

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Bc. Vojtěch Vlach

**HYDROLOGICKÉ SUCHO V PRAMENNÝCH
OBLASTECH KRUŠNÝCH HOR**
HYDROLOGICAL DROUGHT IN HEADWATER
AREAS OF THE ORE MOUNTAINS

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Praha, 2019

Zadání diplomové práce

Název práce:

Hydrologické sucho v pramenných oblastech Krušných hor

Cílem práce je vyhodnocení a porovnání hydrologického sucha v pramenných oblastech povodí Rolavy, Svatavy a Načetínského potoka. Dále se bude práce věnovat trendům ve výskytu hydrologického sucha v období 1967-2018 a možnými fyzickogeografickými faktory, které tyto trendy v jednotlivých povodích ovlivňují. Součástí práce bude komplexní fyzickogeografická charakteristika vybraných povodí s důrazem na změny krajinného pokryvu. V práci budou využita dostupná hydrologická a meteorologická data ČHMÚ, Saského zemského úřadu pro životní prostředí, zemědělství a geologii (LFULG) a Deutscher Wetterdienst.

Použité pracovní metody, zájmové území:

- rešerše zahraniční a domácí odborné literatury na danou problematiku
- fyzickogeografická charakteristika vybraných povodí
- zpracování dostupných mapových podkladů s důrazem na změny krajinného pokryvu
- příprava vstupních hydrometeorologických dat a jejich homogenizace
- výpočet vybraných indexů sucha, analýza změn sezonality výskytu sucha
- hodnocení charakteristik trendů výskytu extrémních odtokových událostí (využití např. MK-testu, IHA analýza)
- diskuse a shrnutí výsledků

Datové zdroje:

Odborná literatura, mapové podklady, terénní průzkum, informace od správců toků, data ČHMÚ, Deutscher Wetterdienst, LFULG.

Datum zadání: 4. 12. 2016

Jméno studenta: Bc. Vojtěch Vlach

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vytvořil samostatně a že jsem veškeré použité zdroje literatury a dat řádně citoval. Tato práce ani její podstatná část nebyla použita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 13. dubna 2019

Bc. Vojtěch Vlach

Rád bych na tomto místě poděkoval RNDr. Miladě Matouškové, Ph.D. za odborné vedení a korektury mé práce, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Ondřeji Ledvinkovi, Ph.D. za inspirativní konzultaci a vhled odborníka z praxe do dané problematiky. Také bych velice rád poděkoval své rodině a přítelkyni za trpělivost a psychickou podporu, kterou mi po celou dobu studia a zpracovávání práce poskytovali.

Téma této diplomové práce bylo řešeno v návaznosti na projekt GAUK č. 1408618: *"Změny biogeochemismu vodních toků v pramenných oblastech"*.

Abstrakt

Změny v hydrologickém cyklu jsou jedním z očekávaných projevů klimatické změny. Pohoří střední Evropy ještě donedávna nebyla považována za oblasti, které by měly být ovlivněny nedostatkem vody. Nicméně poslední roky napovídají o zvyšujícím se riziku častějšího výskytu sucha právě i v těchto regionech, jež mají zásadní vliv na přísun vody do řek, které je odvodňují. Diplomová práce se zabývá vyhodnocením hydrologického sucha v pramenných oblastech tří povodí v Krušných horách pro období 1967 až 2018. Hlavním cílem je porovnání charakteristik hydrologického sucha v povodí horní Svatavy, horní Rolavy a Načetínského potoka na základě dostupných hydrologických a klimatických dat. V souvislosti s tím si práce klade za dílčí cíl detekci dlouhodobých trendů ve výskytu sucha ve vybraných povodích. V neposlední řadě je kladen důraz na zhodnocení přírodních podmínek, zejména pak historickým a současným změnám krajinného pokryvu v zájmových povodích. Výsledky práce poukazují na výraznou změnu sezonality výskytu hydrologického sucha ve druhé polovině sledovaného období, kdy se nedostatkové průtoky koncentrují v rozmezí srpna a října. Dále byly zjištěny rostoucí trendy nedostatkových objemů v povodí horní Svatavy a Načetínského potoka. Povodí horní Rolavy vykazuje významné rozdíly ve výsledných hodnotách ukazatelů i trendů. Ve vybraném období dochází k významnému poklesu průměrných i minimálních průtoků v jarních a letních měsících.

Klíčová slova: srážko-odtokový režim, hydrologické sucho, retence vody, rašeliniště

Abstract

Changes in the hydrological cycle are one of the expected impacts of climate change. Until recently, Central European mountain ranges have not been considered to be affected by water scarcity. Nevertheless, recent years have suggested an increasing risk of drought occurrence also in these regions, which have a major impact on the water supply to rivers that drain them. The master thesis deals with the evaluation of hydrological drought in the headwater areas of three catchments in the Ore Mountains for the period from 1967 to 2018. The main aim is to compare the hydrological drought characteristics in the catchment areas of upper Svatava River, upper Rolava River and Načetínský brook based on available hydrological and climatic data. In connection with this, the work aims to detect the long-term trends of drought occurrence in selected basins. Furthermore, the emphasis is given on the evaluation of natural conditions, especially the historical and current land cover changes in the study catchments. The results point to a significant change in the seasonality of the occurrence of hydrological drought in the second half of the studied period, when the streamflow deficits concentrate between August and October. Furthermore, increasing trends in deficit volumes were found in the catchment areas of the upper Svatava River and Načetínský brook. The upper Rolava River basin shows significant differences in the resulting values of indicators and trends. In the selected period, there is a significant decrease in average and minimum flows in spring and summer months.

Key words: rainfall-runoff regime, hydrological drought, water retention, peat bog

Obsah

Seznam zkratk použitých v textu	9
1 Úvod.....	11
1.1 Struktura práce	12
1.2 Cíle práce.....	12
1.3 Hypotézy a výzkumné otázky.....	13
2 Sucho: definice, dělení a studie.....	14
2.1 Definice hydrologického sucha.....	18
2.2 Ukazatele hydrologického sucha.....	20
2.3 Vliv změny klimatu na hydrologický režim	22
2.4 Vliv krajinného pokryvu povodí na odtokové poměry	26
2.5 Studie trendů změn srážko-odtokových režimů	29
3 Použitá data a metody.....	35
3.1 Hydrologická a klimatologická data	35
3.2 Mapové podklady a použitý software	37
3.3 Testování homogenity datových řad.....	37
3.3.1 Testování absolutní homogenity	38
3.3.2 Testování relativní homogenity.....	38
3.4 Ukazatele hydrologického sucha.....	39
3.5 Detekce trendů v časových řadách.....	40
3.6 Korelace hydrologických a klimatických řad	41
4 Vymezení a charakteristika zájmového území	42
4.1 Základní hydrografické údaje a výškové poměry	43
4.2 Geologické a geomorfologické poměry	45
4.3 Pedologické poměry.....	48
4.4 Krajinný pokryv	50
4.5 Klimatické poměry.....	55
5 Výsledky	57
5.1 Testování homogenity časových řad.....	57
5.1.1 Průměrné měsíční, sezónní a roční teploty.....	57

5.1.2	Měsíční, sezónní a roční srážkové úhrny	58
5.1.3	Měsíční, sezónní a roční sumy denní výšky sněhové pokrývky	59
5.1.4	Měsíční, sezónní a roční průměrné průtoky	60
5.2	Ukazatele hydrologického sucha.....	62
5.2.1	Prahová hodnota a nedostatkové objemy	62
5.2.2	Změny sezonality výskytu suchých dní	65
5.2.3	Jednodenní minima.....	67
5.2.4	Low Flow index.....	69
5.2.5	Průměrné sedmidenní minimum	69
5.2.6	Baseflow index.....	70
5.3	Testování trendů v časových řadách.....	72
5.3.1	Teplotní průměry.....	72
5.3.2	Srážkové úhrny	73
5.3.3	Sněhová pokrývka	74
5.3.4	Průměrné měsíční, sezónní a roční průtoky.....	75
5.3.5	Měsíční, sezónní a roční minimální průtoky	77
5.3.6	Měsíční, sezónní a roční nedostatkové objemy.....	77
5.3.7	Trendy v ročních řadách ukazatelů sucha.....	79
5.3.8	Testování delších průtokových řad.....	80
5.4	Vzájemné korelace mezi časovými řadami.....	84
6	Diskuze	87
6.1	Hydrologické sucho v kontextu regionální změny klimatu	87
6.2	Trendy průměrných a nízkých průtoků.....	89
6.3	Nejistoty výsledků.....	92
7	Závěry	94
8	Seznam literatury a zdrojů.....	96
8.1	Literatura.....	96
8.2	Datové a internetové zdroje.....	101
9	Seznam příloh	102
9.1	Seznam obrázků.....	102
9.2	Seznam tabulek	104

Seznam zkratk použitých v textu

- BFI: Baseflow Index (*index bazálního odtoku*)
- CENIA: Česká informační agentura životního prostředí
- CMI: Crop Moisture Index (*index vlhkosti rostlin*)
- ČGS: Česká geologická služba
- ČHMÚ: Český hydrometeorologický ústav
- ČÚZK: Český úřad zeměměřičský a katastrální
- DIBAVOD: Digitální báze vodohospodářských dat
- DWD: Deutscher Wetterdienst (*Německá meteorologická služba*)
- EEA: European Environment Agency (*Evropská agentura pro životní prostředí*)
- GIM: Global Impact Models (*globální dopadové modely*)
- $H_{(m, s, r)}$: celkový úhrn srážek (*měsíční, sezónní, roční*)
- IHA7.1: Indicators of Hydrologic Alterations, verze 7.1 (*počítačový software*)
- KFGG: Katedra fyzické geografie a geoekologie
- KTRL: Kendall-Theil robust line (*Kendall-Theilova robustní linie*)
- KTRLLine1.0: počítačový software pro výpočet Kendall-Theilovy robustní linie, verze 1.0
- LFI: Low Flow index (*index nízkého průtoku*)
- LFLUG: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (*Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii*)
- MK-test: Mann-Kendallův neparametrický test
- NDVI: Normalized difference vegetation index (*normalizovaný diferenční vegetační index*)
- PDSI: Palmer Drought Severity Index (*Palmerův index závažnosti sucha*)
- PHDI: Palmer Hydrological Drought Index (*Palmerův index hydrologického sucha*)
- PřF UK: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
- Q_a : dlouhodobý průměrný denní průtok
- $Q_{(d, m, s, r)}$: průměrný průtok (*denní, měsíční, sezónní, roční*)

Q_{med} : medián průměrného denního průtoku pro sledované období

Q_{min} : minimální průtok

Q_{355} : kritická hodnota průtoku pro určení hydrologického sucha (*pro celé období*)

Q_{355m} : kritická hodnota průtoku pro určení hydrologického sucha (*pro jednotlivé měsíce*)

Q_{355s} : kritická hodnota průtoku pro určení hydrologického sucha (*pro sezóny*)

RCP: Representative Concentration Pathway (*reprezentativní směr vývoje koncentrací*)

RDI: Reclamation Drought Index (*index náhrad sucha*)

RSDI: Regional Streamflow deficiency index (*index regionálního nedostatku odtoku*)

$S_{(m, s, r)}$: suma denních výšek sněhové pokrývky (*měsíční, sezónní, roční*)

SDI: Streamflow Drought Index (*odtokový index sucha*)

SNHT: Standard Normal Homogeneity Test (*statistický test relativní homogeneity dat*)

SPI: Standardized Precipitation Index (*standardizovaný srážkový index*)

SWSI: Surface Water Supply Index (*index dodávek povrchové vody*)

$T_{(m, s, r)}$: průměrná teplota vzduchu (*měsíční, sezónní, roční*)

τ_b : Kendallův koeficient pořadové korelace (*tau-b*)

TDR: Time Domain Reflectometry (*impulsní reflektometrie či reflektometrie v časové doméně*)

ÚHÚL: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů

USGS: U. S. Geological Survey (*americká geologická služba*)

VegDRI: Vegetation Drought Response Index (*index odezvy vegetačního sucha*)

VÚKOZ: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i.

VÚV T. G. M.: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

WMS: web map service (*webová mapová služba*)

1 Úvod

Během posledních několika let se nejen v Česku začala, zejména v médiích, hojně diskutovat další problematika týkající se vody. Po velmi intenzivním období častého výskytu extrémních povodní během let 1998 a 2013 se situace zdánlivě obrátila a lidé mohou být svědky poměrně dlouhého období sucha. Problémy týkající se ubývajících zdrojů vody se poprvé naplno projevíly v létě roku 2015, a od té doby se znovu vyskytují každou letní sezónu, zejména v oblastech s nižšími průměrnými úhrny ročních srážek. Nicméně i regiony s obvykle vyšším celkovým ročním přísunem srážek, například česká příhraniční pohoří, zaznamenávají z dlouhodobého pohledu také sušší periody.

Problematika sucha byla donedávna v temperátních regionech, jako je střední Evropa, často podceňována. Vývoj posledních let však dokazuje, že sucho je závažným problémem nejen pro přírodní ekosystémy, ale i pro ekonomické aktivity člověka. Zejména v průběhu vegetační sezóny, kdy díky zvyšujícím se teplotám stoupá poměr evapotranspirace, se velmi často prohlubuje intenzita a závažnost sucha, které jsou primárně způsobeny nedostatkem srážek (Hänsel et al., 2019).

Sucho však není fenoménem pouze několika nedávných let. Na území dnešního Česka se období intenzivního sucha vyskytovala dle dochovaných historických pramenů prakticky od nepaměti. Jen v období raného novověku šlo o léta 1540, 1590, 1616 či dva po sobě jdoucí roky 1718-19 (Brázdil, Trnka et al., 2015). Ve 20. století bylo taktéž zaznamenáno několik výrazně suchých period, a to jak meteorologicky, tak i zemědělsky či hydrologicky. Jako extrémně suché byly vyhodnoceny období 1933-36, 1949-52 a 1971-74 (Kakos, Müller, 2004, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015). Výše uvedený výčet může napovědět, že závažná sucha sice nejsou jen záležitostí posledních pár desítek let, nicméně mnohé současné studie (Dai, 2013; Trenberth et al., 2014; Prudhomme et al., 2014, Van Loon et al., 2016) předpovídají pravděpodobnější výskyt delších a intenzivnějších epizod sucha v souvislosti se změnou klimatu a zvýšením jeho variability.

Krušné hory, ve kterých leží zájmová povodí této práce, se v porovnání se zbytkem republiky nacházejí v oblasti nadprůměrného, relativně vyrovnaného ročního úhrnu srážek. S tím souvisí nižší pravděpodobnost výskytu dlouhodobě suchého období, jež by radikálně ovlivnilo funkci zdejších ekosystémů či způsobilo vysychání toků (Hladný, Němec, Blažek, 2006). Pásmo Krušných hor však tvoří orografickou bariéru, za níž se nachází poměrně rozlehlá oblast srážkového stínu s téměř poloviční průměrnou roční dotací. To znamená, že zejména oblasti poblíž jihovýchodního úpatí tohoto pohoří jsou velmi závislé na přísunu vodních zdrojů z toků, které Krušné hory odvodňují. Tolasz et al. (2007) uvádí, že se na hřebenech Krušných hor podle hodnot standardizovaného srážkového indexu (SPI) suché epizody vyskytují maximálně dva

měsíce ročně, navíc krátce a nepravidelně. Naopak v oblasti podkrušnohorského srážkového stínu, zejména na Žatecku, dokonce přesahují období sucha způsobené nedostatkem srážek během průměrného roku až čtyři měsíce.

Výše uvedená fakta napovídají, že pokud se výrazné sucho vyskytne také ve vrcholových partiích či pramenných oblastech Krušných hor, může následně výrazně umocnit dopady sucha po proudu podkrušnohorských toků, které přijdou o svůj hlavní zdroj vodnosti.

Z globálního pohledu jde o mnohem závažnější problém. V souvislosti se stále rostoucí lidskou populací, a s tím spojenou poptávkou po vodních zdrojích, se zvyšuje i tlak na vývoj přesnějších předpovědních scénářů suchých období (Mishra a Singh, 2010).

1.1 Struktura práce

Úvodní část této diplomové práce je koncipována jako rešeršní přehled zahraniční i české odborné literatury k tématu sucha. Stručně jsou nastíněny současné koncepty a přístupy k samotné definici sucha a jeho typům. Uvedené články a studie se zabývají zejména statistickým vyhodnocením hydrologického sucha, jeho možným příčinám a dlouhodobým trendům v jeho výskytu. Nejvhodnější metody získané z rešerše odborné literatury jsou aplikovány v praktické části této práce.

Druhá část práce se zaměřuje na fyzicko-geografickou charakteristiku zájmových oblastí, tedy povodí horních toků Rolavy, Svatavy a Načetínského potoka v Krušných horách. V této části jsou popsány rozdílné přírodní podmínky a další faktory, které mohou mít vliv na rozličné chování jednotlivých povodí během probíhajících suchých period.

Třetí část se zabývá popisem výsledků jednotlivých statistických analýz vybraných ukazatelů sucha se zaměřením na intenzitu a detekci trendů výskytu hydrologického sucha v zájmových povodích. Tyto analýzy jsou následně prováděny na základě dostupných hydroklimatických dat z českých a německých stanic.

Nově získané poznatky jsou následně vyhodnoceny a diskutovány s výsledky jiných studií, zejména těch, jež byly použity v rešeršní části této práce. Zároveň je zde diskutována problematika vhodnosti použitých metod a potenciální nedostatky jednotlivých analýz.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je vyhodnocení a porovnání projevů hydrologického sucha ve vybraných pramenných oblastech Krušných hor pomocí více ukazatelů na základě dostupných hydrologických a klimatických dat. V souvislosti s tím si práce klade za dílčí cíl detekci dlouhodobých trendů ve výskytu hydrologického sucha v jednotlivých povodích.

Nedílnou součástí této diplomové práce je také shrnutí a vyhodnocení současného stavu výzkumu, který se zabývá tématem hydrologického sucha, předně v oblastech s klimatem stejným či podobným střední Evropě. Dále se práce věnuje testování homogenity a vzájemným korelacím hydrologických a klimatických datových řad ve sledovaném období. V neposlední řadě je kladen důraz na zhodnocení přírodních podmínek v zájmových povodích, zejména pak historickým a současným změnám krajinného pokryvu.

1.3 Hypotézy a výzkumné otázky

Tato diplomová práce si stanovuje následující hypotézy:

- V průběhu sledovaného období dochází k signifikantní změně sezonality výskytu hydrologicky suchých period.
- Hlavní příčinou změny srážko-odtokového režimu ve sledovaném období je změna klimatu, ne změna krajinného pokryvu/využití krajiny.
- Délka sledovaného období má zásadní vliv na výsledky analýz dlouhodobých trendů.

A dále si pokládá následující výzkumné otázky:

- Jak se liší charakter a sezonalita hydrologicky suchých dní a epizod v jednotlivých povodích?
- Mění se výrazně klimatické podmínky v zájmovém regionu?
- Jak se změnil charakter krajinného pokryvu v povodích, a mohou tyto změny mít výrazný dopad na srážko-odtokové poměry?



Obrázek 1: Meandry Svatavy u obce Oberzwota (foto: Straktur, 2014)

2 Sucho: definice, dělení a studie

Tato kapitola se zabývá obecným vymezením problematiky sucha v literatuře. Dále se věnuje rešerši konkrétních zahraničních a domácích výzkumů souvisejících s tématem diplomové práce a zároveň aplikovaných ve srovnatelných přírodních podmínkách.

Při pátrání po všeobecné definici sucha je možné se setkat s různými vysvětleními. Více autorů považuje univerzální, ucelenou matematickou definici sucha za takřka neproveditelnou. Sucho je definováno kvalitativně jako deficit vody ve srovnání s normálními podmínkami v daném místě. Pro kvantitativní definici je však zapotřebí lokální vodní bilance a pro její vyčíslení je třeba znát místní vodní zdroje, poptávku a management těchto zdrojů. Právě vliv člověka skrze management vodních zásob v povodí je podstatný, jelikož znemožňuje vytvoření univerzální definice. Tento faktor může být eliminován pouze v případě definice čistě meteorologického sucha. Obtíže kvantifikace vlivu člověka na změnu klimatu vedou k závěru, že je téměř nemožné vyprodukovat funkční a zároveň objektivní definici sucha (Lloyd-Hughes, 2014).

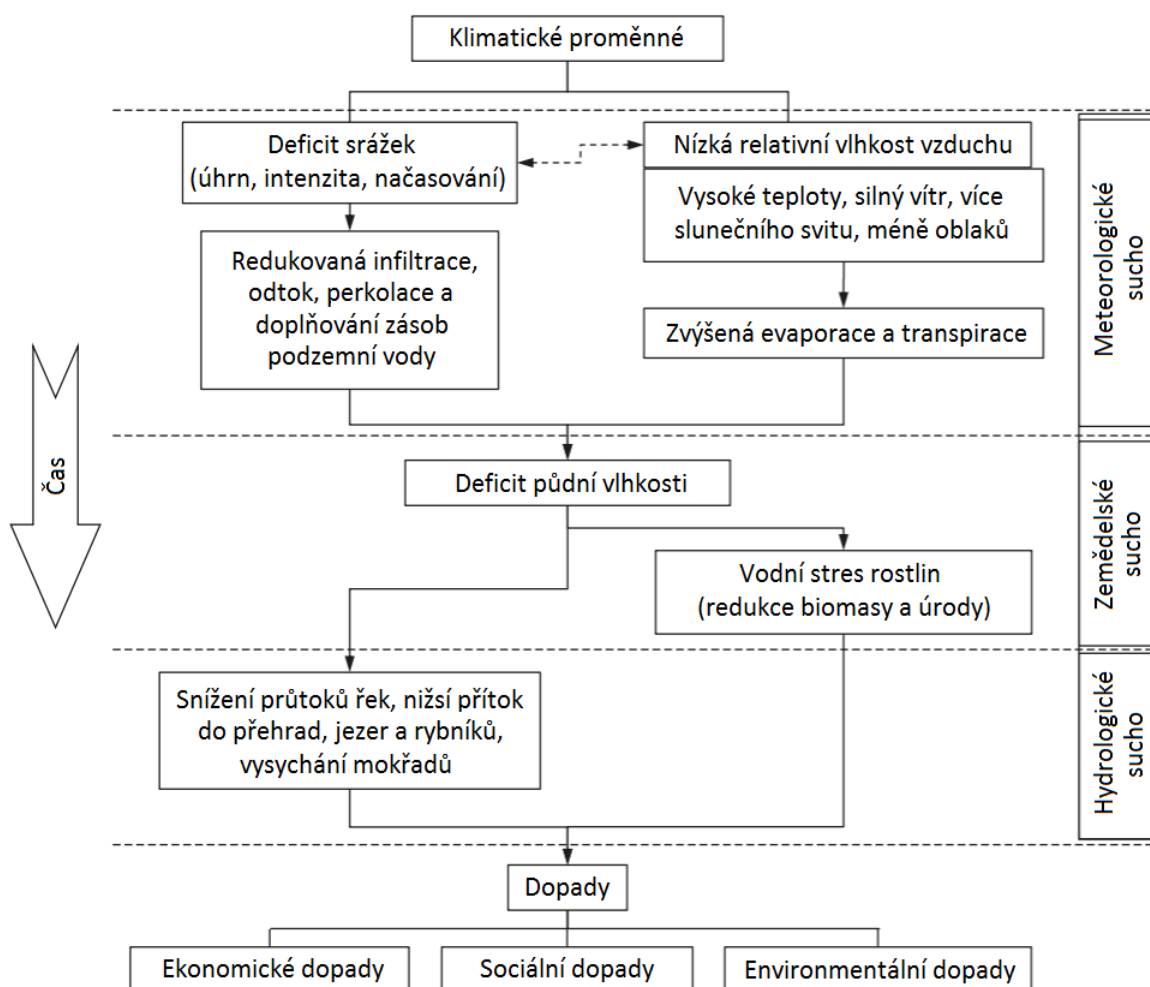
Rozdílné dopady sucha a diverzita přírodních podmínek v různých částech světa jsou důvody, které ztěžují vytvoření všeobecně platné a přijímané definice výše zmíněného jevu. Autoři se taktéž domnívají, že tato skutečnost se projevuje při vývoji statistických ukazatelů, jež slouží k popisu vlastností sucha. V jedné z obecnějších definic je sucho charakterizováno jako přírodní riziko způsobené kombinací klimatologických a hydrologických parametrů. Pochopení vztahů a interakcí mezi těmito skupinami vstupních parametrů je klíčové při vývoji nejen výše zmíněných indexů, ale i praktických mitigačních a adaptačních opatření (Hao, Singh, 2015).

Pokud sucho nevratně poznamená fungování lidské společnosti či ekosystémů, je považováno za přírodní katastrofu. Proto tento jev upoutává pozornost čím dál tím širší skupiny vědců mimo hydrologů a meteorologů, například ekologů, geologů a zejména vědců pohybujících se v zemědělském výzkumu. Sucho se více či méně vyskytuje ve všech klimatických pásmech, tudíž i v oblastech s vysokými průměrnými úhrny ročních srážek. Deficit dostupné vody je většinou spjat s dlouhodobější redukcí úhrnů srážek v různých ročních obdobích. Důležitou roli ve výskytu sucha hraje velké množství faktorů, jako například: teplota, nízká relativní vlhkost, charakter a načasování deště, doba trvání a intenzita deště (Mishra, Singh, 2010).

Sucho je dočasná odchylka od dlouhodobého průměru na rozdíl od aridity, která je popisována jako dlouhodobý stav podnebí v oblastech s průměrným ročním úhrnem srážek pod 200 mm (Wilhite, 1994). Dále jsou období sucha často zaměňována s vlnami veder. Nicméně ne vždy musí nutně dojít při krátkodobém extrémním zvýšení teploty i k nedostatku vody, proto Chang a Wallace (1987) přicházejí s poměrně jednoduchým rozlišením těchto dvou jevů. Zatímco vlna

veder obvykle trvá zhruba týden, sucho může přetrvat měsíce, v extrémních případech i jednotky let. Kombinace výše uvedených jevů však obvykle mívá i závažné socioekonomické následky (Mishra, Singh, 2010).

V odborné literatuře jsou obvykle definovány tři základní typy sucha: meteorologické, zemědělské a hydrologické. Dle obecné definice se tyto typy sucha vyskytují vždy v předem daném pořadí (obrázek 2). Nedostatek srážek obvykle zapříčiní meteorologické sucho, které po určité době vede k úbytku půdní vláh. Pokud půdní vláh klesne pod určitou hranici, nastává sucho zemědělské (též agronomické). Pomalé doplňování vodních zdrojů z půdy směrem k útvarům povrchových a podzemních vod má pak za následek sucho hydrologické, jež nastupuje obvykle s větším zpožděním. Níže uvedené schéma souhrnně popisuje běžný průběh šíření sucha.



