

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv hydrologického sucha na současný stav vybraných vodních toků v povodí Vltavy

Autor práce: Bc. Kristýna Čmelíková

Vedoucí práce: Ing. Martin Heřmanovský, Ph. D.

Zadání diplomové práce:

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kristýna Čmelíková

Krajinné inženýrství
Regionální environmentální správa

Název práce

Vliv hydrologického sucha na současný stav vybraných vodních toků v povodí Vltavy

Název anglicky

Impact of hydrological drought on the current state of selected watercourses in the Vltava river basin

Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je celkové vyhodnocení hydrologického a meteorologického sucha v povodí Vltavy na vybraných vodních tocích pomocí zvolených indexů sucha.

Metodika

- 1) Rešerše literatury zaměřená na hydrologické extrémy, zejména na sucha.
- 2) Popis zájmového území.
- 3) Vyhodnocení hydrometeorologických časových řad pomocí vybraných indexů sucha.
- 4) Diskuze prezentovaných výsledků.

Doporučený rozsah práce

50 až 80 stran

Klíčová slova

vodní tok, povodí, sucho, Vltava, indexy sucha

Doporučené zdroje informací

- AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, KOMISE PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ. *Povodně a sucho : krajina jako základ řešení: sborník příspěvků ze seminářů Komise pro životní prostředí Akademie věd ČR konaných ve dnech 8. října 2013 a 5. června 2014*. Praha: Botanický ústav Akademie věd České republiky, 2014. ISBN 978-80-86188-44-7.
- KREJČÍ, J. – ZEZULÁK, J. *Integrovaný model odtokového procesu v povodí jako podpora systému řízení vodního díla : principy řešení a případová studie homí Vltavy a VD Úpina*. Praha: ČZU, 2005. ISBN 80-213-1414-1.
- LEAL FILHO, W. *Climate change and the sustainable use of water resources*. Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-22265-8.
- Metodika návrhu a výstavby optimální varianty protipovodňových a protierozních opatření PPPO prozímění extrémních hydrologických jevů – povodní a sucha v krajině : stanovení infiltračních vlastností povrchových vrstev v lokalitě určené pro výstavbu protipovodňových a protierozních opatření : modelování povrchového odtoku z experimentálních ploch*. Praha: ČZU-FLE, 2006. ISBN 978-80-213-1600-3.
- TALLAKSEN, L. M. – LANEN, H. A. J. V. *Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 0-444-51688-3.
- V., – VLČEK. *Vodní toky a nádrže. Zeměpisný lexikon ČSR*. Praha: Praha, 1984.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2022

Prohlašuji,

že jsem diplomovou práci na téma „Vliv hydrologického sucha na současný stav vybraných vodních toků v povodí Vltavy“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 28.11.2021

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinovi Heřmanovskému Ph. D., za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, podnětů, doporučení, připomínek a zároveň za velkou trpělivost s obdivuhodnou ochotou při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku hydrologického sucha, které v posledních letech výrazně ovlivňuje vodnost vodních toků na území České republiky. Cílem práce je vyhodnocení meteorologického a hydrologického sucha v povodí vybraných vodních toků. Rešeršní část práce se zaměřuje na popis hydrologických extrémů – sucha a povodní a dále kvantifikace sucha pomocí různých indexů. Pro případovou studii bylo vybráno pět povodí významných přítoků Vltavy: Otava, Lužnice, Sázava, Malše a Stropnice. Pro každé z vybraných povodí byla sestavena kolekce vstupních dat v denním časovém kroku obsahující řady srážek, potenciální evapotranspirace a odtoku. Tyto řady byly následně agregovány do měsíčních a ročních hodnot. Na základě agregovaných měsíčních hodnot byly pro každé povodí vypočítány indexy sucha (SPI a SPEI). Výsledky ukazují, že dle klasifikace u indexu SPI, bylo suchem nejčastěji ohroženo povodí Lužnice (77 suchých měsíců a nejmenším srážkovým úhrnem mezi všemi povodími za analyzované období). Oproti tomu povodí Malše bylo, dle klasifikace SPI, nejméně zasaženo suchem (60 suchých měsíců s největším srážkovým úhrnem mezi všemi povodími za analyzované období). Nejčastěji ohroženo suchem, dle indexu SPEI, bylo povodí Sázavy a Otavy, kde bylo zaznamenáno 106 suchých měsíců. Dle indexu SPEI bylo povodí Lužnice a Stropnice nejméně ohroženo suchem (pouze 101 suchých měsíců, nejvíce epizod 347 měsíců bez výskytu sucha a slabého sucha). Rozdíly v získaných výsledcích souvisí pravděpodobně s tím, jaké vstupy tyto indexy využívají k identifikaci suchých period.

Klíčová slova: index sucha, povodí, povrchové vody

Abstract

The diploma thesis is focused on the issue of hydrological drought, which in recent years significantly affects the water content of watercourses in the Czech Republic. The aim of the thesis is to evaluate the meteorological and hydrological drought in catchment area of selected watercourses. The research part of the thesis focuses on the description of hydrological extremes - drought and floods and the quantification of drought using various indices. Five river basins of significant tributaries of the Vltava river were selected for the case study: Otava, Lužnice, Sázava, Malše and Stropnice. For each of the selected river basins, a collection of input data was compiled in a daily time step containing series of precipitation, potential evapotranspiration and runoff. These series were then aggregated into monthly and annual values. Based on aggregated monthly values, drought indices (SPI and SPEI) were calculated for each river basin. The results show that according to the classification for the SPI index, the Lužnice river basin was most often threatened by drought (77 dry months and the lowest precipitation between all river basins in the analyzed period). In contrast, the Malše river basin was, according to the SPI classification, the least affected by drought (60 dry months with the highest precipitation between all river basins in the analyzed period). According to the SPEI index, the Sázava and Otava river basins were most often at risk of drought, where 106 dry months were recorded. According to the SPEI index, the Lužnice and Stropnice river basins were least threatened by drought (only 101 dry months, most episodes 347 months without drought and weak drought). The differences in the results obtained are probably related to what inputs these indices use to identify dry periods.

Key words: drought index, catchment, surface water

1	ÚVOD	8
2	Cíle Práce	9
3	Hydrologické extrémny	10
3.1	Sucho a nedostatek vody	10
3.2	Příčiny sucha	10
3.3	Typy sucha	11
3.4	Indexy sucha.....	14
3.4.1	Palmerův index intenzity sucha (PDSI)	14
3.4.2	Odtokový index sucha (SDI).....	15
3.4.3	Standardizovaný srážkový index (SPI)	17
3.4.4	Standardizovaný index odtoku (SSI)	18
3.4.5	Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI).....	18
3.5	Koncepce na ochranu před následky sucha a nedostatku vody.....	20
3.6	Povodně.....	22
3.6.1	Preventivní a přípravné opatření proti povodním.....	23
4	Charakteristika studovaného území.....	27
4.1	Povodí Sázavy.....	28
4.2	Povodí Stropnice	28
4.3	Povodí Lužnice.....	29
4.4	Povodí Malše.....	29
4.5	Povodí Otavy.....	29
4.6	Půdní typy.....	31
4.7	Krajinný pokryv	33
5	Metodika.....	35
6	Výsledky práce.....	36
6.1	Vyhodnocení grafů průměrných ročních průtoků	39
6.2	Standardizovaný srážkový index sucha SPI na jednotlivých povodích	44
6.3	Standardizovaný srážkový evapotranspirační index SPEI na jednotlivých povodích	49
7	Diskuze	54
8	Závěr a přínos práce.....	58
9	Přehled literatury a použitých zdrojů	59
10	Seznam Obrázků.....	64
11	Přílohy.....	65

1 ÚVOD

Sucho se v posledních letech vyskytuje stále častěji, což však není dáno pouze nedostatkem srážek, ale také schopností krajiny zadržet vodu. Označení „sucho“ je výraz v obecném pojetí dosti neurčitý a v různých vědních i hospodářských oborech odlišně definovaný (Rožnovský, 2014).

Hydrologické sucho je složitým opakujícím se nebezpečím, které může vést k absenci vody v tocích nebo zásobnících (nádrže, jezera, podzemní voda a sněhová pokrývka), což má za následek negativní dopady na přírodní a socioekonomické systémy (Mishra a Singh, 2010; Van Loon, 2015).

V současné době se klimatická změna negativně projevuje v šíření sucha (Van Loon, 2015) a na některých povodích v ČR vysycháním toků. Téměř veškerá voda na území České republiky pochází z atmosférických srážek. Přes značné nejistoty spojené s modelováním klimatu můžeme v průběhu 21. století očekávat zintenzivnění výskytu extrémních jevů nepříznivých pro vodní režim krajiny a potřeby společnosti, zejména čtenější výskyt povodní, sucha a s ním spojeného nedostatku vody. (VODA-SUCHO, 2015).

Problematika sucha by se měla začít řešit na lokální a následně regionální úrovni, ovšem se zapracováním a využitím přístupů, které situaci vodních poměrů zlepší. Cestu představuje zvýšení biotické rozmanitosti, obnova mokřadů, ale též budování malých vodních ploch. Velmi důležitá jsou protierozní opatření, výsadba rozptýlené zeleně a ochrana přírodních stanovišť. Nezbytnou součástí úspěšného řešení musí být osvěta a edukační aktivity široké veřejnosti podporované všemi resorty, neboť dopady sucha se promítají do všech sektorů hospodářství. Z výše uvedených důvodů je věnována značná pozornost návrhům opatření vedoucích ke zmírnění těchto dopadů a k zajištění udržitelného využívání vodních zdrojů (VODA-SUCHO, 2015).

2 Cíle Práce

Cílem diplomové práce bylo posouzení vlivu hydrologického sucha a meteorologického sucha na povodí vybraných přítoků Vltavy. Analýza byla provedena na základě vyhodnocení hydrometeorologických dat pomocí vybraných indexů sucha. Dílčí cíle obsahovaly:

- provedení literární rešerše dané problematiky,
- výběr povodí a sestavení kolekce vstupních dat,
- výběr vhodných indexů sucha a jejich výpočet pro každé povodí,
- vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.

3 Hydrologické extrémy

Hydrologické extrémy lze rozdělit do dvou typů, a to na sucho s nedostatkem vody a povodně. Extrémní jevy nastupují v době deficitu srážek doprovázených vysokými teplotami nebo v době velké intenzity srážek (Langhammer, 2009).

3.1 Sucho a nedostatek vody

Sucho je celosvětový opakující se jev, který pramení z dlouhodobého deficitu srážek v daném regionu. Pro sucho je charakteristické, že se mezi odlišnými regiony může významně lišit (Van Loon, 2015). Dopady sucha jsou výsledkem vzájemné souhry přírodního jevu (méně srážek než se očekávalo) a poptávky lidí po dodávce vody. Lidská činnost tak může dopady sucha zhoršit (Wilhite, 2005). Deficit srážek často doprovázejí vysoké teploty, nízká relativní vlhkost vzduchu, málo oblačnosti a vyšší počet hodin slunečního svitu. Tyto skutečnosti způsobují vyšší evapotranspiraci, kdy se odpařuje voda z půdy a povrchu rostlin z daného území. (Allen et al., 1998; ČHMÚ, 2012; Restuccia ©2016).

Suchem mohou být ovlivněny všechny typy vod a tím i na vodu vázané organismy (zejména při úplné ztrátě povrchové vody z recipientu), případně některé terestrické druhy rostlin a živočichů, které jsou s vodou úzce spjaty, jak reprodukčně, tak i potravně (Edwards et al., 2012; Lake, 2013).

3.2 Příčiny sucha

Hlavní příčinou sucha je proměnlivost a oteplování klimatu s významným rostoucím výparem. (Žalud, 2020). Další příčinou sucha je vyčerpání úrovně půdní vlhkosti, při kterém pak následně dochází k omezení výparu z půdy. K suchu může dále docházet i v případě, že poptávka po vodě v důsledku lidské činnosti (průmysl, zemědělství) převyšuje její dostupné množství (Van Loon, 2015). Cirkulace vzduchu a povětrnostní podmínky jsou další příčinou sucha. Další příčinou sucha je přírodní fenomén El Niño, který je nevýznamnějším zdrojem meziroční proměnlivosti počasí a klimatu v různých částech světa. Klimatický jev El Niño se vyznačuje proměnlivými teplotami oceánské hladiny v Tichomoří. Jednou za 3 až 5 let k pobřeží v Peru proniká velmi

teplý mořský proud a ryby, kterých je zde spousta zmizí. Tuto situaci provází i nápadná změna počasí na pevnině, kdy silně prší a vyprahlá půda se zazelená (WMO ©2018).

3.3 Typy sucha

Sucho lze obecně rozdělit do čtyř kategorií (Wilhite, 2005):

- sucho meteorologické,
- sucho zemědělské,
- sucho hydrologické,
- sucho socioekonomické.

Meteorologické (klimatické) sucho je stav, kdy je záporná odchylka srážek od normálu během určitého časového období (Wilhite, 2005). V přírodních podmínkách ČR je prvotní příčinou všech typů sucha deficit atmosférických srážek. Na počátku je vždy sucho meteorologické a další typy pak mohou nastat s menším či větším zpožděním (viz obr. č. 1) (ČHMÚ ©2012).

Zemědělské (*půdní*) sucho lze obecně definovat jako nedostatek vody v kořenové vrstvě půdního profilu, který způsobuje poruchy ve vodním režimu zemědělských plodin i volně rostoucích rostlin. Nedostatek vody ve svrchních částech půdního horizontu je důsledkem předchozího nebo ještě nadále trvajících sucha klimatického (viz obr. č. 1) (ČHMÚ ©2012).

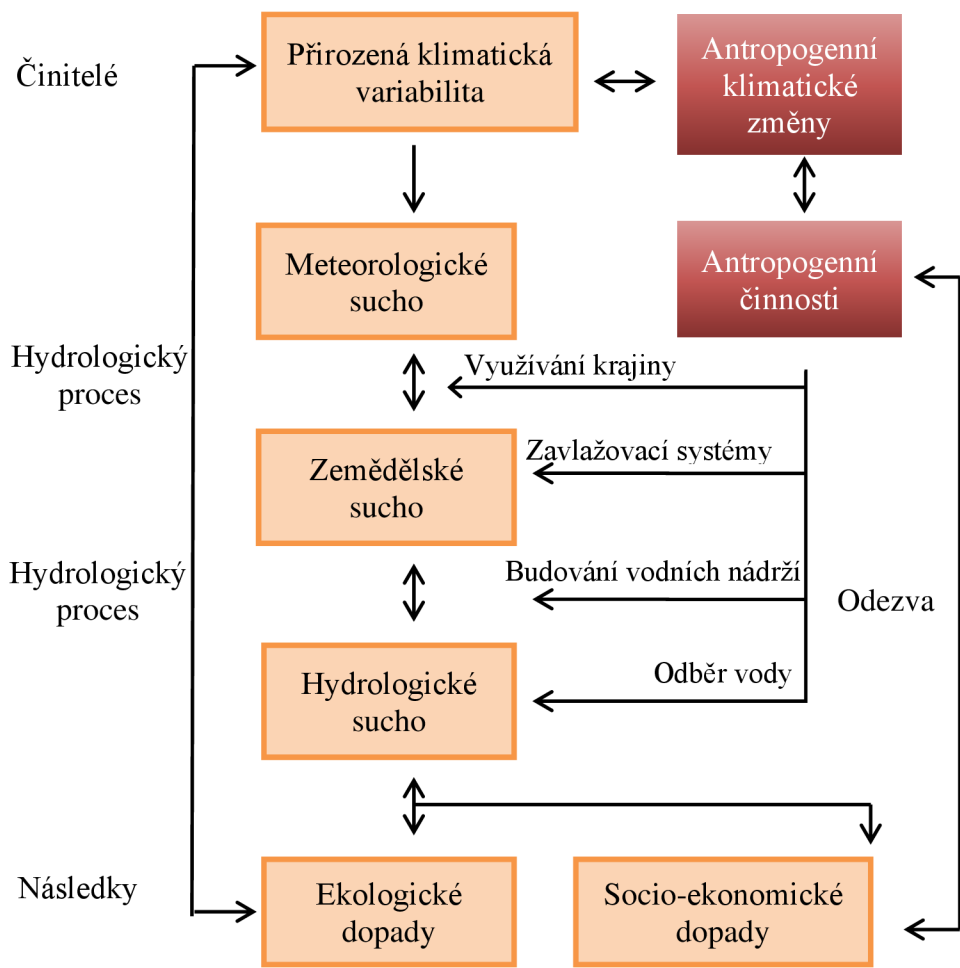
Vznik hydrologického sucha způsobuje deficit srážek, který může vést k podnormální úrovni hladin ve vodních tocích, jezerech a zvodních, případně k podnormálnímu množství půdní vlhkosti (Loon, 2015; Tallaksen, 2004). Nedostatek srážek se v podzemní části hydrologického cyklu projevuje s určitým zpožděním (MZE ©2017). Hydrologické sucho je ovlivněno užíváním vody (zejména odběry povrchové a podzemní vody), a proto je potřeba na hydrologické sucho pohlížet jako na přírodní fenomén, který však může být prohlouben lidským působením (ČHMÚ©2012).

Posledním druhem je sucho socioekonomické, které se projevuje, když začíná negativně ovlivňovat celou společnost, tedy mimo zemědělství, lesnictví a vodní hospodářství. Deficit vody se může negativně promítat do turistického ruchu, průmyslové produkce, produkce elektrické energie, života obyvatel a následně pak do celé ekonomiky a fungování společnosti (Brázdil, 2015).

Další možnou klasifikaci sucha založenou na Thornthwaiteově klasifikaci podnebí uvádí Sobíšek a kol. (1993):

- **stálé sucho**, které se vyskytuje v nejsušších klimatických pásech,
- **sezónní sucho**, které se vyskytuje v určitých klimatických pásmech a v rámci monzunového podnebí,
- **nahodilé sucho**, které je způsobeno nepravidelností a proměnlivostí četností a intenzit srážek.

Za současné situace můžeme mluvit o suchu nahodilém, což je období s nepravidelným výskytem srážek, kterých je výrazně méně než obvykle. Pokud načasování srážek neodpovídá zemědělskému období, můžeme mít mnoho vody, když ji nepotřebujeme a příliš málo, když ji potřebujeme (Restuccia ©2016).



