BRÁZDIL, R., TRNKA M., DOBROVOLNÝ P., CHROMÁ K., HLAVINKA P., ŽALUD Z. (2009): *Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006.* Theoretical and Applied Climatology, roč. 97, č. 3-4, s. 297–315. Dostupné z: doi:10.1007/s00704-008-0065-x

BRÁZDIL, R., TRNKA, M. (2015): *Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost.* Brno: Centrum výzkumu globální změny, Akademie věd České republiky, 400 stran, ISBN 978-80-87902-11-0.

BUZEK, L. (1981): *Eroze proudící vodou v centrální části Moravskoslezských Beskyd.* Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1981, 109 s.

CAMMALLERI, C., VOGT J., SALAMON P. (2016): *Development of an operational low-flow index for hydrological drought monitoring over Europe*. Hydrological Sciences Journal, s. 1–13. ISSN 0262-6667. Dostupné z: doi:10.1080/02626667.2016.1240869

CENIA – ČESKÁ INFORMAČNÍ AGENTURA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ (2002): Prohlížecí služba WMS – *Geomorfologické členění ČR.* [online]. [cit. 24. 4. 2022]. Dostupné z: http://ns.cenia.cz/arcgis/rest/services/CENIA/cenia_geomorfologie/MapServer?f=jsapi

CÍLEK, V., JUST T., SŮVOVÁ Z. et al. (2017): *Voda a krajina: kniha o životě s vodou a návratu k přirozené krajině*. Praha, 198 s., ISBN 978-80-7363-837-5.

CÍLEK, V. (2020): *Jak přejít řeku: o životě v antropocénu, cestě indiánského šamana do Detroitu, kamenech Dunaje a taky o přílivech a odlivech civilizací, vděčnosti a naději.* Praha: Dokořán, 2020, 342 stran, ISBN 978-80-7363-996-9.

CZUDEK T. (2005): *Vývoj reliéfu krajiny České republiky v kvartéru.* Brno: Moravské zemské muzeum, 238 s., ISBN 80-7028-270-3.

Čl. 1 bod 49. zákona č. 20/2004 Sb. zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., *o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)*, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů - znění od 28.05.2008

ČURDA J., JANSKÝ B., KOCUM J. (2011): *Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí Vydry.* Geografie, roč. 116, č. 3, s. 335-353. Dostupné z: https://geografie.cz/media/pdf/geo_2011116030335.pdf

ČEKAL, R., HLADNÝ J. (2008): *Analysis of flood occurrence seasonality on the Czech Republic territory with directional characteristics method*. Acta Universitatis Carolinae. Geographica Roč.43 (1), s. 3-14.

ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA (2022): WMS Geologická mapa GeoČR50. [online].[cit. 28.4. 2022]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/arcgis/services/Geologie/geocr50/MapServer/WmsServer

ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA (2022): WMS Půdní mapa. [online].[cit. 28.4. 2022]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Pudy/pudni_typy_1mil/MapServer/WmsServer

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2022a): *Datová řada denních průtoků profilu 275300* – Ostravice, Staré Hamry.

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2022b): *Datová řada denních úhrnů srážek stanice O1HAMR01* – Ostravice, Staré Hamry, Samčanka.

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2022c): *Datová řada průměrných denních teplot vzduchu O1FREN01* – Frenštát pod Radhoštěm.

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2022d): *Datová řada průměrných denních teplot vzduchu O1LYSA01* – Lysá hora.

ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘIČSKÝ A KATASTRÁLNÍ: *Základní báze geografických dat ZABAGED.* [online]. [cit. 28.4. 2022]. Dostupné z: http://www.cuzk.cz

ČSN 736530. Vodní hospodářství. Názvosloví hydrologie. 1983.

DEMEK, J. (1987): *Obecná geomorfologie.* Praha: Academia, 476 s.

VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA (2022): *Digitální báze vodohospodářských dat DIBAVOD.* [online]. [cit. 10.4. 2022] Dostupné z: http://www.dibavod.cz

ECKHARDT, K. (2005): *How to construct recursive digital filters for baseflow separation.* Hydrol. Process., 19: 507-515. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/hyp.5675

ELLEDER, L. (2003): *Hodnocení hydrologického sucha.* In: Workshop 2003 – Extrémní hydrologické jevy v povodích. ČVUT a ČVTVHS, Praha, s. 287-289, ISBN 80-01-02872-0

FIALA, T. (2011): *Vývoj nedostatkových objemů a průměrných a malých průtoků v České republice.* Disertační práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 126 s.