Obrázek 2: Průběh výskytu různých typů sucha (NDMC, 2006, cit. v Zargar et al., 2011, upraveno)

Kromě typu, který je určen na základě konkrétních dopadů, je sucho navíc v odborné literatuře charakterizováno šesti dimenzemi, které detailněji popisují jeho vlastnosti (Salas 1993, cit. v Zargar et al., 2011, s. 334):

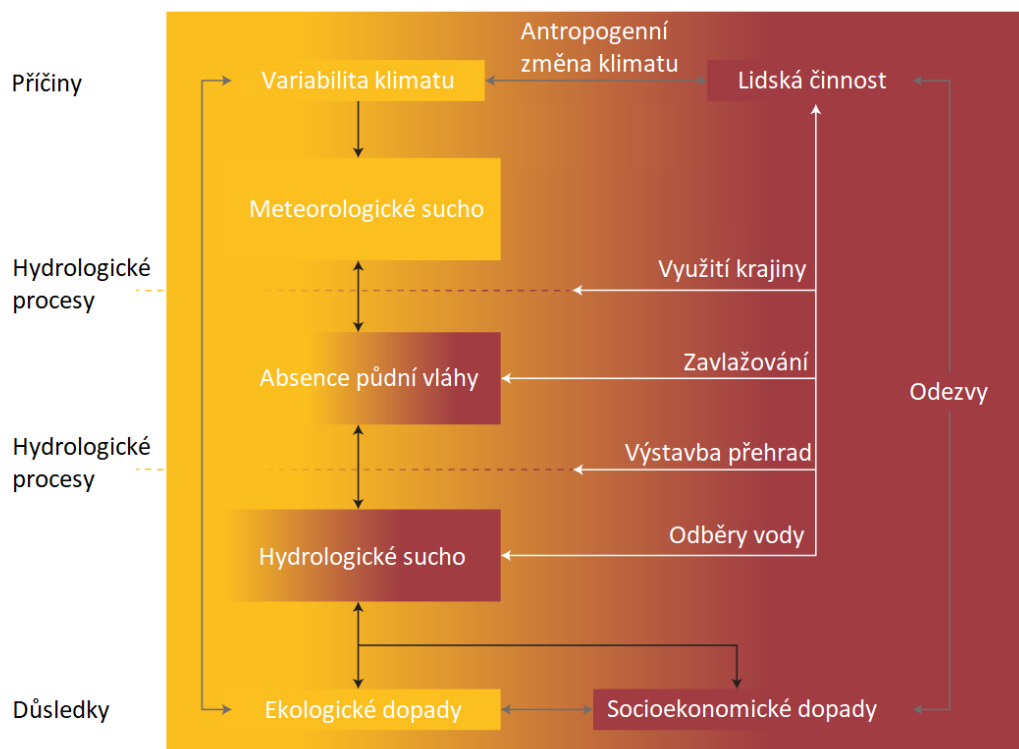
- *Doba trvání:* Sucho může trvat týden až několik let v závislosti na lokalitě. Region může procházet současně vlhkou či suchou epizodou v různých časových měřítkách. Například krátká a výrazná epizoda sucha se může vyskytnout v dlouhodobě vlhčím období a naopak.
- *Magnituda:* Kumulativní deficit vody (srážek, půdní vlhkosti či průtoku) pod kritickou hladinou v průběhu suché periody.
- *Intenzita:* Poměr magnitudy a doby trvání sucha.
- *Závažnost:* Uvedeny jsou dva příklady pro určení závažnosti sucha. Jedním je stupeň nedostatku srážek (viz magnituda), druhým je závažnost dopadů způsobených tímto deficitem.
- *Geografický rozsah:* Prostor zasažený suchem, jehož rozloha je v průběhu události variabilní. Tato oblast může zasáhnout plochu o velikosti několika hektarů, ale také celá povodí či větší regiony.
- *Frekvence (doba opakování):* Průměrná doba mezi jednotlivými epizodami sucha, jež je větší nebo rovna kritické hladině.

Sucho je velmi komplexní problém. Tradiční definice na sucho nahlíží jako na přírodní fenomén, ale zároveň od něj odlišují nedostatek vody způsobený člověkem, jenž popisují jako samostatný proces. Van Loon et al. (2016) navrhuje ve článku s názvem "Sucho v antropocénu" přehodnocení dosavadních konceptů a přístupů k suchu. Kolektiv autorů považuje za nutné zahrnout roli člověka do všech částí výzkumu této problematiky, zejména v případě lidských zásahů při zmírnění nebo naopak umocnění dopadů sucha. Ačkoliv je potřeba rozlišit různé příčiny nedostatku vody z důvodu vhodné aplikace mitigačních a adaptačních opatření, výše uvedené rozdělení nemusí být vždy užitečné při monitoringu a managementu sucha. Klasický monitoring sucha je povětšinou konstruován tak, aby odhalil nedostatek vody v různých částech hydrologického systému, ale bez schopnosti přisuzovat jej ke klimatickým anomáliím či antropogenním faktorům.

Nicméně, dopady sucha na fungování ekosystémů a lidské společnosti jsou výsledkem nedostatku vody, který je způsoben komplexní interakcí přírodních a antropogenních procesů. Proto autoři článku navrhují změnu definice sucha, do které je nutné zahrnout nedostatek vody způsobený činností člověka. Důležité je také definovat sucho (angl. drought) jako epizodický fenomén na rozdíl od nedostatku vody (angl. water scarcity), který odráží dlouhodobou nerovnováhu mezi poptávkou a dodávkou vody (Van Loon et al., 2016).

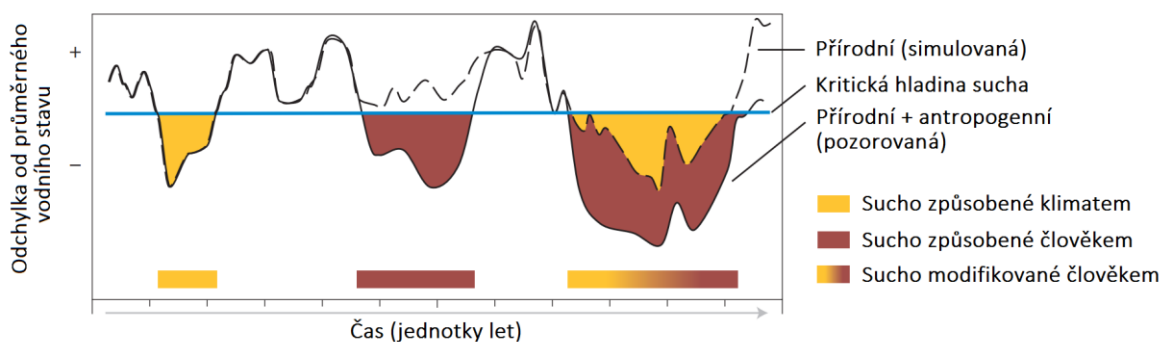
Management sucha stále postrádá větší efektivitu z důvodu neúplného pochopení zpětných vazeb mezi člověkem a právě suchem. Schéma přiložené na další straně (obrázek 3) znázorňuje šíření sucha v dnešním světě, jenž je na mnoha místech silně ovlivněn antropogenní činností.

Přenos sucha od meteorologického, přes půdní, až po hydrologické je ovlivněn klimatickými (levý sloupec; žlutá pole) a antropogenními faktory (pravý sloupec; hnědá pole). Sucho je také modifikováno hydrologickými procesy v povodí (čárkované linie), které jsou pozměněny lidskou činností (bílé šipky). Výsledné ekologické a socioekonomické dopady spouští odezvy, které střídavě vedou ke změnám vlivu člověka na sucho a variabilitu klimatu (šedé šipky).



Obrázek 3: Schéma šíření sucha v antropocénu (Van Loon et al., 2016, upraveno)

Obrázek 4 znázorňuje hypotetické schéma, jež rozlišuje sucho způsobené čistě klimatickými jevy, dále popisuje sucho vyvolané pouze antropogenní činností a nakonec kombinaci těchto dvou případů. Pozorované vodní stavy ovlivněné přírodními i lidskými faktory (nepřerušovaná černá linie) jsou porovnány s modelovanými vodními stavy, které představují ryze přírodní faktory (čárkovaná linie). Projevy sucha modifikovaného člověkem mohou být buď zmírněny, nebo naopak umocněny s ohledem na výchozí přírodní podmínky (Van Loon et al., 2016).



Obrázek 4: Hypotetické schéma rozlišení různých příčin sucha (Van Loon et al., 2016, upraveno)

2.1 Definice hydrologického sucha

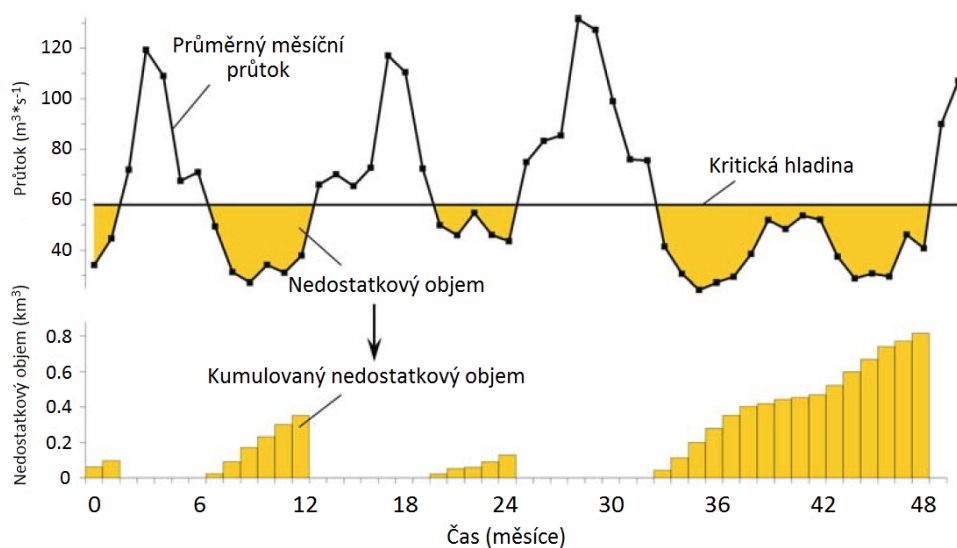
Hydrologické sucho je odborný termín spojený s negativní anomálií objemu podzemních a povrchových vod. Obecně je tento stav pro vodní toky definován jako situace, při které výška hladiny nebo objem protékající vody v korytě překročí stanovenou kritickou hodnotu. Hydrologické sucho by také nemělo být zaměňováno s "low-flows", což je termín označující nízké průtoky. Nízký průtok nemusí nutně znamenat výskyt hydrologického sucha, ale jenom určité procento dní, ve kterých se průtok drží pod dlouhodobým průměrem (Van Loon, 2015). V našich přírodních podmínkách jde většinou o výrazný pokles průtoku pod dlouhodobý průměr v důsledku srážkového deficitu v povodí či nedostatku zdrojů podzemní a povrchové vody. Zde je důležité zdůraznit, že podmínky pro výskyt hydrologického sucha vytvořené přírodou mohou být v kulturní krajině ještě umocněny nevhodnou antropogenní činností. Hydrologické sucho by tedy mělo být chápáno jako důsledek kombinace přírodních hydrometeorologických procesů a činnosti člověka ovlivňující odtokové poměry v daném povodí, což dle některých autorů nebylo vždy standardním přístupem (Van Loon et al., 2016).

Dle ČHMÚ (2018) je průtoková situace na vodních tocích považována za hydrologické sucho při poklesu hodnoty pod kritickou hranici, která je označována jako Q_{355} . Jde o hodnotu průtoku, jejíž pravděpodobnost překročení je 97,19 %. Jinými slovy je to objem vody v korytě toku, který bývá překročen nebo dosažen ve 355 dnech jednoho roku v dlouhodobém průměru. Jako suché dny jsou tedy označeny necelá tři procenta dní, které jsou v průběhu sledovaného období nejméně vodná. Hodnota průtoku Q_{355} je považována za hraniční hodnotu pro odběr vody bez technických potíží a také za kritickou hodnotu tzv. ekologického průtoku (Brázdil, Trnka et al., 2015). V odborné literatuře existuje více příkladů vymezení hydrologického sucha zohledňující jiné kritické parametry. Pro určení takovýchto období jsou v různých publikacích uvedena tato kritéria (Novický et al. 2008, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015):

- hodnota průměrného průtoku je nižší než hodnota příslušného dlouhodobého průměrného měsíčního průtoku v průběhu daného měsíce (Vorel, 1937, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015).
- během roku dojde k výskytu nejméně tří měsíců, kdy je hodnota průměrného měsíčního průtoku rovna nebo menší 60 % dlouhodobé hodnotě průtoku daného měsíce (Johanovský et al., 1937, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015).
- výskyt nejnižšího průměrného denního průtoku, tudíž se v každém hydrologickém roce vyskytne vždy jeden suchý den (Gumbel, 1963, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015).
- dojde ke kontinuálnímu výskytu Q_{355} alespoň ve třech¹ či pěti² na sebe navazujících dnech (¹Hladný, 2009; ²Řičicová et al., 2003, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015).

Důležitou okolností pro charakterizaci hydrologického sucha v zájmovém území je sezonalita. Variabilita průtoků, zejména nízkých, ve zkoumaném toku či povodí může být spojena jednak se sezónním deficitem srážek, ale například i s jejich akumulací v podobě sněhové pokrývky. Pro přesnou charakteristiku hydrologického sucha je proto důležité rozlišit okolnosti a příčiny nízkých průtoků v lokalitě výzkumu (Tallaksen, Van Lanen, 2004). Pro definici počátku a konce epizod hydrologického sucha se často používá metoda kritické hodnoty, nicméně ne pokaždé nutně Q_{355} . V odborné literatuře se často vyskytuje vymezení kritické hodnoty například při pravděpodobnosti překročení 90 %, v některých studiích je použita hodnota dlouhodobého mediánu pro dřívější identifikaci nástupu sucha. Dále je možné se poměrně často setkat s využitím průměrných měsíčních průtoků při analýzách sucha, zejména z důvodu eliminace denních fluktuací, které jsou často vytvořeny uměle manipulací s vodními díly, jezzy a podobně. Vedle možnosti určení kritické hodnoty sucha konstantní hladinou v průběhu celého sledovaného období lze stanovit hranici pro vymezení sucha pohyblivou kritickou hodnotou, jež kolísá například na sezónní bázi (Lehner et al., 2006).

Stanovení kritické hranice musí být provedeno velmi citlivě, jelikož i zdánlivě marginální rozdíl může mít velký význam při rozhodování, jestli událost sucha končí, či dále narůstá. Příliš nízká kritická hladina může vést k velkému množství let bez výskytu sucha, což činí těch několik málo zjištěných událostí statisticky příliš nejistých, aby bylo možno je vyhodnotit. Naopak s příliš vysokou hodnotou kritické hranice roste pravděpodobnost, že několik kratších samostatných suchých událostí může být chybně spojeno do jedné závažné a dlouhodobé epizody. Obecný diagram metody prahové hodnoty pro určení událostí hydrologického sucha, na jejímž základě jsou dále určeny nedostatkové objemy průtoků, znázorňuje obrázek 5. Nedostatkový objem identifikované epizody sucha je vypočítán jako kumulativní rozdíl mezi kritickou hladinou a skutečných průměrných průtoků v průběhu času (Lehner et al., 2006).



Obrázek 5: Obecný diagram metody prahové hodnoty (Lehner et al., 2006, upraveno)

2.2 Ukazatele hydrologického sucha

Charakteristika sucha je nezbytná pro efektivní management opatření při jeho výskytu. Využití statistických indexů je velmi účinný způsob, jak přeměnit velké množství dat do kvantitativní informace, jež může být dále využita k předpovědi, vyhodnocení dopadů sucha či krizovému plánování (Zargar et al., 2011). Obvykle jsou indexy sucha řazeny do jednotlivých kategorií na základě dopadů, které způsobují (meteorologické, zemědělské a hydrologické). Dostupné jsou ale i kategorizace založené na proměnných, se kterými sucho souvisí, či dokonce rozdělení na základě disciplíny použitých vstupních dat. Niemeier (2008) definoval tři další kategorie indexů sucha:

- *souhrnné indexy*: Využívají velké množství vstupních meteorologických, zemědělských a hydrologických proměnných k vytvoření zevrubného obrázku o podobě sucha. Příkladem tohoto přístupu je Palmerův index závažnosti sucha (PDSI).
- *indexy na základě dat z dálkového průzkumu Země*: Využívají informace ze satelitních senzorů k mapování stavu půdy. Nejznámějším příkladem je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI).
- *kombinované (také hybridní či agregované) indexy*: Tyto indexy jsou odvozeny začleněním existujících ukazatelů a indexů do jednoho celku. Jedním z uvedených příkladů kombinovaných indexů je „The US Drought Monitor“.

Množství dostupných indexů či ukazatelů sucha se v posledních letech stále zvyšuje, nicméně v některých případech bez uvážení nakolik jsou nové indexy opravdu smysluplné pro správný popis dopadů sucha. Bachmair et al. (2016) uvádí, že některé nedávno vydané přehledové články porovnávají různé indikátory sucha, ale v žádném z nich není uvedeno, jaké indexy jsou skutečně operačně používány při monitoringu sucha a jeho předpovědích. Dále se dle autorů čtenář nedozví, proč byly tyto indexy vybrány a jestli jsou jejich výsledné hodnoty validovány, například pomocí srovnání s lokálními okolnostmi či dopady sucha. Rovněž chybí komplexní hodnocení stavu monitorování dopadů sucha. Autoři článku proto skloubili přehled literatury na téma indikátorů sucha s průzkumem 33 poskytovatelů operativního monitoringu sucha v celosvětovém i regionálním měřítku. Navzdory různorodosti operativně používaných indexů vychází najevo některé společné rysy. Při průzkumu literatury i poskytovaných služeb bylo autory článku zjištěno, že monitoring dopadů sucha sice existuje, ale je zřídka systematický. Současný trend sice směřuje k vývoji a užívání kompozitních indexů, nicméně se stále potýká s limitovanou schopností hodnocení souvislostí mezi indikátory a konkrétními dopady sucha na životní prostředí a společnost. K úplnému pochopení těchto dopadů je zapotřebí pojmut sucho jako oboustrannou dynamiku mezi přírodou a člověkem (Bachmair et al., 2016).

Brázdil, Trnka et al. (2015) dělí indexy hydrologického sucha, které jsou obvykle založeny na pozorování vodních stavů či průtoků, pouze do dvou kategorií dle míry jejich komplexity. Pro každou z kategorií je uvedeno několik příkladů, které se v současnosti běžně používají v praxi a odborných publikacích. Detailně se prostými indexy uvedenými ve výše jmenované publikaci zabýval v diplomové práci Skála (2017), protože jsou příklady uvedeny jen heslovitě.

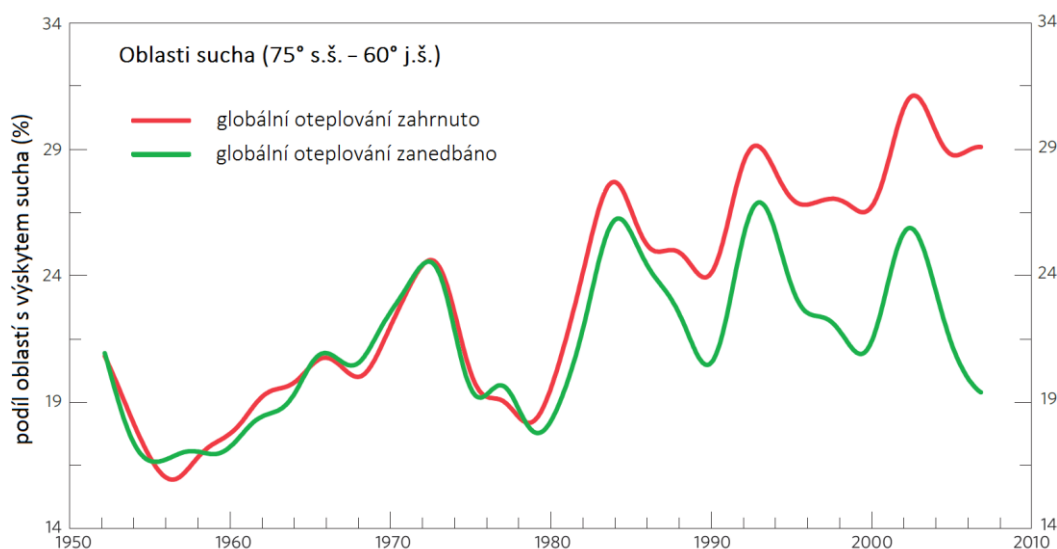
- *prosté indexy*: Tyto indexy často vyjadřují vztah pozorované hodnoty měřené veličiny a jejího dlouhodobého normálu. Rozdíly mezi ukazateli tkví ve způsobu stanovení této odchylky a časovém kroku pro její výpočet. Tyto indexy jsou často využívány pro účely monitoringu sucha díky své jednoduchosti a srozumitelnosti. K nejčastěji používaným ukazatelům tohoto druhu v praxi mimo jiné patří:
 - *metody prahových hodnot (Q_{355} , Q_{90} a další)*
 - *nedostatkový objem (v m^3 či mm na plochu povodí)*
 - *index bazálního odtoku (BFI)*
 - *index regionálního nedostatku odtoku (RSDI)*
 - *odtokový index sucha (SDI)*
 - *index nízkého průtoku (LFI)*
- *komplexní indexy*: Složitější ukazatele zahrnují do jednoho celku více naměřených či odvozených veličin. Díky širšímu záběru vstupních elementů se tedy snaží celistvě postihnout srážko-odtokový proces. Tyto indexy bývají zaměřeny na celý proces vodní bilance pro dané povodí, zejména za účelem lepší schopnosti řídit vodní zdroje. Zvláštní zřetel je brán na procesy, jež přispívají k odtoku, například akumulace sněhu a jeho tání, půdní vlhkost a její distribuce či evapotranspirace. Níže jsou uvedeny příklady hojně používaných indexů z této skupiny (Brázdil, Trnka et al., 2015):
 - *Palmerův index hydrologického sucha (PHDI)*
 - *Palmerův index závažnosti sucha (PDSI)*
 - *index vlhkosti rostlin (CMI)*
 - *index dodávek povrchové vody (SWSI)*
 - *index náhrad sucha (RDI)*
 - *index odezvy vegetačního sucha (VegDRI)*

Výběr vhodných indexů pro potřeby této diplomové práce byl proveden na základě několika kritérií. Zaprvé musel být brán v potaz dostatek vhodných vstupních dat v odpovídající kvalitě pro provedení samotných výpočtů. V druhé řadě bylo zohledněno využití daných indexů v již publikovaných studiích s podobným zaměřením. Posledním faktorem při rozhodování byla samotná vhodnost použití daného indexu v přírodním prostředí zájmové lokality. Konkrétní indexy hydrologického sucha, které byly vybrány pro účely této práce, jsou uvedeny spolu s metodikou výpočtů jejich hodnot v kapitole 3.

2.3 Vliv změny klimatu na hydrologický režim

Historické záznamy srážek, průtoků řek a indexů sucha vykazují na mnoha místech na Zemi narůstající ariditu od roku 1950. Výsledky analýz zabývajících se modelováním půdní vlhkosti, účinnosti srážek a dalšími ukazateli sucha nasvědčují zvyšujícímu se riziku výskytu závažnějších suchých period v 21. století. Nicméně jsou stále patrné poměrně velké rozdíly mezi simulovanými výsledky modelů a skutečně pozorovanými projevy sucha.

Dai (2013) uvádí, že předchozí studie poukazují na výrazný vliv průměrné roční povrchové teploty moře na úhrny srážek nad pevninou. Zároveň však z dříve publikovaných výzkumů vyplývá, že spojené předpovědní modely nejsou schopny zcela přesně reprodukovat pozorované regionální změny v množství srážek. Důvodem je nedostatek pozorovaných, převážně přirozených změn v povrchové teplotě moře v simulacích spojených modelů. Přirozené odchylky teploty se liší v závislosti na různých počátečních podmínkách a jsou tedy nereprodukovatelné. Na základě výsledných hodnot původní podoby PDSI je k vidění zejména po roce 1980 rozdílný průběh vývoje globálního podílu plochy zasažené suchem (obrázek 6). Červená křivka zobrazuje časový průběh vývoje při zahrnutí faktoru globálního oteplování do výpočtů, zelená křivka znázorňuje výsledky analýzy se zanedbáním stejného faktoru. Oblasti zasažené suchem jsou definovány hodnotou nižší, než je hodnota dvacátého percentilu pro období 1950-79, což zhruba odpovídá hodnotě PDSI -2 (Dai, 2013).

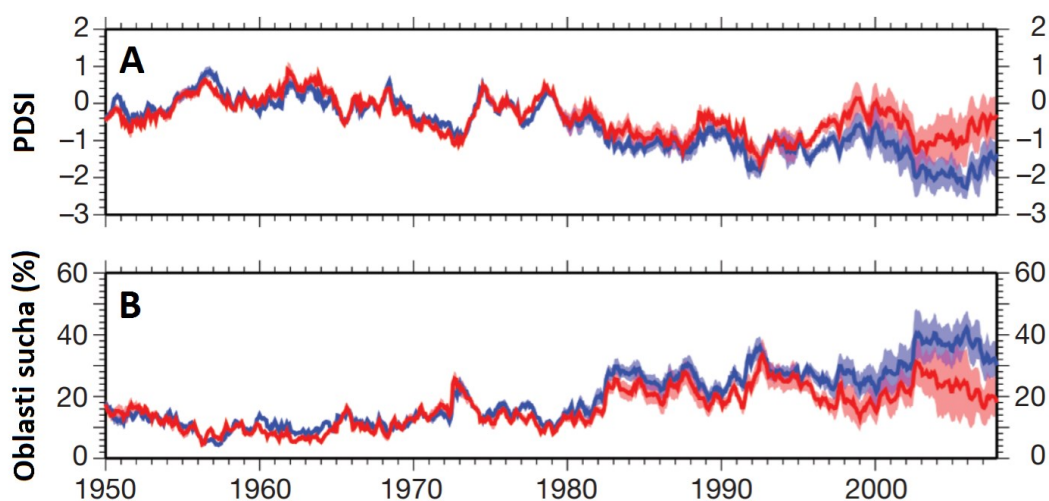


Obrázek 6: Časový vývoj podílu oblastí zasažených suchem na Zemi dle indexu PDSI (Dai, 2013, upraveno)

Autor se dále na základě shody pozorovaných globálních změn aridity a svých modelovaných předpovědí domnívá, že z důvodu poklesu úhrnů srážek a zvýšené evapotranspiraci mohou být v budoucnu očekávány závažnější a plošně rozsáhlejší epizody sucha. Výrazný nárůst intenzity suchých period autor očekává již během následujících třiceti až devadesáti let (Dai, 2013).

Vliv oteplování klimatu na potenciální změnu globálního rozložení srážek připouští i Sheffield, Wood a Roderick (2012). Konkrétní výpočty PDSI vykazují celosvětový pokles vlhkosti od 70. let 20. století a s tím související nárůst suchých či aridních oblastí. Výpočet PDSI vychází z vodní bilance zájmového povodí, jež zahrnuje měsíční úhrny, momentální půdní nasycenost vodou a evapotranspiraci. Relativní jednoduchost tohoto ukazatele z něj činí atraktivní nástroj pro hodnocení sucha ve velkém měřítku, nicméně jeho výsledné hodnoty mohou být v souvislosti s klimatickými změnami zavádějící. Autoři proto uvádějí, že mnohé případy z dříve publikovaných výsledků o nárůstu globálního sucha jsou nadhodnoceny, jelikož PDSI využívá zjednodušený model potenciálního výparu, který je vztažen pouze na změny teplot, a proto nesprávně reaguje na globální oteplování v posledních desetiletích.

Při provedení více realistických výpočtů, do kterých autoři zahrnuli energetickou bilanci, vlhkost vzduchu a rychlost větru, vychází najevo, že nárůst intenzity a prostorové distribuce sucha za posledních 60 let je daleko menší, než dle původních propočtů (obrázek 7). Modré křivky znázorňují výsledky výpočtů dle klasické definice PDSI, zatímco červené křivky vyjadřují jeho modifikovanou verzi.



Obrázek 7: Vývoj globální průměrné hodnoty PDSI a podílu oblastí zasažených suchem (Sheffield, Wood, Roderick, 2012, upraveno).

Výsledky v grafu znázorňují roční průměrnou hodnotu pro celý svět s výjimkou Grónska, Antarktidy a pouštních oblastí s průměrným ročním úhrnem srážek menším než 0.5 mm za den. Zjištění o rozdílech ve výsledných hodnotách mohou pomoci při vysvětlení variací mezi záznamy o suchu z posledních desítek let s využitím hodnot PDSI a paleoklimatických rekonstrukcí na základě dendrochronologických metod (Sheffield, Wood, Roderick, 2012).