Obr. č. 1: Proces šíření sucha zahrnující přírodní a lidský faktor včetně zpětných vazeb v měnícím se klimatu (Potopová, 2018).

3.4 Indexy sucha

Veličiny, které používáme ke kvantitativnímu vyhodnocení sucha, nazýváme indexy sucha. Mnohé indexy jsou založené na zvolených prahových hodnotách srážkových úhrnů nebo počtu bezsrážkových dní. Pokročilejší indexy reflektují časovou distribuci srážek nebo míru abnormality srážek. Další skupinu indexů sucha tvoří ty, které kromě deficitu srážek zohledňují i podmínky pro výpar. Indexy sucha jsou meteorologické a hydrologické (ČMeS ©2014).

3.4.1 Palmerův index intenzity sucha (PDSI)

Palmerův index intenzity sucha je velmi rozšířený index sucha, který navrhl Palmer (1965) k hodnocení meteorologického sucha, při kterém využívá snadno dostupné údaje o teplotě a srážkách. Kromě deficitu srážek uvažuje i další složky hydrologické bilance, přičemž bere v úvahu rozdílné typy půd. Zohledněna je i bilance předchozích měsíců, takže pomocí PDSI vymezené epizody sucha vykazují jistou perzistenci bez ohledu na případná přechodná zeslabení sucha. Hodnoty PDSI jsou standardizovány, což umožňuje porovnat intenzitu sucha v oblastech s různým klimatem. Jedná se o standardizovaný index, který nabývá hodnot od -10 (sucho) až +10 (vlhko), podrobná klasifikace Palmerova indexu sucha je prezentována v tab. č. 1. Mapy provozních agentur obvykle ukazují rozsah -4 až +4, ale jsou možné i extrémnější hodnoty. PDSI byl při kvantifikaci dlouhodobého sucha poměrně úspěšný (NCAR ©2019).

PDSI hodnoty	Třída
≥ 4.00	Extrémní vlhko
3.00 – 3.99	Silné vlhko
2.00 – 2.99	Mírné vlhko
1.00 – 1.99	Slabé vlhko
0.50 – 0.99	Počáteční vlhko
0.49 – -0.49	Přirozené
-0.50 – -0.99	Počáteční sucho
-1.00 – -1.99	Slabé sucho
-2.00 – -2.99	Mírné sucho
-3.00 – -3.99	Silné sucho
≤ -4.00	Extrémní sucho

Tab. č. 1: Klasifikace Palmerova indexu sucha (Palmer, 1965).

3.4.2 Odtokový index sucha (SDI)

Odtokový index sucha (SDI) se počítá na základě metodiky, kterou prezentoval Nalbatis (2008). Index se počítá vždy k 1. říjnu, 1. lednu, 1. dubnu a 1. červenci.

Nejprve se vypočítají měsíční objemové průtoky dle vzorce:

$$VQ_i = Q_i \cdot m_i \quad i = 1, 2, \dots, nn \quad (1)$$

kde VQ_i je měsíční objem průtoku [m^3], Q_i průměrný denní průtok [m^3/s], m_i je počet dní v měsíci a $i = 1, \dots, nn$ je počet měsíců v časové řadě.

Dále se tyto objemy kumulují dle vzorce:

$$V_{i,k} = \sum_{j=i}^{3k} VQ_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots \quad j = 1, 2, \dots, 12; \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

kde V_{ik} je kumulativní objemový průtok pro i -tý hydrologický rok a k -tou referenční periodu [m^3] ($k = 1$ pro období říjen až prosinec, $k = 2$ pro období říjen až březen, $k = 3$ říjen až červen, $k = 4$ pro období říjen až září).

Poté se vypočte index SDI dle vzorce:

$$SDI_{i,k} = \frac{\ln(V_{i,k}) - \overline{\ln(V_{i,k})}}{s_{i,k}} \quad i = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

kde $SDI_{i,k}$ je odtokový index sucha pro i -tý hydrologický rok a k -tou referenční periodu, $\ln(V_{ik})$ je přirozený logaritmus kumulovaného objemového odtoku, $s_{i,k}$ je směrodatná odchylka z těchto hodnot.

Na základě velikosti SDI indexu se pak kvantifikuje velikost sucha do kategorií dle tab. č. 2 a spočte se pravděpodobnosti výskytu jednotlivých stupňů sucha - $P_{m,k}$ (4. sloupec tab. č. 2) v jednotlivých obdobích dle vzorce:

$$P_{m,k} = P(SDI_{i,k} = m) \quad m \in [1, 2, 3, 4] \quad \forall i \quad (4)$$

kde $P(\cdot)$ je pravděpodobnost výskytu daného stavu m pro danou referenční periodu k .

Stupeň	Typ sucha	Kritérium pro vymezení	Pravděpodobnost výskytu (%)
0	Není sucho	$SDI \geq 0,0$	50
1	Mírné sucho	$-1,0 \leq SDI < 0$	34,1
2	Střední sucho	$-1,5 \leq SDI < -1,0$	9,2
3	Velké sucho	$-2,0 \leq SDI < -1,5$	4,4
4	Extrémní sucho	$SDI < -2$	2,3

Tab. č. 2: Hodnocení sucha dle indexu SDI (Nalbantis, 2008).

3.4.3 Standardizovaný srážkový index (SPI)

Index je založen na hodnocení sucha s použitím týdenních nebo měsíčních srážkových úhrnů. Měsíční úhrny srážek jsou aproximovány teoretickým pravděpodobnostním rozdělením (Hayes et al, 1999).

SPI index je definován jako normovaná hodnota úhrnu srážek za dané období, tedy SPI má normální rozdělení $N(0,1)$ (s nulovým průměrem a jednotkovou směrodatnou odchylkou). SPI lze určit pomocí vztahu (Brázdil et al., 2007):

$$SPI = F^{-1} [G(PREC)] \quad (5)$$

kde G je kumulativní distribuční funkce srážkových úhrnů (distribuční funkce je obvykle aproximována gama rozdělením), F^{-1} je inverzí funkce normálního rozdělení $N(0,1)$ a $PREC$ je srážkový úhrn za dané období. Distribuční funkce G vychází z dlouhodobé řady pozorování na dané stanici (McKee et al., 1993).

SPI index má tři výhody: první výhodou je jednoduchost výpočtu, který je založen nadatech srážkových úhrnů a je třeba stanovit parametry distribuční funkce. Druhou výhodou je variabilní časové měřítko, které umožní popis srážkového deficitu pro účely meteorologického, zemědělského a hydrologického sucha. Poslední výhodou je standardizace tzn., že extrémní hodnoty se vyskytují se stejnou pravděpodobností, tím je dána i srozumitelnost indexu (Hayes et al., 1999).

Nevýhodou spojenou s výpočtem indexu je nutnost dostatečně dlouhých časových řad srážek (alespoň 30 let), aby mohly být tyto časové řady s dostatečnou přesností modelovány teoretickou distribuční funkcí (McKee et al., 1993). Další nevýhodu představuje právě standardizovaný charakter indexu, kdy se sucho určité extrémní události v různých lokalitách vyskytuje se stejnou frekvencí. Nelze určit lokality, které jsou k výskytu sucha více náchylné. Poslední nevýhoda se projevuje v oblastech se sezónním výskytem velmi nízkých srážek při použití časového intervalu 1-3 měsíce tzn., hodnoty mohou vycházet nereálně vysoké. Tento index je vhodný pro hodnocení krátkodobého, střednědobého i dlouhodobého sucha. Jde o indikátor deficitu srážek, který nebere v úvahu výpar ani změny teploty vzduchu (Brázdil, 2015).

3.4.4 Standardizovaný index odtoku (SSI)

Široce používaným indexem sucha standardizovaný index odtoku, který se používá pro monitorování sucha i povodní. Je založen na měsíčních datech průtoků a je vhodný pro měření meteorologického a hydrologického sucha. Je obdobný jako „Standardizovaný srážkový index“ SPI (viz kapitola 3.4.3). Nejprve si zvolíme vhodnou distribuční funkci „Gamma rozdělení“ (Brázdil, 2015).

3.4.5 Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI)

Standardizovaný srážkový evapotranspirační index slouží k monitorování a analýze sucha. Měří závažnost sucha podle jeho intenzity a trvání a může identifikovat začátek i konec sucha. Klíčovou výhodou oproti jiným široce využívaným indexům sucha je, že jeho multiskalární vlastnosti umožňují identifikaci různých typů sucha a dopadů v souvislosti s globálním oteplováním (Gutmann, 1998).

SPEI k výpočtu používá měsíční difference mezi srážkami a potenciální evapotranspirací (PET) v jednoduché klimatické vodní bilanci. Potenciální evapotranspiraci lze spočítat různými metodami. V R balíku SPEI, který byl použit v této diplomové práci, jsou obsaženy následující metody výpočtu měsíční PET: Thorntwaitova metoda, Hargreavesova metoda a metoda dle Penman-Monteitha (Beguería et al., 2014).

Thorntwaitova metoda (1948) je nejjednodušší a často využívanou metodou výpočtu potenciální evapotranspirace (PET), která vyžaduje k výpočtu pouze průměrné měsíční teploty vzduchu:

$$PET = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \quad (6)$$

kde PET je potenciální evapotranspirace měsíce o 30 dnech ($\text{mm} \cdot \text{měs}^{-1}$), T je průměrná měsíční teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$), $\alpha = (67,5 \cdot 10^{-8}) \cdot T^3 - (77,1 \cdot 10^{-8}) \cdot T^2 + 0,01796 \cdot T + 0,492$ a I je teplotní index.

Další metodou výpočtu hodnoty PET je Hargreavesova metoda, která počítá průměrnou měsíční potenciální evapotranspiraci. Někteří autoři využívají tuto rovnici i pro odhad denních hodnot evapotranspirace (Hargreaves, Allen, 2003).

Hodnota PET může být počítána pomocí fyzikálně založené metody FAO Penman-Monteitha (PMM) nebo modely založenými na empirických vztazích, kde PET se počítá s menšími požadavky na dostupné údaje. PMM umožňuje stanovit referenční evapotranspiraci v měsíčním intervalu za využití standardních meteorologických dat (sluneční záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru). Výhodou metody je, že z výsledných hodnot referenční evapotranspirace je možné vypočítat aktuální evapotranspiraci (Allen et al., 1998).

Počítaná diference mezi srážkami a PET pro daný měsíc je pak jednoduchou mírou odpovídajícího přebytku nebo deficitu vody. Získané diference mohou být agregovány pro různé časové škály od jednoho do několika měsíců, podobně jako u SPI (viz kap. 3.4.3.).

3.5 Koncepce na ochranu před následky sucha a nedostatku vody

Koncepce schválená vládou ČR dne 24. července 2017 usnesením č. 528, je strategickým dokumentem, který byl zpracován na základě výstupů činnosti Mezirezortní komise VODA-SUCHO skupinou pracovníků MZE, MŽP a VÚV TGM v. v. i. Hlavním cílem koncepce je vytvoření rámce pro přijetí účinných legislativních, organizačních, technických a ekonomických opatření k minimalizaci dopadů sucha a nedostatku vody na životy a zdraví obyvatel, hospodářství, ŽP a na celkovou kvalitu života v ČR (MZE ©2020).

Mezi strategické cíle této koncepce patří (MZE ©2020):

- Zvýšení informovanosti o riziku sucha prostřednictvím monitoringu a predikce výskytu such, zajistit připravenost na událost sucha pomocí plánů pro zvládání sucha a všeobecné osvěty.
- Zabezpečit udržení rovnováhy mezi vodními zdroji a potřebou vody napříč sektory i v měnících se klimatických a socioekonomických podmínkách.
- Zmírňovat dopady sucha na akvatické i terestrické ekosystémy prostřednictvím obnovy přirozeného vodního režimu krajiny

Koncepce na ochranu před následky sucha a nedostatku vody obsahuje těchto pět následujících pilířů (MZE ©2020):

- 1) **Vytvoření informační platformy o suchu a nedostatku vody**, prvním krokem pilíře č. 1 je při zvládání rizika sucha a nedostatku je informační platforma pro monitoring sucha a stav vodních zdrojů.
- 2) **Posilování odolnosti a rozvoj vodních zdrojů**, druhý tematický pilíř směřuje k naplnění strategického cíle 2. Představuje reakci na pozorované nepříznivé trendy v množství a jakosti dostupných vodních zdrojů a rovněž na nepříznivé dopady změny klimatu. Do primární skupiny opatření spadají stávající vodárenské infrastruktury, opatření na ochranu množství a jakosti dostupných vodních zdrojů a strategické aktivity zaměřené na přípravu a

realizaci nových vodních zdrojů, opatření na rozvoj zemědělské závlahy a zvýšení požární ochrany.

- 3) Zemědělství jako nástroj ochrany množství a jakosti a ochrany půdy,**
Třetí tematický pilíř směřuje k naplnění strategického cíle 2 v zemědělství a lesnictví. Opatření představují reakci na zhoršující se vláhovou bilanci, klesající retenční a infiltrační schopnosti zemědělské půdy, nepříznivé dopady vodní eroze a znečištění vodylátkami na výživu a ochranu rostlin. Cílem opatření navržených v rámci tohoto tematického pilíře je snížení následků sucha v zemědělství, zlepšení fyzikálních vlastností půd, zpomalení odtoku vody z krajiny a ochrana jakosti vody.

- 4) Obnova přirozeného vodního režimu krajiny,** čtvrtý tematický pilíř vede k naplnění strategického cíle 3 a zahrnuje veškeré aktivity k nápravě nepříznivých důsledků systematického odvodnění krajiny a zásahů člověka do sítě vodních toků. Cílem opatření přijatých v souladu s touto prioritou je zvýšení retence vody v krajině a zvyšování odolnosti vodních ekosystémů vůči hydrologickým extrémům.

- 5) Podpora principů zodpovědného hospodaření s vodou napříč sektory,**
pátý tematický pilíř vede k naplnění strategického cíle 2 a 3 a je zaměřen na snižování poptávky po vodě, její opětovné využívání a snižování míry znečištění vody, která se navrácí do přirozeného prostředí. K dispozici je řada nových technologií, které zatím nejsou v praxi uplatňovány a mohou výrazně přispět ke snižování následků sucha a nedostatku vody na společnost, hospodářství a na životní prostředí.

3.6 Povodně

Povodeň je přírodní jev, kdy dochází k výraznému zvýšení hladiny vodních toků nebo jiných povrchových vod, při kterém voda již zaplavuje území mimo koryto vodního toku. Povodní je i stav, kdy voda může způsobit škody tím, že z určitého území nemůže dočasně přirozeným způsobem odtékat nebo její odtok je nedostatečný, případně dochází k zaplavení území při soustředěném odtoku srážkových vod (Zákon č. 254/2001 Sb).

Povodně lze v základu dělit na přirozené a zvláštní:

1) Přirozené povodně

Jsou způsoby přirozenými přírodními vlivy, v závislosti na počasí. Rozlišujeme je na zimní, jarní a letní povodně. Příčiny zimních a jarních povodní jsou nejčastěji tání sněhu v kombinaci s atmosférickými srážkami. Letní povodně jsou zapříčiněny dlouhotrvajícími dešti nebo krátkodobými dešti velké intenzity (Kovář, 2003).

Dle ČSN 75 0110 rozlišujeme tyto typy přirozených povodní:

- **Dešťové**, původem s kapalných srážek, které se dle doby trvání a intenzity dále rozdělují (Brázdil et al., 2005):
 - **dešťové povodně z trvalých srážek**, mají pomalý nástup, který je způsoben dlouhotrvajícím deštěm.
 - **dešťové povodně z přivalových srážek**, jsou náhlé, krátké a intenzivní deště doprovázené bouřkou lokálního charakteru.
- **Sněhové**, vznikají v důsledku tání sněhové pokrývky z důvodu zvyšující se teploty na konci zimního období a na jaře (Brázdil et al., 2005).
- **Smíšené**, jsou kombinací tání sněhové pokrývky a atmosférických dešťů. Dopadem dešťových srážek na sněhovou pokrývku dochází k urychlení tání sněhu, čímž se zvyšuje průtok (Brázdil et al., 2005).
- **Ledové**, v dobách trvalých mrazů vzniká na hladinách řek ledová pokrývka. V případě oblevy dochází k uvolňování ledových celin, které se nahromadí v částech profilu a vytvoří tzv. „ledovou zácpu“, čímž dočasně snižují průtočnost koryta a vzduť vodní hladiny (Brázdil et al., 2005).

2) Zvláštní povodně

Povodně způsobené umělými vlivy, což jsou situace, jež mohou nastat na vodních dílech vzdouvajících vodu. Vzniklou zvláštní povodeň je nutné chápat odlišně od přirozených povodní, a to zejména pro rozdílnou charakteristiku možného vzniku, průběhu a rozdílných povodňových opatření před a při vzniku zvláštní povodně. Pro účely dohledu jsou vodní díla zařazena do I. až IV. kategorie podle výše škod v území pod vodním dílem při případné havárii (protržení) hráze (HZSCR ©2018).

3.6.1 Preventivní a přípravné opatření proti povodním

Preventivní opatření jsou nejefektivnější formou ochrany pře povodněmi. Na zabezpečení realizace preventivních opatření se musí podílet správci/vlastníci nemovitosti, což mohou být rovněž organizace nebo občané. Pro efektivní ochranu je třeba nalézt vhodnou kombinaci opatření, která budou zvyšovat přirozenou akumulaci a retardaci vody s technickým opatřením k ovlivnění povodňových průtoků. Pro návrh těchto opatření je nutné znát geomorfologii území, rostlinný pokryv, složení půdy s využitím moderních informačních technologií. Řeky přesahující hranice státu je nezbytné řešit v mezinárodním kontextu, v rámci mezinárodních dohod (HZSCR ©2018).