HISDAL, H., TALLAKSEN, L. (2000): *Drought event definition.* Technical report no.6, ARIDE project. Oslo, Departement of Geophysics, University of Oslo, 41 s.

HLADNÝ, J. (2009): *Druhy sucha.*In: NĚMEC, J., KOPP J. (eds.): Vodstvo a podnebí v České republice. MZV ČR, Consult Praha, s. 66.

HOLKO, L., PARAJKA J., KOSTKA Z., ŠKODA P., BLÖSCHL G. (2011): *Flashiness of mountain streams in Slovakia and Austria.* Journal of Hydrology, roč. 405, č. 3-4, s. 392–401. ISSN 0022-1694. Dostupné z: https://doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.038

JENÍČEK, M., LEDVINKA, O. (2020): *Importance of snowmelt contribution to seasonal runoff and summer low flows in Czechia.* Hydrology and Earth System Sciences [online]. 2020, Ilustrace [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: doi:10.5194/hess-24-3475-2020

KAŇOK, J. (1997): *Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodí Odry po profil Koźle.* Ostravská univerzita, Ostrava, 185 s. cit. In: VOLKOVÁ, A. (2010): *Změny ve srážko-odtokovém režimu v povodí Stropnice.* Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/30089

KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ O. (2000): *Analýza hydrologického sucha v povodí horní Metuje a Orlice.* In: Workshop 2000 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, ČVUT a ČVTVHS, Praha, 294 s., ISBN 8001023184

KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ O. (2011): *Options for drought analysis.* In: Blažková, Š., D. et al. (2011) Floods, droughts and prediction uncertainties. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 124 s., ISBN 8087402138

KEMEL, M., KOLÁŘ V. (1980): *Hydrologie*. Praha: ČVUT, 1980, 292 s.

KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2004): *Analýza změn srážko-odtokových poměrů v povodí Otavy*. In: Langhammer, J. (ed.): Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní – Sborník příspěvků závěrečného semináře grantu *GAČR 205/03/Z046*. KFGG PřF UK, Praha, str. 71-85.

KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M., KRÁLOVEC, V., LEDVINKA, O. (2008): *Změny odtokového režimu v pramenných oblastech vodních toků*. In: LANGHAMMER, J. (2008): *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2008, 276 s. ISBN 978-80-86561-59-2.

KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2009): *Změny srážko-odtokových poměrů v pramenných oblastech v kontextu vlivu člověka a vývoje klimatu.* Přednáška Povodně v krajině ZS 2009/2010, PřF UK, Praha. [online]. [cit. 21.7. 2022]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/floods/prezentace/kliment_matouskova_zmeny_s_o_pomeru.pdf

KŘÍŽEK, M., UXA, T., MIDA P. (2016): *Praktikum morfometrických analýz reliéfu.* Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 178 stran, ISBN 978-80-246-3244-5.

KUTÍLEK, M. (1978): *Vodohospodářská pedologie.,* 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 296 s.

LANGHAMMER, J. (2009): *Vliv úprav toků a údolní nivy na průběh a následky povodní.* Přednáška Povodně v krajině ZS 2009/2010, PřF UK, Praha. [online]. [cit. 19. 7. 2022]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/floods/prezentace/langhammer_2_vliv_uprav_toku_na_povodne.pdf

LANGHAMMER, J., SU, Y., BERNSTEINOVÁ, J. (2015): *Runoff response to climate warming and forest disturbance in a mid-mountain basin*. Water [online]. BASEL: Mdpi, 2015, 7(7), 3320-3342 [cit. 2022-07-12]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w7073320

LANGHAMMER, J., BERNSTEINOVÁ J. (2020): *Which aspects of hydrological regime in mid-latitude montane basins are affected by climate change?* Water (Basel) [online]. BASEL: Mdpi, 2020, 12(8), 2279 [cit. 2022-07-12]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w12082279

NALBANTIS, I., TSAKIRIS G. (2009): *Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resources Management.* Water Resources Management, roč. 23, č. 5, s. 881–897. ISSN 0920-4741. Dostupné z: doi:10.1007/s11269-008-9305-1

NASSIF, S. H., WILSON, E. M., (1975): *The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration.* Hydrological Sciences Bulletin, roč. 20, č. 4, s. 539–553. ISSN 0303-6936. Dostupné z: doi:10.1080/02626667509491586

NETOPIL, R., (1981): *Fyzická geografie, [Díl] 1: Hydrologie-Limnologie-Oceánografie.* Univerzita J.E. Purkyně v Brně. Praha, 258 s. Dostupné také z: https://ndk.cz/uuid/uuid:60174100-32cd-11e6-a7c6-005056827e52

NETOPIL, R., PROŠEK, P., BRÁZDIL, R., DEMEK, J. (1984): *Fyzická geografie. 1.* Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 272 s.