Při studování odborných článků k tématu změny výskytu a projevů sucha v současných podmínkách měnícího se klimatu stojí za povšimnutí, že některé výsledky jsou velmi rozdílné, v některých případech dokonce v očividném rozporu (Trenberth et al., 2014). Rozdíly či nuance

ve výsledcích, byť ne natolik výrazné, jsou patrné i při srovnání některých výsledků výše uvedené studie Daie (2013; obrázek 6) a Sheffielda, Wooda a Rodericka (2012; obrázek 7). Trenberth et al. (2014) se domnívá, že se důvod tohoto nesouladu skrývá ve formulaci PDSI a také rozdílných datových sadách použitých pro určení komponentu evapotranspirace. Autoři považují původní vzorec PDSI za chybný a vyžadující opatrnou interpretaci výsledných hodnot, stejně jako Sheffield, Wood a Roderick (2012) či Mishra a Singh (2010). Trenberth et al. (2014) dále vyhodnotil některé další nesrovnalosti, které se objevují při interpretaci tohoto indexu, například jak se změnil charakter srážek a jeho analýza. Přesnější určení příčin výskytu sucha v globálním měřítku vyžaduje zohlednění přirozené variability klimatu, například jižní oscilace (El Niño/La Niña). Dle autorů tedy globální oteplování nemusí přímo způsobovat častější výskyt suchých epizod. Nicméně, při jejich výskytu je více pravděpodobný rychlejší nástup a větší celková intenzita těchto událostí (Trenberth et al., 2014).

Lehner et al. (2006) zkoumal budoucí dopad globální změny klimatu na riziko výskytu povodní a sucha v Evropě. Autoři uvádí, že při analýzách extrémních hydrologických jevů je pozornost zaměřena obvykle na případové studie z menších, lokálních povodí. Současně je však možno se dozvědět při procházení odborné literatury, že změna klimatu může výrazně změnit riziko výskytu hydrologických extrémů také ve velkých regionálních měřítkách a že stále se zvyšující poptávka po vodě bude v budoucnu ještě umocňovat tlak na vodní zdroje. Proto se kolektiv autorů rozhodl vytvořit první kontinentální integrovanou analýzu možných dopadů globálních změn klimatu a spotřeby vody na budoucí frekvenci výskytu sucha a povodní v celé Evropě. Pro analýzu byl využit globální integrovaný hydrologický model WaterGAP, především z důvodu jeho schopnosti simulovat režimy vysokých a nízkých průtoků. Tento model také slouží k výpočtu relativních změn frekvencí povodní a sucha. Výsledky studie indikují rozlehle "kritické regiony", pro které model předpokládá významné změny v riziku výskytu povodní a sucha v závislosti na scénářích budoucí klimatické změny.

Jako nejvíce náchylné oblasti, co se týče nárůstu frekvence výskytu povodní, se dle výsledků jeví severní a severovýchodní Evropa. Naopak v jižní a jihovýchodní Evropě se může očekávat výrazné zvýšení frekvence výskytu sucha. V těchto kritických regionech se události s nynější intenzitou stoleté povodně či sucha mohou opakovat každých 10 až 50 let do 70. let 21. století. I přes poměrně vysokou míru nejistoty v předložených výsledcích se autoři domnívají, že tyto předběžné propočty podtrhují důležitost vývoje účinných mitigačních a adaptačních strategií pro dopady klimatické změny v kontinentálním měřítku (Lehner et al., 2006).

Feyen a Dankers (2009) se taktéž zabývali vlivem globálního oteplování na hydrologické sucho v Evropě. Autoři provedli výpočty pomocí hydrologických modelů nad daty z regionálních klimatických modelů pro konec 20. a 21. století. Analýzy byly provedeny odděleně pro období

s výskytem mrazu (chladnější polovinu roku) a období, kdy nemrzne (teplejší polovinu roku) z důvodu odlišení stavu sucha ve vodních tocích od událostí způsobených jinými fyzikálními procesy, zejména mrazem a akumulací sněhové pokrývky. Výsledky napovídají, že v teplejší části roku se periody hydrologického sucha stanou více závažnými a déle trvajícimi, zejména ke konci 21. století ve většině částí Evropy s výjimkou severních a severovýchodních regionů. Dále je z výsledků patrné, že výskyt hydrologického sucha nebude významnější v chladnější části roku v budoucích podmínkách klimatu. Nicméně vychází najevo, že v důsledku změny klimatu se zvyšuje pravděpodobnost vodního stresu pro více evropských povodí. Nejvíce potenciálně ohrožených povodí se nachází v jižní Evropě, kde se již v současnosti obyvatelé potýkají s vodním stresem zejména v letních měsících. Toto zjištění je ve shodě s výsledky výše uvedené Lehnera et al. (2006). Očekávané změny v minimálních průtocích mohou negativně ovlivnit říční lodní dopravu, dodávku pitné vody, zemědělství či dodávku energie v důsledku redukce výroby ve vodních elektrárnách (Feyen, Dankers, 2009).

Očekává se, že stále se zvyšující koncentrace skleníkových plynů v ovzduší změní globální hydrologický cyklus, což může mít v budoucnu značné důsledky pro suchozemskou hydrologii. Prudhomme et al. (2014) vyhodnotila dopad změny klimatu na výskyt hydrologického sucha v experimentu zahrnujícím sedm globálních dopadových modelů (GIM), které vycházejí z pěti globálních klimatických modelů se čtyřmi různými scénáři vývoje budoucích koncentrací všech skleníkových plynů (RCPs). Výsledky poukazují na pravděpodobný nárůst globální závažnosti hydrologického sucha ke konci 21. století. Jako epicentra potenciálních problémů se zásobami vody autoři uvádí jižní Evropu, Blízký východ, jihovýchod USA, Chile a jihozápad Austrálie. Různé reprezentace procesů suchozemského hydrologického cyklu v rámci GIM způsobují mnohem větší nejistotu v modelované reakci sucha na změnu klimatu, než se předpokládalo dříve. Při posuzování modelování dopadů klimatické změny na vodní cyklus v budoucnu bude důležité cílit na lepší zachycení nejistoty pro zpřesnění předpovědí (Prudhomme et al., 2014).

Franke et al. (2004) se zabýval změnami klimatologických charakteristik v Sasku pro období 1951 až 2000. Konkrétně se kolektiv autorů zaměřil na analýzy teploty vzduchu, dopadajícího slunečního záření, srážkových úhrnů, sněhové pokrývky, evapotranspirace a vodní bilance. Cílem práce bylo shromáždit všechna dostupná data s denním chodem pro následné statistické vyhodnocení změn jednotlivých charakteristik. Autoři využili standartních metod testování homogenity a trendů časových řad z více než 600 meteorologických stanic v Sasku a přilehlých regionech. Více než polovina všech testovaných řad byla dostatečně homogenní pro vytvoření regionální analýzy klimatu Saska a jejího srovnání s klimatickým normálem pro období 1961 až 1990. Jako jedno ze stěžejních zjištění trendových analýz autoři uvádí signifikantní pokles (10 až 30 %) letních srážkových úhrnů, dále pak významný nárůst zimních srážkových úhrnů

a také zvýšený výskyt extrémních srážkových událostí na počátku léta. Jako další důležitý poznatek kolektiv autorů uvádí zvýšení frekvence a délky suchých period v rané i pozdní vegetační sezóně. S tím souvisí i zvyšující se hodnoty potenciální evapotranspirace, jež narostly téměř o 7 % během období 1970 až 2000. V neposlední řadě je uveden nárůst průměrných teplot vzduchu ve všech ročních obdobích, zejména v zimě (o více než 2 °C v severním Sasku). Jako výjimka je však uveden podzimní pokles teploty o 0,4 °C v Krušných horách, nicméně tento trend není statisticky významný (Franke et al., 2004).

Klimatologické studie přináší důkazy o posunu ročních období, jako například dřívější tání sněhu či dřívější začátek vegetační sezóny. Také hydrologická měření a výzkumy potvrzují časnější nástup jarního tání a jeho vlivu na průměrné měsíční průtoky. Z perspektivy vodního hospodářství je třeba kvantitativně charakterizovat dlouhodobou variabilitu hydrologického režimu k lepšímu porozumění, jak přesně klimatická změna ovlivňuje vodní bilanci v povodích s různou nadmořskou výškou. Renner a Bernhofer (2011) zkoumali posuny v hydrologických režimech na 27 vodoměrných stanicích v Sasku mezi lety 1930 a 2009 na základě časových řad odtokového koeficientu. Výsledky hovoří o velké variabilitě v načasování maximálních hodnot v průběhu roku, nicméně prostorově jsou tyto výsledky velmi koherentní. Hlavní rozdíly v načasování jsou dány zejména rozdílnou nadmořskou výškou povodí. Analýza trendů teplot vzduchu odhalila zlomový bod v roce 1988, ve kterém dochází k výraznému posunu vyšších hodnot odtokového koeficientu o jeden až tři týdny dříve. Důvodem je nárůst teploty v pozdní zimě a na začátku jara, zejména ve výše položených povodích. Tato změna dle autorů napovídá, že dopady změny klimatu na vodní cyklus mohou být mnohem výraznější ve výše položených povodích niválně-pluviálního režimu (Renner a Bernhofer, 2011).

2.4 Vliv krajinného pokryvu povodí na odtokové poměry

Krajinný pokryv je v odborné literatuře považován za jeden z nejdůležitějších faktorů, které formují odtokové poměry v povodí. Změny krajinného pokryvu nebo využití krajiny do velké míry ovlivňují odtokové charakteristiky daného povodí, jež však ihned recipročně mění dostupnost povrchové a podzemní vody, což vede k dalším změnám pokryvu či možného využití krajiny. Náhlé a výrazné změny krajinného pokryvu mohou způsobit začarovaný kruh, jenž může vést jen k velmi obtížnému napravení nejen vodní bilance, ale i celkové geodiverzity a biodiverzity daného území. I z důvodů masivního odlesňování či výskytu závažných epizod sucha se stává čím dál důležitější otázkou efektu krajinného pokryvu na vodní režim, a to nejen v regionálním, ale hlavně v malém měřítku dílčích povodí (Sajikumar, Remya, 2015).

Výzkum Robinsona et al. (2003) si kladl za cíl ověřit, jestli různý lesní management a případná změna krajinného pokryvu v lesních povodích výrazně ovlivňuje odtok v průběhu extrémních

srážkových událostí. Autoři se zaměřili na tři různé typy lesních porostů v Evropě: jehličnaté monokultury na rašelinných půdách ve Velké Británii a Irsku, mediteránní tvrdolisté lesy a střeoevropské smíšené lesy. Dle výsledků studie je zřejmé, že těžba dřeva ve všech typech lesa krátkodobě zvyšuje bazální odtok, ačkoliv v měřítku větších povodí jsou tyto změny hůře detekovatelné. Dále vychází najevo, že meliorace výrazně ovlivňuje přerozdělení povrchového a podpovrchového odtoku v menších povodích a pramenných oblastech, Kvůli nevhodným odvodňovacím systémům může dojít ke ztrátě až 50 % objemu povrchového odtoku za rok v porovnání s nedotčenými povodími. Nicméně se autoři na základě svých zjištění domnívají, že potenciál lesa redukovat extrémně vysoké a nízké průtoky je výrazně menší, než se obecně předpokládalo ve dříve publikovaných studiích (Robinson et al. 2003).

Bernsteinová et al. (2015) zkoumala vliv disturbancí lesního porostu a změny klimatu na odtok ze dvou sousedících šumavských povodí. Krajinový pokryv povodí horní Vydry a Große Ohe byl v nedávné minulosti velmi silně ovlivněn polomy lesa v důsledku orkánů a také kůrovcovou kalamitou. Dostupná hydrologická a meteorologická data z let 1978-2011 byla analyzována neparametrickými testy pro zjištění trendů a bodů (roků) zlomu. Spolu s mapováním změny vegetačního pokryvu měly výsledky napovědět, jestli zde dochází ke změně hydrologického cyklu a pokud ano, čím jsou tyto změny způsobeny. Kolektiv autorů uvádí, že nebyla zjištěna žádná signifikantní změna v průměrných ročních průtocích a srážkách, stejně tak v případě sezónního rozložení úhrnů srážek. Naopak výrazný nárůst byl zaznamenán ve výskytu vysokých průtoků v březnu, což je způsobeno značným oteplováním na konci zimy a začátku jara. Toto oteplování výrazně posouvá datum roztání posledních zbytků sněhové pokrývky, které nastává o více než tři týdny dříve (začátek až polovina dubna v závislosti na nadmořské výšce). V povodí Große Ohe došlo k 11% nárůstu odtokového koeficientu v důsledku ztráty porostu lesa na 30 % celkové plochy povodí v roce 1999. Pro stejný rok byl v časových řadách odhalen zlomový bod, jenž rozděluje sledované období na dvě periody (1980-1998 a 1999-2011). Výskyt zlomového bodu v tomto roce pro datovou řadu průtoků autoři přisuzují právě masivnímu úbytku lesa v důsledku kůrovcové kalamity. Zmenšené evapotranspirační ztráty zvýšily doplňování zdrojů podzemních vod v průběhu léta, což způsobilo výrazný nárůst nízkých průtoků na podzim. Naproti tomu pozorované zvýšení průtoků na konci zimy a začátku jara je dle autorů způsobeno pouze oteplováním. Dále nebyly zaznamenány žádné negativní trendy nízkých průtoků v jarních a letních měsících, pouze mírný pokles v absolutních hodnotách průtoků v květnu. Nicméně tento fakt autoři přisuzují dřívějšímu tání sněhu, jelikož jarní srážkové úhrny dlouhodobě neklesají. Srážkové úhrny v letních měsících sledovaného období naopak mírně narůstají (Bernsteinová et al., 2015). Je však třeba brát v potaz, že analýza končí rokem 2011 a tím pádem nezahrnula několik abnormálně suchých let ve střední Evropě, počínaje rokem 2015, což může mít určitý vliv na dosažené výsledky.

Zehe et al. (2010) se zaměřil na porovnání dynamiky odtoku z lesního a travnatého porostu v závislosti na nasycení půdy vodou. Kolektiv autorů představil studii, která se zabývá vlivem půdní vlhkosti na odtokový proces v pramenné oblasti řeky Wilde Weißeritz (Divoká Bystřice) ve východních Krušných horách, zhruba 5 km západně od obce Cínovec. Dva testovací pozemky s odlišným vegetačním pokryvem byly rovnoměrně osazeny celkem 73 sondami (impulsní reflektometry, dále jen TDR) měřícími v hloubce 60 cm. Distribuovaná časová řada vertikálně zprůměrovaných údajů o půdní vlhkosti z obou lokalit byla poté analyzována statistickými a geostatistickými metodami. Prostorová variabilita půdní vlhkosti v lese byla výrazně větší než na travnaté ploše. Shlukování sond TDR v kombinaci s dlouhodobým sledováním umožnilo autorům identifikovat prostorové struktury kovariance v menším měřítku pro různou vlhkost. Rovněž byla zjištěna velmi silná korelace mezi předchozí půdní vlhkostí v lese a odtokovým koeficientem srážko-odtokových událostí pro nejbližší vodoměrný profil Rehefeld. Předchozí nasycení půdy v lesním porostu vysvětluje 92 % variability odtokového součinitele. Autoři také na závěr článku uvádějí, že metoda sledování půdní vlhkosti pomocí sond TDR je vhodnější k posouzení průměrné dynamiky půdní vlhkosti spíše v neovlivněných prostředích, zejména v lese. Měření půdní vlhkosti v lese se ukázalo jako mnohem lepší prediktor pro tvorbu modelů odtoku než pouhé sledování předchozích srážkových událostí. Dlouhodobé sledování těchto charakteristik v pramenných oblastech toků by dle kolektivu autorů mohlo významně pomoci při předpovědi povodní a varování před nimi (Zehe et al., 2010).

Pro české pohraniční oblasti je typická, alespoň co se 20. století týče, změna využití krajiny po roce 1945. Prvotní příčinou těchto změn byl odsun sudetských Němců, následný vznik tzv. železné opony a s tím související uzávěra pohraničních zón. Obě výše uvedené skutečnosti vedly k rapidnímu úbytku populace, což mělo za následek pokles podílu zejména orné půdy ve prospěch pastvin, luk a lesního porostu. Pro Krušné hory byla taktéž typická těžba cínu a mědi již od středověku (také se zde těžil uran, zejména v první polovině 20. století), což na zdejší krajině zanechalo dnes již často nezřetelné stopy v podobě různých odvodňovacích kanálů a přeložek v důlních systémech (Beranová, 2011). Krajinný ráz Krušných hor v historii opakovaně procházel markantními změnami, o čemž podrobněji pojednává kapitola 4.4.

V katastrálních územích obcí Abertamy a Hřebečná, které mohou být brány jako modelový příklad krušnohorských příhraničních katastrů z důvodu jejich těsné blízkosti k vybraným povodím, byla provedena analýza změn krajinného pokryvu a využití ploch mezi lety 1827 a 2007. Z výsledků je patrný výrazný nárůst podílu trvalého travního porostu na úkor orné půdy, která v roce 1827 tvořila zhruba polovinu rozlohy těchto katastrů, ale v současnosti se zde již vůbec nevyskytuje. Mírný nárůst zaznamenala též kategorie lesních ploch na úkor orné půdy a travních porostů. (Bičík et al., 2012, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015).

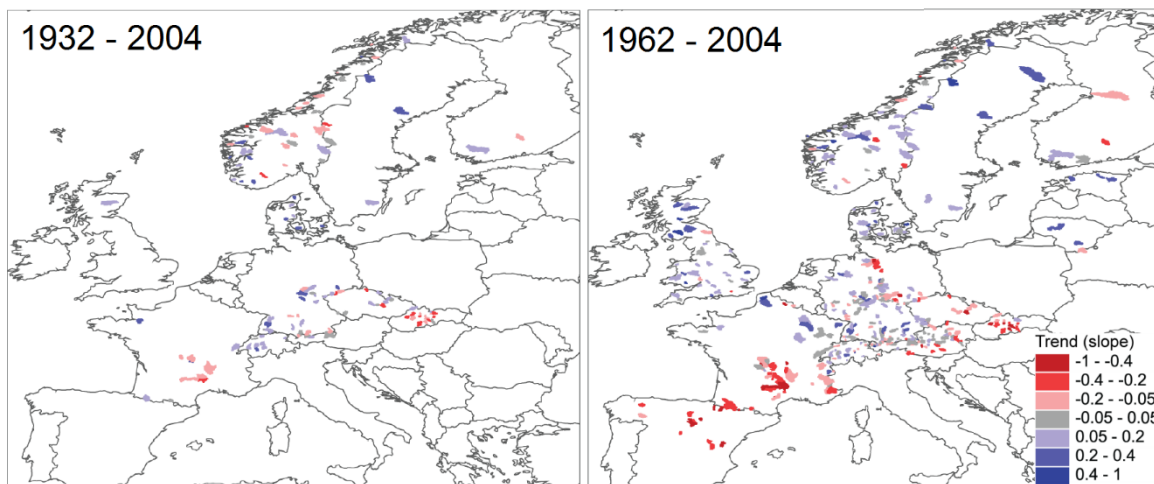
2.5 Studie trendů změn srážko-odtokových režimů

Pozorování změn srážko-odtokových režimů v přírodních či méně antropogenně ovlivněných povodích je velmi důležité pro hodnocení modelových simulací velkých měřítek, vodního hospodářství a adaptačních opatření. Vědecké týmy po celém světě se stále pokouší rozpoznat vliv klimatické změny na odtokové režimy řek od kombinace více přímých antropogenních disturbancí, např. odběrů či umělého zadržování vody (Stahl et al. 2010).

Hannaford a Marsh (2006) provedli vyhodnocení trendů nízkých průtoků za využití Mann-Kendallova testu (dále jen MK-test) ve vybraných britských povodích, jež nejsou tolik narušeny antropogenními zásahy. Statistické testy byly aplikovány na řady průtoků, doby trvání nízkých průtoků a jejich magnitudy. Analýzy byly provedeny pro dvě periody z důvodu vyhodnocení citlivosti trendů na referenční období, ke kterému byly vztaženy. Bez ohledu na rozkolísanost v nedávné minulosti ukazují výsledky relativní stabilitu hodnot průměrných a nízkých průtoků od počátku 60. let 20. století. Taktéž nebyly zjištěny žádné signifikantní trendy pro minimální průtoky. Pozitivní trend v období 1973 až 2002 je silně ovlivněn výrazně sušším obdobím na začátku sledovaného úseku, tudíž není brán jako relevantní. Existuje několik náznaků klesající tendence průtoků na východě Velké Británie, nicméně tyto výsledky nebyly v době provedení analýzy statisticky významné (Hannaford, Marsh, 2006). Podobný přístup využil Wang et al. (2015) k hodnocení změn průtoků na řece Tarim na západě Číny. V období mezi lety 1960 a 2007 byl zaznamenán stále se zvyrazňující trend výskytu extrémně nízkých průtoků s největší intenzitou v zimním období. Zároveň byl zaznamenán progresivní trend doby trvání suchých period na dolním toku řeky Tarim. Kolektiv autorů se domnívá, že zásadní vliv na změnu odtokového režimu tkví v globální změně klimatu, zejména kvůli ubývajícím zásobám tavné vody z ledovců a sněhu. Dále však připouštějí, že určitou odpovědnost za současný stav nese i intenzivnější antropogenní činnost přímo v povodí (Wang et al., 2015).

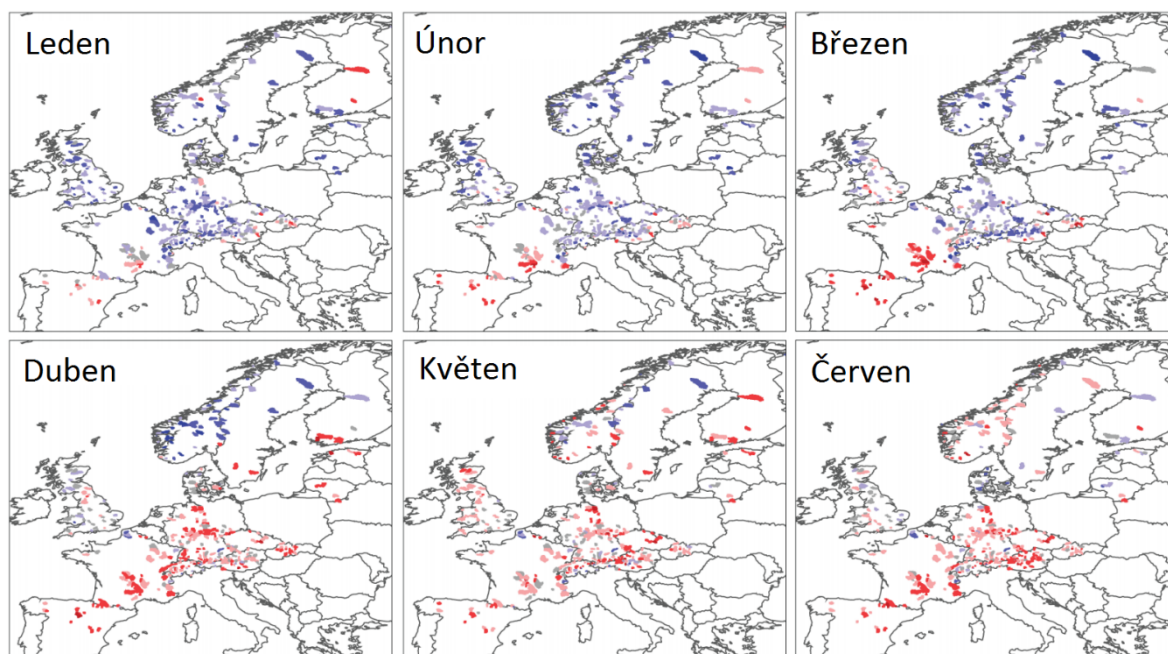
Stahl et al. (2010) zkoumala trendy průtoků v konsolidovaném datasetu 441 malých, přírodě blízkých povodí patnácti evropských zemích. Nejširší prostorové pokrytí poskytly analýzy období let 1962–2004, nicméně výpočty byly provedeny i pro období od roku 1932, 1942 a 1952, ale se zahrnutím menšího počtu stanic. Tendence průměrných průtoků byly definovány na základě sklonu Kendall-Theilovy robustní linie (dále jen KTRL) pro standardizované roční a měsíční datové řady. Testování magnitud letních nízkých průtoků a jejich načasování bylo provedeno pouze pro období od května do listopadu z důvodu snahy o identifikaci pouze letních minim způsobených nedostatkem dešťových srážek a vysokou evapotranspirací. Roční průměrné průtoky vykazují mezi lety 1962 a 2004 negativní trend ve Španělsku, jižní Francii a v jihovýchodní polovině střední Evropy. Naopak pozitivní trendy byly zaznamenány v mírné

většině ze všech zkoumaných povodí, zejména v severní a severozápadní Evropě a též v severozápadní polovině střední Evropy. Při analyzování delších řad stojí také za povšimnutí obecné zeslabení signifikance pozitivních i negativních trendů. Na druhou stranu v některých povodích negativní trendy ročních průměrných hodnot přetrvávají, např. na Slovensku (obrázek 8).

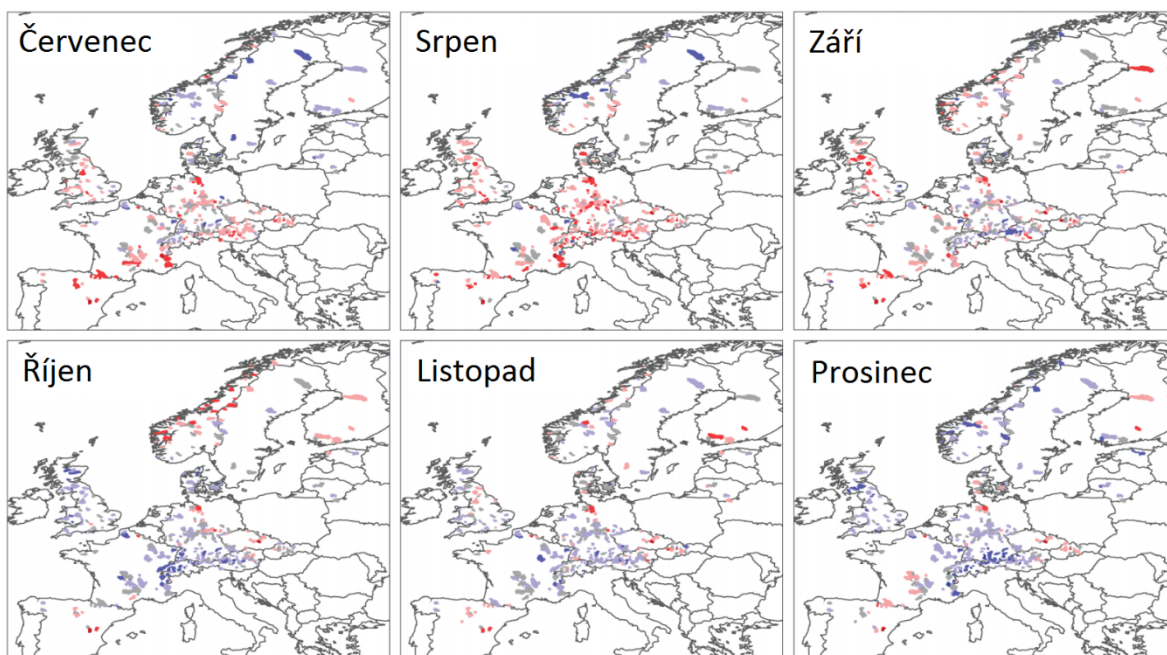


Obrázek 8: Trendy průměrných ročních průtoků v Evropě (Stahl et al., 2010, upraveno)

Trendy průměrných měsíčních průtoků pro období 1962–2004 (obrázky 9 a 10 na následující straně) nastiňují možné příčiny změn celoročních průměrů, stejně jako změny v odtokových režimech vodních toků po celé Evropě. Pozitivní trend průměrných měsíčních průtoků byl zjištěn v zimních měsících u valné většiny zájmových povodí. Výrazný obrat však nastává v dubnu, kdy naopak většina povodí vykazuje negativní trend. Ten se postupně prohlubuje až do srpna, kdy je hodnotově i plošně nejvýraznější. Hodnoty nízkých průtoků klesají zejména v regionech s nejnižším průměrným měsíčním průtokem v letních měsících (Stahl et al. 2010).



Obrázek 9: Trendy průměrných měsíčních průtoků v Evropě, část první (Stahl et al., 2010, upraveno)



Obrázek 10: Trendy průměrných měsíčních průtoků v Evropě, část druhá (Stahl et al., 2010, upraveno)

Přestože se může zdát, že klimatická změna má stejný či podobný vliv na celém území daného regionu, v praxi tomu tak nemusí vždy být. Dopady změny klimatu se mohou lišit prostorově i sezónně, což se projevuje právě v rozdílném chování režimů jednotlivých řek v daném regionu. Hannaford a Buys (2012) vyhodnotili trendy průtoků v 89 povodích ve Velké Británii a Severním Irsku v období 1969–2008. Autoři se opět zaměřili na oblasti s žádnou nebo nízkou měrou antropogenního ovlivnění odtoku kvůli přesnější kvantifikaci role klimatických faktorů. Výsledky ukazují rostoucí tendence průměrných a vysokých průtoků v podzimních a zimních měsících, ale také klesající průměrné průtoky na jaře.