1) Přípravná opatření jsou:

- **Stanovení záplavových území** – stanovování záplavových území a jejich dokumentace stanoví Ministerstvo životního prostředí vyhláškou. Vodoprávní úřad, který záplavové území stanovil, zabezpečí zpřístupnění dokumentace a předá jednu kopii této dokumentace Ministerstvu životního prostředí dle zákona č. 254/2001 Sb.
- **Vymezení směrodatných limitů stupňů povodňové vlny aktivity** - dle zákona č. 254/2001 Sb. se stupni povodňové aktivity rozumí míra povodňového nebezpečí vázaná na směrodatné limity, jimiž jsou zpravidla vodní stavy anebo průtoky v hlásných profilech na vodních tocích. Rozsah operativních opatření prováděných pro ochranu před konkrétní povodní se řídí nebezpečím nebo vývojem povodňové situace, která se vyjadřuje stupni povodňové aktivity a to:

- **první stupeň (stav bělosti)** - nastává při nebezpečí přirozené povodně a zaniká, pominou-li příčiny takového nebezpečí.
- **druhý stupeň (stav pohotovosti)** - se vyhláší, když nebezpečí přirozené povodně přerůstá v povodeň, ale nedochází k větším rozlivům a škodám mimo koryto.
- **třetí stupeň (stav ohrožení)** - se vyhláší při bezprostředním nebezpečí nebo vzniku škod většího rozsahu, ohrožení životů a majetku v záplavovém území.
- **Povodňové plány** – povodňovými plány se rozumí dokumenty, které obsahují způsob zajištění včasných a spolehlivých informací o vývoji povodně možnosti ovlivnění odtokového režimu, organizaci a přípravu zabezpečovacích prací.
- **věcnou část** – zahrnuje údaje potřebné pro zajištění ochrany před povodněmi určitého objektu.
- **organizační část** – obsahuje jmenné seznamy, adresy a způsob spojení účastníků ochrany před povodněmi.
- **grafickou část** – obsahuje zpravidla mapy a plány, kde jsou zakresleny záplavová území.
- **Povodňové prohlídky** – povodňovými prohlídkami se zjišťuje, zda na vodních tocích, vodních dílech a v záplavových územích nejsou závady, které by mohly zvýšit nebezpečí povodně.
- **Příprava předpovědní a hlásné povodňové služby** – předpovědní povodňová služba informuje povodňové orgány, popřípadě další účastníky ochrany před povodněmi, o nebezpečí vzniku povodně, o jejím vzniku a o dalším nebezpečném vývoji. Tuto službu zabezpečuje ČHÚ ve spolupráci se správcem povodí.
Hlásná povodňová služba zabezpečuje informace povodňovým orgánům pro varování obyvatelstva v místě očekávané povodně a v místech ležících níže na vodním toku, informuje povodňové orgány a účastníky ochrany před povodněmi o vývoji povodňové situace a předává zprávy a hlášení potřebná k jejímu vyhodnocování a k řízení opatření na ochranu před povodněmi.

- **Organizační a technická příprava** – se rozumí povodňové záchranné práce prováděné za povodně v bezprostředně ohrožení nebo již zaplavených území k záchraně životů a majetku, zejména ochrana a evakuace obyvatelstva, péče o ně po nezbytně nutnou dobu.
- **Vytváření hmotných povodňových rezerv** - Jedná se především o vybavení jednotky SDH obce, dále vozidla, stroje, čerpadla, vysoušeče a další vybavení (pytle, písek, plničky, lopaty, kolečka, úklidové, ochranné a desinfekční prostředky atd.).
 - **Příprava účastníků povodňové ochrany** – účastníci ochrany před povodněmi, jímž je to zákonem uloženo, zpracovávají zprávu o povodni, při které byla vyhlášena povodňová aktivita, došlo k povodňovým škodám nebo byly prováděny povodňové zabezpečovací a záchranné práce dle zákona č. 254/2001 Sb.

2) Opatření při nebezpečí a za povodně jsou:

- **Činnost předpovědní povodňové služby** – informuje povodňové orgány, popřípadě další účastníky ochrany před povodněmi, o nebezpečí vzniku povodně.
- **Činnost hlásné povodňové služby** – zabezpečuje informace povodňovým orgánům pro varování obyvatelstva v místě očekávané povodně a v místech ležících níže na vodním toku.
- **Varování při nebezpečí povodně** – hlásná povodňová služba zabezpečuje informace povodňovým orgánům pro varování obyvatelstva.
- **Zřízení a činnost hlídkové služby** – svou činnost zahajuje při prvním stupni (stavu bělosti) povodňové aktivity.
- **Vyklízení záplavových území** – evakuace obyvatelstva a majetku.
- **Řízené ovlivňování odtokových poměrů** – opatření k ochraně obyvatelstva a majetku v zaplavovaných územích je třeba stanovení odtokových poměrů v řešených povodích.

- **Povodňové zabezpečovací práce** – provádí se podle povodňových plánů a podle potřeby záchranné práce nebo evakuace.
- **Povodňové záchranné práce** – k ochraně a evakuaci obyvatelstva v zaplavených územích.
- **Zabezpečení náhradních funkcí a služeb v území zasaženém povodní** – provádějí povodňové orgány obcí.

3) Opatření po povodni

- **Vyhodnocení povodňové situace včetně vzniklých povodňových rizik** – Povodňové orgány provádějí vyhodnocení povodně, které obsahuje rozbor příčin a průběhu povodně, popis a posouzení účinnosti provedených opatření, věcný rozsah a odborný odhad výše povodňových škod a návrh opatření na odstranění následků povodně.
- **Odstranění povodňových škod a obnova území po povodni** – zajistit likvidaci škod po povodni a obnovit území do původního stavu.
- **Evidenční a dokumentační práce** – Účelem dokumentace je zabezpečení průkazných a objektivních záznamů o průběhu povodně, o provedených opatřeních k ochraně před povodněmi, o příčině vzniku a velikosti škod a o jiných okolnostech souvisejících s povodní (zákon č. 254/2001 Sb.).

4 Charakteristika studovaného území

Pro studii vlivu hydrologického sucha byly vybrány 4 významné přítoky Vltavy: Sázava, Otava, Lužnice a Malše a významný přítok Malše, tedy Stropnice. Lokace vybraných toků je spolu s limnigrafickými stanicemi uvedena na obr. č. 2.



Obr. č. 2: lokace zvolených vodních toků (zdroj: autorka práce).

Povodí	Vodoměrná stanice	Dlouh. průměr. průtoky 1980-2018 m^3/s	Staničení km	Q355 m^3/s	Plocha povodí km^2	Nad. výška m.n.m	Délka toku km	Ústí m.n.m.	Pramen m.n.m.	Průměr. sklon toku %
Otava	LG Písek	23,28	24,7	5,47	2913,7	354	111,7	346	627	2,5
Lužnice	LG Bechyně	21,42	10,6	3,25	4057	354	208	346	970	3
Sázava	LG Nespeky	18,55	27,2	3,58	4038,6	259	225,9	200	757	2,47
Stropnice	LG Pašínovice	2,12	3,3	0,36	399,9	418	54	400	780	7
Malše	LG Římov	2,97	19,4	0,68	493,7	419	96	385	985	6,25

Tab. č. 4: základní geomorfologické a hydrologické charakteristiky zájmových povodí (Zdroj: pvl © 2021).

Základní hydrologické a morfologické charakteristiky zájmových povodí jsou prezentovány v tab. č. 4. V příloze č. 3 jsou pak uvedeny nejdůležitější přítoky Malše, Stropnice, Otavy, Sázavy a Lužnice. V povodí Malše a Sázavy se nacházejí tři významné velké vodní nádrže: VD Římov (povodí Malše), VD Švihov (Povodí Sázavy - Želivka) a VD Pilská (povodí Sázavy).

4.1 Povodí Sázavy

Sázava pramení severozápadně od Šindelného vrchu v nadmořské výšce 757 m. Na horním toku protéká větším spádem kamenitým řečištěm většinou zalesněným údolím a tvoří četné zákruty. Středním tokem protéká Sázava mírným proudem mělkými údolím, kde přibývá chatová zástavba. Na dolním toku od Týnce nad Sázavou se řeka postupně zařezává do hlubokého zalesněného údolí, proud se zrychluje a v korytě přibývají kameny. Řeka se prodírá žulovým masivem do vltavské kotliny. Tento zajímavý úsek končí u Pikovic, kde se říční proud ztrácí ve vzdušné přehradě Vrané (Švorc, 2006).

Vodoměrná stanice, jejíž data byla v práci využita, se nachází cca 750 m pod pevným jezem v Nespekách na pravém břehu.

4.2 Povodí Stropnice

Řeka Stropnice pramení na svahu Vysoké na hranicích České republiky a Rakouska v Novohradských horách v nadmořské výšce 780 m. Dříve se potok nazýval Borovanský, jedná se o nejvýznamnější pravostranný přítok řeky Malše, do které se vlévá u Dolní Stropnice na jejím 16,8 ř. km. v nadmořské výšce 400 m. Na řece Stropnici se mimo jiné nachází VD Humenice a dále přírodní park Terčino údolí u Nových Hradů (EDPP, 2010).

Vodoměrná stanice, jejíž data byla v práci využita, se nachází cca 500 m po cestě od návsi v Pašinovicích na levém břehu.

4.3 Povodí Lužnice

Lužnice pramení na rakouské straně Novohradských hor, na západním svahu hory Eichelberg (1054 m), v nadmořské výšce 970 m. Řeka rozléhající se na jihu České republiky s horním tokem v Horním Rakousku. Lužnice je dlouhá 208 km a odvodňuje území o rozloze 4234,65 km²; oproti ostatním jihočeským řekám má však velmi malý spád a teče pomalu. Je to pravobřežní přítok Vltavy. Lužnice protéká Novohradskými horami, Vitorazskem, Třeboňskou pánví a Středočeskou pahorkatinou. Celý horní tok Lužnice od hranic s Rakouskem až k Veselí nad Lužnicí je součástí CHKO Třeboňsko. Poté je koryto řeky v úseku od Veselí nad Lužnicí k soutoku s Vltavou chráněné jako Přírodní památka Lužnice (Třeboňsko, 2019).

Vodoměrná stanice, jejíž data byla v práci využita, se nachází cca 150 m pod soutokem se Smutnou na levém břehu.

4.4 Povodí Malše

Malše pramení na svahu Viehberg v Rakousku v nadmořské výšce 985 m. Nad Dolním Dvořištěm tvoří státní hranici. Jedná se o významný pravostranný přítok Vltavy, do které se vlévá v centru Českých Budějovic. Dále protéká Rychnovem nad Malší, Kaplicemi, Římovem a Doudleby. Protéká Soběnovskou vrchovinou, kde vytváří hluboce zaříznuté, místy až kaňonovité údolí. Délka vodního toku činí 96 km (z toho 89 km v České republice) a plocha 979,1 km². Na řece Malši se mimo jiné nachází VD Římov (EDPP, 2010).

Stanice profilu, jehož data byla v práci využita, se nachází cca 40 m po proudu od silničního mostu Římov - Komářice na pravém břehu.

4.5 Povodí Otavy

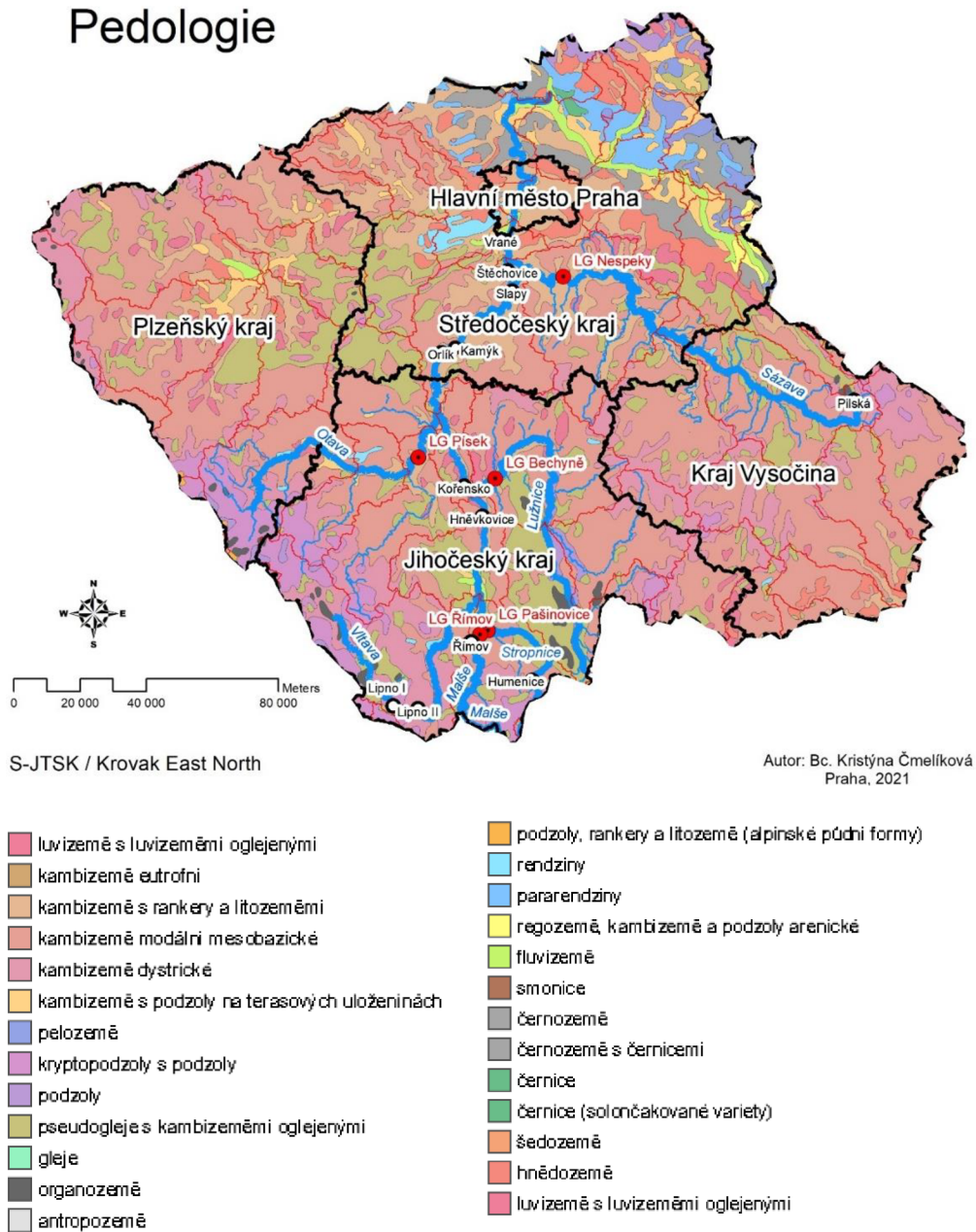
Otava vzniká soutokem horských řek Vydry a Křemelné v Jihočeském kraji, v národním parku Šumava, u Čeňkovy Pily ve výšce 627 m n. m. Na horním toku teče zalesněným údolím v kamenitém řečišti s četnými peřejemi a balvanitými kaskádami. Pod historickou osadou rýžovačů zlata a sklářů Rejnštejnem se její spád zmírňuje a tok se pozvolna mění. Směrem k soutoku s Vltavou se řeka rozšiřuje a

prohlubuje. Původně hluboké údolí s přejezdným tokem zaříznutým do terénu se po vybudování Orlické přehrady v polovině 20. století změnilo v široký záliv s četnými zákruty, který se pod raně gotickým hradem Zvíkovem spojuje s Vltavou (Švorc, 2006).

Vodoměrná stanice se nachází cca 50 m po proudu od pěší lávky v sídlišti na Pražském předměstí na levém břehu.

4.6 Půdní typy

Na obr. č. 3 a v tabulce č. 5a jsou prezentovány půdní typy a subtypy v zájmovém území.



Obr. č. 3: půdní typy a subtypy v zájmovém území (zdroj: autorka práce).

Půdní typ	Subtyp	Sázava	Otava	Lužnice	Stropnice	Malše
		%				
Luvizem	s luvizeměmi oglejenými	0	4	0	0	0
Kambizem	modální mesobazické	21	34	10	31	52
	dystrické	9	4	0	14	43
	s rankery a litozeměmi	52	38	26	0	0
	s podzoly na terasových uloženinách	0	10	0	0	0
Pseudoglej	s kambizeměmi oglejenými	16	8	29	55	5
Rendziny		2	1	0	0	0
Kryptopodzoly s podzoly		0	1	0	0	0
Pelozemě		0	0	35	0	0

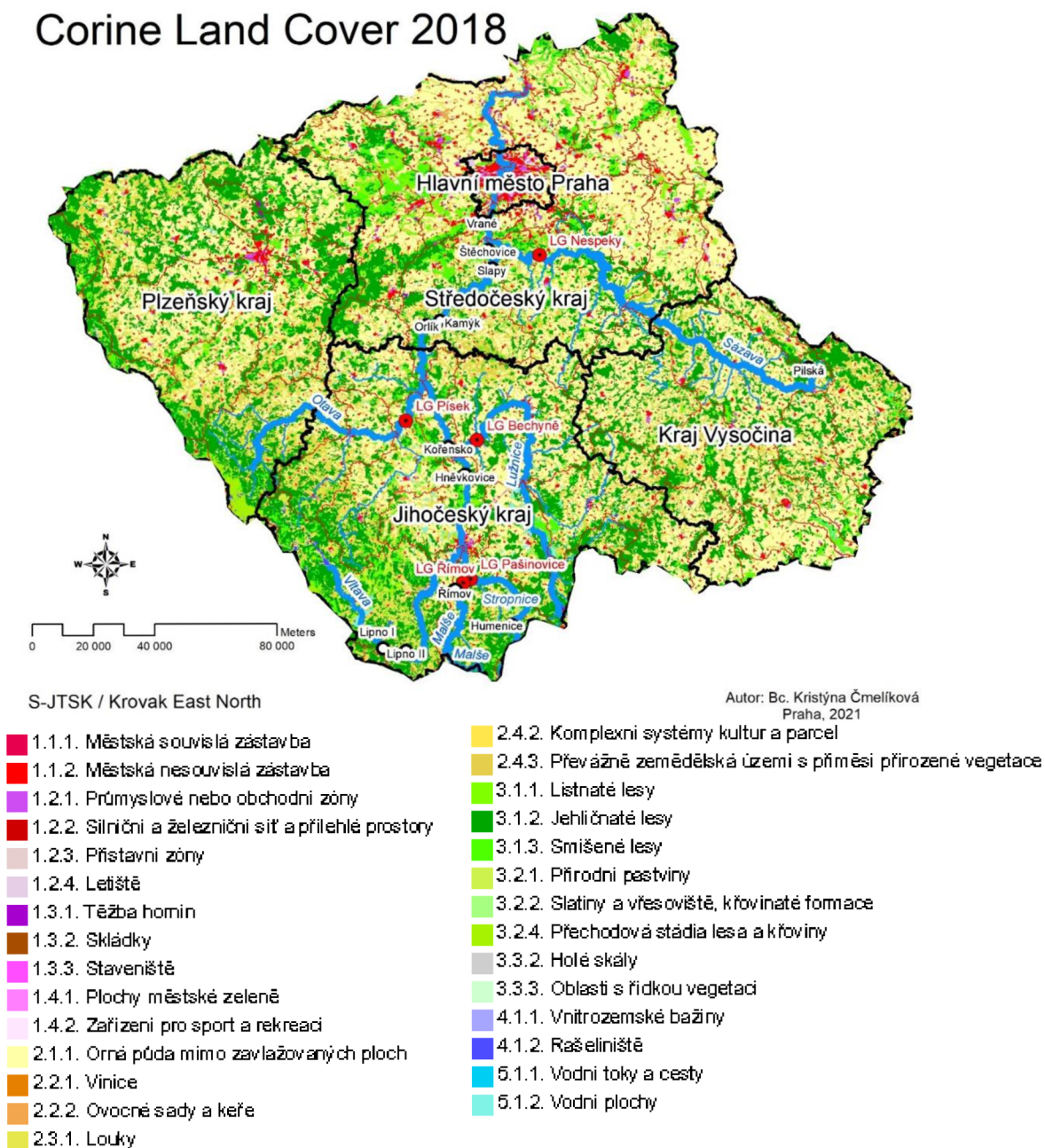
Tab. č. 5a: relativní zastoupení půdních typů a subtypů na zájmových povodích (zdroj: autorka práce).