NĚMEC, J., HLADNÝ J. (2006): *Voda v České republice.* Praha: Consult, 2006, 253 s., ISBN 80-903482-1-1.

NĚMEC, J., KOPP, J., BARTOŠ, M. (2009): *Vodstvo a podnebí v České republice v souvislosti se změnou klimatu.* Praha: Pro Ministerstvo zemědělství ČR vydal Consult, 255 s., ISBN: 978-80-903482-7-1.

OLDEN, J. D., POFF N. L. (2003): *Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes*. River Research and Applications, roč. 19, č. 2, s. 101–121. ISSN 1535-1459. Dostupné z: doi:10.1002/rra.700

PATERA, A. (2001): *Rozvoj výzkumného řešení problematiky extrémních hydrologických jevů.* In: Workshop 2001 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, ČVUT A ČVTVHS, Praha, s. 17-24, ISBN: 8001024458

PETROW T., MERZ B. (2009): *Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002*, Journal of Hydrology Vol. 371, s.129-141, ISSN 0022-1694, Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.024.

POVODÍ ODRY, s. p. (2016): *Atlas toku: Ostravice.* [online]. Dostupné z: https://www.pod.cz/atlas_toku/ostravice.html

PROŠEK, P., BRÁZDIL, R., DEMEK, J., NETOPIL, R. (1984): *Fyzická geografie. 1.* Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 272 s.

REJŠEK, K., VÁCHA R. (2018): *Nauka o půdě.* Olomouc: Agriprint, 527 s., ISBN: 978-80-87091-82-1.

ŘIČICOVÁ, P., DAŇHELKA, J., NÁVOJOVÁ, H., KOURKOVÁ, H. (2003): *Sucho v českých povodích v roce 2003 a v minulých desetiletích.* In: Workshop 2003 – Extrémní hydrologické jevy v povodích. ČVUT a ČVTVHS, Praha, s. 103-112, ISBN: 8001028720

SCHWARZOVÁ, M. (2021): *Srážko-odtokové poměry v povodí s mozaikou orné půdy a lesních, lučních i zastavěných ploch*. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. České Budějovice. Dostupné z: https://theses.cz/id/npa3kv/

STÁTNÍKOVÁ, P. (2012): *Povodně a záplavy.* Vyd. 1., Praha a Litomyšl: Paseka, 189 s., ISBN: 8074321827

STRNAD, F., MORAVEC V., HANEL M., VIZINA A., BERAN A., MELIŠOVÁ E., KOŽÍN R., (2017): *Regionalizace nedostatkových objemů v České republice.* Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, roč. 59, č. 6, s. 12. ISSN 0322-8916. Dostupné z: doi:10.46555/vtei.2017.05.002

TALLAKSEN, L. M., MADSEN H., CLAUSEN B. (1997). *On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume*. Hydrological Sciences Journal, roč. 42, č. 1, s. 15–33. ISSN 0262-6667. Dostupné z: doi:10.1080/02626669709492003

TOLASZ, R., MÍKOVÁ T., VALERIÁNOVÁ A., VOŽENÍLEK V. (2007): *Atlas podnebí Česka 1961-2000.* Praha: Český hydrometeorologický ústav, 255 s., ISBN 978-80-86690-26-1.

TREML, P. (2012): *Největší hydrologická sucha 20. století.* In: Seminář Adolfa Patery 2012 – Extrémní hydrologické jevy v povodích. ČVUT a ČVTVHS, Praha, 250-257. Dostupné z: http://www.sucho.eu/pdf/Treml_2012.pdf

VERSTRAETEN, G., POESEN, J., DEMARÉE, G., AND SALLES, C. (2006): *Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates*, J. Geophys. Res., 111, D22109, doi:10.1029/2006JD007169.

VLČEK, L., KOCUM, J., JANSKÝ, B., ŠEFRNA, L., KUČEROVÁ, A. (2012): *Retenční potenciál a hydrologická bilance horského vřesoviště: případová studie Rokytecké slatě, povodí horní Otavy, jz. Česko.* Geografie. Sborník České geografické společnosti [online]. 2012 [cit. 2022-07-14].