Výše uvedené trendy odtoku jdou ruku v ruce s měnícím se rozložením srážek v průběhu roku, nicméně autoři upozorňují, že tyto výsledky jsou poplatné pouze výše uvedenému časovému rozmezí. Při použití delších časových řad nebyly tyto trendy potvrzeny. Co se týče letních měsíců, ve sledovaném období nebyly zaznamenány žádné negativní trendy jak v průměrných, tak v nízkých průtocích, což je v rozporu s predikcemi většiny klimatických modelů. Dále autoři poukazují na poměrně velkou míru prostorové heterogenity zjištěných trendů, předně v jiho-východní Anglii. V souvislosti s tímto faktem je také upozorněno na nutnost opatrného přístupu při extrapolaci výsledků z plošně malých povodí do větších regionů, aby nedošlo k zanedbání intraregionální variability (Hannaford, Buys, 2012).

Vliv člověka na odtokové procesy v kulturní krajině je nezpochybnitelný. Otázkou však zůstává, jak, kde a kdy se toto ovlivnění projevuje nejvíce. Tijdeman, Hannaford a Stahl (2018) se pokusili odlišit vliv člověka na odtok porovnáním více charakteristik sucha v antropogenně ovlivněných povodí Anglie a Walesu s přírodními či přírodě blízkými povodími. Autoři studie

se zaměřili na vztah mezi dobou trvání sucha a indexem bazálního odtoku (dále jen BFI), dále na korelaci mezi průtokem a srážkovými úhrny a také na výskyt epizod hydrologického sucha v porovnání s meteorologickým suchem (nárůst či pokles měsíců s hydrologickým suchem v poměru se srážkovým suchem). Výsledky poměrně překvapivě neprokázaly významné rozdíly v projevech hydrologického sucha mezi přírodními povodími a většinou ovlivněných povodích. Pouze v několika málo povodích bylo zjištěno prodloužení suchých period z důvodu čerpání podzemní vody. Korelace mezi úhrny srážek a průtokem byla slabší pro povodí s přehradními nádržemi, tak i s větším odběrem podzemní vody než pro přírodní povodí. Dále autoři uvádí, že frekvence výskytu měsíců s hydrologickým suchem vykazuje sestupnou tendenci v povodích s přehradními nádržemi. Antropogenní modifikace ale dle výsledků analýz nemají konzistentní vliv na charakteristiky hydrologického sucha. V rozličných případech je mohou zhoršit, ale i zmírnit (Tijdeman, Hannaford, Stahl, 2018).

Předmětem výzkumu Blahušiakové a Matouškové (2016) v povodí horního Hronu v Nízkých Tatrách bylo vyhodnocení hydroklimatických extrémů pomocí MK-testu a také porovnání dvou period ve sledovaném období za využití programu Indicators of Hydrological Alterations (IHA). Výsledky trendových analýz korelují s dalšími výsledky jiných výzkumů v regionu střední Evropy. Hlavním zjištěním této práce je klesající trend průtoků (průměrný roční, průtok 75. percentilu (Q_{75pct}) a hodnota průtoků Q_{330}) v rozmezí let 1931 až 2010. Klesající tendence je výrazná zejména v chladné polovině roku (od listopadu do února). Dále dochází k relativně významnému poklesu hodnoty nejnižšího denního průtoků o 24 % v chladné polovině roku, pro teplejší polovinu roku hodnota klesla o 19 %. Nejdélší periody sucha byly zaznamenány v letech 1974 a 2003, v obou případech od února do dubna. Jako výjimečně suché uvádějí autorky roky 1973, 1993 a 2003. Zároveň však dodávají, že například hodnoty BFI nevykazují ve sledovaném období žádné signifikantní změny (Blahušiaková a Matoušková, 2016).

Studii trendů odtokových charakteristik na území Česka se zabývalo, či stále zabývá, více autorů z různých vědecko-výzkumných institucí a univerzit. Ondřej Ledvinka (2015) ukazuje potřebu pečlivého zkoumání setrvačnosti v časových řadách při analýzách trendů. Ve své studii zaměřené na vyhodnocení trendů sedmidenních nízkých průtoků a dalších podobných charakteristik využil celkem tří modifikací MK-testu, které umožňují různé nastavení trvalosti jevů. Analýza byla provedena pro 144 českých měrných profilů v rozmezí let 1961 a 2005. Výsledky práce mimo jiné poukazují na velký kontrast mezi nedostatkovými objemy průtoků mezi východní částí Česka, kde narůstají, a západní částí území, kde naopak klesají. Zároveň však výsledky pro toto časové období ukazují, že jen velmi málo stanic zaznamenalo změny charakteristik spojených se suchem. Nejvýraznější změny v objemu ročního deficitu byly zaznamenány zejména na horských stanicích, ale sestupné trendy sedmidenních minimálních

průtoků na těchto profilech nejsou zřejmé. Dále byl potvrzen konstantní posun juliánského dne výskytu sedmidenního minima směrem k začátku roku nezávisle na nadmořské výšce dané stanice. Tento fakt je přisuzován dřívějšímu tání sněhu na celém území Česka (Ledvinka, 2015).

Odezvu odtoku v pramenných oblastech řeky Blanice pramenící na Šumavě zkoumali Královec, Kliment a Matoušková (2016). Výzkum se týkal porovnání dvou malých sousedících povodí s různým krajinným pokryvem. Více zalesněné povodí Tetřívčího potoka dle výsledků výrazně nadlepšuje průtok v méně vodných letech oproti povodí Zbytinského potoka, jehož plocha je převážně tvořena trvalým travním porostem. S tím souvisí i delší doba trvání poklesu odtokové vlny po výrazných srážkových událostech v povodí Tetřívčího potoka. Zároveň však autoři poukazují na větší dlouhodobou odtokovou variabilitu v tomto povodí. Pouze při větší míře předchozího nasycení způsobují krátkodobé intenzivní srážky výrazně vyšší kulminační průtoky v travnatém povodí Zbytinského potoka (Královec, Kliment, Matoušková, 2016).

Změnám sezonality a trendům hydrologického sucha na Šumavě se věnoval Vít Skála (2017). Autor aplikoval svůj výzkum v sedmi šumavských povodích v rozmezí let 1931 až 2014 s výjimkou období 1937 až 1949. Hlavním cílem práce bylo vzájemné porovnání výsledků z jednotlivých povodí a pokus o naznačení rozdílů v chování horských a nížinných profilů a zároveň profilů na návětrné a závětrné straně. Zhodnocení hydrologického sucha bylo provedeno na základě více metod (prahová hodnota, nedostatkové objemy a metoda Gumbela (1963), což je de facto jednodenní minimum). Dále pak autor hodnotil trendy sucha za pomoci dvou neparametrických testů (MK-test a Hirsch-Slackův test). Z dosažených výsledků vyplývá, že efekt návětrí a závětrí má podstatný vliv na sezonalitu výskytu hydrologicky suchých dnů. Na profilech v návětrných povodích nastávají maxima suchých dní na podzim, zatímco profily umístěné v závětrí vykazují maxima v zimních měsících. Dále autor uvádí, že pro všechna vybraná povodí byl ve sledovaném období poměrně překvapivě zjištěn výrazný pokles výskytu hydrologického sucha, jelikož nejvýraznější suché epizody byly zaznamenány zejména v první polovině vybraných časových řad. Nicméně trendy pro jednotlivé měsíce nejsou tolik jednoznačné a prostorově nesouvislé. Pro závětrná povodí na české straně Šumavy byla například zjištěna klesající tendence výskytu sucha v zimních měsících (Skála, 2017). Trendům průměrných měsíčních teplot vzduchu či úhrnů srážek, a jejich případného vlivu na zimní průtoky, se tato práce bohužel nezabývala, tudíž nelze úplně přesně interpretovat příčiny hydrologicky suchých epizod právě v zimních měsících.

Velmi aktuální studii, která se zabývala vyhodnocením sezónních variací sucha a jeho trendů ve střední Evropě, publikovala Hänsel et al. (2019). Hlavním přínosem této práce je zhodnocení dlouhodobé variability charakteristik sucha a sezónních klimatických trendů v období od roku

1951 do roku 2015. Klasická čtyři roční období byla před analýzou ještě doplněna dvěma vegetačními sezónami: ranou (duben, květen, červen) a pozdní (červenec, srpen a září).

Výzkum využil data měřená na 91 klimatologických stanicích v Německu, Polsku a Česku pro agregované vyhodnocení sezónních srážkových charakteristik pomocí osmi různých indexů sucha a tří ukazatelů extremity srážek. Nejsušší sezóny byly identifikovány jak pro celý region, tak i pro jeho čtyři menší dílčí části. Autoři upozorňují na důležitost vhodného zvolení délky zájmového období, jelikož multidekádní variabilita podmínek sucha omezuje časovou stabilitu vypočtených trendů. Například trendy sucha pro období 1951 až 2015 mají podobnou směrnicí jako trendy pro období 1961 až 2015, ale výrazně menší magnitudu a signifikanci. Co se jednotlivých ročních období týče, významné trendy poklesu srážek byly pozorovány na jaře, méně výrazné pak i v létě. Naproti tomu podzim a zima vykazují mírné zvýšení srážkových úhrnů. V rané vegetační sezóně byly detekovány silnější trendy nedostatku srážek než v její pozdní části. Naopak trendy extrémních úhrnů srážek jsou výraznější v pozdní vegetační sezóně ve srovnání s její ranou fází, a to i ve srovnání s klasicky vymezeným létem. Současný zvýšený výskyt sucha a zároveň extrémně silných srážkových úhrnů je pozorován v jarních měsících na několika stanicích, zejména v subregionu, jenž zahrnuje stanice v západní polovině Německa. V centrálním subregionu, který zahrnuje stanice nacházející se v Čechách, východní polovině Německa a západním Polsku, byly vyhodnoceny jako nejsušší následující sezóny. Epizody sucha jsou uvedeny v pořadí od nejzávažnějšího:

- zima: 1964, 1973, 2014
- jaro: 2011, 1953, 1976
- léto: 1976, 2003, 1983
- podzim: 1959, 1953, 1982
- raná vegetační sezóna: 1976, 2003, 1992
- pozdní vegetační sezóna: 1971, 1983, 2003

Výše uvedená zjištění historicky nejsušších sezón, která prezentuje Hänsel et al. (2019), nejsou úplným překvapením, jelikož se ve výčtu objevují známé suché epizody v Česku, které uvádí např. Kakos, Müller (2004), cit. v Brázdil, Trnka et al. (2015) či Potop et al. (2014).

Výsledky případových studií dlouhodobých trendů srážek a odtoku z větší části potvrzují zjištění a předpoklady regionálních či národních analýz. Současné tendence chování většiny evropských vodních toků jsou součástí koherentního vzorce změny klimatu, který má vliv nejen v regionálním, ale i v kontinentálním měřítku. Modelované změny se na kontinentální úrovni většinou shodují s hydrologickými odezvami, které jsou navrženy klimatickými modely na základě očekávaných změn klimatu v budoucnu (Stahl et al., 2010).

3 Použitá data a metody

3.1 Hydrologická a klimatologická data

Časové řady průměrných denních průtoků Q_d pro vybrané měřicí stanice byly získány od ČHMÚ (profil Chaloupky) a LFULG (profily Klingenthal a Rothenthal). Společný časový průnik těchto řad je k dispozici od počátku hydrologického roku 1967, kdy byl uveden do provozu měrný profil Chaloupky na horní Rolavě. Datové řady dvou německých stanic jsou delší, v případě profilu Klingenthal na Svatavě byly údaje o průtocích dostupné již od listopadu 1960, bohužel s výjimkou celého hydrologického roku 1970, kdy docházelo k rekonstrukci stanice. Nejdelší řadou průměrných denních průtoků disponuje stanice Rothenthal, jež je závěrovým profilem zájmového povodí Načetínského potoka. Měření vodních stavů a průtoků zde bylo zahájeno již před 90 lety a časová řada je doposud kontinuální. Většina analýz v této práci je proto provedena pro období 1967 až 2018, jelikož postihuje všechny tři vodní toky. Základní údaje vybraných měřících stanic jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled vybraných hydrologických stanic

profil (vodní tok)	elevace (m n. m.)	dostupné období	prům. dlouhodobý průtok Q_a (m^3*s^{-1})	medián Q_{med} (m^3*s^{-1})	průtok Q_{355} (m^3*s^{-1})
Klingenthal (Svatava)	540	1961-1969 1971-2018	1,141	0,696	0,199
Chaloupky (Rolava)	807	1967-2018	0,569	0,408	0,110
Rothenthal (Načetínský p.)	538	1929-2018	1,340	0,900	0,227

Zdroje dat: ČHMÚ, ČÚZK, LFULG

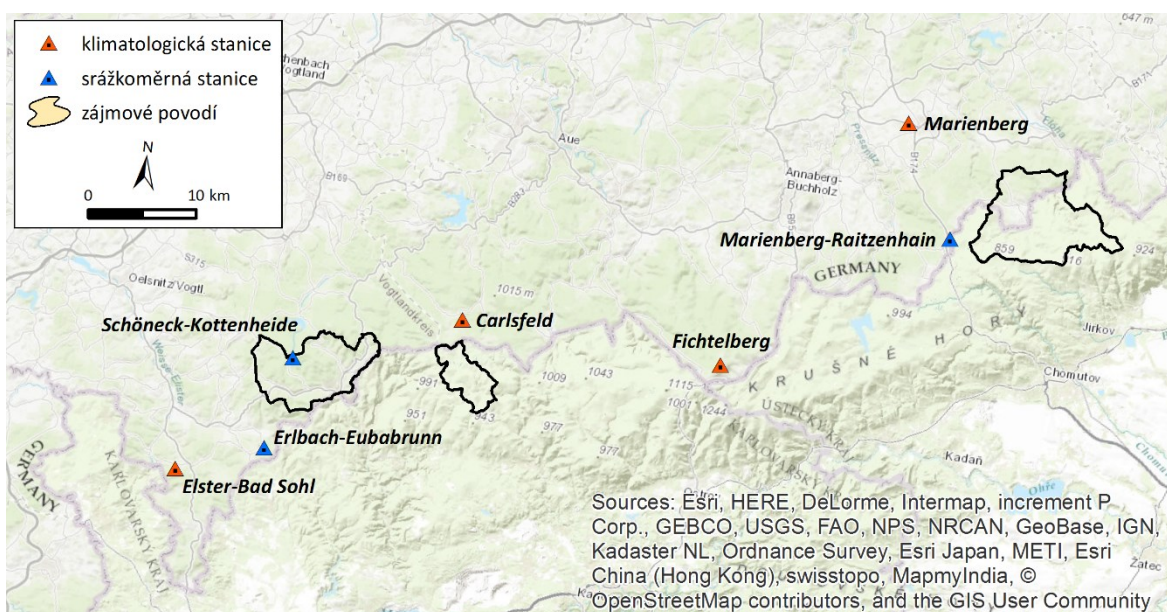
Další nedílnou součástí vstupních dat pro analýzy týkající se indexů hydrologického sucha či vyhodnocení dlouhodobých trendů jsou údaje z meteorologických a klimatologických stanic v okolí zájmových povodí. Pro účely této práce byly využity zejména průměry teplot vzduchu ($H_{m,s,r}$), úhrnů srážek ($T_{m,s,r}$) a sumy denní výšky sněhu za ($S_{m,s,r}$). Data ze stanic na německé straně Krušných hor byla čerpána z volně dostupné digitální databáze na webových stránkách Deutscher Wetterdienst (dále jen DWD), data z českých stanic nebyla z finančních důvodů využita. Německé měřicí stanice poskytly dostatečně dlouhé datové řady, ale ne každá z vybraných stanic měří kompletní spektrum všech meteorologických a klimatologických parametrů (tabulka 2 na následující straně). Datové řady z těchto stanic nebyly stoprocentně kompletní, problémy s chybějícími daty se týkaly povětšinou jen několika kratších epizod či jednotek hodnot v rámci souboru. Například hodnoty ukazatele T_m chybí v datové řadě stanice Elster-Bad Sohl pro roky 1967 a 2005, u stanice Marienberg pak mezi roky 1971 a 1975.

Hodnoty H_m chybí v kalendářním roce 2005 pro prvně jmenovanou stanici, stejný problém se vyskytuje také u stanice Marienberg v roce 1968 či přerušovaně v rozmezí let 1991 až 1995. Chybějící data byla doplněna vždy pomocí lineární regrese. Při procesu doplňování dat se ukázala silná korelace průměrných měsíčních teplot mezi jednotlivými stanicemi. Pro výše položené stanice posloužila jako referenční bod stanice Fichtelberg, jež se nachází zhruba na půli cesty mezi povodím Rolavy a Načetínského potoka a zároveň disponuje dlouhou a nepřerušovanou datovou řadou již od roku 1890. Polohy vybraných meteorologických stanic a zájmových povodí jsou zobrazeny v přehledové mapě (obrázek 11) pod tabulkou 2.

Tabulka 2: Přehled vybraných srážkoměrných a klimatologických stanic

stanice (poblíž povodí)	nadmořská výška (m n. m.)	dostupná data	dostupné parametry
Elster-Bad Sohl (Svatava)	560	1951-2018*	H_m, T_m, S_m
Erlbach-Eubabrunn (Svatava)	565	1948-2018*	H_m, S_m
Schöneck-Kottenheide (Svatava)	768	1884-2018*	H_m, S_m
Carlsfeld (Rolava, Svatava)	897	1891-2018*	H_m, T_m, S_m
Fichtelberg (referenční stanice)	1213	1890-2018	H_m, T_m, S_m
Marienberg (Načetínský p.)	639	1956-2018*	H_m, T_m, S_m
Marienberg-Reitzenhain (Načetínský p.)	764	1947-2018*	H_m, S_m

*chybějící data byla doplněna na základě lineární regrese z okolních stanic (zdroje dat: DWD, LFULG)



Obrázek 11: Přehledová mapa vybraných klimatologických a srážkoměrných stanic (zdroje: DWD, LFULG, © OpenStreetMap Contributors)

3.2 Mapové podklady a použitý software

Podklady pro fyzicko-geografickou charakteristiku zájmových lokalit pocházejí z českých, německých a mezinárodních zdrojů. Veškeré mapové podklady pro německé části vybraných povodí byly staženy či zvektorizovány nad WMS z volně přístupné databáze iDA, kterou provozuje na svých webových stránkách LFULG.

Pro území nacházející se na české straně Krušných hor bylo třeba shromáždit data a podklady z více zdrojů. Základní topografické vrstvy prostorových dat byly získány z databáze ArcČR 500, verze 3.3, vrstvy týkající se povodí a vodních toků byly staženy z databáze DIBAVOD na stránkách VÚV T. G. M. Mapové podklady geologických a půdních poměrů poskytla ČGS. Údaje o potenciální přirozené vegetaci byly zjištěny na národním geoportálu INSPIRE, který provozuje CENIA. Data krajinného pokryvu v období 1990-2018 byla získána z volně přístupné databáze CORINE Land Cover na webu EEA, starší české mapové podklady z 19. a 20. století poskytl VÚKOZ. Pro údaje o krajinném pokryvu na německé straně v polovině 20. století byla zvektorizována základní mapa Saska ze 40. let, dostupná jako WMS z webu LFULG.

Prostorové analýzy a mapové výstupy byly vytvořeny v programu ESRI ArcGIS 10.3, diagramy a tabulky jako výstupy analýz jednotlivých ukazatelů hydrologického sucha pak byly produkovány povětšinou v prostředí Microsoft Office, dále také v prostředí softwaru IHA7.1 (Richter et al., 1998; The Nature Conservancy, 2009). K výpočtům statistických testů byla využita rozšíření programu Microsoft Excel, např. Multitest, verze 5.0, pro provedení základní i sezónní verze MK-testu (Libiseller, Grimvall, 2002; Libiseller, 2004) či XLSTAT od společnosti Addinsoft pro testy homogenity časových řad. Analýzy trendů pomocí KTRL byly provedeny v programu KTRLLine1.0, jenž je volně k dispozici ke stažení na webových stránkách USGS (Granato, 2006) a správnost těchto výpočtů byla ověřena i v prostředí XLSTAT. Principy výpočtů a vzorce uvedených statistických testů jsou detailně rozvedeny v kapitole 3.5.

3.3 Testování homogenity datových řad

Před samotnými analýzami změn sezonality suchých dní a testováním statisticky významných trendů v časových řadách byla testována jejich absolutní a relativní homogenita. Účelem tohoto testování byla snaha o určení zlomových roků v měsíčních, sezónních a ročních datových řadách klimatologických, srážkoměrných a vodoměrných stanic. Dále tyto testy také posloužily ke zjištění, jestli a jak moc se tyto zlomové roky pro jednotlivá zájmová povodí liší. Pro tento účel byly využity dva testy homogenity: Pettittův test absolutní homogenity (Pettitt, 1979), též uváděný jako Pettitt-Mann-Whitney test (Volková, 2010) a Standard Normal Homogeneity Test (dále jen SNHT; Alexandersson, 1986).

3.3.1 Testování absolutní homogenity

Pettittův test provádí identifikaci zlomového bodu v datové řadě na základě významné změny střední hodnoty, čímž tuto řadu rozdělí na dvě části. Vzorec testu je:

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j)$$

kde je délka datové řady označena jako T a rok zlomu je označen jako t . Testovací statistika má pak následující vzorec, kde K_T je její maximální hodnota a označuje pravděpodobný rok zlomu.

$$K_T = \max |U_{t,T}|$$

Nulová hypotéza tohoto testu nepředpokládá výskyt bodu změny, tudíž je zamítnuta, pokud je např. na 95% hladině spolehlivosti hodnota p menší než 0,05. Nicméně i při nesplnění těchto kritérií test určí rok, jenž rozdělí soubor na dva díly. Tento test je hojně používán ve studiích podobného zaměření, zejména pro testování hydroklimatických dat bez normálního rozdělení. Ve svých studiích jej použili například Franke et al. (2004), Ledvinka (2008), Bernsteinová et al. (2015) či Královec, Kliment a Matoušková (2016).

3.3.2 Testování relativní homogenity

SNHT test byl vyvinut za účelem detekce změn v časových řadách srážek (Alexandersson, 1986; Alexandersson, Moberg, 1997). Test pracuje na principu vytvoření poměrů mezi zkoumanou a referenční řadou (Q_i), přičemž výsledná řada (Z_i) je standardizována do podoby s normálním rozdělením. Vzorec testu je:

$$Z_i = (Q_i - \bar{Q})/\sigma_Q$$

kde Q je nulový průměr a σ_Q jednotková směrodatná odchylka. Testovací statistika je následně vypočtena dle vzorce:

$$T = \max\{a\bar{z}_1^2 + (n - a)\bar{z}_2^2\}, \quad 1 \leq a \leq n - 1$$

Nulová hypotéza předpokládá, že hodnoty Z mají normální rozdělení, alternativní hypotéza zní, že řada nemá normální rozdělení a Z spadá do intervalu $N(\mu_1, 1)$ či $N(\mu_2, 1)$ a je určen rok zlomu a (Alexandersson, 1986). Stejně jako u Pettittova testu je bod zlomu určen i při nesplnění kritéria na 95% hladině spolehlivosti, ve výsledcích této práce jsou proto statisticky významné hodnoty zvýrazněny a porovnány s výsledky Pettitova testu. Khaliq a Ouarda (2007) však upozorňují, že jednoduchý zlom může být pomocí základní verze tohoto testu identifikován velmi blízko začátku nebo konci datových řad.

Jako doplněk k rozborům homogenity byly sestrojeny podvojně součtové čáry kumulativních podílů průměrných ročních srážek H_r a průtoků Q_r (Kaňok, 1999). Ve studiích tento přístup využili např. Kliment a Matoušková (2007) či Ledvinka (2008).

3.4 Ukazatele hydrologického sucha

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.2, výběr indexů hydrologického sucha musel být proveden na základě několika kritérií, jako je například dostupnost vhodných dat či porovnatelnost s dalšími publikovanými výzkumy podobného zaměření. Zároveň bylo v analýzách přihlédnuto k problematice hodnocení průtoků v „chladném“ a „teplém“ půlroce. Vymezení těchto dvou pomyslných polovin roku bylo provedeno za účelem odlišení extrémně nízkých průtoků způsobených mrazem od těch minimálních průtoků, které nastaly z důvodu nedostatku srážek či zásob vody v povodí. Chladný půlrok je pro této účely práce vymezen od počátku listopadu do konce dubna, zatímco teplý půlrok zahrnuje období od začátku května do konce října.

- *Metoda prahové hodnoty Q_{355}* : Pro každý profil byly vypočteny hodnoty průtoků, jejichž pravděpodobnost dosažení je 97,19 %. Hodnota Q_{355} byla definována nejen pro celé sledované období, ale také pro každý měsíc (Q_{355m}) a sezónu (Q_{355s}) pro účely zjištění, které měsíce nejvíce „vysychají“ nejen absolutně, ale i relativně ke svému normálu.
- *Nedostatkové objemy*: Na základě překročení výše uvedené prahové hodnoty byly vypočteny pro každý profil deficitní objemy (Lehner et al., 2006; Vlnas, 2015).
- *LFI*: Poměr nejnižšího denního průtoků pro každý hydrologický rok k hodnotě dlouhodobého průměrného denního průtoků. Čím blíže je hodnota indexu nule, tím výraznější byla záporná odchylka od normálu (Poff, Ward, 1989 cit, v Pyrcce, 2004).
- *BFI*: Podíl objemu bazálního odtoku na celkovém objemu odtoku na základě separace hydrogramu v denním kroku. Dle původní definice, kterou publikoval v 80. letech britský hydrologický institut, měl index sloužit k pozorování vlivu geologického podloží na odtok. Povodí s hydrogeologicky vysoce propustným podložím vykazují roční hodnoty kolem 0,9, zatímco v málo propustných oblastech nabývá většinou hodnot okolo 0,2 (Gustard, Bullock, Dixon, 1992). V současnosti se tento ukazatel využívá i ve studiích zabývajících se suchem v různých modifikacích. V této práci je BFI vypočten jako podíl hodnoty sedmidenního minimálního průtoků a průměrného denního průtoků v daném hydrologickém roce (Poff, Ward, 1989; Richter et al., 1998).

Při výpočtu některých ukazatelů byl využit výše uvedený software IHA7.1, který pracuje na bázi denních řad průtoků a umožňuje výpočet 67 hydrologických parametrů i z dlouhých datových souborů. Velkou výhodou IHA7.1 je možnost rozdělit datový soubor na dvě libovolně dlouhé periody pro srovnávací analýzu. V tomto softwaru byly pro vybrané období 1967-2018 vypočteny hodnoty BFI a sedmidenního minima, dále pak byly určeny hodnoty jednodenního minima a juliánský den jeho výskytu (Richter et al., 1998). Tento přístup také využili např. Blahušáková a Matoušková (2016), Vlach (2016), Yang et al. (2017) a Navrátilová (2018).

3.5 Detekce trendů v časových řadách

Dalším způsobem je určení trendu pomocí sklonu KTRL, která je též označována jako Theil-Senova regrese. Tento přístup poprvé zvolil pro určení trendu Theil (1950). Jedná se v podstatě o lineární regresní funkci a významnost trendu je určena sklonem přímky. Ve vzorci rovnice KTRL je řada daného hydrologického ukazatele označena jako y , čas jako t , sklon jako m a absolutní člen z regresní analýzy je označen jako b . Samotný sklon m je pak vypočten jako medián všech sklonů pro po dvojice po sobě jdoucích hodnot. Pokud je hodnota sklonu KTRL kladná, znamená to stoupající tendenci datového souboru, naopak pokud je hodnota záporná, hodnoty mají sestupnou tendenci (Déry et al., 2009).

$$y = m t + b, \quad m_k = \frac{(y_j - y_i)}{(t_j - t_i)}$$

Stahl et al. (2010) použila tuto metodu pro standardizované hodnoty Q_r , Q_m či pro průměrná sedmidenní minima a datum jejich výskytu v teplejší části roku, konkrétně od května do listopadu. Jak kolektiv autorů uvádí, předmětem jejich studie nebylo testování statistické významnosti, ale spíše poukázat na regionální rozdíly a celkové změny ve vývoji odtoku v průběhu delšího období. Další studie zabývající se touto metodou publikovali Chen a Grasby (2009) či Déry et al. (2009), zejména pro porovnání trendů různých hydrologických ukazatelů v regionech s rozdílnými hydrologickými režimy.