Z obr. č. 3 a tab. č. 5a je patrné, že v povodí Sázavy a Otavy nejvíce převládá kambizem s rankery a litozeměmi. V povodí Lužnice se vyskytuje nejvíce pelozemí. V povodí Stropnice je nejvíce zastoupena pseudoglej a na povodí Malše převládá kambizem modální mesobazická.

4.7 Krajinný pokryv

Na obr. č. 4 a v tabulce č. 5b je prezentován vegetační kryt v zájmové lokalitě.

Corine Land Cover 2018



Obr. č. 4: CORINE Land Cover 2018 (zdroj: autorka práce).

Povodí	Sázava	Otava	Lužnice	Stropnice	Malše
	%				
Jehličnaté lesy	24	21	20	28	46
Směšené lesy	12	19	12	18	5
Převážně zemědělská území s příměsí přirozené vegetace	32	21	35	20	23
Orná půda mimo zavlažovaných ploch	2	6	12	3	9
Městská nesouvislá zástavba	10	8	7	6	5
Vnitrozemské bažiny	1	0	5	8	0
Louky	10	7	6	5	6
Komplexní systémy kultur a parcel	0	1	0	0	0
Zařízení pro sport a rekreaci	8	3	3	2	0
Vodní plochy	1	2	0	0	6
Průmyslové nebo obchodní zóny	0	2	0	0	0

Tab č. 5b: relativní zastoupení Corine Land Cover v zájmovém území (zdroj: autorka práce)

Z obr. č. 4 a tabulky č. 5b je patrné, že dominantním krajinným pokryvem v povodí Sázavy, Otavy, Stropnice a Lužnice jsou jehličnaté lesy, smíšené lesy a převážně zemědělská území s příměsí přirozené vegetace. Na povodí Malše dominují zejména jehličnaté lesy a převážně zemědělská území s přirozenou vegetací.

Na povodí Sázavy je nejvíce zařízení pro sport a rekreaci, luk a městské nesouvislé zástavby. Povodí Stropnice má nejvíce vnitrozemských bažin. Lužnice má nejvíce zemědělských území s příměsí přirozené vegetace a orné půdy mimo zavlažovacích ploch. Nejvíce vodních ploch a jehličnatých lesů můžeme zaznamenat na povodí Malše. Smíšených lesů, průmyslových nebo obchodních zón a komplexních systémů kultur a parcel můžeme nejvíce zaznamenat na povodí Otavy.

5 Metodika

Pro každé povodí byla sestavena kolekce vstupních dat, která obsahovala denní časové řady průtoků z limnigrafických stanic, jejichž zdrojem je ČHMÚ, dále denní časové řady denních srážkových úhrnů a průměrné denní teploty. Srážková a teplotní data odvozena z datasetu gridovaných srážek a teploty v rozlišení 25 km × 25 km (Štěpánek et al., 2011). Pro jednotlivá povodí byla interpolací Thiessenovými polygony spočítána průměrná srážka na povodí, ta byla následně korigována na základě vrstvy průměrných srážek (stejně období, rozlišení 1 km × 1 km) tak, aby průměr srážek pro povodí byl stejný. Podobě byla korigována i teplota - průměrná teplota na povodí z gridované vrstvy byla opravena na základě rozdílu v nadmořské výšce odvozené z gridované vrstvy a z digitálního modelu terénu, přičemž byl uvažován gradient teploty 0,65 °C/100 m. Celková délka vstupních meteorologických dat byla od 1. 11. 1980 až 31. 12. 2018.

Na základě časových řad průměrné denní teploty byly pro každé povodí spočteny časové řady potenciální evapotranspirace metodou, kterou prezentovali Oudin et al. (2005) na základě prací Jensen a Haise (1963) a McGuinness a Bordne (1972). Vstupem pro výpočet potenciální evapotranspirace byly, kromě průměrné denní teploty, souřadnice těžiště povodí.

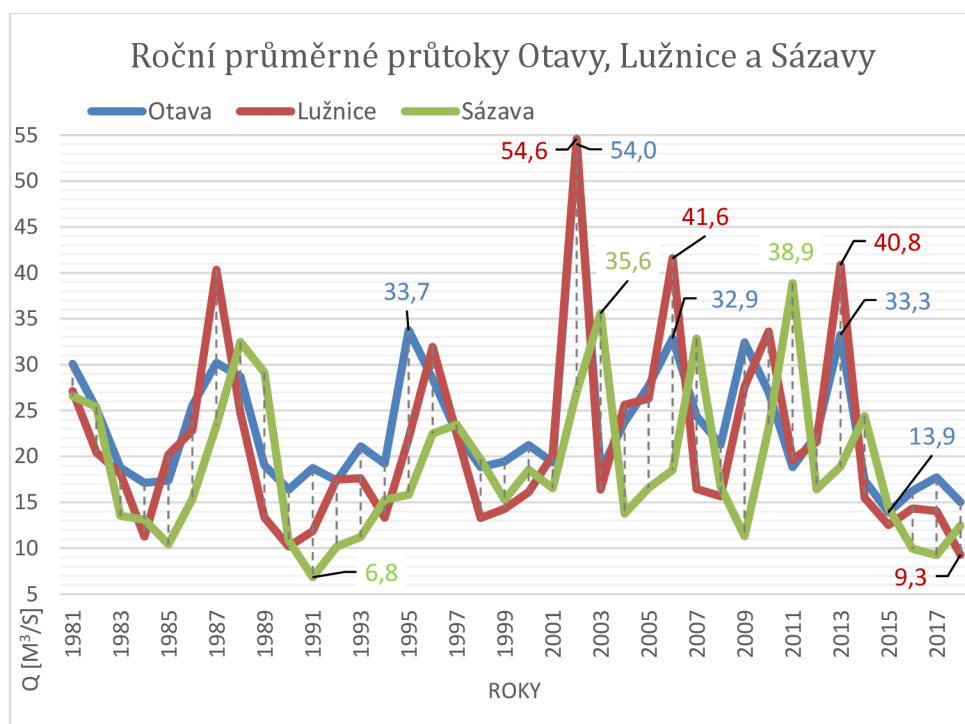
Časové řady srážek v denním kroku byly následně agregovány do měsíčních a ročních hodnot. Na základě časových řad průtoků a průměrné denní teploty byly vypočteny průměrné měsíční a roční hodnoty. Na základě agregovaných měsíčních hodnot srážek a průměrných měsíčních teplot byly vypočteny zvolené indexy sucha (SPI a SPEI). Veškeré výpočty byly řešeny v programovacím jazyku R (R Development Core Team, 2008).

Dalším krokem bylo celkové zhodnocení meteorologického a hydrologického sucha a porovnání indexů sucha mezi sebou.

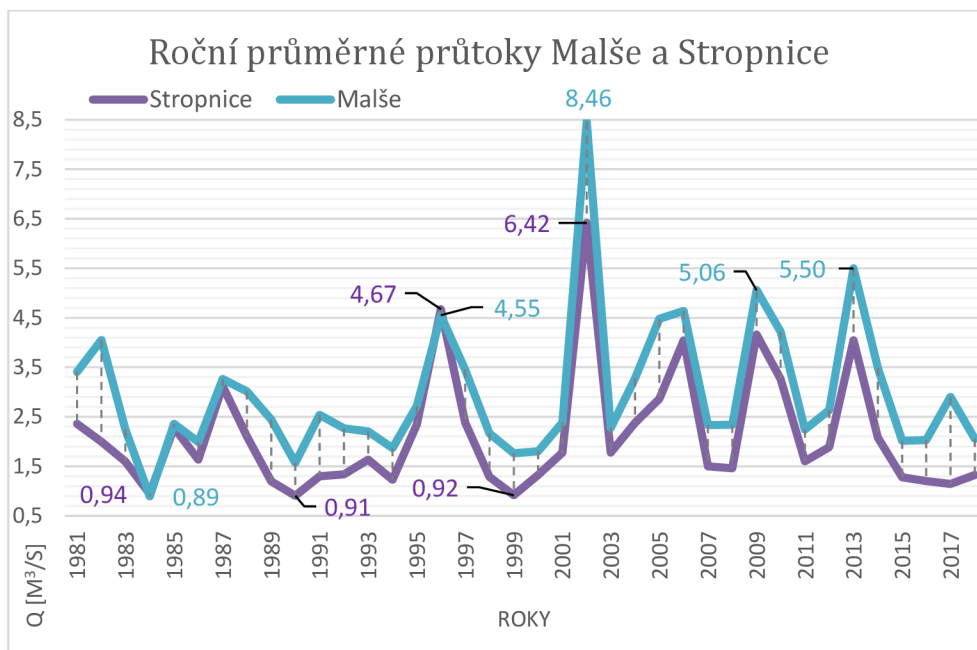
6 Výsledky práce

Z denních průtokových dat byly nejprve vypočteny roční průměrné hodnoty průtoku a porovnány. Tyto výsledky jsou prezentovány na grafu č. 1a a grafu č. 1b. Průměrné roční průtoky Malše a Stropnice jsou prezentovány samostatně na grafu č. 1b, kvůli zvýraznění rozdílů těchto dvou povodí (Stropnice je přítokem Malše a v blízkosti uzávěrového profilu povodí Malše se nachází VD Římov).

Z grafu č. 1a jsou jasně patrné povodňové roky na Otavě, Lužnici (zejména roky 2002, 2006 a 2013) a Sázavě (od poloviny roku 2002 a 2003). Naopak nejméně vodné roky byly zaznamenány na Otavě v roce 2015 (13,9 m³/s), na Lužnici v roce 2018 (9,3 m³/s) a na Sázavě v roce 1991 (6,8 m³/s). Minimálních ročních průměrných průtoků, které jsou pro Otavu 5,47 m³/s, pro Lužnici 3,25 m³/s a pro Sázavu 3,58 m³/s, nebylo v použité časové řadě dosaženo.

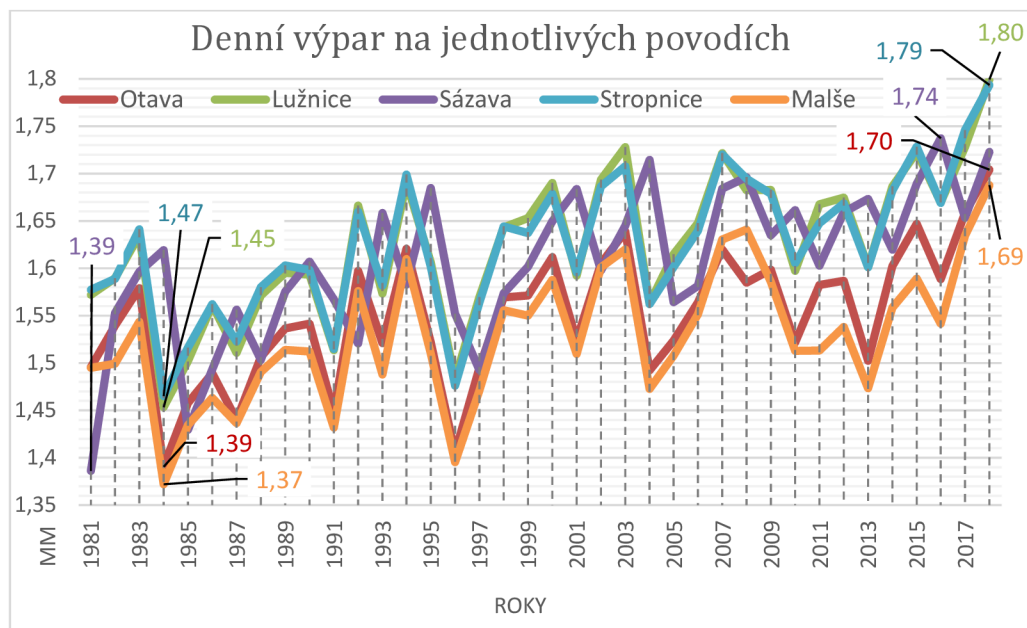


Graf č. 1a: Průměrný roční průtok Otavy, Lužnice a Sázavy v letech 1981-2018



Graf č. 1b: průměrný roční průtok na Malši a Stropnici.

Z grafu č. 1b jsou patrné povodňové roky na Stropnici a Malši (zejména roky 1996 a 2002). Naopak nejméně vodné roky byly zaznamenány na Stropnici v roce 1984 (0,94 m³/s), 1990, 1999 a na Malši v roce 1984 (0,89 m³/s. Minimálních ročních průměrných průtoků, které jsou pro Stropnici 0,36 m³/s a pro Malši 0,68 m³/s, nebylo v použité časové řadě dosaženo. Na grafu 1b je patrné, že vodní nádrž Římov nadlepšuje a udržuje minimální průtok na Malši. Pouze v roce 1984 byl na Malši patrný pokles průměrného ročního průtoky na hodnotu 0,89 m/s, což souviselo s tehdejší suchem v jihočeském kraji, který se vyznačoval srážkovým deficitem a byl doprovázen vysokými teplotami.



Graf č. 1c: průměrná denní potenciální evapotranspirace na vybraných povodích.

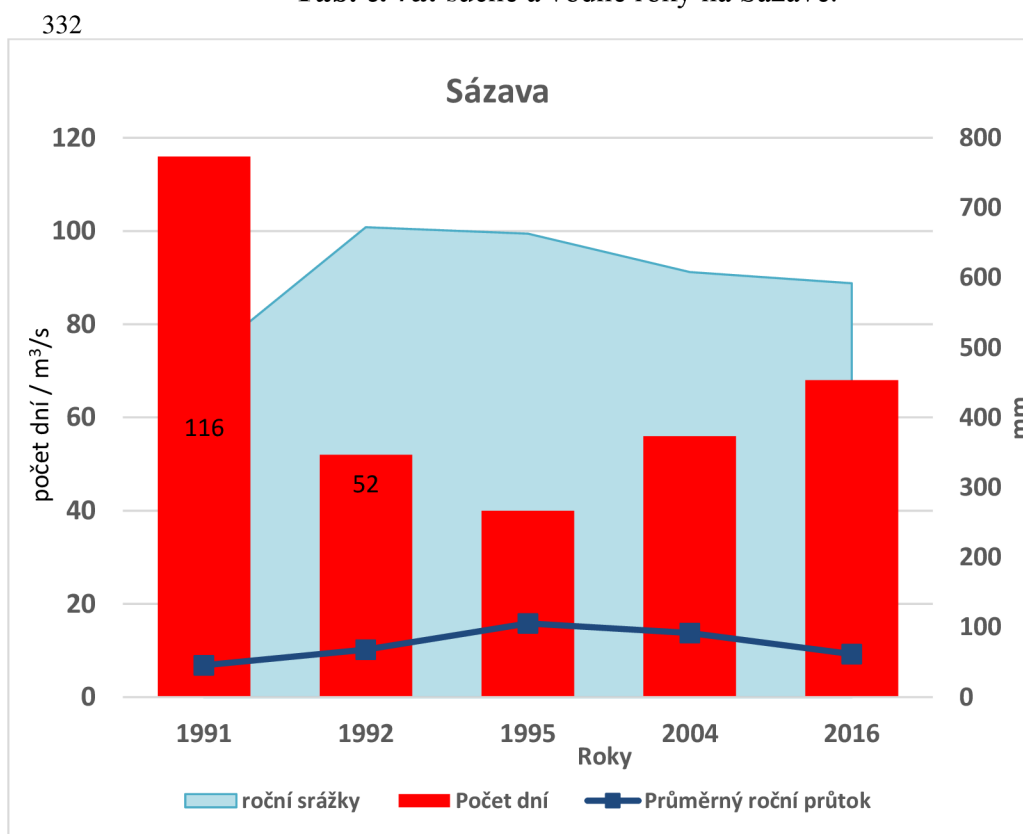
Na grafu č. 1c je prezentován průběh průměrné denní potenciální evapotranspirace vypočtené metodou dle Oudina pro záměrná povodí. V grafu č. 1c si můžeme všimnout vzrůstající průměrné denní potenciální evapotranspirace v průběhu posledních let. Nejvyšší hodnoty průměrné denní potenciální evapotranspirace byly dosaženy na povodích Lužnice (1,80 mm), Sázavy (1,79 mm) a Stropnice (1,74 mm), což může pravděpodobně souviset s nižší průměrnou nadmořskou výškou těchto povodí (zejména Lužnice a Sázavy) a tedy i vyšší průměrnou denní teplotou na těchto povodích, která je vstupem pro výpočet denních hodnot potenciální evapotranspirace. Naopak nejnižší hodnoty průměrné denní evapotranspirace byly na povodí Malše (1,37 mm) a Otavy (1,39 mm), což pravděpodobně souvisí s vyšší průměrnou nadmořskou výškou těchto povodí (zejména Malše) a tedy i nižší průměrnou denní teplotou na těchto povodích.