VLČEK, L., ŠÍPEK, V., KOFROŇOVÁ, J., KOCUM, J., DOLEŽAL, T., JANSKÝ, B. (2021): *Runoff formation in a catchment with Peat bog and Podzol hillslopes.* Journal of hydrology (Amsterdam) [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2021, 593, 125633 [cit. 2022-07-14]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125633

WANG, H.J., CHEN, Y.N., DENG H.J., PAN, Y. (2015): *Detecting changes in extreme streamflow in the Tarim River*, Northwest China, Quaternary International Vol. 380–381, s.149-158, ISSN 1040-6182. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.048.

YEVJEVICH, V. (1967): *An objective approach to definition and investigations of continental hydrologic droughts.* Hydrology papers no.23, Colorado State University, Fort Collins, 19 s., doi: 10.1016/0022-1694(69)90110-3

WILHITE, D.A., GLANTZ, M.H., (1985): *Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions.* Water International 10, s. 111–120. doi:10.1080/02508068508686328

WILKS, D. S. (2011): *Statistical methods in the atmospheric sciences.* Third edition. Amsterdam: Elsevier, 676 s., ISBN: 978-0-12-385022-5

7.1 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

Obrázek. č. 1: Obecná mapa lokalizace

Obrázek č. 2: Geologické poměry povodí horního toku Ostravice

Obrázek č. 3: Schéma Odtokového procesu dle ČSN 73 6511

Obrázek č. 4: Půdní poměry povodí horního toku Ostravice

Obrázek č. 5: Sklonitost povodí horního toku Ostravice

Obrázek. **č. 6**: Využití území v roce 1990 podle CORINE land cover

Obrázek č. 7: Využití území v roce 2018 podle CORINE land cover

Tabulky

Tabulka č. 1: Hodnocení vodnosti

Tabulka č. 2: Hodnoty BFI_{max} pro metodu rekurzivní digitální filtrace

Tabulka č. 3: Hodnoty n-letých průtoků

Tabulka. č. 4: Podíl rozložení kategorií CORINE land cover v r.1990 a 2018

Tabulka č. 5: Statistické údaje ze datového souboru denních srážkových úhrnů

Tabulka č. 6: Statistické údaje ze datového souboru průměrných denních průtoků

Tabulka č. 7: Průměrné teploty období před a po bodu zlomu

Tabulka č. 8: Hodnoty m-denních průtoků v období 1970-2020

Tabulka č. 9: M-denní průtoky období 1970-1995 a 1996-2020

Tabulka č. 10: Systém hodnocení vodnosti jednotlivých let

Grafy

Graf č. 1: Klimagram – roční chod srážek a teploty pro období 1970-2020

Graf č. 2: Průměrné denních teploty a průměrné teploty jednotlivých období

Graf č. 3: Čára překročení průměrných denních průtoků v období 1970-2020

Graf č. 4: Vodnost jednotlivých let a průměrných ročních průtoků

Graf č. 5: Roční suma srážek [mm] a výsledek poměru Q_r a Q_a

Graf č. 6: Sezonalita průtoku Q_m a S_m v období 1970-2020

Graf č. 7: Procentuální podíl Q_m v ročních obdobích

Graf č. 8: Změna sezonality Q_m a S_m

Graf č. 9: Roční suma srážek a roční průměr indexu základního odtok

Graf č. 10: Sezonalita indexu základního odtoku v období 1970-2020

Graf č. 11: Změna sezonality indexu základního odtoku

Graf č. 12: Roční odtokový součinitel C [%]

Graf č. 13: Jednoduché součtové čáry Q_d a S_d pro období 1970-2020

Graf č. 14: Podvojná součtová čára Q_r a S_r pro období 1970-2020

Graf č. 15: Četnosti suchých dní a epizod sucha v jednotlivých letech

Graf č. 16: Doba trvání epizod hydrologického sucha

Graf č. 17: Doba trvání epizod sucha v jednotlivých měsících

Graf č. 18 a 19: Průběh Q_d a S_d během vybraných epizod sucha

Graf č. 20: Počet dní s BFI 99-100 % v jednotlivých letech

Graf č. 21: Celková velikosti nedostatkového objemu epizody sucha a její intenzity

Graf č. 22: Počet suchých dní v jednotlivých měsících v období 1970-2020

Graf č. 23: Změna sezonality výskytu období sucha

Graf č. 24: Výskyt hodnot průtoku $\geq 6{,}2$ m^3/s

Graf č. 25: Počet dní s průtokem $\geq 6{,}2$ m^3/s v jednotlivých letech

Graf č. 26: Jednotlivé epizody povodní v čase a jejich doba trvání

Graf č. 27: Sezónní výskyt epizod vysokých průtoků

Graf č. 28: Změna sezonality vysokých průtoků

Graf č. 29 a 30: Průběh hodnot srážek a průtoku při vybraných povodních