Pro testování trendů a jejich statistické významnosti v časových řadách byl použit MK-test, jenž stejně jako Pettittův test předpokládá, že vstupní data nemají normální rozdělení. Tento neparametrický test je ve své původní podobě i sezónní modifikaci dle Hirsche a Slacka (1984) používán k detekci monotónních trendů v časových řadách nejen v hydrologii či klimatologii. Nulovou hypotézou je nezávislost pozorovaných dat a jejich stejnoměrná distribuce v souboru, zatímco alternativní hypotéza předpokládá výskyt monotónního trendu. Dva důležité parametry, jenž vyjadřují detekci trendu, jsou:

- *míra signifikance*: vyjadřuje sílu testu (*p-hodnota*)
- *odhad velikosti směrnice*: vypovídá o směru a velikosti trendu (*MK-statistika*)

Ve vzorci testovací statistiky MK-testu jsou X_j a X_k dvě po sobě jdoucí hodnoty v rámci časové řady, n představuje délku řady. Pokud je hodnota testovací statistiky S kladná, je detekován rostoucí trend, záporná hodnota znamená klesající trend (Libiseller, 2004):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k), \quad \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

MK-test je v posledních letech velmi často využívanou metodou v hydrologii i klimatologii, jedním z důvodů je i jeho schopnost pracovat s nekompletními datovými soubory. Pro své

analýzy, jež jsou uvedeny v rešeršní části této práce, jej použili například Franke et al. (2004), Ledvinka (2008), Hannaford a Buys (2012), Blahušiaková a Matoušková (2016), Královec, Kliment a Matoušková (2016), Skála (2017) či Navrátilová (2018).

3.6 Korelace hydrologických a klimatických řad

Vzájemná závislost měsíčních a ročních klimatických řad byla po provedení trendových analýz následně testována pomocí Kendallova koeficientu pořadové korelace τ_b (Kendall, 1955). Oproti např. Pearsonovu korelačnímu koeficientu nepředpokládá normalitu vstupních souborů, tudíž je vhodný pro použití ordinálních dat. Tento ukazatel hodnotí těsnost vztahu mezi dvěma datovými soubory na základě počtu inverzí v pořadí dvojic objektů, což je opačný přístup než při výpočtu Spearmanova koeficientu, jenž koreluje pouze pořadí. Kendallův koeficient nabývá hodnot od -1 do 1, stejně jako např. Pearsonův nebo Spearmanův korelační koeficient (Abdi, 2007). V odborné literatuře taktéž bývá nejasně vymezena kritická hladina pro odlišení slabé a středně silné závislosti. V případě Spearmanova nebo Kendallova koeficientu bývá standardně uváděna hodnota pro uznání středně silné závislosti jako $\pm 0,3$ (Puth, Neuhäuser, Ruxton, 2015; De Vaus, 2002), nicméně v některých publikacích je možno se setkat i s hodnotou $\pm 0,4$ (Guilford, 1953). Pro účely této práce byla tedy jako hladina středně silné závislosti určena hodnota $\pm 0,35$, jež může být jakýmsi kompromisem mezi těmito dvěma přístupy.

Postup výpočtu Kendallova τ_b je následující. Dvojice hodnot proměnných X a Y jsou nejprve seřazeny vzestupně podle hodnot proměnné X , jestliže je mezi proměnnými pozitivní vztah (konkordance), měl by soubor proměnné Y též být seřazen od nejmenší hodnoty po největší. Pokud je vztah záporný (diskordance), bude mít soubor Y klesající tendenci. Vzorec výpočtu koeficientu je uveden níže:

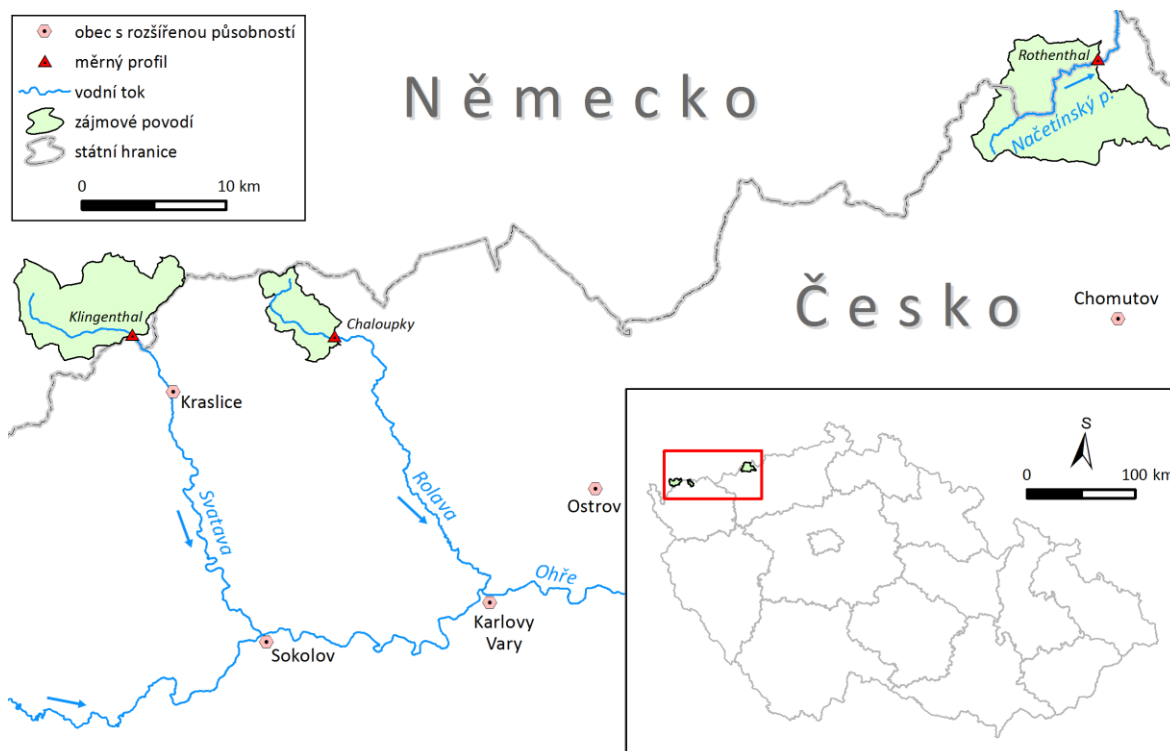
$$\tau_b = \frac{P - Q}{\sqrt{(D - \frac{\sum U(U-1)}{2})(D - \frac{\sum V(V-1)}{2})}}$$

P označuje počet všech diskordancí, Q je pak počet všech konkordancí. Jestliže v datovém souboru existuje větší počet shodných pořadí ($X_i=X_j$ či $Y_j=Y_i$), upraví se hodnota D , která vyjadřuje maximální přípustný počet shod (diskordancí a konkordancí). Dále pak ve vzorci vyjadřují U a V počet shod v řadách proměnných X_i , respektive Y_i (Abdi, 2007). V rámci výpočtu tohoto koeficientu byla také testována nulová hypotéza, která předpokládá nulovou závislost mezi proměnnými X a Y . Alternativní hypotéza předpokládá prokázání výskytu pozitivní nebo negativní závislosti. Testování proběhlo standardně na 5% hladině významnosti.

4 Vymezení a charakteristika zájmového území

Tato část diplomové práce je zaměřena na fyzicko-geografickou charakteristiku vybraných povodí. Pro účely této práce byla vybrána tři povodí v Krušných horách, konkrétně povodí horní Svatavy, horní Rolavy a povodí Načetínského potoka (obrázek 12). Ve všech třech případech jde o menší horská povodí na česko-saském pomezí, která zahrnují zejména pramenné oblasti. Rozvodnice jsou stanoveny vždy pro první vodoměrný profil od pramene toku. Tato povodí byla vybrána na základě dvou faktorů. Prvním z nich je délka časové řady průtoků, z nichž je nejkratší datová řada profilu Chaloupky na řece Rolavě začínající hydrologickým rokem 1967. Druhým kritériem důležitým pro možnost porovnání jednotlivých povodí mezi sebou je absence přehradních nádrží či jiných větších hydrotechnických staveb nad měrným profilem daného povodí, což by v ideálním případě mělo zajistit relativně nízkou míru přímého ovlivnění srážkoodtokového režimu. Samozřejmě nejde ani v jednom případě o ryze přírodní povodí bez jakéhokoli zásahu člověka, příklady konkrétních antropogenních vlivů na odtok jsou uvedeny dále v textu.

Některé podkapitoly jsou mírně zestručněny, jelikož se podrobnější charakteristice daných území věnovalo více autorů ve svých závěrečných pracích. Povodí horní Rolavy a jeho hydrografickým charakteristikám se věnovali ve svých bakalářských, respektive diplomových pracích například Ledvinka (2008), Beranová (2011) a Vlach (2016), v povodí horní Svatavy a Načetínského potoka provedla svůj výzkum Navrátilová (2018).



Obrázek 12: Přehledová mapa zájmových povodí (zdroje dat: ARCDATA PRAHA, LFULG, VÚV T. G. M.)

Pramenné oblasti povodí Svatavy (německy *Zwota*) a Rolavy se nacházejí poměrně blízko sebe (obrázek 12), závěrové profily jsou od sebe vzdáleny zhruba 10 kilometrů. Zatímco povodí horní Svatavy zakončené profilem Klingenthal se rozkládá hlavně na území spolkové země Sasko, povodí horní Rolavy přesahuje česko-německou hranici jen v severozápadním výběžku. Povodí Svatavy administrativně spadá svojí českou částí do okresu Sokolov v Karlovarském kraji, povodí Rolavy leží na hranici okresů Sokolov a Karlovy Vary v témž kraji. Svatava i Rolava stékají jihovýchodním směrem po úpatí Krušných hor a vlévají se do Ohře jako její levostranné přítoky. První ze jmenovaných toků se vlévá do Ohře v Sokolově, druhý v Karlových Varech.

Povodí Načetínského potoka (německy *Natzschung*) je od zbylých dvou povodí vzdáleno zhruba 50 km směrem na severovýchod. Na české straně se toto povodí rozkládá na území okresů Chomutov a Most v Ústeckém kraji, německá část povodí spadá též do Saska. Načetínský potok tvoří necelých 15 kilometrů státní hranici, na které leží i měrný profil Rothenthal. Na rozdíl od Svatavy a Rolavy směřuje Načetínský potok na severovýchod a vlévá se jako levostranný přítok do řeky Flöhy ve městečku Grünthal. Flöha náleží do povodí řeky Mulde, jež se stéká s Labem u města Dessau-Roßlau ve spolkové zemi Sasko-Anhaltsko.

4.1 Základní hydrografické údaje a výškové poměry

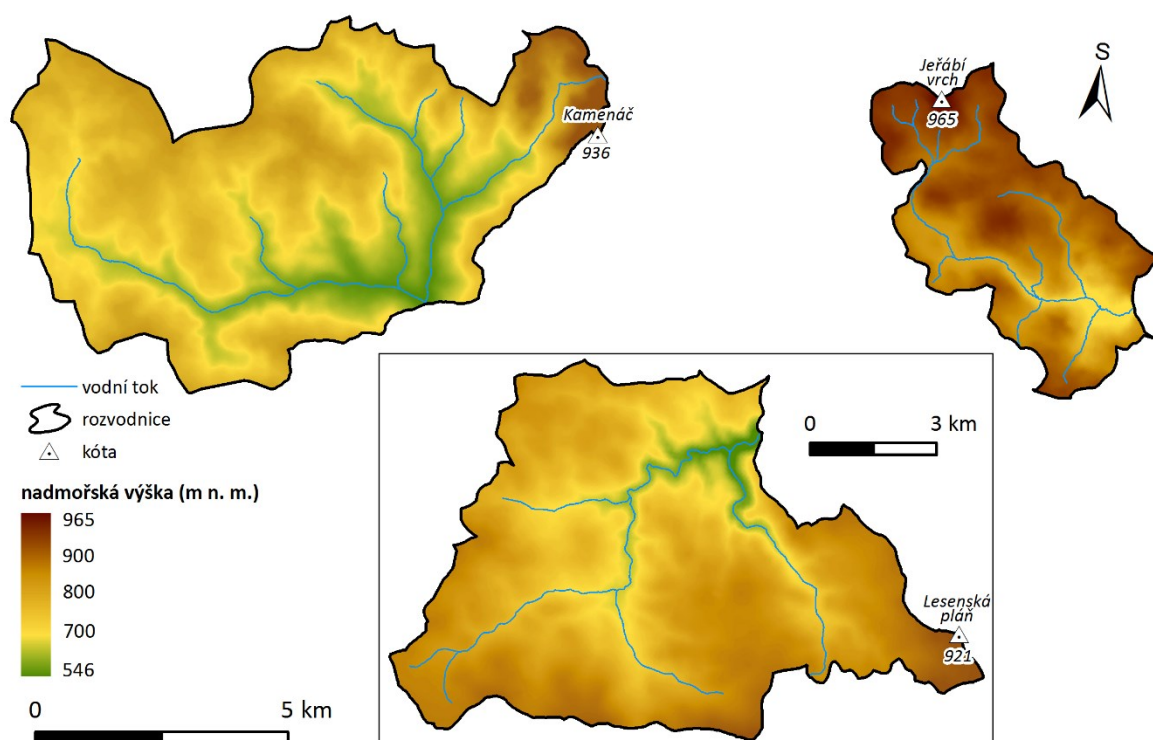
Už při zběžném pohledu na údaje základních hydrografických ukazatelů (tabulka 3) je patrné, že vybraná povodí mají rozdílnou celkovou rozlohu i výškovou členitost. Zatímco povodí horní Rolavy s průměrnou nadmořskou výškou 906 metrů se rozkládá zejména na náhorní plošinu, zbylá dvě povodí s ostřejším hlavním údolím mají mnohem větší převýšení.

Tabulka 3: Základní hydrografické údaje o zájmových povodích

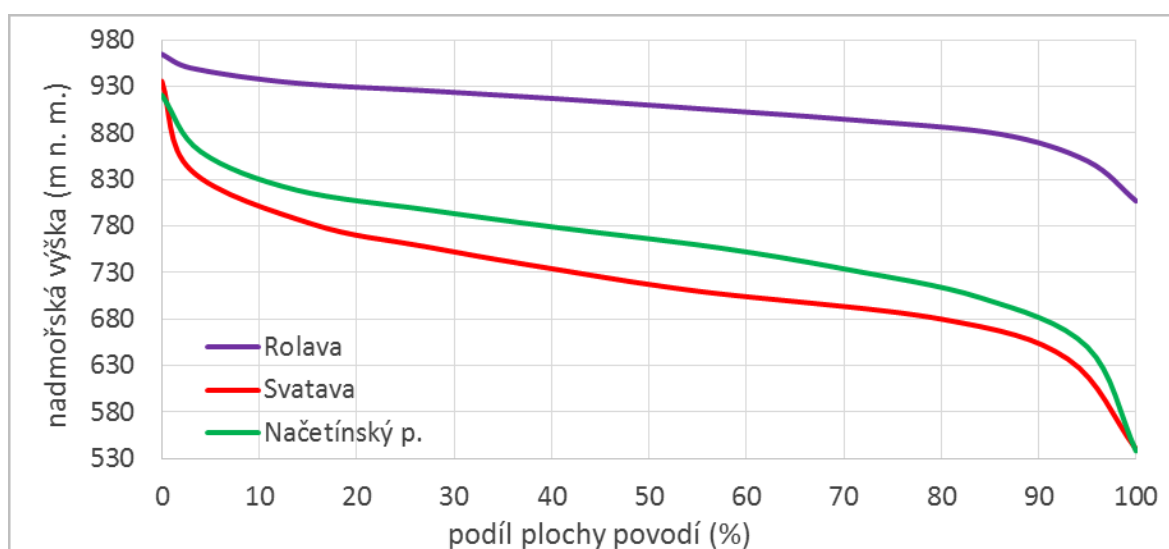
	Svatava	Rolava	Načetínský p.
plocha povodí (km²)	53,91	18,74	73,68
délka rozvodnice (km)	39,76	23,94	46,28
skutečná délka toku (km)	9,58	8,76	13,75
přímková délka toku (km)	7,48	5,09	9,76
nejvyšší bod povodí (m n. m.)	936	965	921
nejnižší bod povodí (m n. m.)	540	807	538
nejvyšší bod toku (m n. m.)	715	921	825
nejnižší bod toku (m n. m.)	540	807	538
převýšení povodí (m)	396	158	383
průměrný sklon povodí (‰)	53,93	36,50	44,62
průměrný sklon toku (‰)	18,27	13,01	20,87

zdroje dat: CENIA, ČÚZK, LFULG, VÚV T. G. M.

Rozdílné převýšení je dáno hlavně polohou měrných profilů, v případě Svatavy a Načetínského potoka jde o rozdíl zhruba 250 výškových metrů oproti měřící stanici Chaloupky na Rolavě. Proto také průměrná nadmořská výška povodí Svatavy dosahuje 716 metrů a pro povodí Načetínského potoka 762 metrů. Mapa nadmořských výšek (obrázek 13) a také hypsografické křivky (obrázek 14) vizuálně znázorňují výškové poměry ve všech třech vybraných povodích. Necelých 70 % plochy povodí horní Rolavy se nachází v nadmořské výšce vyšší než 900 metrů, zatímco zbylá dvě povodí nedosahují této výšky ani z 5 %.



Obrázek 13: Nadmořské výšky zájmových povodí (zdroje dat: ARCDATA PRAHA, LFULG, VÚV T. G. M.)



Obrázek 14: Hypsografické křivky zájmových povodí (zdroje dat: ARCDATA PRAHA, LFULG, VÚV T. G. M.)

4.2 Geologické a geomorfologické poměry

Všechna zájmová povodí se dle českého i německého geologického členění řadí do území Českého masivu, konkrétně do oblasti saxothuringika. Podloží povodí horní Svatavy je tvořeno zejména fylity, svory a granity, což jsou horniny typické pro krušnohorské krystalinikum (Demek, Mackovčín et al., 2006). Geologická stavba nedalekého povodí horní Rolavy je velmi odlišná, jelikož ji takřka celou tvoří celek karlovarského plutonu. Karlovarský pluton je tvořen hlavně variskými granitoidy, typickou horninou je zde porfýrický granit, jenž je označován jako horská žula. V puklinách tohoto masivu se vyskytují ložiska greisenů, tedy cínových rud. Těžba cínu probíhala na tomto místě již od 16. století, nicméně po konci 2. světové války z důvodu nerentability nepokračovala. Na místě tehdejší těžby stále stojí opuštěné ruiny důlního komplexu a zajateckého pracovního tábora Sauersack, které byly vystavěny v časech Protektorátu Čechy a Morava z rozhodnutí nacistického Německa. Ložiska cínu jsou obecně známá i na dalších místech v Krušných horách nejen v oblasti karlovarského plutonu (Beranová, 2011). V povodí Načetínského potoka jsou dominantní ortoruly, které pocházejí z období starohor až prvohor. Zajímavou součástí geologické stavby tohoto povodí a jeho blízkého okolí je rozsáhlý bazaltový příkrov jižně od Brandova, jenž je reliktem třetihorní vulkanické činnosti (Demek, Mackovčín et al., 2006).

Při posuzování reliéfu zájmových území podle morfologické typologie reliéfu Česka patří vybraná povodí do dvou kategorií. Povodí horní Rolavy a vyšší polohy povodí Načetínského potoka spadají do třídy vyšší hornatiny s nízkým výškovým rozpětím. Celé povodí Svatavy a nižší polohy povodí Načetínského potoka patří do třídy vyšších vrchovin s větším rozpětím výšek (Balatka, Kalvoda 2006). Dle geomorfologického členění Česka (tabulka 4) patří všechna povodí do stejných kategorií až na úroveň celku Krušné hory. V rámci podcelků spadá povodí Svatavy a Rolavy do Klínovecké hornatiny, zatímco povodí Načetínského potoka do Loučenské hornatiny (Demek, Mackovčín et al., 2006).

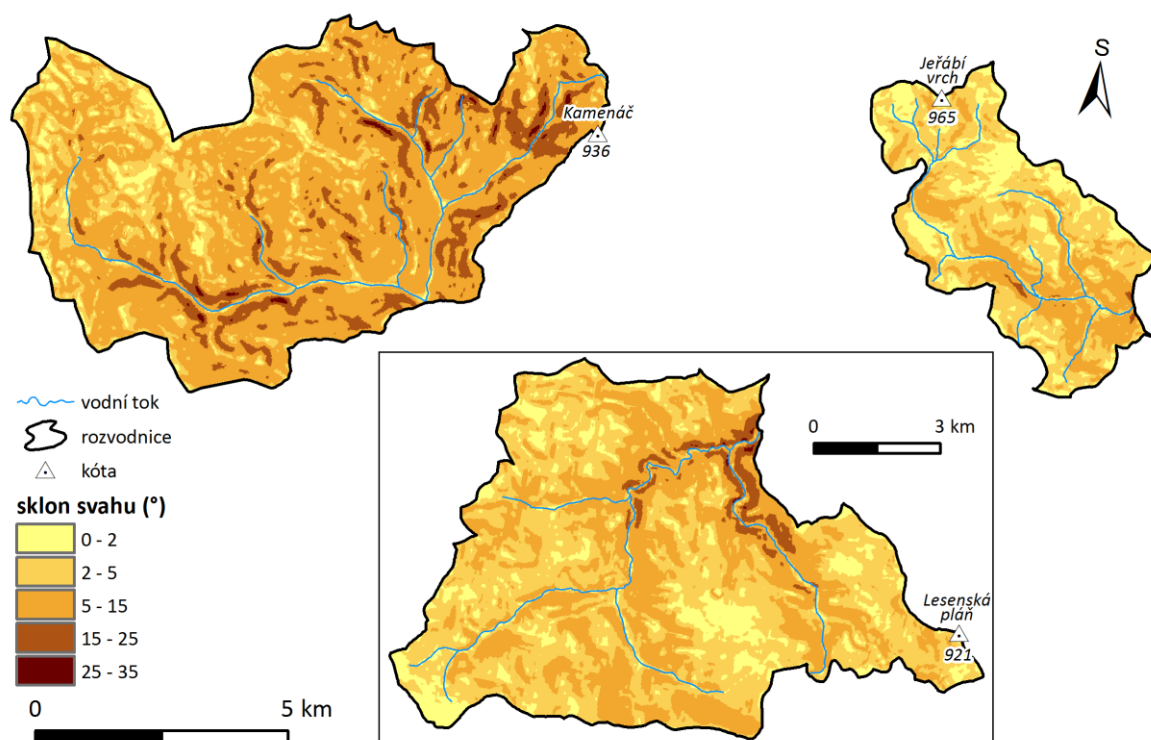
Tabulka 4: Geomorfologické členění zájmového území

povodí	Svatava	Rolava	Načetínský p.
okrsek	Jindřichovická vrchovina	Přebuzská hornatina	Rudolická hornatina
podcelek	Klínovecká hornatina		Loučenská hornatina
celek	Krušné hory		
oblast	Krušnohorská hornatina		
subprovincie	Krušnohorská soustava		
provincie	Česká vysočina		
system	Hercynský		

zdroj: Demek, Mackovčín et al., 2006

Na úrovni okrsků spadá povodí Svatavy do Jindřichovické vrchoviny, která tvoří jihozápadní cíp celku Krušných hor. Tato vrchovina je tvořena zaoblenými hřbety s výskytem denudačních plošin, jež jsou odděleny hlubokými údolími řeky Svatavy a jejími přítoky (Demek, Mackovčín et al., 2006). Nejvyšším vrcholem Jindřichovické vrchoviny i zájmového povodí horní Svatavy je Kamenáč (936 m n. m.). Povodí horní Rolavy se rozkládá na území okrsku Přebuzská hornatina, pro který je typický plochý reliéf náhorní planiny s rozsáhlými relikty zarovnaných povrchů ve vrcholových partiích (Demek, Mackovčín et al, 2006). Nejvyšší bod na území povodí je Jeřábí vrch, též zvaný Bažiňák (965 m n. m.). V jeho těsné blízkosti se nachází Národní přírodní rezervace (dále jen NPR) Rolavská vrchoviště a také pramen řeky Rolavy.

Reliéf Rudolické hornatiny, do které spadá povodí Načetínského potoka, se skládá zejména ze strukturně denudačních plošin a hřbetů (Demek, Mackovčín et al, 2006). Na rozdíl od dvou předešlých se okrsek Rudolické hornatiny mírně svažuje na sever a severozápad, což činí podstatnou část povodí Načetínského potoka prakticky návětrnou stranou svahu. Sklonitostní poměry ve všech zájmových povodích znázorňuje obrázek 15.



Obrázek 15: Sklonitostní poměry zájmových povodí (zdroje dat: ARCDATA PRAHA, LFULG, VÚV T. G. M.)

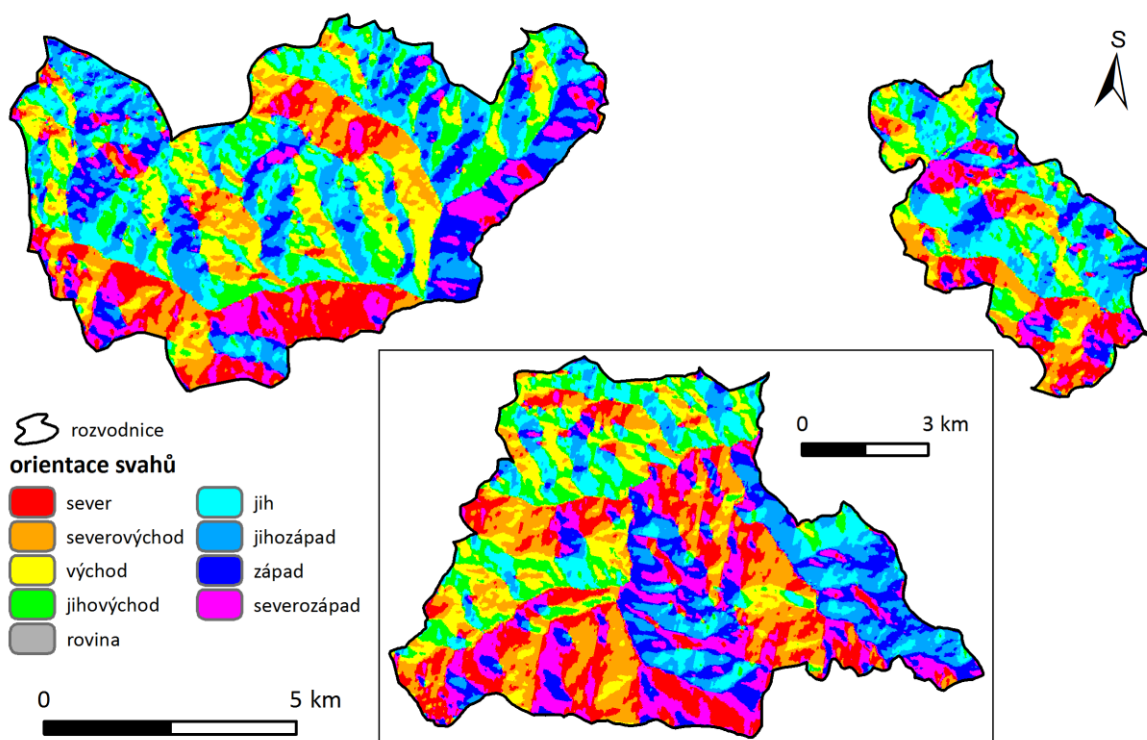
Největší podíl příkře sklonitých ploch je již při prvním pohledu patrný v povodí horní Svatavy, jsou strmé svahy rozmístěny téměř rovnoměrně po všech dílčích údolích. Na rozdíl od zbylých dvou povodí se zde téměř neobjevují větší plochy s menším nebo žádným sklonem. Naopak větší část plochy povodí horní Rolavy je povětšinou jen velmi mírně zvlněna, vrcholové partie se dokonce často blíží zarovnanému povrchu. Koryto tohoto toku se více zahlubuje do okolního terénu až za závěrovým profilem Chaloupky. Nejvýše položená místa v povodí Načetínského

potoka jsou taktéž jen mírně skloněna, velmi příkré svahy se vyskytují pouze ve dvou údolích blíže závěrovému profilu. Níže přiložená fotografie zachycuje Načetínský potok pod obcí Kalek, kde se jeho údolí začíná více zařezávat do okolního terénu (obrázek 16).