6.1 Vyhodnocení grafů průměrných ročních průtoků

V tab. č. 7a až 7e a na grafech č. 2a až 2e je prezentováno 5 nejvodnějších a nejsušších roků pro každé povodí. Suché roky byly určeny dle počtu dní v roce, kdy byl průtok nižší než nebo rovný Q_{355} stanovený pro dané povodí pro období 1981–2018. Vodné roky byly vybrány dle ročních srážkových úhrnů a průměrného ročního průtoku.

Tok	Rok	Suché roky			Vodné roky		
		Počet dní	Průměr. roční průtok [m^3/s]	Roční srážky [mm/rok]	Rok	Průměr. roční průtok [m^3/s]	Roční srážky [mm/rok]
Sázava m^3/s	1991	116	6,84	483,75	1988	32,47	786,46
	1992	52	10,20	672,10	2002	27,03	870,19
	1995	40	15,82	662,74	2003	35,60	872,04
	2004	56	13,79	607,81	2007	32,86	783,75
	2016	68	9,26	592,10	2011	38,88	817,69

Tab. č. 7a: suché a vodné roky na Sázavě.



Graf č. 2a: suché roky na Sázavě dle Q_{355} ($3,58 m^3/s$).

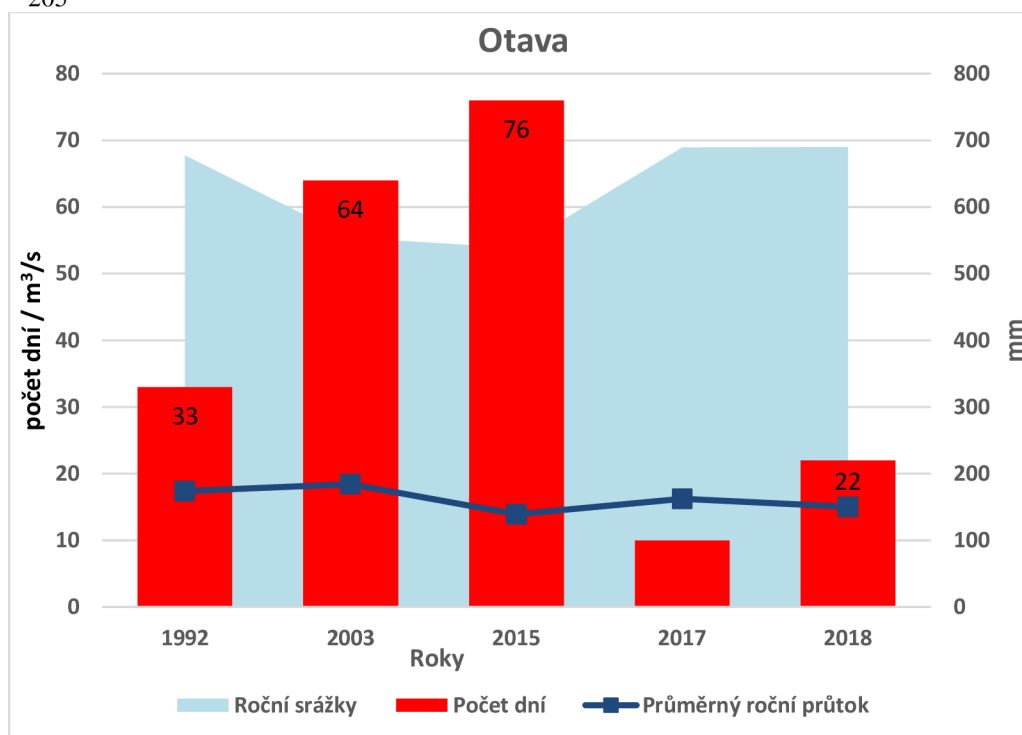
Z obr. č. 2a i tabulky č. 7a je pro povodí Sázavy patrné, že nejsušším rokem byl v počtu dní dle Q_{355} rok 1991 (116 dní), kdy průměrný roční průtok dosahoval $6,84 m^3/s$ s ročními srážkami $484 mm/rok$. Ve zbývajících vybraných suchých letech bylo

Q₃₅₅ zaznamenáno ve výrazně nižším počtu dní (přibližně polovina počtu dní ve srovnání s rokem 1991). Z hlediska ročních srážek byl nejvíce vodný rok 2003 se srážkami 872 mm/rok (průměrný průtok byl 35,6 m³/s). Z hlediska průměrného průtoku byl nejvodnějším rokem rok 2011 s průměrným průtokem 38,88 m³/s (viz tab. č. 7a).

Tok	Rok	Suché roky			Vodné roky		
		Počet dní	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]	Rok	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]
Otava m/s	1992	33	17,38	677,14	1995	33,74	920,03
	2003	64	18,43	554,13	2002	54,04	1187,68
	2015	76	13,91	538,60	2006	32,87	829,16
	2017	10	16,25	689,41	2009	32,44	938,55
	2018	22	15,02	690	2013	33,25	815,70

Tab. č. 7b: suché a vodné roky na Otavě.

205



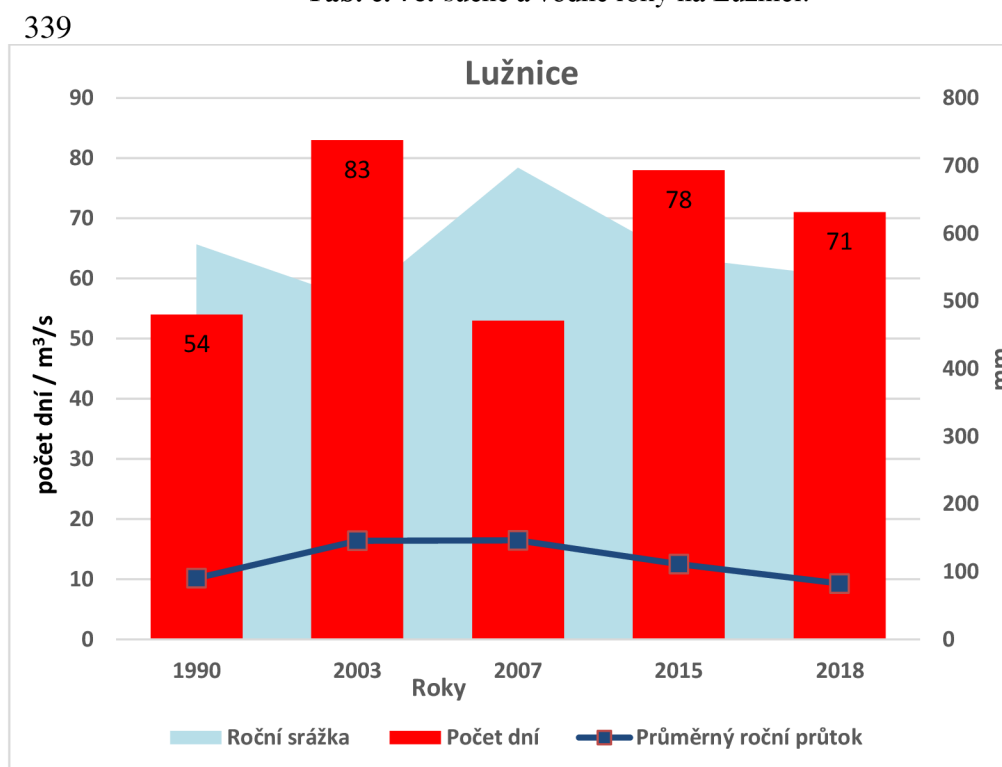
Graf. č. 2b: suché roky na Otavě dle Q₃₅₅ (5,47 m³/s).

Z obr. č. 2b i tabulky č. 7b je pro povodí Otavy patrné, že nejsušším rokem byl v počtu dní dle Q₃₅₅ rok 2015 (76 dní) s ročními srážkami 538,60 mm/rok. Druhým nejsušším rokem byl rok 2003 (64 dní s Q₃₅₅). Pro zbývající vybrané suché roky jsou patrné výrazně nižší počty dní s Q₃₅₅ (přibližně poloviční počet dní ve srovnání s roky 2015 a 2003). Z hlediska ročních srážek i ročního průtoku byl nejvodnějším

rokem rok 2002 díky intenzivním srážkám od června do srpna, kdy průtok dosahoval skoro dvojnásobné hodnoty ostatních vodných let (viz tab. č. 7b). Pro ostatní vybrané vodné roky jsou průměrné roční průtoky velmi podobné.

Tok	Rok	Suché roky			Vodné roky		
		Počet dní	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]	Rok	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]
Lužnice m/s	1990	54	10,19	583,58	1987	40,33	805,08
	2003	83	16,38	501,15	2002	54,59	1005,54
	2007	53	16,46	697	2006	41,58	761,69
	2015	78	12,53	564,27	2010	33,63	812,22
	2018	71	9,29	536,69	2013	40,85	771,08

Tab. č. 7c: suché a vodné roky na Lužnici.



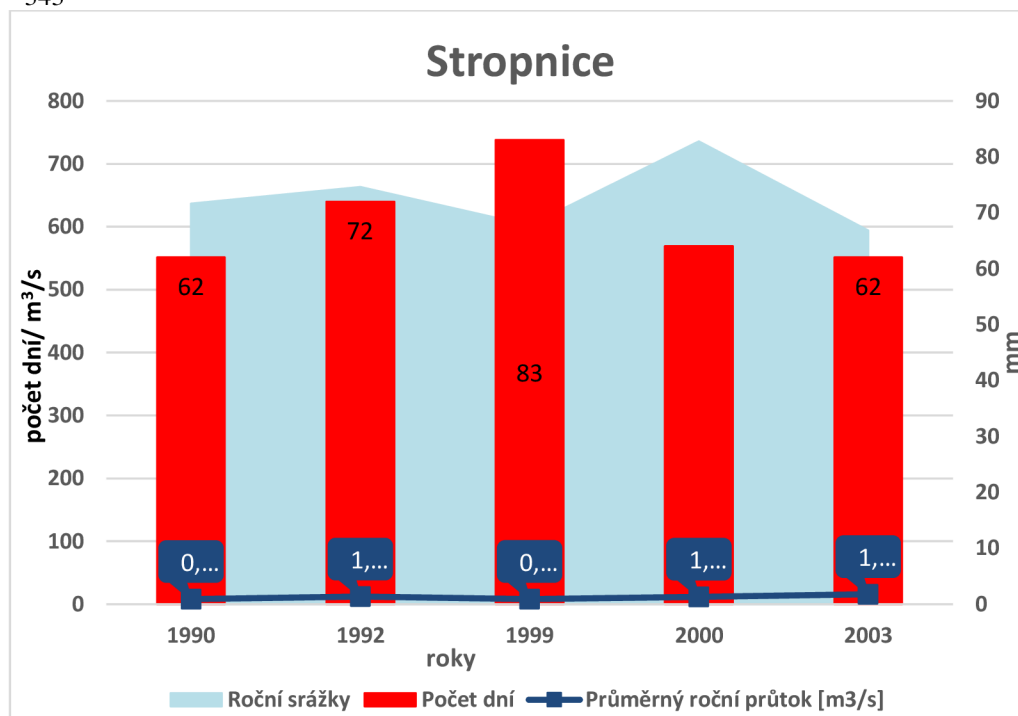
Graf č. 2c: suché roky na Lužnici dle Q_{355} (5,47 m³/s).

Z obr. č. 2c i tabulky č. 7c je pro povodí Lužnice patrné, že nejsušším rokem v počtu dní dle Q_{355} byl rok 2003 (83 dní), kdy byl průměrný roční průtok 16,38 m³/s s ročními srážkami 501 mm/rok. Z hlediska ročních srážek i průměrného ročního průtoku byl nejvodnějším rokem rok 2002 zejména v důsledku intenzivního deště v červnu, srpnu a říjnu (viz tab. č. 7c).

Tok	Rok	Suché roky			Vodné roky		
		Počet dní	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]	Rok	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]
Stropnice m/s	1990	62	0,91	636,99	1996	4,67	885,37
	1992	72	1,34	663,04	2002	6,42	804,09
	1999	83	0,92	602,03	2006	4,05	671,50
	2000	64	1,32	735,67	2009	4,16	602,03
	2003	62	1,78	594,10	2013	4,05	735,67

Tab. č. 7d: suché a vodné roky na Stropnici.

343

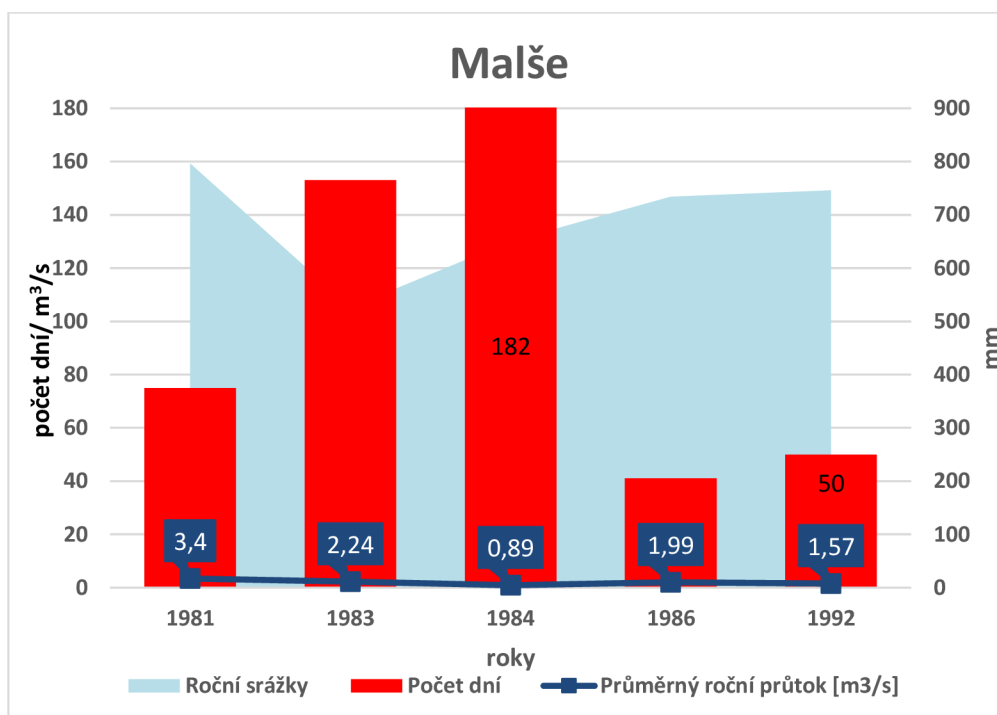


Graf č. 2d: suché roky na Stropnici dle Q_{355} (0,36 m³/s).

Z obr. č. 2d i tabulky č. 7d je pro povodí Stropnice patrné, že nejsušším rokem v počtu dní dle Q_{355} byl rok 1999 (83 dnů) s ročními srážkami 602 mm/rok. Ostatní suché roky vykazují podobné délky období, kdy průměrný průtok byl nižší nebo roven Q_{355} . Z hlediska ročních srážek vodným rokem byl rok 1996, kdy byl průměrný roční průtok 4,7 m³/s s ročními srážkami 885 mm/rok. Z hlediska průměrného průtoku byl nejvodnějším rokem rok 2002 díky intenzivním srážkám v červnu, srpnu a říjnu (viz tab. č. 7d).

Tok	Rok	Suché roky			Vodné roky		
		Počet dní	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]	Rok	Průměr. roční průtok [m ³ /s]	Roční srážky [mm/rok]
Malše m/s	1981	75	3,40	796,35	1996	4,55	868,41
	1983	153	2,24	526,43	2002	8,46	1171,66
	1984	182	0,89	650,45	2006	4,64	842,48
	1986	41	1,99	733,95	2009	5,06	1023,40
	1992	50	2,27	653,29	2013	5,50	883,26

Tab. 7e: suché a vodné roky na Malši.



Graf č. 2e: suché roky na Malši dle Q_{355} (0,68 m/s).

Z obr. č. 2d i tabulky č. 7d je pro povodí Stropnice patrné, že nejsušším rokem v počtu dní dle Q_{355} byl rok 1984 (182 dnů), kdy byl průměrný roční průtok 0,89 m³/s s ročními srážkami 650 mm/rok. Druhý nejsušší rok byl rok 1983 se 153 dny, kdy byl průtok pod hodnotou nebo roven Q_{355} . Z hlediska ročních srážek i průměrného ročního průtoku byl nejvodnějším rokem rok 2002 v důsledku převládajícího intenzivního deště v červnu, červenci, srpnu a říjnu.

Povodí Malše v 5 nejsušších obdobích dosáhlo největšího celkového počtu suchých 501 dní, kdy byly průtoky pod hodnotou nebo rovny Q_{355} .

6.2 Standardizovaný srážkový index sucha SPI na jednotlivých povodích

Na základě agregovaných měsíčních srážkových dat od roku 1981 – 2018 byly vypočteny, pomocí R balíku SPEI, indexy sucha SPI pro jednotlivá povodí. Standardizovaný srážkový index sucha (SPI) se počítal pro období 12 měsíců. Kód použitý při výpočtu SPI indexu je prezentován v příloze č. 2 diplomové práce.

Výsledky analýzy sucha, formou indexu SPI, jsou prezentovány na grafech č. 4a až 4e. V tab. č. 8 následuje podrobnější textová analýza – nejčastější situace na povodí, tj. která povodí byla nejvíce náchylná na silné a extrémní sucho. Na grafech č. 3a až 3e je prezentováno procentuální zastoupení kategorií sucha dle SPI pro jednotlivá povodí.

Hodnoty SPI	SPI kategorie	Počet měsíců				
		Otava	Lužnice	Sázava	Stropnice	Malše
≥ 0	Extrémní vlhko	16	17	13	17	17
1.5-1.99	Silné vlhko	8	9	23	16	17
1-1.49	Střední vlhko	32	46	37	34	21
-0,99 až +0,99	Normální stav	320	296	305	312	330
-1.49 až -1	Střední sucho	43	50	39	54	42
-1.99 -1.5	Silné sucho	22	26	18	12	8
≤ -2	Extrémní sucho	4	1	10	0	10

Tab. č. 8: Klasifikace dle standardizovaného srážkového indexu SPI (McKee et al., 1993)

Index standardizovaného srážkového indexu v období od roku 1981–2018 jasně ukazuje, že na všech analyzovaných povodích převládal normální stav (od 296 měsíců do 330 měsíců, tj. 67 % až 74 % ze všech měsíců v rámci časových řad - viz grafy č. 3a až 3e a grafy č. 4a až 4e). Vlhkých měsíců bylo 12 % až 16 % z celkového počtu měsíců časových řad v závislosti na povodí (nejméně vlhkých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Otavy - viz graf. č. 3a a nejvíce vlhkých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Lužnice a Sázavy – viz grafy č. 3b a 3c), přičemž nejčastěji byla zaznamenána kategorie středního vlhka (viz tab. č. 8). Suchých měsíců bylo zaznamenáno 13 % až 17 % v závislosti na povodí (nejvíce suchých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Lužnice – viz graf. č. 3b a nejméně suchých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Malše – viz graf. č. 3e). Z tab. 8 je patrné, že nejvíce měsíců spadajících do kategorie extrémní sucha bylo zaznamenáno na povodích Sázavy a Malše.

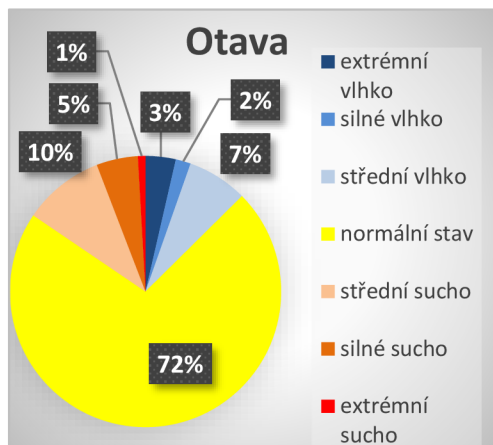
Z grafů č. 4a až 4e jsou patrné periody sucha v letech 1983 – 1984 (zasažena všechna povodí, extrémní sucho na Malši – viz graf. č. 4e), 1990 – 1992 (zasažena všechna

povodí, extrémní sucho na Sázavě – viz graf č. 4c), 1997 na Otavě, 2002 – 2003 (zasažena všechna povodí), 2013 – 2015 (zasažena všechna povodí, extrémní sucho na Otavě a Lužnici – viz grafy č. 4a a 4b) a 2017 – 2018 na Lužnici.

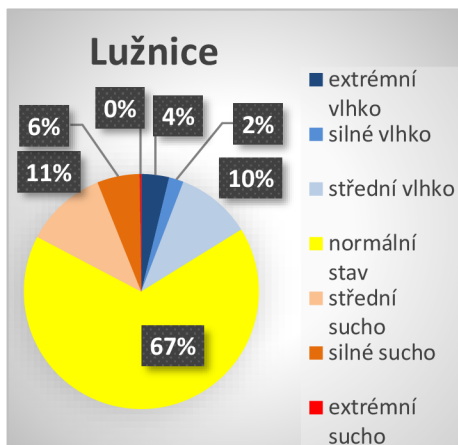
Grafy č. 4a až 4e dále ukazují vlhké periody: 2001 – 2002 na všech povodích (dle kategorie SPI se na všech povodích jednalo o extrémně vlhké období), 2004 – 2005 na všech povodích, 2008 – 2009 na všech povodích, 2012 – 2013 na všech povodích. Z hlediska period sucha dle SPI indexu lze považovat období 1981 – 2000 za normální až suché, 2001 – 2013 za normální až vlhké s několika lokalizovanými periodami sucha. Období 2014 – 2018 lze považovat za spíše suché.

Nejčastěji zasaženo suchem, dle indexu SPI, bylo povodí Lužnice (tj. bylo zaznamenáno 77 suchých měsíců – viz tab. č. 8, a tedy 17 % suchých měsíců – viz graf č. 3b), a to pravděpodobně z důvodu nejmenšího srážkového úhrnu za celé sledované období mezi analyzovanými povodími. Povodí Malše bylo nejméně zasaženo suchem (60 suchých měsíců, tj. 13 %). Na povodí Malše bylo zaznamenáno 385 měsíců vlhkého/normálního stavu (tj. 87 %), a to pravděpodobně díky nejvyššímu srážkovému úhrnu ve sledovaném období mezi analyzovanými povodími.

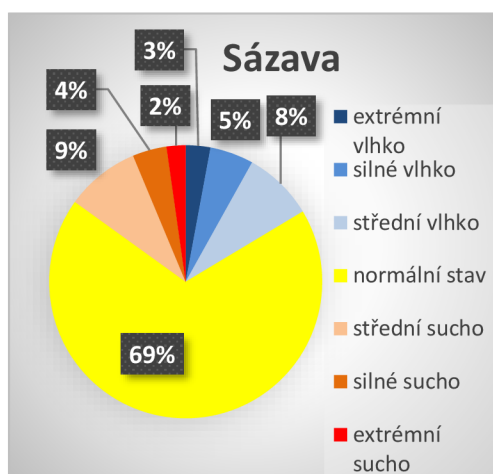
a)



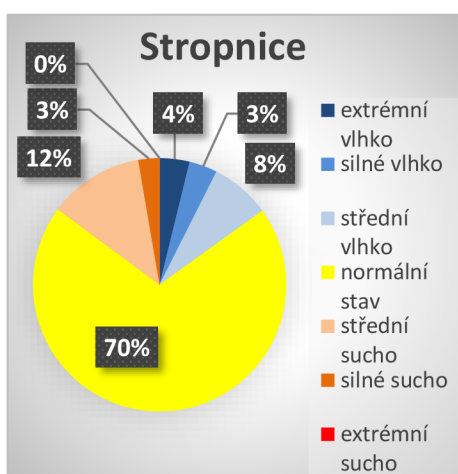
b)



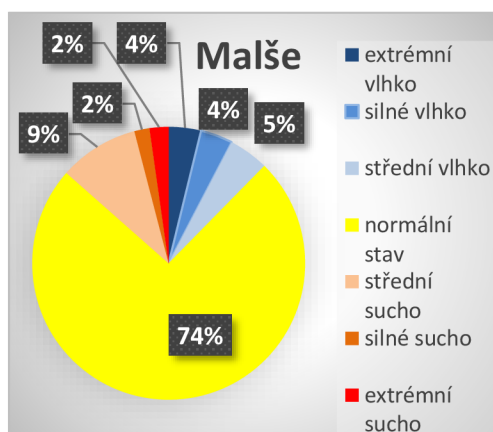
c)



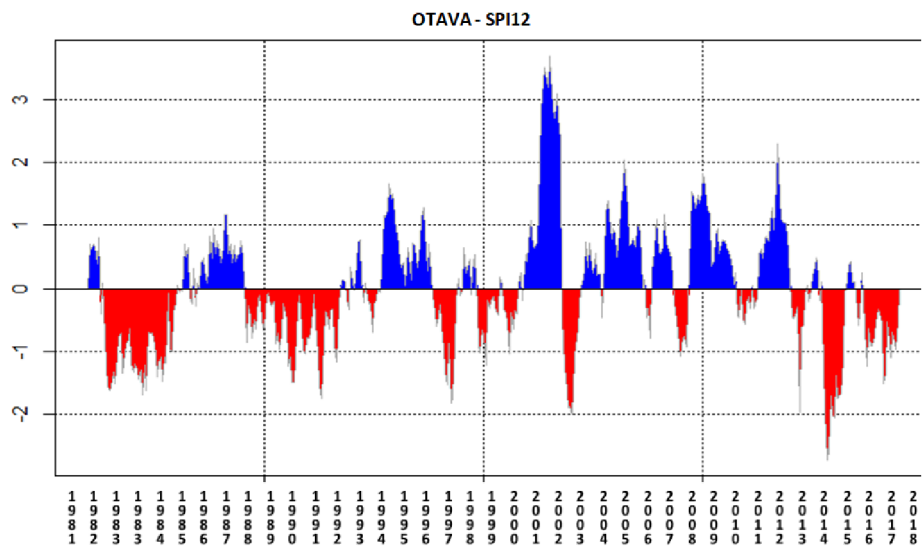
d)



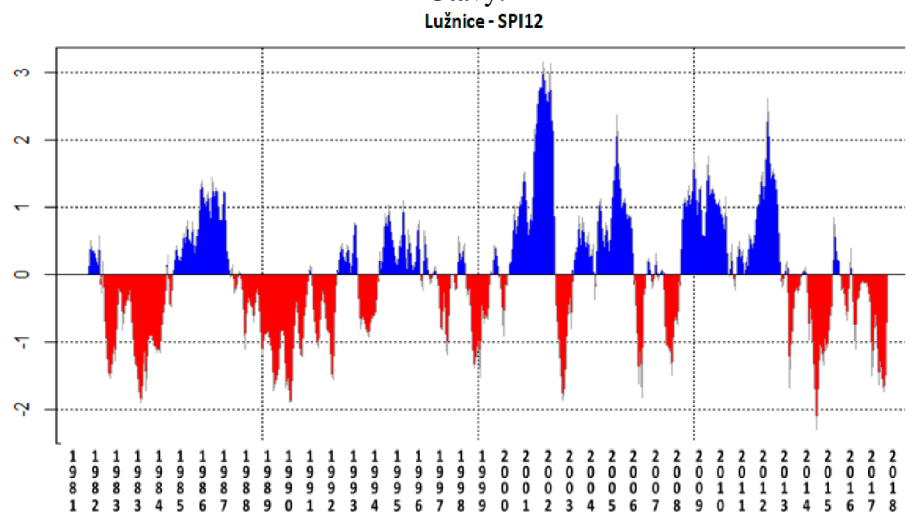
e)



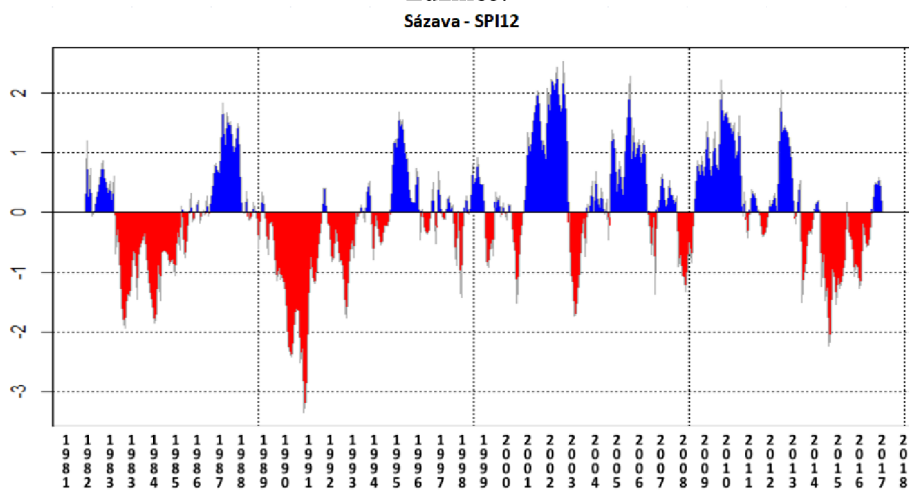
Graf č. 3: procentuální zastoupení měsíců spadajících do kategorií sucha dle indexu SPI pro povodí Otavy (a), Lužnice (b), Sázavy (c), Stropnice (d) a Malše (e).



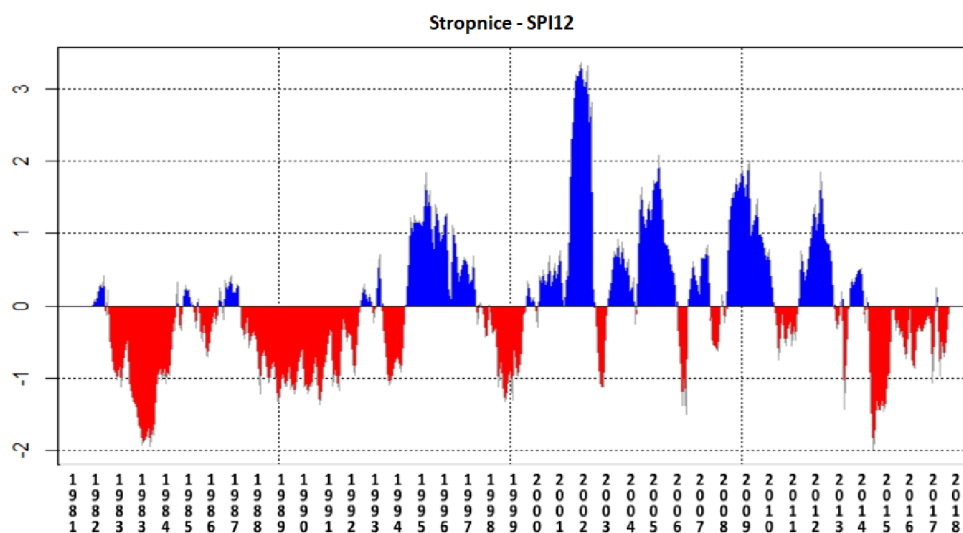
Graf č. 4a: průběh srážkového indexu SPI v období 1981 až 2018 pro povodí Otavy.



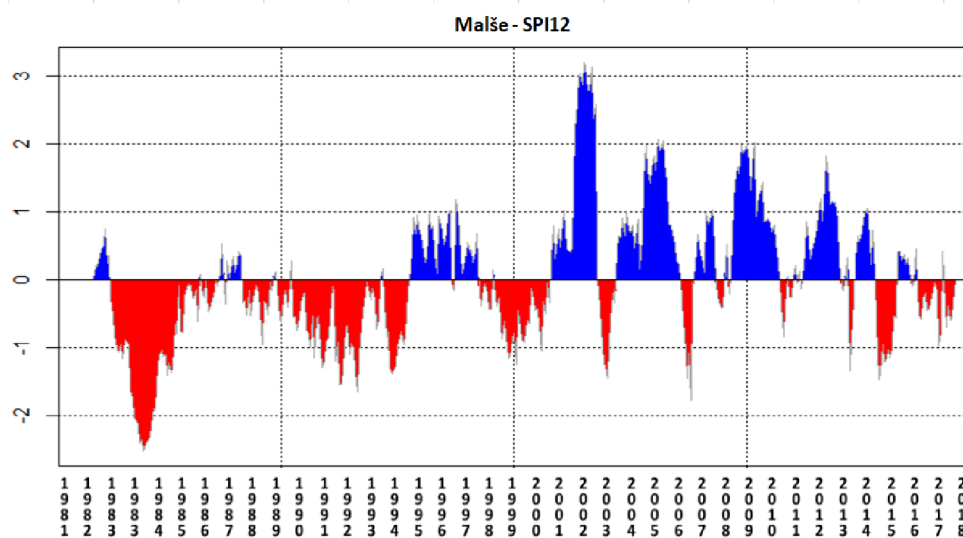
Graf č. 4b: průběh srážkového indexu SPI v období 1981 až 2018 pro povodí Lužnice.



Graf č. 4c: průběh srážkového indexu SPI v období 1981 až 2018 pro povodí Sázavy.



Graf č. 4d: průběh srážkového indexu SPI v období 1981 až 2018 pro povodí Stropnice.



Graf č. 4e: průběh srážkového indexu SPI v období 1981 až 2018 pro povodí Mašče.

6.3 Standardizovaný srážkový evapotranspirační index SPEI na jednotlivých povodích

Pro výpočet SPEI byla využita metoda odhadu PET dle Thornthwaitea (1948), kdy vstupními daty pro výpočet indexu byly průměrné měsíční teploty a zeměpisná šířka (latitude) jednotlivých povodí.

Z průměrných denních teplot byly vypočteny průměrné měsíční teploty pro jednotlivá povodí pro období 1981 – 2018. Dále byly, pomocí R balíku SPEI, vypočteny indexy sucha SPEI pro jednotlivá povodí. Standardizovaný srážkový-evapotranspirační index sucha (SPEI) se počítal pro období 12-ti měsíců. Kód použitý při výpočtu SPEI indexu je prezentován v příloze č. 3 diplomové práce.

Výsledky analýzy sucha, formou indexu SPEI, jsou prezentovány na grafech č. 6a až 6e. V tab. č. 9 následuje podrobnější textová analýza – nejčastější situace na povodí, tj. která povodí byla nejvíce náchylná na silné a extrémní suchu. Na grafech č. 5a až 5e je prezentováno procentuální zastoupení kategorií sucha dle SPEI pro jednotlivá povodí.

Kategorie sucha podle indexu SPEI		Počet měsíců				
		Otava	Lužnice	Sázava	Stropnice	Malše
0	bez výskytu sucha (nad -0,1)	252	258	251	262	255
1	slabé sucho (-0,1 až -0,8)	87	89	88	80	85
2	mírné sucho (-0,8 až -1,2)	43	42	44	41	41
3	výrazné sucho (-1,2 až -1,6)	34	33	32	35	37
4	výjimečné sucho (-1,6 až -2,0)	28	23	30	27	25
5	extrémní sucho (pod -2,0)	1	3	0	3	2

Tab. č. 9: Hodnocení indexu sucha SPEI (ČHMÚ, ©2020).

Index standardizovaného srážkového evapotranspiračního indexu SPEI v období od roku 1981–2018 jasně ukazuje, že na všech analyzovaných povodích převládal stav bez výskytu sucha (od 252 měsíců do 262 měsíců, tj. 57 % až 58 % ze všech měsíců v rámci časových řad - viz grafy č. 5a až 5e a grafy č. 6a až 6e. Dle hodnocení

indexu sucha SPEI dle tab. č. 9 bylo suchých měsíců zaznamenáno 42 % až 47 % v závislosti na povodí (nejvíce suchých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Otavy – viz graf. č. 5a a nejméně suchých měsíců bylo zaznamenáno na povodí Lužnice a Stropnice – viz graf. č. 5b, 5d). Z tab. 8 je patrné, že nejvíce měsíců spadajících do kategorie extrémní sucho bylo zaznamenáno na povodích Lužnice a Stropnice.