Obrázek 16: Údolí Načetínského potoka mezi Kalkem a Gabrielinou Hutí (foto: Kinšt, 2018)

Orientace svahů zájmových povodí je také do jisté míry odlišná a svým způsobem odpovídá směřování hlavních toků v daném povodí (obrázek 17; tabulka 5). Pro povodí Svatavy a Rolavy jsou procentuálně nejvýznamnější svahy jižní a jihozápadní, naopak méně jsou zastoupeny svahy západní, severozápadní a severní.



Obrázek 17: Orientace svahů v zájmových povodích (zdroj vstupních dat: ARCDATA PRAHA)

V povodí Načetínského potoka je situace vsutku odlišná, převládají zde svahy skloněné zejména k severozápadu, severu a severovýchodu, což může hrát roli například při expozici vůči převládajícímu západnímu proudění či při jarním tání sněhové pokrývky. Z tohoto pohledu by se měl sníh udržet delší dobu právě v povodí Načetínského potoka, kde jsou severní svahy zastoupeny zejména v polohách nad 800 m n. m.

Tabulka 5: Orientace svahů a jejich podíly na rozloze povodí

	Svatava		Rolava		Načetínský p.	
	km ²	% plochy	km ²	% plochy	km ²	% plochy
sever	5,71	10,59	2,15	11,45	11,88	16,12
severovýchod	5,94	11,02	2,27	12,13	12,55	17,03
východ	7,10	13,17	2,12	11,30	7,63	10,35
jihovýchod	6,80	12,61	2,35	12,57	6,74	9,14
jih	8,21	15,22	3,59	19,17	7,73	10,50
jihozápad	8,98	16,66	2,69	14,37	8,80	11,95
západ	6,42	11,90	1,83	9,74	8,78	11,92
severozápad	4,75	8,81	1,74	9,28	9,56	19,98
bez orientace	<0,01	<0,01	0	0	0,01	0,01
celkem	53,91	100	18,74	100	73,68	100

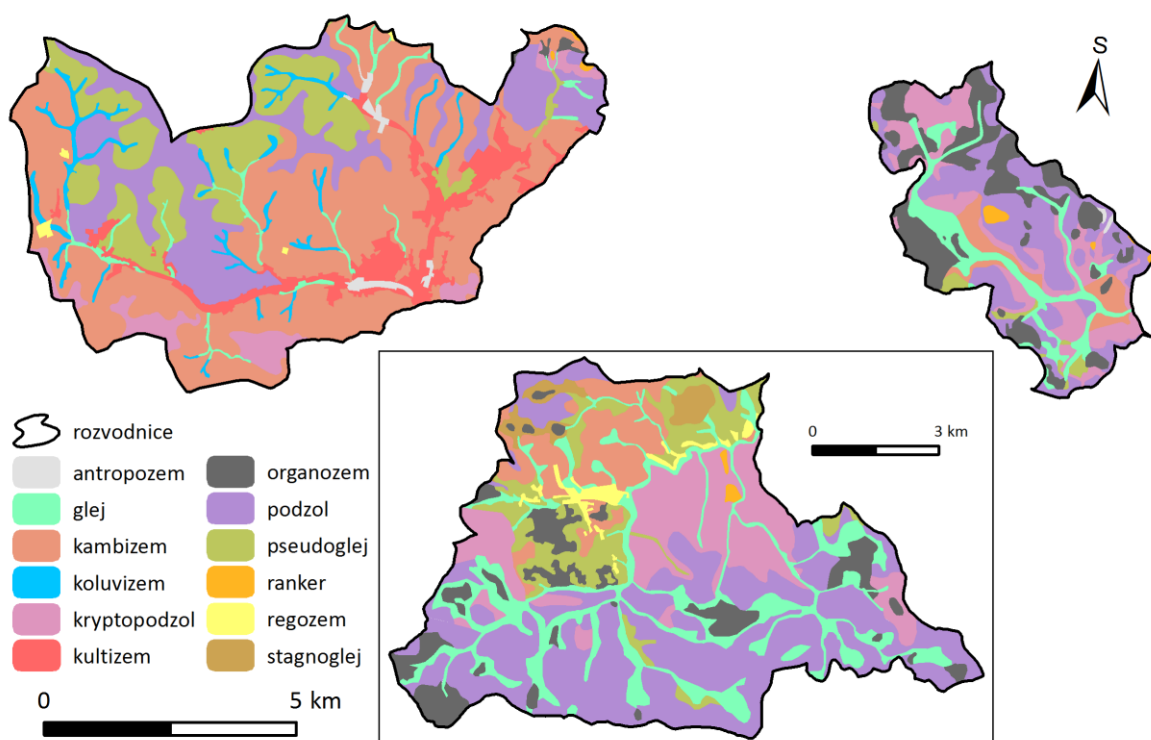
zdroj vstupních dat: ARCDATA PRAHA

4.3 Pedologické poměry

Půdní pokryv a jeho fyzikální vlastnosti určují okolnosti povrchového odtoku vody, zároveň rozhodují o míře infiltrace během srážkových událostí, a také po jak dlouhou dobu je půda schopna zadržet vodu v průběhu suchých událostí. V českých krystalinických pohořích, jakými jsou Krušné hory či Šumava, je formování odtoku spjato se výskytem hydromorfních půdních typů, zejména organozemí. Důležitým faktorem je pak nasycení těchto půd, jež se povětšinou vyskytují v rámci horských vrchovišť. V průběhu suchých období tvoří organozemě velkou zásobu vody, ale namísto zásobování místních toků ji spíše zadržují. Ještě v sedmdesátých letech dvacátého století byla však široce přijímána tzv. houbová teorie. Podle tohoto konceptu měla vrchoviště nasakovat vodu při vysokých úhrnech srážek, zatímco v suchém období měla rašeliniště vodu pomalu vypouštět a nadlepšovat tím průtoky řek (Vlček, 2018).

Stejně jako reliéf, i půdní poměry jsou v zájmovém území relativně pestré. Dle dostupných mapových podkladů z ČGS a LFULG se ve vybraných povodích vyskytuje celkem 12 půdních typů. Nejpestřejší půdní pokryv je v povodí Svatavy, naopak nejméně typů půdy se nachází v povodí Rolavy. Zde je nutno podotknout, že hodnoty uvedené v tabulce 5 jsou odvozeny z českých i německých půdních map v měřítku 1:50 000, což s sebou může nést určitou míru

nejistoty v přesnosti těchto dat na takto malých územích. Prostorovou distribuci skupin půdních typů na území jednotlivých povodí znázorňuje obrázek 18.



Obrázek 18: Půdních typy v zájmových povodích (zdroje vstupních dat: ČGS, LFULG)

Jak je uvedeno v úvodu této podkapitoly, nejvíce kategorií půdních typů se vyskytuje v povodí horní Svatavy. Nejvýznamnějším půdním typem jsou zde kambizemě, které zabírají necelých 45 % rozlohy. Zhruba pětinu plochy zaujímají podzoly a na více než patnácti procentech celkové výměry se nachází pseudogleje. Na rozdíl od dalších dvou povodí se zde vyskytuje kultizem s podílem 8 %, což je dáno hustějším osídlením povodí a větším zemědělským využitím krajiny. Dále lze říci, že organozemě zaujímají pouze marginální podíl plochy povodí Svatavy v porovnání s dalšími zájmovými povodími.

Dominantním půdním typem v povodí horní Rolavy jsou podzoly, které zaujímají téměř třetinu jeho rozlohy. Poblíž zdejších vrchovišť jsou podzoly poměrně často zrašeliněné se silnější vrstvou nadložního humusu a tvoří tak jakousi přechodovou zónu k půdám v rašeliništích. Organozemě tvoří se zhruba čtvrtinovým podílem taktéž velmi významnou část zdejšího půdního krytu. Dále se zde také vyskytují kryptopodzoly (21,3 %) a gleje (13,4 %). Jen na 6 % plochy se zde vyskytují kambizemě, což je oproti povodí Svatavy rozdíl skoro 40 %. V povodí Načetínského potoka je taktéž nejrozšířenější podzol s necelými 37 % celkové plochy. Podobný procentuální podíl rozlohy jako v případě povodí horní Rolavy zaujímá glej (16,7 %) a také kryptopodzol (16 %). Relativně významnou část tvoří taktéž organozem s 8,5 % plochy povodí. Detailní hodnoty rozloh jednotlivých půdních typů a jejich procentuální podíly na ploše povodí jsou zaznamenány v tabulce 6 na následující straně.

Tabulka 6: Plochy a procentuální podíly půdních typů ve vybraných povodích

	Svatava		Rolava		Načetínský p.	
	plocha (km ²)	podíl (%)	plocha (km ²)	podíl (%)	plocha (km ²)	podíl (%)
antropozem	0,47	0,88	0,06	0,31	–	–
glej	1,17	2,18	2,52	13,44	12,29	16,69
kambizem	24,03	44,58	1,16	6,20	6,24	8,47
koluvizem	1,90	3,53	–	–	–	–
kryptopodzol	2,29	4,24	3,99	21,27	11,77	15,98
kultizem	4,44	8,24	–	–	–	–
organozem	0,15	0,28	4,55	24,26	6,26	8,49
podzol	10,93	20,27	5,87	31,32	26,98	36,62
pseudoglej	8,30	15,40	0,42	2,22	6,94	9,42
ranker	0,08	0,15	0,18	0,98	0,20	0,27
regozem	0,14	0,26	–	–	1,28	1,74
stagnoglej	–	–	–	–	1,72	2,33
celkem	53,91	100,00	18,74	100,00	73,68	100,00

zdroje vstupních dat: ČGS, LFULG

4.4 Krajinový pokryv

Vegetační i krajinový pokryv zájmových povodí již po několik století více či méně ovlivněn lidskou činností. Pokud by se dalo vycházet z přirozených podmínek bez vlivu člověka, pokrytí území potenciální přírodní vegetací by byl výrazně jiný. Velkým zásahem do charakteru krajiny českých pohraničních pohoří je již po několik století výsadba smrkových monokultur. Pouze na velmi malých, těžko přístupných plochách se výjimečně zachovala přirozená vegetace, jež odpovídá své zonální poloze (Chytrý et al., 2010). Na charakteru krajinového pokryvu Krušných hor se také do jisté míry projevuje absence velkoplošných chráněných oblastí, které by omezily antropogenní zásahy do zdejšího krajinového rázu.

Povodí horní Svatavy by bylo dle mapy potenciální přírodní vegetace Saska pokryto z valné většiny acidofilní (též bikovou) bučinou, ve vyšších polohách by se pak měly nacházet smíšené bučiny se smrčinami (Schmidt et al., 2003). Podle mapy potenciální přirozené vegetace Česka by bylo povodí horní Rolavy porostlé zejména podmáčenou rohozcovou smrčinou, níže položené plochy by pokrývala smrková bučina. Vrcholové partie v povodí Rolavy jsou do velké míry pokryty přirozenou vegetací komplexu horských vrchovišť (Neuhäuslová et al., 2001). Potenciální vegetační pokryv povodí Načetínského potoka je prakticky směs předchozích dvou povodí. V nejvyšších polohách poblíž pramene tohoto toku by se měly nacházet podmáčené

rohozové smrčiny, jen zřídka přecházející do vrchovištních komplexů (Schmidt et al., 2003). Na východním okraji povodí je uvedena violková bučina, zejména v níže položených údolích poblíž závěrového profilu. Většinu plochy by stejně jako v případě povodí Svatavy pokrývaly acidofilní bučiny s občasou příměsí smrku (Neuhäuslová et al., 2001).

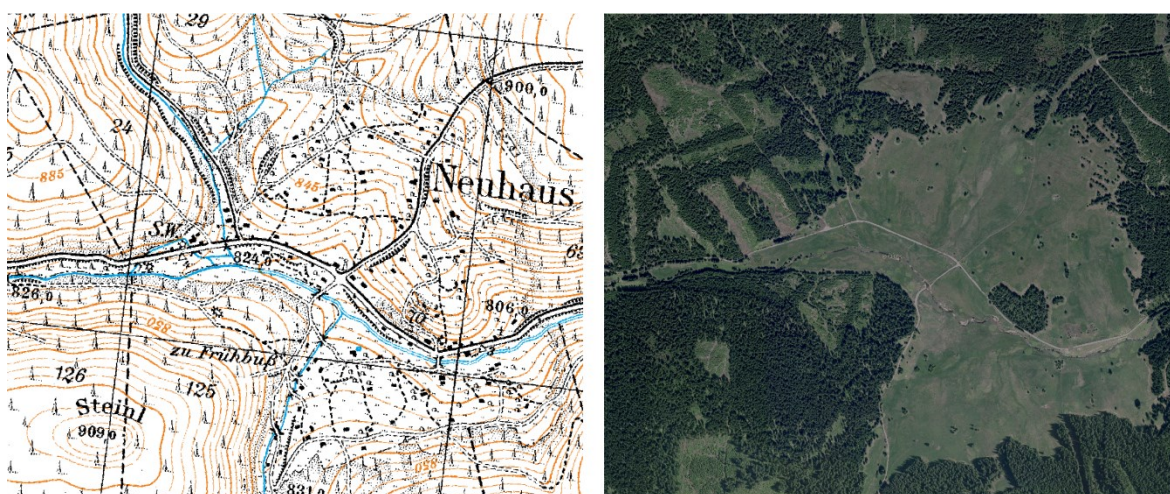
I přes dílčí změny krajinného pokryvu během posledního století, uvedené dále v této kapitole, by se na první pohled mohlo zdát, že oblast krušnohorského hřebene je jinak relativně stabilní, alespoň co se zalesnění týče. Při pohledu hlouběji do historických pramenů však bylo zjištěno, že tomu tak povětšinou nebylo. V oblastním plánu rozvoje lesa přírodní oblasti Krušných hor (Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, 1999; dále jen ÚHÚL) je uveden velmi podrobný popis změn rozsahu, složení a stavu lesních porostů již od 13. století v nižších polohách, kdy začala přeměna původních pralesů v důsledku hornické kolonizace.

Na počátku 16. století byly lesy na Jáchymovsku popisovány jako těžko prostupný prales, což se postupně začalo poměrně rychle měnit s výstavbou hornických městeček i ve vyšších polohách (např. Boží Dar, Pernink, Měděnec). Spotřeba dřeva pro důlní činnost, stavbu osad a měst měla fatální následky na stav původního lesa, zejména v okolí tehdy na krátko druhého největšího města Jáchymova s 18 000 obyvateli, ale také na Přísečnicku, tedy i poblíž povodí Načetínského potoka. Částečnou přirozenou obnovou prošly krušnohorskou lesy v průběhu třicetileté války, kdy došlo k útlumu hornické činnosti spojené s úbytkem obyvatel.

Koncem 18. století prakticky skončila možnost libovolného kácení lesů, přičemž se postupně přešlo na systém plánovitého hospodaření. Stav lesů však také již od středověku poznamenala výroba dřevěného uhlí, rašeliny, činnost dolů a hamrů. V okolí Jáchymova, Rotavy a Oloví bylo zaznamenáno v různých epizodách hynutí smrků, borovic, jedlí i bříz v důsledku nadměrných kouřových emisí. Po ukončení provozu nejvíce znečišťujících podniků se stav lesa výrazně zlepšil, jako období nejlepšího zdravotního stavu lesa na Jáchymovsku a Chomutovsku jsou uvedena 20. a 30. léta 20. století. Druhovú skladbu lesa v Krušných horách je již více než 100 let stabilní, nicméně na jeho zdravotním stavu se negativně podílela, a do jisté míry se stále podílí, masivní těžba a spotřeba hnědého uhlí v Podkrušnohoří, jež svého vrcholu dosáhla v průběhu 80. let 20. století (ÚHÚL, 1999).

Pro analýzu změn krajinného pokryvu byly využity mapové podklady z poloviny 20. století a nejnovější dataset CORINE Land Cover z roku 2018. Zmíněné historické podklady jsou vektorovou verzí základních topografických map. Pro území Čech se jedná o mapu z roku 1950, pro Sasko byla použita topografická mapa „*Messtischblatt*“ ze 40. let 20. století. Starší mapové podklady (II. a III. vojenské mapování) byly k dispozici pouze pro území Čech, což není ani polovina celkové zájmové plochy, pročež bylo od jejich použití pro účely této práce upuštěno.

Z důvodu různých metodik kategorizace typů krajinného pokryvu v historických a soudobých mapových podkladech byly některé, vzájemně si podobné třídy pro účely této práce sloučeny. Do nově definované třídy louky a pastviny byly například spojeny tři kategorie: trvalý travní porost, přírodní louky a pastviny. Prostorově významná kategorie přechodových stádií lesa nebyla vůbec definována v historických podkladech, proto byla po přihlédnutí k aktuálním leteckým snímkům zařazena do třídy jehličnatého lesa. Posledními sloučenými kategoriemi jsou rašeliniště, bažiny a trvale zamokřené plochy. Na obrázku 19 vlevo je na mapě ze 40. let zachycena bývalá osada Chaloupky (*Neuhaus*) v povodí horní Rolavy, jež se nacházela poblíž stejnojmenné vodoměrné stanice. Letecký snímek vpravo zachycuje současný stav.



Obrázek 19: Lokalita bývalé osady Chaloupky ve 40. letech 20. století a nyní (zdroje: ČÚZK, LFULG)

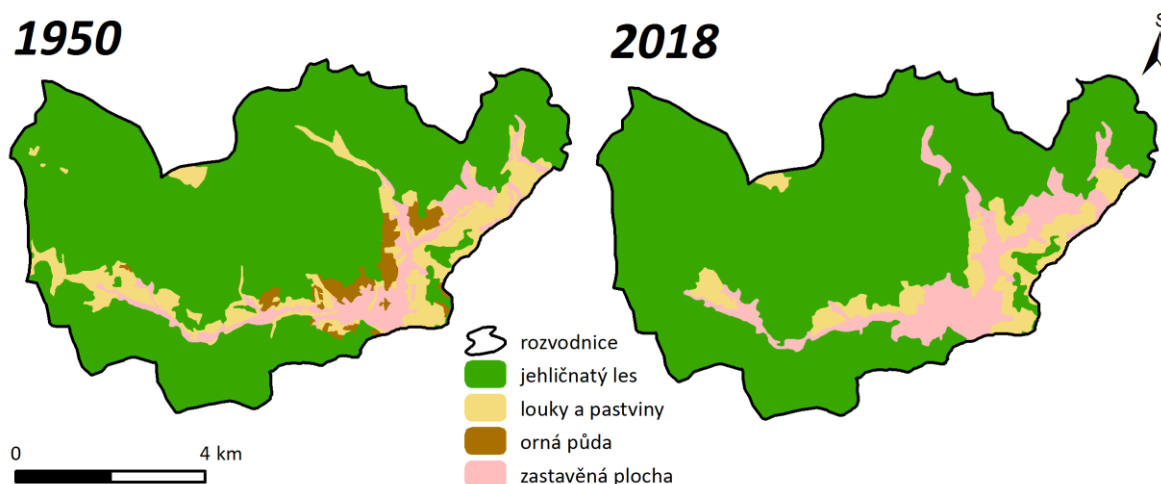
Podíly ploch skupin krajinného pokryvu v referenčním roce 1950 a v současnosti jsou uvedeny v tabulce 7. Pokud se přihledne k údajům o potenciální přirozené vegetaci, je nanejvýš zřejmé, že lidská činnost významně upravila charakter krajiny a skladby vegetace do současné podoby. Absence čistě bukových lesů je asi nejvýraznějším nesouladem ve všech povodích. Nejbližší je v současnosti své potenciální podobě zřejmě povodí Rolavy, kde se zachovala rašeliniště a vegetace s nimi spojená.

Tabulka 7: Procentuální podíly ploch typů krajinného pokryvu

	Svatava		Rolava		Načetínský p.	
	1950 [%]	2018 [%]	1950 [%]	2018 [%]	1950 [%]	2018 [%]
zastavěná plocha	6,70	10,86	0,86	—	0,44	0,61
orná půda	2,84	—	0,06	—	6,33	2,04
louky a pastviny	11,22	7,95	20,15	16,05	11,52	14,39
smíšený les	—	—	—	—	—	7,31
jehličnatý les	79,24	81,18	63,46	68,05	79,48	73,42
rašeliniště	—	—	15,47	15,90	2,23	2,24
celkem	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

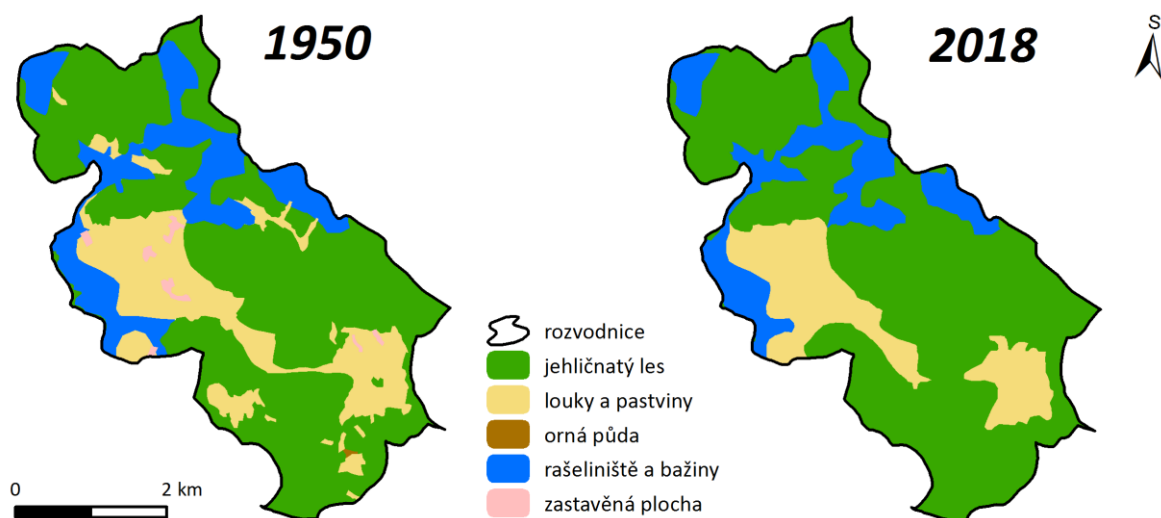
zdroje vstupních dat: EEA, LFULG, VÚKOZ

Povodí horní Svatavy je ze všech tří zájmových oblastí nejvíce ovlivněno výstavbou. Od počátku padesátých let v katastru obce Klingenthal postupně přibývá podíl zastavěné plochy na úkor orné půdy, luk a pastvin. Během sledovaného období se tato plocha téměř zdvojnásobila, což může mít negativní vliv na retenční schopnost krajiny a spotřebu vody jako takové. Zároveň však mírně narostl i podíl zalesněných ploch, konkrétně o dva procentní body. Zajímavostí je absence listnatého či smíšeného lesa, a to nejen v současné databázi CORINE, ale i v mapových podkladech ze 40. let. Orná půda se v tomto povodí již více než třicet let neobdělává. Změnu prostorového rozmístění krajinného pokryvu v tomto povodí znázorňuje obrázek 20.



Obrázek 20: Změny krajinného pokryvu v povodí horní Svatavy (zdroje dat: EEA, LFULG, VÚKOZ)

Nejméně změn, alespoň co se podílů typů krajinného pokryvu týče, doznalo od konce 2. světové války povodí horní Rolavy. Vysídleny byly osady Rolava a Chaloupky a s nimi zanikly i plochy orné půdy. Zároveň ve sledovaném období narostl podíl jehličnatých lesů na úkor luk a pastvin, částečně vlivem přirozené sukcese. Rašeliniště zaujímají zhruba stejnou plochu jako před sedmdesáti lety, což je patrné i při pohledu na mapu typů krajinného pokryvu v tomto povodí. Ze všech zájmových oblastí je podíl rašelinišť největší právě v povodí Rolavy (obrázek 21).



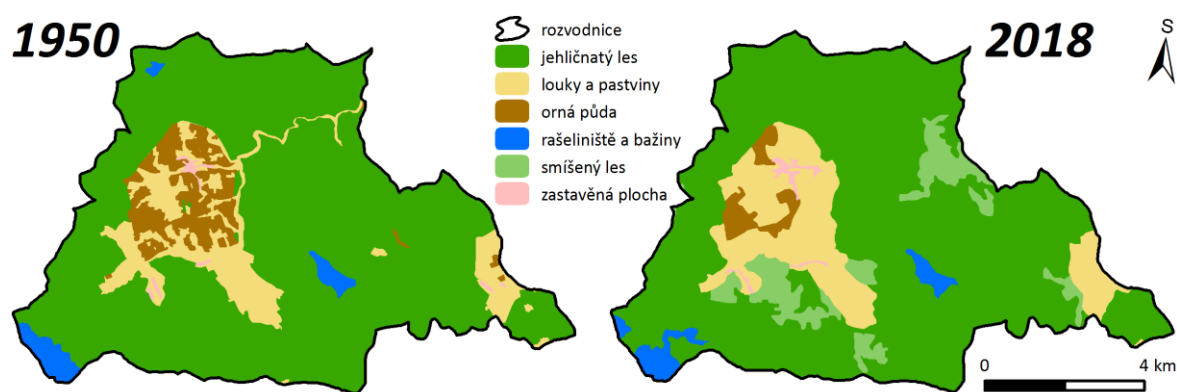
Obrázek 21: Změny krajinného pokryvu v povodí horní Rolavy (zdroje dat: EEA, VÚKOZ)

Typický ráz krajiny nynější krajiny v pramenné oblasti Rolavy znázorňují přiložené fotografie. Obrázek 22 byl pořízen poblíž závěrového profilu Chaloupky, obrázek 23 zachycuje vrchovištní jezírko Velký močál na území NPR Rolavská vrchoviště.



Obrázek 22 a 23: nalevo: povodí horní Rolavy poblíž profilu Chaloupky (foto: M. Matoušková) napravo: Velký močál poblíž bývalého dolu Sauersack (zdroj: © Carniflora.cz)

Pouze v povodí Načetínského potoka došlo v průběhu sledovaného období k nárůstu podílu luk a pastvin, a to téměř o tři procentní body. Je tomu tak zejména z důvodu opuštění intenzivního využití dvou třetin původně orné půdy v okolí obce Rübenu. Zároveň došlo k velmi mírnému rozvoji zástavby právě v území této obce. Dle nejnovějších údajů CORINE Land Cover zaujímaly smíšené lesy v roce 2018 zhruba 7 % plochy tohoto povodí, nicméně dle mapových podkladů z poloviny 20. století zde převládal les jehličnatý. V součtu se plocha všech lesů zvýšila o jeden procentní bod. Mapy změn krajinného pokryvu zahrnuje obrázek 24.