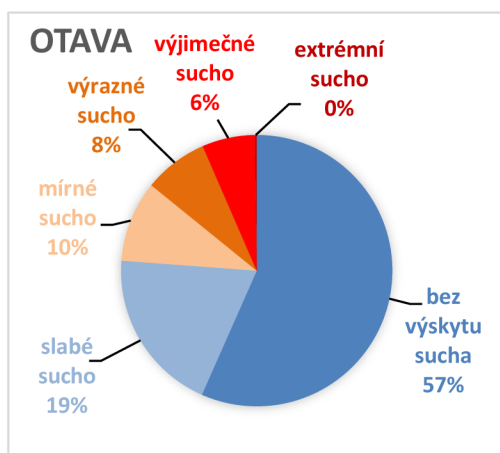
Z grafů č. 6a až 6e jsou patrné periody sucha v letech 1985 – 1987 (zasažena všechna povodí, nejvíce period extrémního sucha bylo na Lužnici – viz graf. č. 6b), mírné a výrazné sucho bylo zaznamenáno v letech 1982, 1991 a 1992 (zasažena všechna povodí, nejvíce však na Sázavě – viz graf č. 6c), roky 1996 - 1997 (zasažena všechna povodí, nejvíce epizod výjimečného sucha bylo na povodí Stropnice – viz graf č. 6d), rok 2006 (zasažena všechna povodí, výrazné sucho na Otavě a Stropnici – viz grafy č. 6a a 6d).

Grafy č. 6a až 6e dále ukazují periody bez výskytu sucha: 1989 – 1990 na všech povodích (dle kategorie SPEI se na všech povodích jednalo o stav bez výskytu sucha), 1994 – 1995 na všech povodích, 1999 – 2003 na všech povodích, 2008 – 2009 na všech povodích, 2012 – 2018 na povodí Otavy, Sázavy, Lužnice a Stropnice (grafy č. 6a až 6d), 2014 – 2018 na povodí Malše viz graf č. 6e.

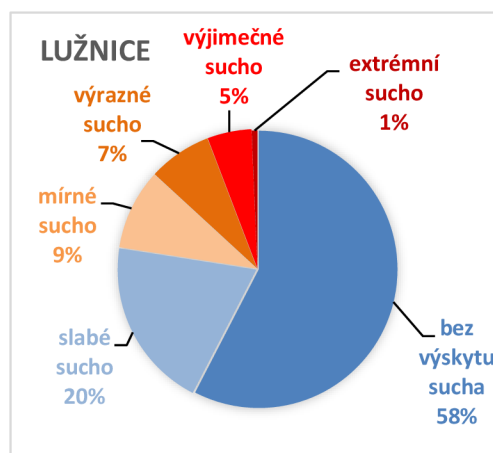
Z hlediska period sucha dle SPEI indexu lze považovat období 1981 – 1997 za suché s několika periodami slabého sucha a stavu bez výskytu sucha, 1998 – 2000 bylo období bez výskytu sucha až slabého sucha s občasnými periodami mírného a výrazného sucha. Období 2007– 2018 lze považovat za stav bez výskytu sucha.

Nejčastěji zasaženo suchem dle indexu SPEI bylo povodí Sázavy (tj. bylo zaznamenáno 194 suchých měsíců – viz tab. č. 9, a tedy 44 % suchých měsíců – viz graf č. 5c). Povodí Lužnice bylo nejméně zasaženo suchem – 101 suchých měsíců (tj. 22 %) a 347 měsíců bez výskytu sucha nebo slabého sucha (tj. 78 %).

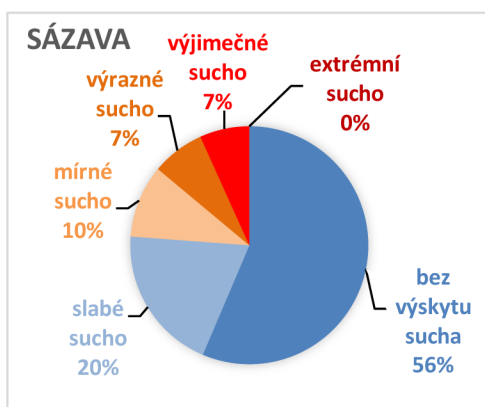
a)



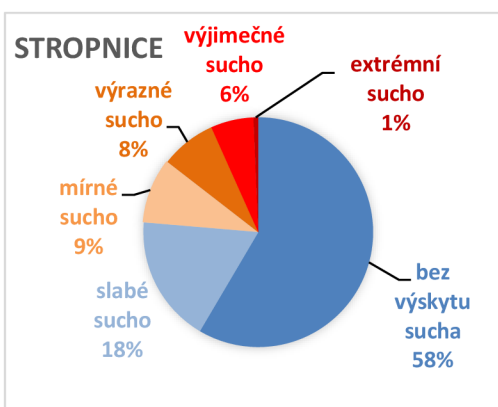
b)



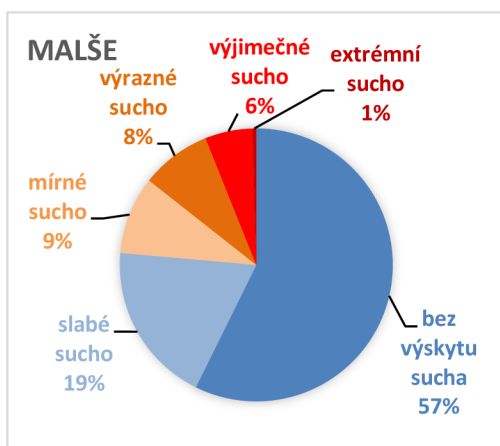
c)



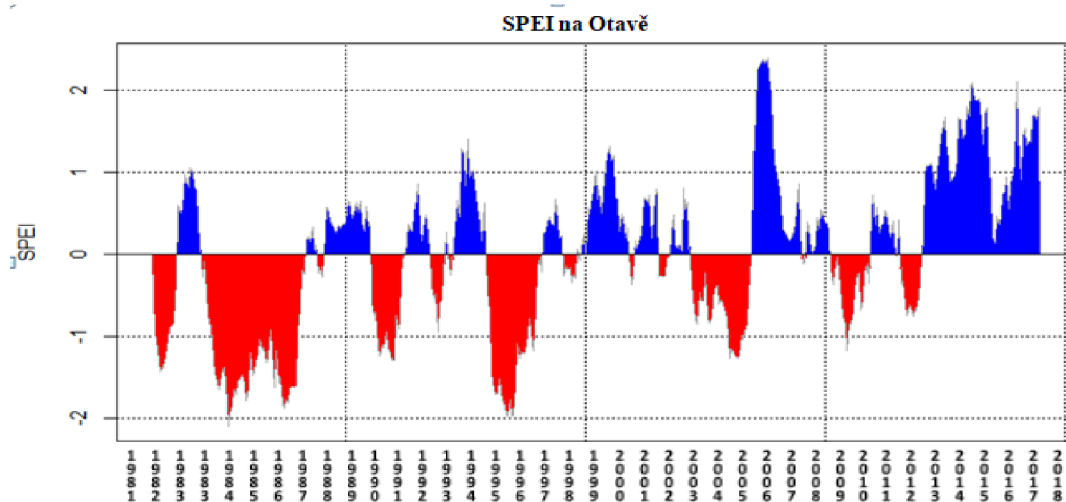
d)



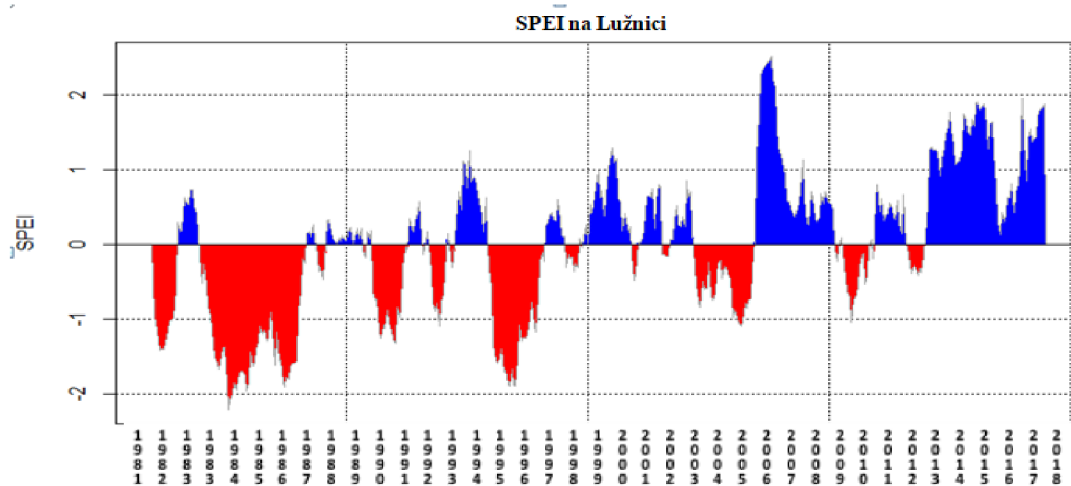
e)



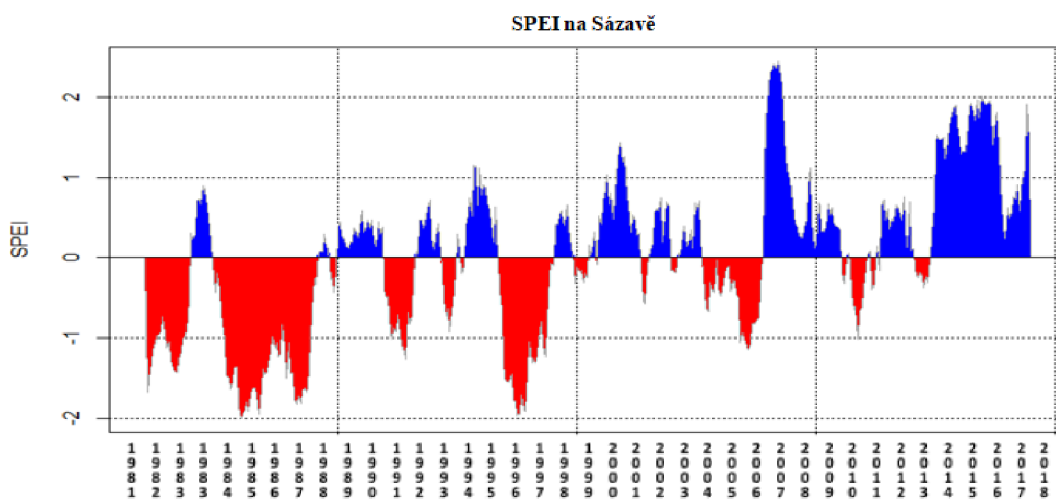
Graf č. 5: procentuální zastoupení měsíců spadajících do kategorií sucha dle indexu SPEI pro povodí Otavy (a), Lužnice (b), Sázavy (c), Stropnice (d) a Malše (e).



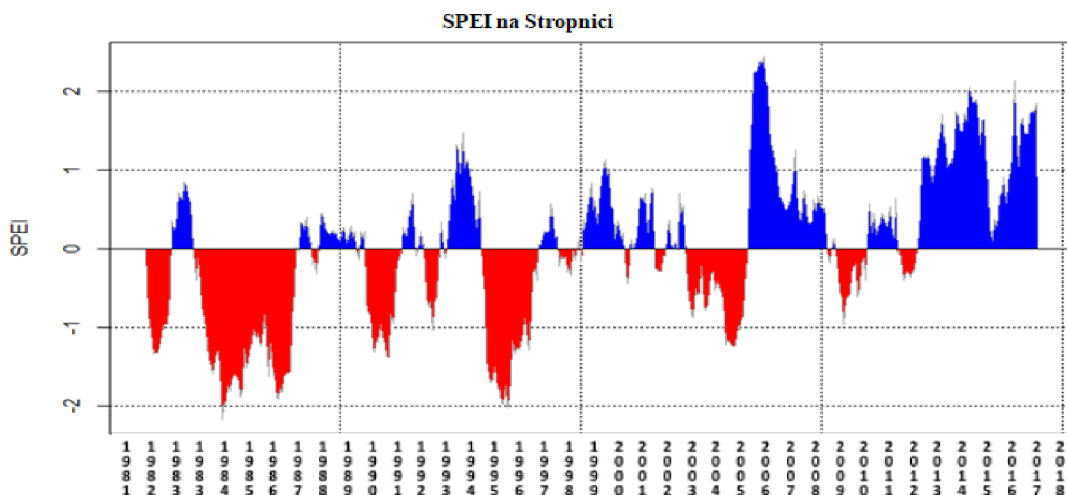
Graf č. 6a: standardizovaný evapotranspirační index SPEI v období 1981 až 2018 na Otavě.



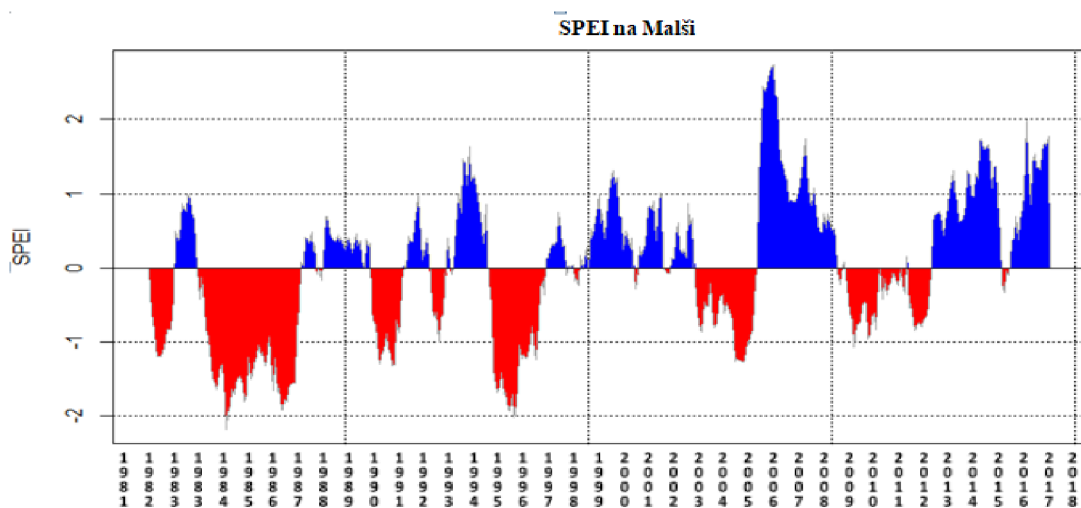
Graf č. 6b: standardizovaný evapotranspirační index SPEI v období 1981 až 2018 na Lužnici.



Graf č. 6c: standardizovaný evapotranspirační index SPEI v období 1981 až 2018 na Sázavě.



Graf č. 6d: standardizovaný evapotranspirační index SPEI v období 1981 až 2018 na Stropnici.



Graf č. 6e: standardizovaný evapotranspirační index SPEI v období 1981 až 2018 na Malši.

7 Diskuze

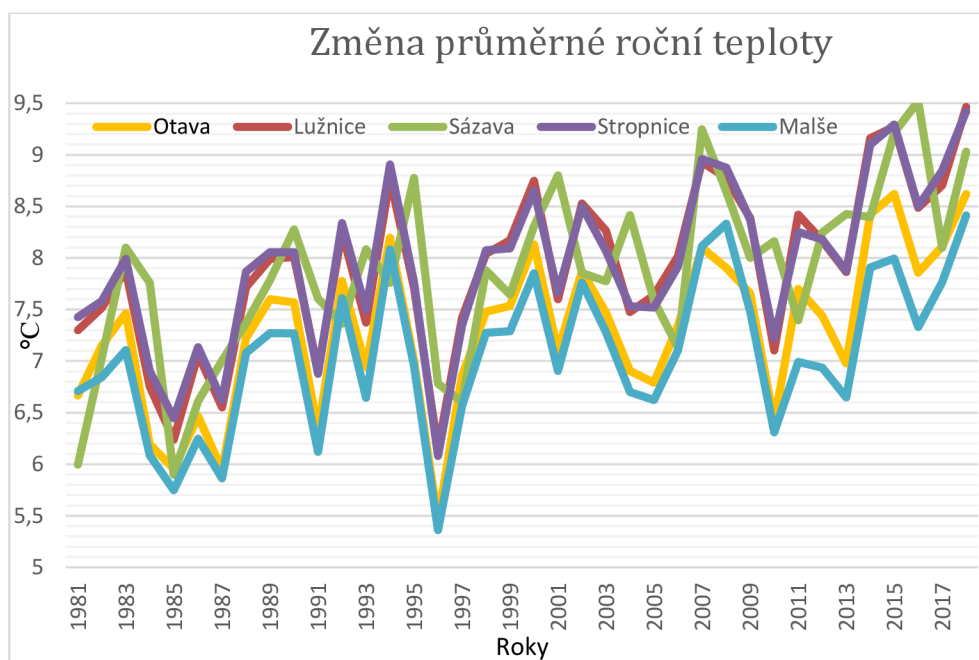
Území ČR je zcela závislé na atmosférických srážkách, proto je třeba co nejvíce zdržovat vodu v krajině a vodních tocích (VODA-SUCHO, 2015).

Do budoucna lze očekávat vlivem změny klimatu růst průměrné denní teploty a s tím spojený růst evapotranspirace. Díky tomu lze očekávat vyšší ztráty vody z povodí právě ve formě evapotranspirace, což jistě negativně ovlivní průtoky ve vodních tocích (Van Loon, 2015).