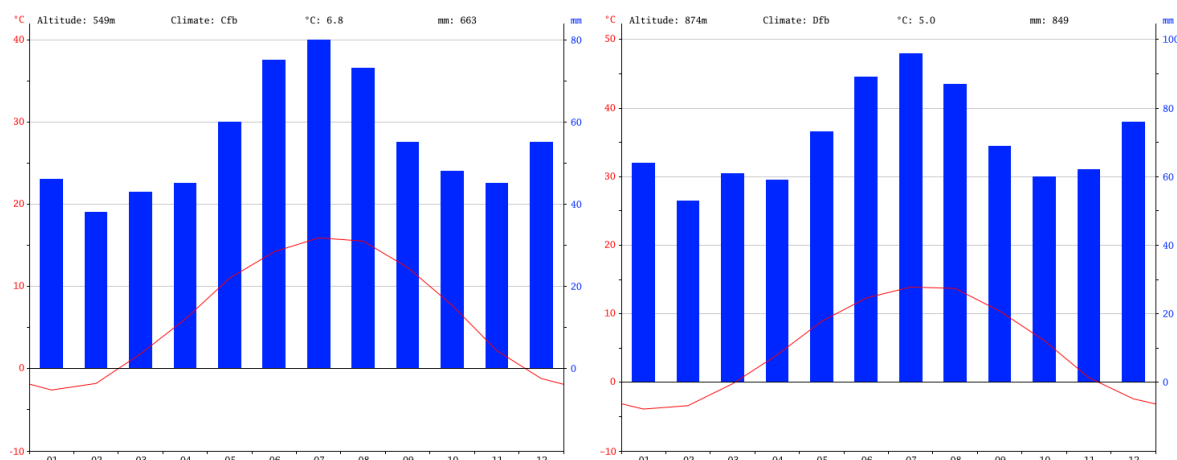
Obrázek 24: Změny krajinného pokryvu v povodí Načetínského potoka (zdroje dat: EEA, LFULG, VÚKOZ)

Celkově lze říci, že k výrazné a potenciálně hydrologicky nepříznivé změně krajinného pokryvu došlo v posledních 70 letech pouze v povodí horní Svatavy, kde se zvýšil podíl zastavěné plochy. Na druhou stranu, všechna povodí zaznamenaly v průběhu sledovaného období mírný nárůst podílů lesních porostů a také úbytek ploch orné půdy.

4.5 Klimatické poměry

Charakteristika předchozích přírodních podmínek, zejména nadmořských výšek či vegetace, napovídá, že určité rozdíly se projevují i v podnebí jednotlivých zájmových lokalit. Na základě Köppenovy klasifikace klimatu spadá většina území zájmových do kategorie Dfb, což je vlhké, boreální klima s chladnou letní sezónou. Dle Quittovy klasifikace se vybraná povodí řadí do skupiny tříd klimaticky chladných oblastí C5 až C7 (Tolasz et al., 2007). Nicméně, jak už bylo naznačeno, v každém povodí se poměry klimatu mírně liší a nejsou plošně konzistentní.

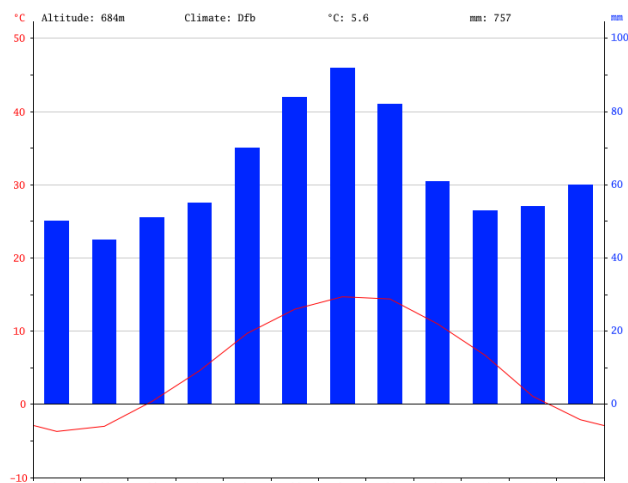
Povodí horní Svatavy je z pohledu průměrných teplot vzduchu nejteplejší, v obci Klingenthal poblíž stejnojmenného závěrového profilu má roční průměr hodnotu necelých 7 °C. Tento níže položený jihovýchodní výběžek povodí spadá dle Köppena klimaticky již do kategorie Cfb, což je podtyp klimatu mírného pásu s listnatými lesy. Podle Quittovy klasifikace patří povodí Svatavy do kategorií C6 a C7, což jsou dvě nejmírnější ze skupiny klimaticky chladných oblastí. Nejteplejší měsíce je zde červenec s 16 °C, naopak nejchladnější je leden s -2,5 °C (obrázek 25, diagram vlevo). Průměrný roční srážkový úhrn činí zhruba 663 mm, nicméně tento údaj je ovlivněn nižší a závětrnou polohou obce. Nejdeštivějším měsícem je z hlediska dlouhodobého průměru červenec s úhrnem 80 mm, nejsušší je únor s 38 milimetry srážek.



Obrázek 25: Modelové klimadiagramy obcí Klingenthal (vlevo) a Přebuz (vpravo). Zdroj: Climate-Data.org

Nejchladnějším a zároveň nejvlhčím klimatem ze tří vybraných lokalit disponuje povodí horní Rolavy, zejména díky své průměrné nadmořské výšce. Neosídlené vrcholové partie tohoto povodí jsou dle Köppenovy klasifikace řazeny do kategorie Dfc, což znamená, že maximálně tři měsíce v roce mají průměrnou teplotu nad 10 °C. Dle Quitta spadá toto území do třídy C5 (Tolasz et al., 2007). V obci Přebuz nedaleko měrného profilu Chaloupky se průměrná roční teplota pohybuje kolem 5 °C, nejteplejší měsíc je červenec se 14 °C, nejchladnější je opět leden s průměrnou teplotou -4 °C (obrázek 25, diagram vpravo). Průměrné roční srážkové úhrny se zde pohybují kolem 870 mm. Nejdeštivější a nejsušší měsíce jsou, stejně jako v povodí horní Svatavy, červenec a únor, nicméně průměrné úhrny srážek v těchto měsících jsou přibližně

o 15 mm vyšší. Klima povodí Načetínského potoka popisuje modelový klimadiagram pro obec Kalek, která se nachází přibližně uprostřed tohoto zájmového území, necelých pět kilometrů jihozápadně od závěrového profilu Rothenthal (obrázek 26). Hodnota průměrné roční teploty se pohybuje kolem 5,5 °C, přičemž nejteplejší měsíc je opět červenec se 14,5 °C. Nejchladnějším měsícem je leden s -3,7 °C. Největší a nejmenší průměrné měsíční srážkové úhrny se zde vyskytují v červenci, respektive v únoru, stejně jako v předchozích dvou povodích. Průměrný roční úhrn srážek se pohybuje kolem 760 mm. Prakticky celé území je zařazeno do kategorie Dfb dle Köppena a také do tříd C5 a C6 dle Quitta (Tolasz et al., 2007).



Obrázek 26: Modelový klimadiagram pro obec Kalek. Zdroj: Climate-Data.org

Tabulka 8: Měsíční, roční a sezónní průměry vybraných klimatologických stanic

1967-2018	Carlsfeld		Elster-Bad Sohl		Fichtelberg		Marienberg	
	T [°C]	H [mm]	T [°C]	H [mm]	T [°C]	H [mm]	T [°C]	H [mm]
listopad	1,0	96,4	2,5	61,0	-0,3	94,1	2,5	65,3
prosinec	-2,1	112,5	-0,7	49,1	-3,3	105,1	-0,6	70,4
leden	-3,1	99,9	-1,8	55,5	-4,4	94,0	-1,7	60,8
únor	-3,0	78,0	-1,2	50,8	-4,4	76,3	-1,3	48,2
březen	-0,2	94,6	2,3	68,4	-1,8	86,6	1,9	59,7
duben	3,7	79,8	6,3	77,1	2,1	75,1	6,0	61,7
květen	8,8	93,3	11,4	82,2	7,1	92,9	11,0	76,6
červen	11,8	113,8	14,4	80,3	10,0	107,8	13,8	93,1
červenec	13,9	125,2	16,3	61,3	12,1	121,3	15,8	99,6
srpen	13,8	113,9	15,6	54,8	12,1	109,9	15,6	97,7
září	10,0	97,9	11,7	60,3	8,3	95,5	11,7	73,5
říjen	5,9	89,7	7,4	69,0	4,4	79,5	7,6	61,3
rok	5,1	1195,0	7,0	770,0	3,5	1138,1	6,9	867,9
III-V	4,1	267,8	6,6	227,7	2,5	254,7	6,3	198,0
VI-VIII	13,2	353,0	15,5	196,5	11,4	339,0	15,1	290,3
IX-XI	5,6	283,9	7,2	190,3	4,1	269,0	7,3	200,1
XII-II	-2,7	290,3	-1,2	155,4	-4,0	275,4	-1,2	179,4
XI-IV	-0,6	561,2	1,2	361,9	-2,0	531,3	1,1	366,0
V-X	10,7	633,8	12,8	408,1	9,0	606,9	12,6	501,8

zdroj vstupních dat: DWD

5 Výsledky

5.1 Testování homogenity časových řad

Testování homogenity bylo provedeno pomocí Pettittova a SNHT testu pro měsíční, sezónní a roční časové řady všech vodoměrných, srážkoměrných a klimatologických stanic. Z důvodu zajištění porovnatelnosti jednotlivých časových řad bylo testované období pro všechny stanice stejně dlouhé. Analyzované období tedy pokrývá rozmezí hydrologických roků 1967 až 2018. Pro oba testy homogenity byla zvolena 5% hladina významnosti, v níže uvedených tabulkách jsou podbarveny pouze statisticky významné hodnoty, pro které byla testem zamítnuta nulová hypotéza o homogenitě datového souboru. Oranžové podbarvení hodnot v tabulkách znamená, že v roce zlomu došlo k nárůstu střední hodnoty, modré podbarvení značí její pokles.

5.1.1 Průměrné měsíční, sezónní a roční teploty

Jako první byly testovány řady průměrných měsíčních, sezónních a ročních teplot (tabulka 9). Již na první pohled je zřetelné, že nehomogenity byly potvrzeny u většiny stanic především pro jarní a letní měsíce, nejčastější výskyt zlomů pro měsíční řady, zejména jarních, se nachází v rozmezí let 1989 až 1992, a také na přelomu tisíciletí pro letní měsíce, naopak v zimních měsících a březnu nebyl zjištěn signifikantní zlom u žádné stanice.

Tabulka 9: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady T_m , T_r a T_s

T _m , T _r , T _s (1967-2018)	Carlsfeld		Elster-Bad Sohl		Fichtelberg		Marienberg	
	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT
listopad	2000	2000	2000	2002	2002	2002	2000	2002
prosinec	1982	1971	2011	1970	1982	1971	2011	2013
leden	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987
únor	1986	1986	1987	1987	1986	1986	1987	1987
březen	1988	1988	1988	1971	1988	1988	1988	1988
duben	1992	1992	1986	1992	1992	1992	1992	1997
květen	1991	1991	1984	1984	1991	1991	1984	1991
červen	1997	2001	1997	1999	2001	2001	2001	2001
červenec	1990	2005	1990	1981	2005	2005	2005	2005
srpen	1989	1989	1989	1989	1989	2014	1989	2014
září	1996	1996	2004	2004	1996	2002	2002	2002
říjen	1969	1969	1999	1968	2003	1969	2003	1969
rok	1987	1987	1987	1987	1988	1987	1988	1988
III-V	1988	1988	1987	1987	1988	1988	1988	1988
VI-VIII	1991	2001	1989	2000	1991	2001	2001	2001
IX-XI	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003
XII-II	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987
XI-IV	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1988	1988
V-X	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998

zdroj vstupních dat: DWD

Pro podzimní měsíce byl odhalen zlom pouze v listopadu na dvou stanicích. Analýza sezónních průměrů odhalila statisticky významné zlomy v letech 1987 a 1988 pro jaro a také chladnější polovinu roku na všech stanicích. Statisticky významné letní a podzimní zlomy jsou detekovány spíše kolem přelomu milénia. Pro průměrnou hodnotu teploty vzduchu v teplejší polovině roku (od května do října) vykazují všechny stanice stejný bod zlomu v roce 1998. Roční průměrné teploty na všech stanicích zaznamenávají zlom v letech 1987 a 1988.

5.1.2 Měsíční, sezónní a roční srážkové úhrny

Zatímco u teplotních řad bylo v 95% intervalu spolehlivosti potvrzeno poměrně hodně zlomů, pro datové řady srážkových úhrnů tomu tak není. Drtivá většina všech testovaných měsíčních, sezónních i ročních řad srážkových úhrnů je dle výsledků Pettittova a SNHT testu homogenní (tabulka 10). Statisticky významný zlom byl odhalen Pettittovým testem jen pro leden na stanici Fichtelberg v roce 2002, po kterém došlo v tomto měsíci k nárůstu střední hodnoty úhrnu srážek. Zlomové roky 2017 a 1968 potvrzené SNHT testem v květnové řadě stanice Elster-Bad Sohl, respektive v případě zimy na stanici Marienberg, jsou zřejmě způsobeny extrémními úhrny srážek v letech 1967 a 2018 na těchto stanicích v rámci daného měsíce či sezóny. Také s přihlédnutím ke slabině tohoto testu v podobě možné identifikace zlomu příliš blízko začátku či konce časové řady mohou být tyto zlomové roky označeny za diskutabilní, i přes svou potvrzenou statistickou významnost.

Tabulka 10: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady H_m , H_r a H_s

Hm, Hr, Hs (1967-2018)	Carlsfeld		Elster-Bad Sohl		Erlbach- Eubabrunn		Fichtelberg		Marienberg		Marienberg- Reitzenhain		Schöneck- Kottenheide	
	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT
listopad	1987	1969	1987	1969	1987	1987	1987	2001	1987	1968	1987	1987	1987	1969
prosinec	1995	1968	1978	1968	1985	1968	2008	1968	1975	1968	1985	1968	1985	1968
leden	2010	1968	1975	1975	2002	1969	2002	2002	1969	1968	2002	2010	2002	2010
únor	2009	1974	2009	2009	2009	1971	1998	1998	2009	1971	1982	1982	1986	1986
březen	2010	2010	2009	2009	2009	1968	2002	2002	1970	1970	1991	1967	1991	2010
duben	1995	1995	2001	2009	1995	1995	1997	1997	1995	1995	1997	1997	1997	1995
květen	1987	2003	1987	2017	2001	2017	2003	2003	2014	2014	1974	2014	1974	1972
červen	1975	1975	1986	1968	1986	1986	1974	1974	1999	1969	1989	1989	1996	1970
červenec	1991	2017	1991	1991	1991	1991	1991	2017	1991	1976	1991	1978	1991	1972
srpen	1998	2010	1972	1970	1987	1970	1996	2015	2010	2010	1996	2010	1995	1970
září	1993	1994	1983	1983	1983	1968	1994	2000	1994	1968	1994	1994	1993	1993
říjen	1995	2015	1995	1995	1995	1995	1995	1995	1995	2015	1995	2013	1995	1974
rok	1981	1970	2011	2013	1970	1970	2001	2001	2013	2013	1986	1986	1991	2017
III-V	1988	1970	2009	2009	2009	1970	1973	1970	2009	2014	1970	1970	2001	2009
VI-VIII	2013	2017	1991	2017	2010	1970	1984	2017	1976	2017	1979	2017	1998	2017
IX-XI	1994	1995	1995	1995	1995	1995	1995	1995	1994	1994	1994	1994	1994	1994
XII-II	1995	1968	2006	2013	1998	1968	1998	1998	1976	1968	1982	1968	1979	1973
XI-IV	1995	1995	2006	2013	2013	1968	1998	1998	2005	1970	1986	1986	1979	1979
V-X	1993	2017	1993	1993	1992	1970	2001	2001	1981	2017	1994	2017	1992	2017

zdroj vstupních dat: DWD

5.1.3 Měsíční, sezónní a roční sumy denní výšky sněhové pokrývky

Řady kumulativních výšek denní pokrývky sněhu pro měsíce, sezóny a roky jsou oproti celkovým úhrnům srážek daleko více nehomogenní, alespoň dle výsledků Pettittova a SNHT testu. Při porovnání tabulky 9 na straně 57 s tabulkou 11 by se sice dalo velmi opatrně usuzovat, že některé stanice vykazují zlomy poklesu výšek sněhu v souladu se zlomy teplot, nicméně ne úplně ve všech případech tato úvaha dává smysl. Například v lednu a únoru byl detekován zlom v řadách výšek sněhu na všech čtyřech klimatologických stanicích, nicméně na žádné z nich nebyl v těchto měsících zjištěn signifikantní teplotní zlom. Na druhou stranu je však zřejmé, že většina statisticky významných zlomů se opět vyskytuje v rozmezí let 1987-92, pokud se zanedbají problematické krajní roky sledovaných období. V tříměsíčních sezónních řadách byly významné zlomy zaznamenány pouze v zimě a na jaře na pěti ze sedmi vybraných stanic. Zajímavostí je absence nehomogenit v řadě srážkoměrné stanice Erlbach-Eubabrunn, dále stojí za povšimnutí měsíce prosinec a březen na všech sledovaných stanicích, kde s jedinou výjimkou nebyly detekovány nehomogenity v řadách výšek sněhové pokrývky.

Tabulka 11: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady S_m , S_r a S_s

Sm, Sr, Ss (1968-2018)	Carlsfeld		Elster-Bad Sohl		Erlbach- Eubabrunn		Fichtelberg		Marienberg		Marienberg- Reitzenhain		Schöneck- Kottenheide	
	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT
listopad	2009	2009	1982	2011	2011	1995	2009	2009	2009	2011	1982	2009	1982	2009
prosinec	1982	1968	1992	1982	2013	2010	1982	1968	2013	2013	2013	2013	1982	1968
leden	1987	1967	1987	1987	1987	1970	1987	1968	1987	1987	1987	1987	1987	1970
únor	1989	1988	1988	1970	2002	2002	1987	1987	1988	1970	1988	1970	1988	1970
březen	1988	1988	1988	1971	1971	1971	1988	1988	1971	1970	1988	1971	1988	1970
duben	2009	1988	1986	1984	1988	1988	1988	1970	2009	1970	1988	1970	1988	1970
květen	1987	1970	1979	1979	1980	1980	1992	1970	1992	1967	1987	1967	1991	1985
červen	—	—	—	—	—	—	2005	1967	—	—	—	—	—	—
červenec	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
srpen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
září	—	—	—	—	—	—	1979	2002	—	—	—	—	—	—
říjen	1974	1974	1974	2011	1993	2008	1989	1974	1975	2006	1975	1974	1975	1974
rok	1989	1989	1988	1970	1971	1970	1988	1970	1988	1970	1988	1970	1988	1970
III-V	1988	1988	1988	1971	1971	1971	1988	1970	2009	1970	1988	1970	1988	1970
VI-VIII	—	—	—	—	—	—	2005	1967	—	—	—	—	—	—
IX-XI	2009	2009	1982	2011	1982	1995	2009	2009	2009	2011	1982	2009	1982	2009
XII-II	1989	1989	1987	1987	1998	1970	1982	1968	1987	1970	1987	1970	1987	1970
XI-IV	1989	1989	1988	1970	1971	1970	1988	1968	1988	1970	1988	1970	1988	1970
V-X	1982	1974	1981	2011	2002	2008	1982	1970	1982	1967	1974	1967	1992	1974

zdroj vstupních dat: DWD

V neposlední řadě je třeba zmínit, že na žádné stanici nebyl detekován zlom vedoucí k nárůstu výšky sněhové pokrývky, za všemi těmito zlomy dochází k poklesu střední hodnoty. Stejně tak všechny zlomy průměrných teplot značí následný nárůst jejich střední hodnoty. Tato fakta mohou do jisté míry naznačovat výskyt potenciálních trendů v datových řadách, které jsou testovány v kapitole 5.3.

5.1.4 Měsíční, sezónní a roční průměrné průtoky

Testování homogenity průtokových řad z jednotlivých vodoměrných profilů odhalilo v 95% intervalu spolehlivosti bez výjimky pouze poklesy střední hodnoty průměrných měsíčních průtoků na všech vodoměrných stanicích. Nicméně lze vyzorovat i několik velmi zajímavých rozdílů. Pro nejvýše položený vodoměrný profil Chaloupky na horní Rolavě byly Pettittovým testem detekovány signifikantní zlomy pro sezónní a roční průměry většinou blíže současnosti než u zbylých dvou povodí. V dubnu a květnu byly potvrzeny zlomy na všech třech profilech, pro Chaloupky a Rothenthal i v červnu 1996. Dle výsledků Pettittova testu zaznamenala Stanice Klingenthal zlom také v srpnu 1987, na profilu Rothenthal došlo v průběhu 90. let ke zlomům dokonce ve všech letních měsících. Průtokové řady podzimních měsíců jsou, bez jedné výjimky dle SNHT testu pro profil Rothenthal, homogenní. Co se týče ročních průměrů, opět si lze povšimnout rozdílů relativně výrazných rozdílů mezi povodími. Pro průměrné sezónní řady byly zaznamenány signifikantní zlomy taktéž na jaře a v létě, pro profil Rothenthal i na podzim. Podobně jako u klimatických řad se často vyskytují signifikantní zlomy v letech 1987 až 1993.

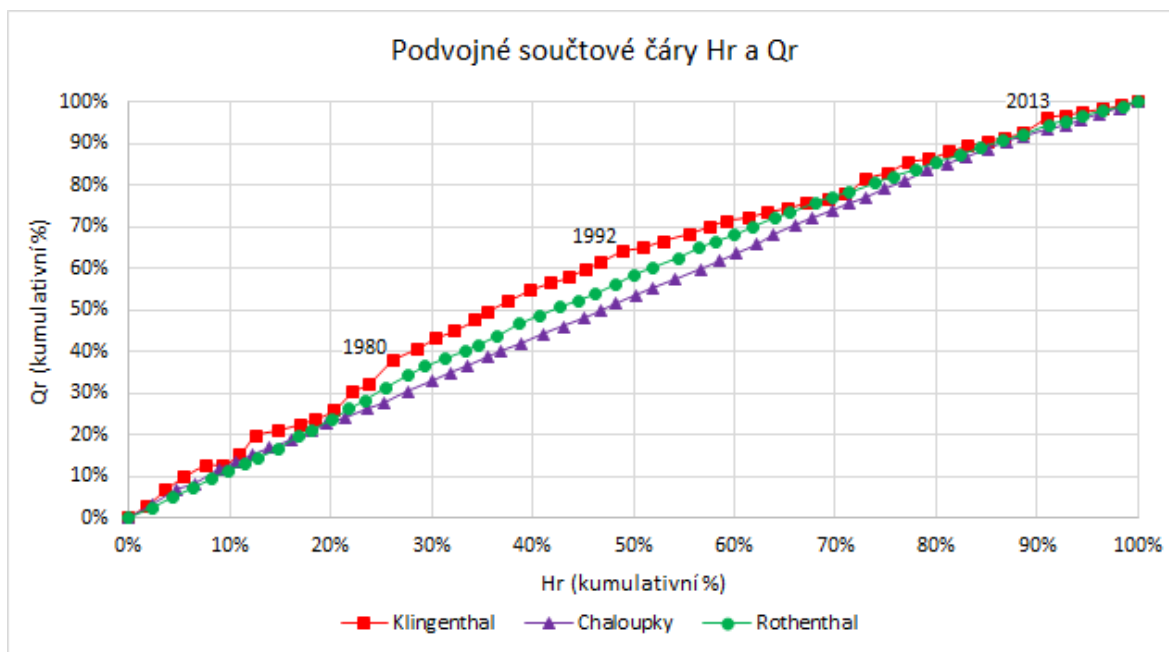
Tabulka 12: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady Q_m , Q_r a Q_s

Qm, Qr, Qs (1967-2018)	Klingenthal		Chaloupky		Rothenthal	
	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT	Pettitt	SNHT
listopad	1999	2017	1987	1967	2003	2008
prosinec	1995	1975	1978	1971	1995	1994
leden	2010	2010	1974	1973	1995	1995
únor	1996	1967	1988	1988	2005	1967
březen	2012	2012	1988	1968	2012	2012
duben	1988	1988	1988	1970	1997	1988
květen	1992	1987	1992	1970	1987	1987
červen	1987	1987	1996	1996	1996	1996
červenec	1996	1985	2012	2012	1997	1996
srpen	1987	1984	1987	2011	1993	2002
září	1998	1998	2001	2011	1998	1967
říjen	1981	1968	2001	1998	1984	1981
rok	1988	2013	2007	1968	1996	1996
III-V	1988	1988	2001	1970	1988	2010
VI-VIII	1987	1987	1996	2013	1996	1996
IX-XI	1982	1982	2011	2011	1982	1982
XII-II	1968	1968	1979	1973	1995	1995
XI-IV	1989	2013	2008	1968	2000	2013
V-X	1987	1987	1998	1987	1996	1996
7-day-min	1989	1987	1979	2001	1993	1993

zdroje dat: ČHMÚ, LFULG

Analýze homogenity byly podrobeny i řady průměrných sedmidenních minimálních průtoků, které také poukazují na odlišné chování všech povodí. Zatímco profily Klingenthal a Rothenthal zaznamenaly zlom následovaný poklesem průtoků na konci 80., respektive 90. let, na profilu Chaloupky nedochází ve sledovaném období ke statisticky významnému zlomu (tabulka 12).

Pro lepší vizuální představu byly jako doplněk ke statistickým testům homogenity sestrojeny podvojně součtové čáry srážek a průtoků (obrázek 27). Na osu y byly vyneseny kumulativní procentuální podíly Q_r pro každý vodoměrný profil, na osu x pak byly vyneseny stejným způsobem hodnoty H_r z nejbližší srážkoměrné stanice. Pro profil Klingenthal na horní Svatavě byly využity úhrny srážek ze stanice Schöneck-Kottenheide. Pro časovou řadu Načetínského potoka z limnigrafu Rothenthal byla použita srážková řada ze stanice Marienberg-Reitzenhain a stanice. Podvojná součtová čára pro profil Chaloupky v povodí horní Rolavy byla sestrojena za využití řady srážkových úhrnů na stanici Carlsfeld.



Obrázek 27: Podvojně součtové čáry H_r a Q_r pro jednotlivá povodí (zdroje dat: ČHMÚ, DWD, LFULG)

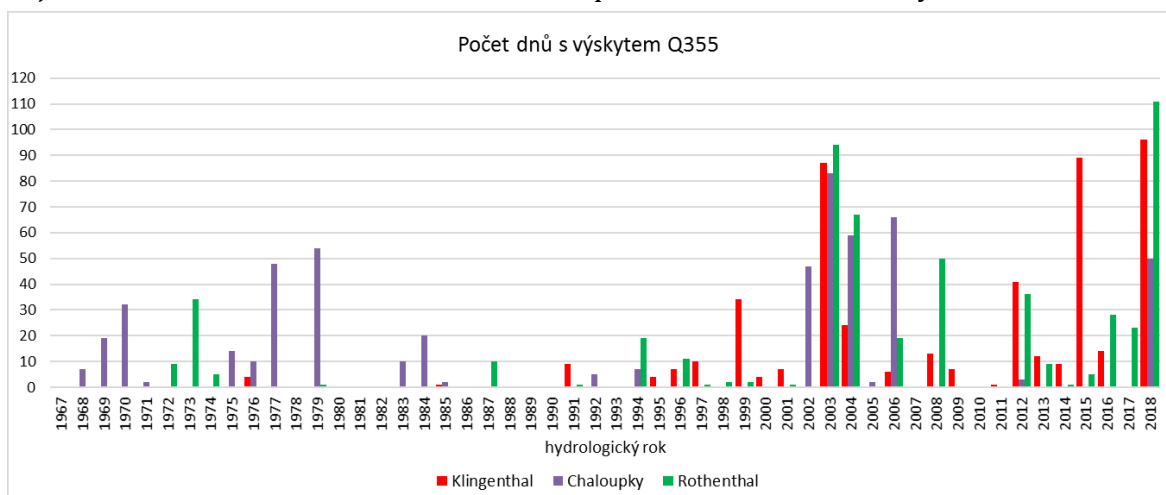
Na první pohled je velmi výrazná rozkolísanost součtové čáry pro profil Klingenthal, kde došlo k významnému zlomu s rokem 1980. V tomto roce začíná z pohledu Q_r vodnější období. Naopak po roce 1992 je k vidění relativně rychlý pokles. Pettittův, popřípadě SNHT test sice detekoval jednoduché zlomy řady Q_r v letech 1988 a 2013, nicméně je třeba připomenout, že počítal pouze s průtoky, zatímco podvojná součtová čára zahrnuje i srážkové údaje. V tomto případě však i součtová čára dokazuje pokles průměrných průtoků zhruba po přelomu 80. a 90. let. Stanice Rothenthal vykazuje pro toto období podobnou tendenci, ale zlomy a odchylky nejsou zdaleka tak výrazné. Rok 1996, který byl určen jako zlomový oběma výše uvedenými testy homogenity, se nezdá být na součtové čáře zřetelný. Nejvyrovnanější průběh bez jakýchkoli jasně zřetelných zlomů byl zaznamenán na profilu Chaloupky, přestože i pro tuto stanici byly v rámci např. Pettittova test odhalen zlomový bod v roce 2007.