V letech 1992, 2000, 2003 a 2007 postihly území ČR extrémní suché epizody, které byly umocněné vysokými teplotami, díky tomu došlo k poklesu průtoku řek na kritickou hodnotu Q_{355} (což je patrné i na grafech č. 1a a 1b), ale i úbytku podzemních vod (Brázdil et al., 2015). Z grafu č. 1b je patrný pozitivní vliv lokace VD Římov na průtoky v Malši (VD nadlepšuje průtok pod hrází) v porovnání s povodím Stropnice (které je přibližně stejně velké jako povodí Malše). Z výsledků lze usuzovat, že přítomnost VD v povodí může omezit výskyt hydrologického sucha pod VD i při výskytu meteorologického sucha na povodí (viz např. perioda počínajícího až probíhajícího meteorologického sucha v letech 1988 až 1994 na grafech č. 4e a 6e, kdy průměrný roční průtok neklesl pod $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Nadlepšováním průtoku pod hrází však nesmí být ohroženy další funkce VD, zejména pokud je VD využíváno jako zdroj pitné vody. VD Římov je významným zdrojem pitné vody pro České Budějovice a okolí. V letech 1983 až 1984 bylo zaznamenáno extrémní sucho v povodí Malše dle obou indexů (grafy č. 4e a 6e) a zároveň nejvyšší počty dní v roce, kdy průtok uzávěrovým profilem byl nižší nebo roven Q_{355} (viz graf č. 2e), což může naznačovat, že průtok pod hrází byl nadlepšován pouze minimálně nebo vůbec, aby nedošlo k ohrožení zdroje pitné vody.

Porovnáme-li vliv umístění VD v povodí Malše (před uzávěrovým profilem) a Sázavy (na přítoku do Sázavy a ve velké vzdálenosti od uzávěrového profilu), pak lze konstatovat, že lokace VD Švihov na Želivce má minimální vliv na nadlepšování průtoku v Sázavě. Naopak, kvůli odběrům vody pro zásobování Prahy a okolí pitnou vodou dochází v povodí Sázavy k poklesu dlouhodobého průměrného průtoku, měřeno v limnigrafické stanici Kácov (Šercl, Kukla, 2015). Tím pak může dojít

k prohloubení hydrologického sucha v povodí, které je následkem sucha meteorologického.



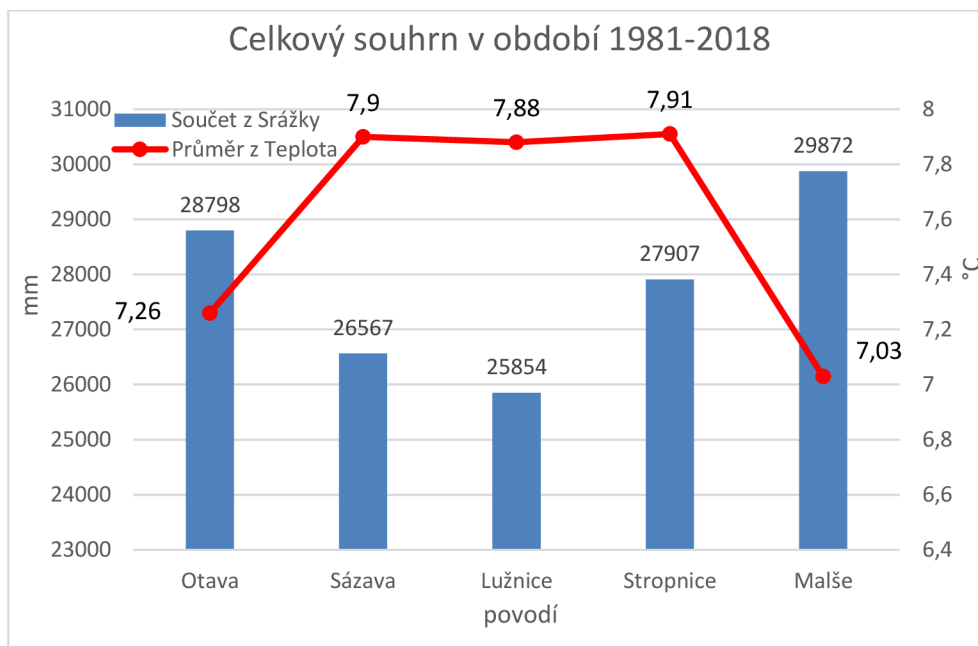
Graf č. 7: změna průměrné roční teploty na studovaných povodích.

Stoupající průměrné denní hodnoty potenciální evapotranspirace v grafu č. 1c lze vysvětlit pomocí grafu č. 7, kde jsou prezentovány průměrné roční teploty na studovaných povodích. Z tohoto grafu je patrný nárůst průměrných ročních teplot na všech povodích. Lze očekávat, že s růstem průměrné roční teploty také porostou průměrné denní teploty, které jsou základem pro výpočet denních hodnot potenciální evapotranspirace metodou dle Oudina.

Porovnáme-li výsledky prezentované na grafech č. 4a až 4e a 6a až 6e, v tabulkách č. 8 a 9 a na grafech č. 3 a 5, pak můžeme konstatovat, že index SPEI je pesimističtější měřítko vyhodnocení sucha než index SPI, neboť vedl k vyššímu počtu měsíců, které byly hodnoceny jako suché (o cca 40) v porovnání s indexem SPI. Tento výsledek lze pravděpodobně spojit s tím, jaká vstupní data oba indexy využívají. Index SPI využívá pouze měsíční srážková data, na rozdíl od indexu SPEI, který využívá jako vstup výsledek jednoduché bilance mezi srážkami a potenciální evapotranspirací v měsíčním kroku. Zaměříme-li se více na kategorii extrémního sucha, pak je přísnějším kritériem index SPI, co do počtu povodí, tak i počtu měsíců, kdy toto extrémní sucho bylo indikováno. Tento výsledek je překvapivý právě kvůli povaze

vstupních dat při výpočtu obou indexů. Pravděpodobným vysvětlením tohoto výsledku může být skutečnost, že roky, kdy tato extrémní sucha nastala, byly srážkově velmi deficitní. Tento výrazný srážkový deficit ovlivnil výpočet indexu SPI, který pak byl, co do hodnocení, pesimističtější, než index SPEI.

S indexem SPEI, na rozdíl od indexu SPI, je spojena vyšší míra nejistoty získaných výsledků. Tato skutečnost souvisí s tím, že sám odhad potenciální evapotranspirace je nejistý a tato nejistota se pak následně propaguje do výpočtu indexu. Lze očekávat, že výpočet indexu SPEI, který využívá k odhadu potenciální evapotranspirace různé metody (v R balíku SPEI se jedná o metody dle Thorntwaita, dle Hargreavse a dle Penman-Monteitha) může vést v rámci jednoho povodí a vybraného konkrétního období k různým hodnotám tohoto indexu a tedy i odlišné klasifikaci dle tabulky č. 9. Toto lze demonstrovat např. pomocí grafů č. 4a až 4e a 6a až 6e pro období 2014 až 2018, kdy dle indexu SPI lze hovořit nejčastěji o normálním stavu až suchu, ale v případě indexu SPEI nebylo sucho zaznamenáno. Pravděpodobným vysvětlením tohoto výsledku může být, že použitá metoda dle Thorntwaita pro výpočet měsíční potenciální evapotranspirace podhodnocuje potenciální evapotranspiraci při daných podmínkách a proto bilance srážek a potenciální evapotranspirace je spíše kladná. Ovšem tento argument by bylo vhodné podpořit výsledky, kdy by při výpočtu indexu SPEI byla využita např. metoda dle Hargreavse nebo dle Penman-Monteitha a vypočtené hodnoty měsíčních potenciálních evapo-transpirací uvedených metod by se vzájemně porovnali.



Graf č. 8: celkové srážky a dlouhodobá průměrná teplota za studované období analyzovaných povodí.

Celkové výsledky ukazují, že nejméně zasažená suchem jsou povodí Malše a Otavy (z hlediska počtu měsíců, které nebyly vyhodnoceny jako suché dle obou indexů). Tento výsledek je pravděpodobně spojen s vyššími srážkovými úhrny (vliv na výpočet indexu SPI) za celé období a nižšími dlouhodobými průměrnými teplotami (viz graf. č. 8). Nižší teploty, které jsou pravděpodobně důsledkem vyšších nadmořských výšek povodí, vedou k nižším hodnotám potenciální evapotranspirace a tedy i pozitivnější bilanci mezi ní a srážkami. To pak ovlivňuje výpočet indexu SPEI. Naopak, mezi povodí nejnáchylnější k suchu patří povodí Sázavy a Lužnice. Tento výsledek je pravděpodobně spojen s nižšími srážkovými úhrny (vliv na výpočet indexu SPI) za celé období a vyššími dlouhodobými průměrnými teplotami (vliv na výpočet indexu SPEI).

8 Závěr a přínos práce

Hlavním cílem diplomové práce bylo vyhodnocení hydrologického a meteorologického sucha na vybraných vodních tocích (Otava, Lužnice, Sázava, Malše a Stropnice).

Sucho bylo hodnoceno na základě dvou zvolených indexů – standardizovaný srážkový index (SPI) a standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI). Pro každé povodí byla sestavena kolekce vstupních dat obsahující časové řady srážek, průměrné denní teploty, potenciální evapotranspirace a odtoku v denním kroku. Z vybraných dat pak byly zvolené indexy počítány.

Výsledky ukazují, že dle klasifikace spojené s indexem SPI, bylo suchem nejčastěji ohroženo povodí Lužnice (77 suchých měsíců a nejmenší celkový srážkový úhrn mezi všemi povodími za analyzované období). Oproti tomu povodí Malše bylo, dle klasifikace SPI, nejméně zasaženo suchem (60 suchých měsíců a největší celkový srážkový úhrn mezi všemi povodími za analyzované období).

Z výsledků dále vyplývá, že nejčastěji ohroženo suchem, dle indexu SPEI, bylo povodí Sázavy, kde bylo zaznamenáno 106 suchých měsíců. Dle indexu SPEI bylo povodí Lužnice nejméně ohroženo suchem (pouze 101 suchých měsíců, nejvíce epizod bez výskytu sucha).

Získané výsledky ukazují rozdíly mezi oběma indexy, které pravděpodobně souvisejí s typem vstupních dat, která jsou při výpočtu daného indexu použita.

- 12) Dashtpajardi M. M., Kousari R. M., Vagharfard H., Ghonchepour D., Hosseini E. M., Ahani H., 2014: An investigation of drought magnitude trend during 1975–2005 in arid and semi-arid regions of Iran, *Environ Earth Sci* (2015) 73 P. 1231-1244.
- 13) EDPP.CZ ©2010: Elektronický digitální povodňový portál (online) [cit. 2021.11.24]. dostupné z: <https://www.edpp.cz/orptsv_hydrologicke-udaje>.
- 14) Edwards, F.K. et Baker, R. et Dunbar, M. et Laizé, C. A., 2012: Review of the processes and effects of droughts and summer floods in rivers and threats due to climate change on current adaptive strategies. Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology, P. 75
- 15) EEA - Evropská agentura pro životní prostředí, ©2018: Změna klimatu a voda - teplejší oceány, záplavy a sucha (online) [cit. 2020.06.03], dostupné z <https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2018/clanky/zmena-klimatu-a-voda-2013>
- 16) Guttman, N. B., 1998: Comparing the Palmer drought index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association* 34, P. 113-121.
- 17) Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., Vanyarkho, O. V. 1999: Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), P. 429-438.
- 18) H Z S C R - Hasičský záchranný sbor České republiky, 2018: Ochrana před přirozenými a zvláštními povodněmi v ČR (online) [cit. 2020.01.10], dostupné z <https://www.hzscr.cz/clanek/povodne-2013.aspx>
- 19) Jensen, M. E., Haise, H. R. 1963: Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE* 89 (LR4), 15–41.
- 20) Kovář M., 2003: Ochrana před přirozenými a zvláštními povodněmi: příručka pro orgány státní správy, územní samosprávy, právnické osoby a podnikající fyzické osoby. Ministerstvo vnitra-generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR.
- 21) Kvítek, T., 2015: Povodně, sucho, eroze, jakost povrchové a podzemní vody, hladiny podzemních vod a společný ukazatel – malá retence vody v krajině. S. 3-10.
- 22) Lake, P. S., 2013: Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology*, Issue 48. P. 1161–1172.
- 23) McGuinness, J. L., Bordne, E. F. 1972: A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, DC.

- 24) McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales: in Proceedings of the 8th conference on applied climatology, vol. 17(22), P. 179–183.
- 25) Meziřesortní komise VODA-SUCHO, 2015: III. Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody.
Langhammer, J., 2007: Hydrologie - odtokový proces. PŕF UK, Praha 27 s.
- 26) Mishra, A. K., et Singh, V. P., 2010: A review of drought concepts. J. Hydrol. 391, 202–216.
- 27) MZE, ©2017: III. Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky (online)[cit.2020.03.20], dostupné z<<http://eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo-zemdelstvi/koncepce-a-strategie/koncepce-na-ochranu-pred-nasledky-sucha.html>>
- 28) MŽP - Ministerstvo životního prostředí ©2008: Národní akční plán adaptaci na změnu klimatu (online) [cit. 2020.06.09]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu
- 29) MŽP - Ministerstvo životního prostředí ©2020: Operační program životního prostředí 2021-2027, Koncept. 83 s.
- 30) MŽP - Ministerstvo životního prostředí ©2008: Unijní program LIFE - (online) [cit. 08.02.2020] dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/komunitarni_program_life
- 31) Nalbantis I., 2008: Evaluation of a Hydrological Drought Index. European Water 23/24: 67-77. National Technical University of Athens. Greece.
- 32) NCAR - UCAR, 2019: Palmer Drought Severity Index (PDSI). Climate Data Guide (online)[cit. 2020.01.03], dostupné z: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/palmer-drought-severity-index-pdsi>
- 33) Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., et al. 2005: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. Journal of Hydrology, 303, 290–306.
- 34) Palmer W., 1965: "Meteorological Drought". Research paper no.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, February 1965 (58 pgs). Available online by the NOAA National Climatic Data Center at <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>
- 35) Palmer W. C., 1967: Meteorological Drought. Research paper no. 45. Office of Climatology. Washington, D.C.

- 36) Povodí Vltavy, státní podnik, ©2003: Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 (online)[cit. 08.09.2020], dostupné z https://dibavod.cz/data/povodnove_zpravy/vltava/vltava_08_2002.pdf
- 37) Punčochář P., Tůma A., Hubáčková A. 2018: Vodohospodářské technickoekonomické informace, 2018, roč. 60, č. 5, str. 36–39. ISSN 0322- 8916.
- 38) PVL - Povodí Vltavy, ©2013: Profil státního podniku Povodí Vltavy (online) [2020.05.13], dostupné z <http://www.pvl.cz/profil-statniho-podniku>
- 39) PVL - Povodí Vltavy, ©2009: Plán oblasti povodí Dolní Vltavy (online) [2020.05.13], dostupné z <http://www.pvl.cz/planovani-v-oblasti-vod/plany-oblasti-povodi---2009/plan-oblasti-povodi-dolni-vltavy>>
- 40) Pytl, V., Augusta P. 2005: Hydrologická charakteristika vodních tokův Praze. In: Pytl, V., Augusta P.: Praha a Vltava: řeky, potoky a vodní nádrže Velké Prahy. Milpo media, Praha. S. 56 - 62. ISBN 80-903481-2- 2.
- 41) R Development Core Team, 2008: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0. URL <http://www.R-project.org>.
- 42) Restuccia R., 2016: 5 Causes Of Drought (online) [cit. 2020.11.07], dostupné z <https://jainsusa.com/blog/drought/>
- 43) Rožnovský, J., 2014: Sucho na území České republiky. Živa 1: 2-3
- 44) RStudio Inc., ©2011: Version 1.2.5042. (online) [cit. 2020.07.11], dostupné z <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- 45) SFŽP ČR- Státní fond životního prostředí ČR (online) [cit. 2020.06.03], dostupné z <https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/operacni-program-zivotni-prostredi/>
- 46) Sobišek, B. a kol., 1993: Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Academia, Ministerstvo životního prostředí České republiky. Praha. První vydání. 594 s. ISBN 80-85368-45-5.
- 47) Šercl, P., Kukla, P., 2015: Porovnání základních hydrologických údajů za referenční období 1931 – 1980 a 1981 – 2010. Hydrologická ročenka České republiky 2014, Český hydrometeorologický ústav, Praha, ISBN: 978-80-87577-57-8.
- 48) Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R. 2011: Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. IDÖJÁRÁS - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, 115(1–2), 87–98.
- 49) Švorc L., Švorcová V., 2006: České řeky a říčky. Knihovna Jana Drdy. 268 s. ISBN: 80-86937-11-9.

- 50) Tallaksen, L.M., Van Lanen H.A.J., 2004: Hydrological drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science 48. Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK.
- 51) Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38, 55–94.
- 52) Třeboňsko, ©2019: Řeka Lužnice (online) [2021.11.21], dostupné z <<https://www.trebonsko.cz/reka-luznice>>
- 53) Van Loon, A. F., 2015: Hydrological drought explained. Wiley Interdisciplinary Reviews: Wires Water, P. 359-392
- 54) Wilhite, D. A., 2005: Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues. CRC Press, Boca Raton, 432 s.
- 55) Yisehak B. Zenebe A. 2020: Modeling multivariate standardized drought index based on the drought information from precipitation and runoff: a case study of Hare watershed of Southern Ethiopian Rift Valley Basin, Modeling earth Systems and Environment.
- 56) Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), v platném znění.
- 57) Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) v platném znění od 1. 1. 2022.
- 58) Žalud, Z., 2020: Proč je sucho a jak se mu bránit? (online) [cit. 2020.01.03], dostupné z: <<https://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/zdenekn-zalud-proc-je-sucho-a-jak-se-mu-branit>>
- 59) Žalud, Z., 2015: Když bude teplá zima, hrozí za rok katastrofální sucho, varuje klimatolog (online)[cit. 2020.01.03], dostupné z:<https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/pristi-sucho-muze-byt-katastrofalni-tvrdi-klimatolog.A150902_171936_domaci_fer>

10 Seznam Obrázků

- 1) **Obr. č. 1:** Proces šíření sucha zahrnující přírodní a lidský faktor včetně zpětných vazeb v měnícím se klimatu (online) [cit. 202.11.28], dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/nove-poznatky-ktete-jsou-odrazem-zmeny-klimatu-vliv-sucha-na-rostlinnou-produkci>
- 2) **Obr. č.2:** Lokace zvolených vodních toků
- 3) **Obr. č. 3:** Půdní typy
- 4) **Obr. č. 4:** CORINE Land Cover 2018