5.2 Ukazatele hydrologického sucha

V další části této práce byly vyhodnoceny konkrétní ukazatele hydrologického sucha. Testy homogenity datových řad naznačily, že nejvíce statisticky významných změn v hydrologických a klimatologických parametrech se děje v jarních a také letních měsících v období 1987-1992. Proto byl i vzhledem k celkové délce sledovaného období zvolen jako dělicí rok pro analýzy změn sezonality výskytu hydrologického sucha rok 1992. Tyto změny jsou tedy sledovány pro dvě stejně dlouhé šestadvacetileté periody, konkrétně v letech 1967-1992 a 1993-2018. Pro ukazatele sucha byly testovány i dlouhodobé trendy na jednotlivých stanicích, výsledky těchto analýz jsou uvedeny také v tabulce 21 v rámci podkapitoly 5.3.7.

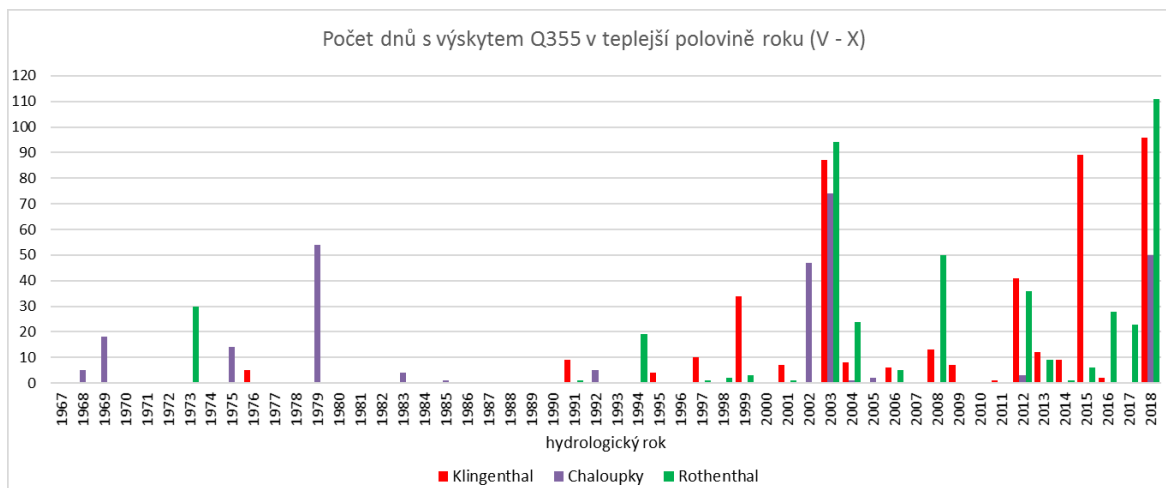
5.2.1 Prahová hodnota a nedostatkové objemy

Jako první byly analyzovány počty dnů s výskytem Q_{355} na daném vodoměrném profilu. Tyto dny a s nimi související nedostatkové objemy byly zároveň podrobeny analýze změn sezónního výskytu, mimo jiné i z důvodu odlišení extrémně nízkých průtoků v chladném a teplém půlroce. Z grafu ročních výskytů Q_{355} (obrázek 28) je patrné, že se profil Chaloupky na horní Rolavě liší od zbylých dvou výskytem dnů s extrémně nízkými průtoky v 70. letech. Naproti tomu profily Klingenthal na horní Svatavě a Rothenthal na Načetínském potoce vykazují nejsušší roky z pohledu výskytu Q_{355} především ve druhé polovině sledovaného období. Další zajímavostí je nesoulad v počtu výskytu těchto dní mezi dvěma blízkými povodími horní Rolavy a Svatavy v 60. a 70. letech, kdy se Rolava potýkala se suchem relativně často, zatímco Svatava nikoliv. Zároveň je třeba poukázat na extremitu roku 2018, jenž v počtu dnů s výskytem Q_{355} překonal na horní Svatavě a Načetínském potoce historická maxima. Profil Klingenthal zaznamenal v tomto roce 96 dní pod kritickou hladinou, stanice Rothenthal dokonce 111, v obou případech šlo o téměř nepřerušované epizody od července do října. Na horní Rolavě bylo zaznamenáno nejdelší sucho v roce 2003, konkrétně 83 dní s průtokem menším či rovným kritické hladině.

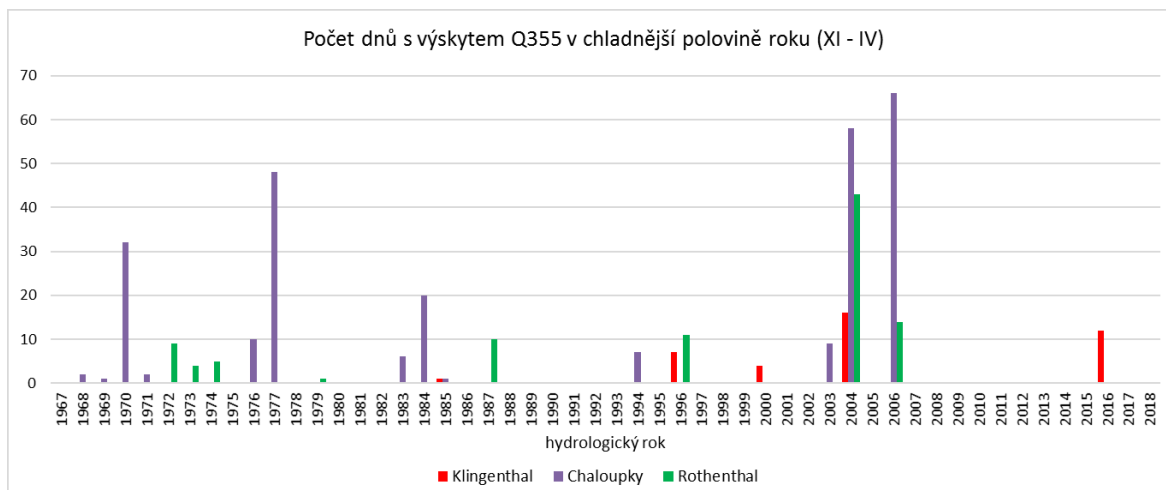


Obrázek 28: Počet dnů s výskytem Q_{355} na jednotlivých profilech (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)

Pokud je datový soubor průtoků Q_{355} rozdělen na dvě poloviny dle teplejší a chladnější části roku tak, jak bylo definováno v metodické části této práce, je k vidění velmi výrazný rozdíl mezi oběma polovinami (obrázky 29 a 30). Zatímco hodnoty nejsušších roků v teplejší polovině roku (květen až říjen) téměř kopírují hodnoty pro celé roky, pro chladnější polovinu roku je tomu trochu jinak. V období od listopadu do dubna se jeví jako nejsušší hydrologické roky 2004 a 2006. Zároveň je dobře patrný rozdíl mezi povodím horní Rolavy a zbylými dvěma povodími, která nemají tak výrazný podíl dní s extrémně nízkými průtoky v chladnější polovině roku, například roky 1970, 1977 a 2006 zde byly suché dny zaznamenány výlučně v tomto období.



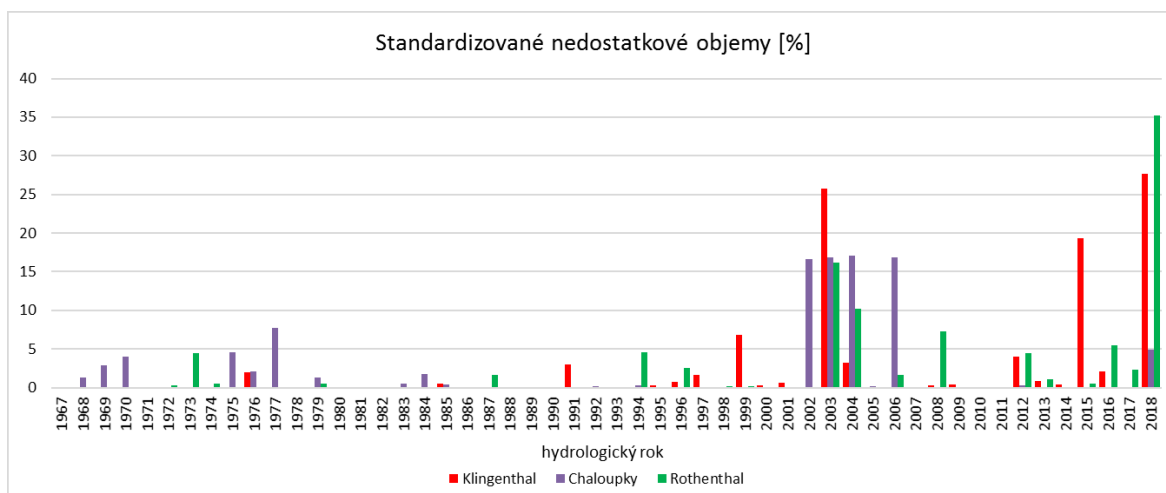
Obrázek 29: Počet dnů s výskytem Q_{355} v teplejší polovině roku (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)



Obrázek 30: Počet dnů s výskytem Q_{355} v chladnější polovině roku (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)

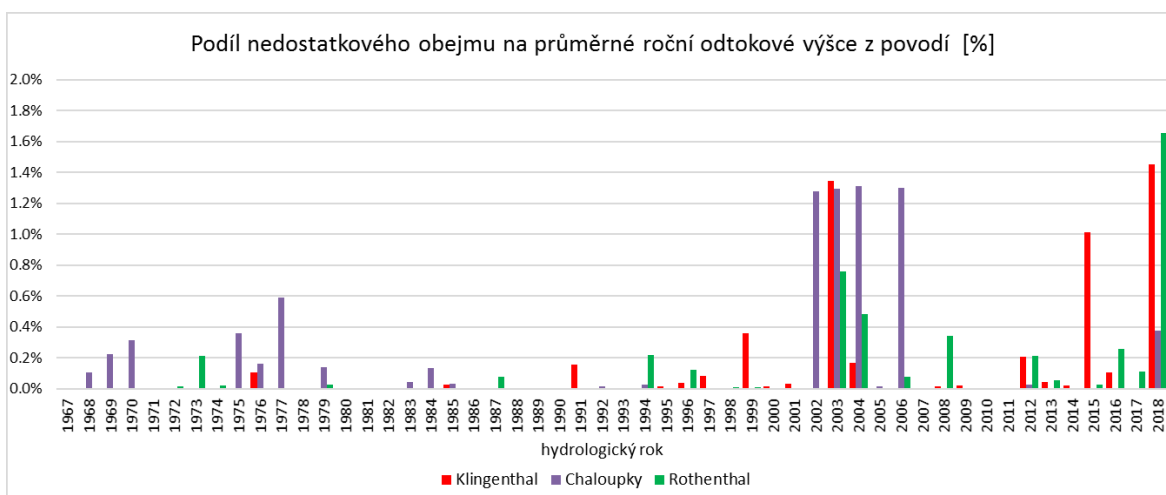
Samotný počet dní pod kritickou hladinou (doba trvání) však může přinést trochu zkreslenou informaci o závažnosti sucha v daném povodí, jelikož nezohledňuje, jak moc skutečný průtok poklesl pod danou hranici. Proto byly pro stejné roky vypočteny i kumulativní nedostatkové objemy na daných vodoměrných profilech, které, obrazně řečeno, každému hydrologicky suchému dni přidělí i pomyslnou váhu (magnitudu). Aby byly tyto hodnoty mezi jednotlivými stanicemi porovnatelné, bylo třeba roční nedostatkové objemy v milimetrech na plochu povodí standardizovat do podoby procentuálních podílů pro celé hydrologické roky (obrázek 31).

Na první pohled jsou zřejmé některé rozdíly oproti předchozímu grafu, který zobrazoval pouze počty hydrologicky suchých dní (obrázek 28 na straně 62). Nejvýraznějším rozdílem je poměr let 2003 a 2018 na profilu Rothenthal, kde podíl nedostatkových objemů dosahuje v roce 2018 dvojnásobné hodnoty oproti roku 2003, zatímco dle obrázku straně byl rok 2018 jen mírně sušší. Stejně tak byl rok 2015 na profilu Klingenthal dle Q_{355} přibližně na stejné úrovni s roky 2003 a 2018, ale po započtení nedostatkových objemů se rok 2015 ukázal jako vodnější. Další zajímavostí jsou roky 2002-04 a 2005 na horní Rolavě. Dle Q_{355} se na první pohled jevil jako nejsušší rok 2003, nicméně dle deficitních objemů byly všechny roky srovnatelné.



Obrázek 31: Standardizované roční nedostatkové objemy (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)

Ať už se však jedná o výskyt dnů s hodnotou průtoku menší nebo rovnou Q_{355} či procentuální podíly nedostatkových objemů, z výše uvedených výsledků je zřejmé, že na horní Svatavě a Načetínském potoce je ve sledovaném období vývoj výskytu extrémně suchých roků velmi podobný. Na druhou stranu ve výše položeném povodí horní Rolavy byly zaznamenány sušší roky také na začátku sledovaného období a v rozmezí let 2002-2006. Dále stojí za zmínku extrémně suchý rok 2018, který nebyl na Chaloupkách zdaleka tak výrazný jako na profilech Klingenthal či Rothenthal.



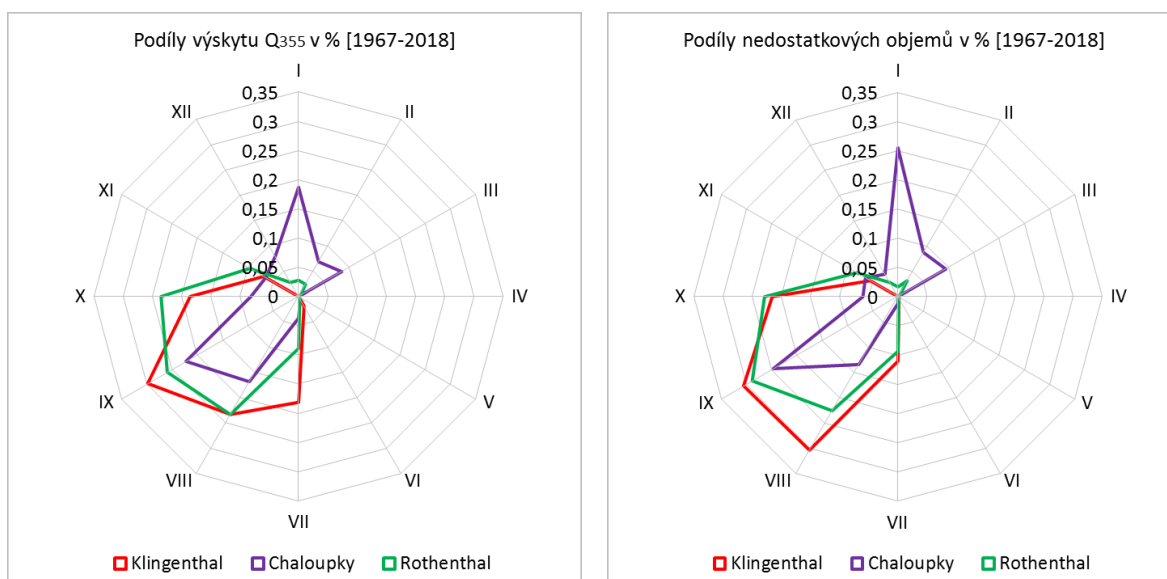
Obrázek 32: Podíl nedostatkových objemů na odtokové výšce (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)

Procentuální podíl nedostatkových objemů na průměrné odtokové výšce z povodí je však dle hodnot v obrázku 32 na předchozí straně poměrně nízký. Zde je třeba podotknout, že výsledné hodnoty jsou způsobeny nastavením kritické hladiny pro výpočet nedostatkových objemů, kterou je v této práci Q_{355} , tudíž i nejsušší roky nepřesahují 2% podíl na ročním odtoku.

5.2.2 Změny sezonality výskytu suchých dní

Při sledování výskytu hydrologicky suchých dní v rámci roku je důležité upřít pozornost také na sezónní či meziměsíční změny. Proto jsou dalším předmětem analýzy této práce změny sezonality výskytu hydrologicky suchých dní dle jednotlivých měsíců. Z důvodů uvedených v úvodu podkapitoly 5.2 bylo sledované období rozděleno na dvě shodně dlouhé periody (1967-1992 a 1993-2018), pro které byly jednotlivé dny s hodnotou průtoku menší či rovnou Q_{355} rozděleny dle měsíce výskytu. Součty suchých dní v jednotlivých měsících byly pro celé sledované období i jeho dvě dílčí části převedeny na procentuální podíly z důvodu následného vynesení hodnot do růžicového diagramu. Zároveň byly pro každý měsíc analogicky vypočteny nedostatkové objemy ze stejného důvodu jako v podkapitole 5.2.1, tedy k porovnání prostého podílu počtu suchých dní s jeho „váženou“ hodnotou, která více vypovídá o intenzitě sucha.

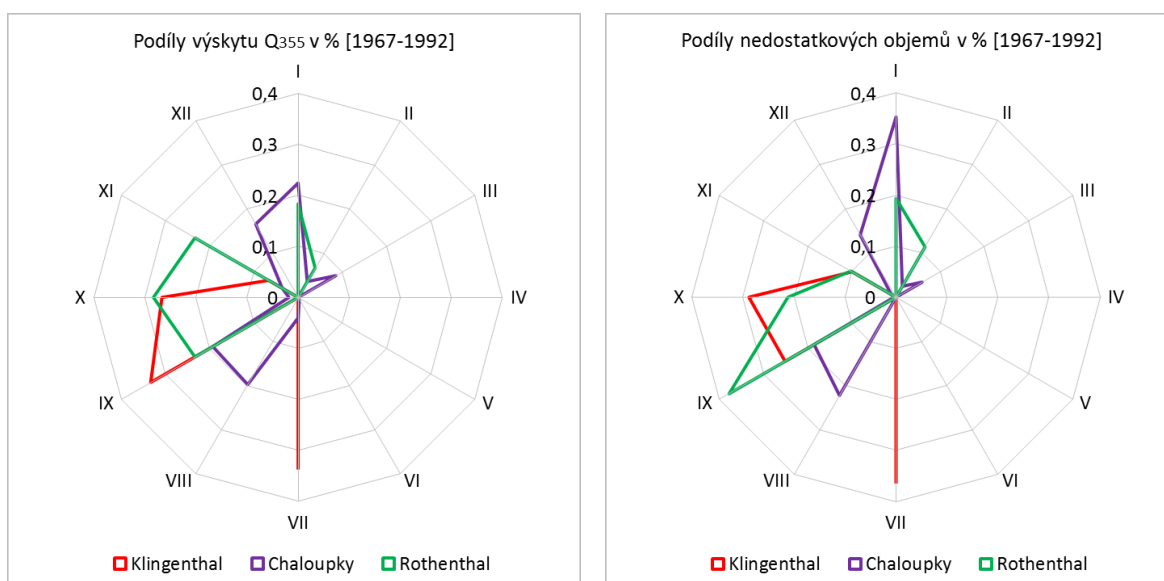
Při pohledu na růžicové diagramy měsíčních podílů Q_{355} a nedostatkových objemů pro celé sledované období (obrázky 33 a 34) vychází najevo několik rozdílů. Například pro profil Klingenthal je dle počtu dní Q_{355} nejsušším měsícem září, nicméně dle nedostatkových objemů je na stejné úrovni jako srpen. Dle nedostatkových objemů se v červenci na stejném profilu v porovnání se srpnem a zářím vyskytuje méně než polovina deficitních průtoků, zatímco dle výskytu Q_{355} je tento poměr v porovnání se stejnými měsíci vyrovnanější. Dále je zřetelné, že podle nedostatkových objemů je na profilu Rothenthal průměrně nejsušším měsícem září, zatímco dle výskytu Q_{355} je podíl tohoto měsíce srovnatelný se srpnem a říjnem.



Obrázek 33 a 34: Měsíční podíly Q_{355} a nedostatkových objemů v období 1967-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

Pro oba dosud jmenované profily platí, že se zde vyskytují jen velmi zřídka hydrologicky suché dny v rozmezí prosince a června, což ovšem neplatí pro profil Chaloupky na horní Rolavě, kde je podíl suchých dnů v zimních měsících velmi významný. Tento fakt je zřejmě dán vyšší průměrnou nadmořskou výškou a s tím souvisejícími nižšími teplotami vzduchu v zimě. Oproti ostatním profilům je zde zajímavý omezený výskyt extrémně suchých dnů v červenci a říjnu.

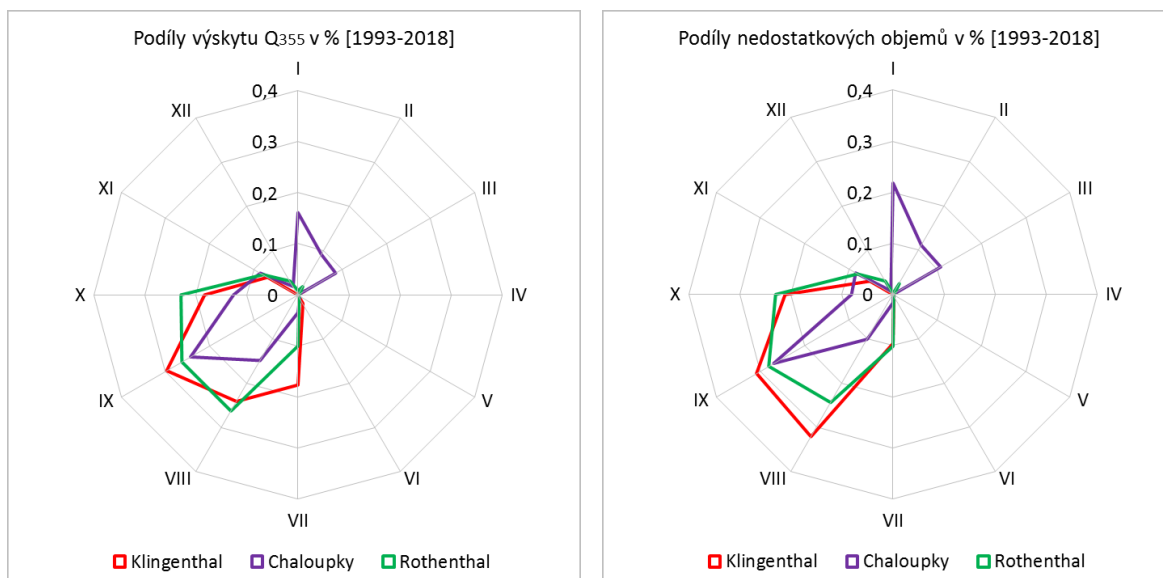
Pokud je pozornost zaměřena na sezónní rozložení dnů s extrémně nízkým průtokem spolu s jejich nedostatkovými objemy odděleně pro dvě výše definované periody, rozdíly jsou patrné na první pohled (obrázky 35 a 36). V první polovině sledovaného období (1967 až 1992) je opět k vidění významný rozdíl při zohlednění magnitudy sucha v daných měsících oproti samotné době trvání sucha. Nejvýraznější je tento rozdíl v podzimních měsících na profilech Klingenthal a Rothenthal. Zatímco na prvně jmenovaném profilu je dle doby trvání častěji zasaženým měsícem září než říjen, dle nedostatkových objemů se sucho projevuje více v říjnu. Nejčastěji se však na této stanici vyskytovaly suché dny s největší magnitudou v červenci. Pro limnigraf Rothenthal je podzimní situace opačná, nejvíce suchých dnů se v první polovině sledovaného období vyskytovalo v říjnu, nicméně z pohledu magnitudy je téměř dvojnásobně významnější měsíc září. Na profilu Chaloupky se výrazněji projevují nedostatkové průtoky v zimě, v teplejší polovině roku pak téměř výhradně v září a srpnu.



Obrázek 35 a 36: Měsíční podíly Q₃₅₅ a nedostatkových objemů v letech 1967-1992 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

Druhá polovina sledovaného období (obrázky 37 a 38 na další straně) vykazuje oproti té první několik výrazných změn. Na první pohled je zřejmá větší a vyrovnanější koncentrace suchých dnů v rozmezí července a listopadu, což platí zejména pro níže položené profily Klingenthal a Rothenthal. Tyto stanice mimo jiné zaznamenaly v období 1993 až 2018 signifikantní nárůst suchých dnů v srpnu ve srovnání s rozmezím let 1967 až 1992, jelikož v dřívějším období nebyl v srpnu zaznamenán ani jeden den splňující kritérium pro označení hydrologického sucha.

Na limnigrafu Rothenthal zároveň došlo k markantní redukci extrémně nízkých průtoků v zimních měsících oproti předchozímu období. Dále je možné opět pozorovat odlišné chování profilu Chaloupky, kde je i v druhé polovině sledovaného období výrazně suchý leden, přestože se podíl nedostatkových objemů v tomto měsíci oproti předchozímu období snížil. S tímto faktem souvisí i posun většinového podílu nedostatkových objemů v tomto povodí z chladnější do teplejší poloviny roku, a to zejména zvýšenému výskytu deficitních průtoků v září.



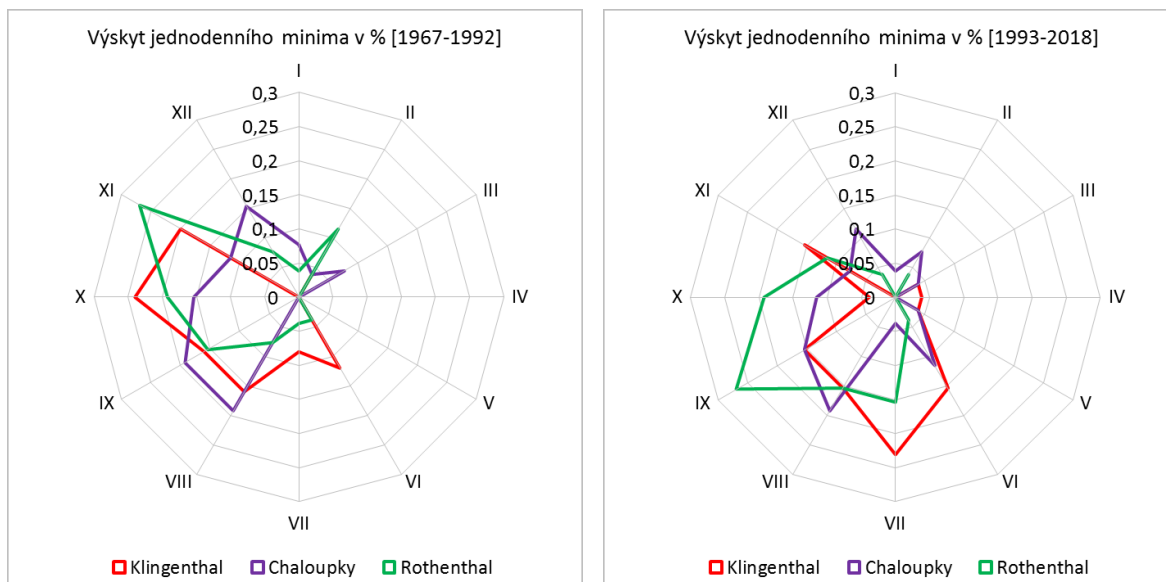
Obrázek 37 a 38: Měsíční podíly Q_{355} a nedostatkových objemů v letech 1993-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

5.2.3 Jednodenní minima

Další metodou charakterizace hydrologického sucha je metoda, kterou uvádí Gumbel (1963), tedy že pro každý rok je jako sucho určena jen jedna hodnota absolutně nejnižšího průměrného denního průtoků. Tento přístup sice poukáže, kdy v daný hydrologický rok došlo k nejmenšímu průtoků, nicméně hodnota tohoto minima nemusí dle jiných kritérií, např. prahové hodnoty, splňovat parametry „suchého“ dne. Tudíž měsíc, který dle této metody vychází jako nejčastěji zasažený minimálním průtokem, nemusí vykazovat dle jiných analýz žádné projevy sucha.

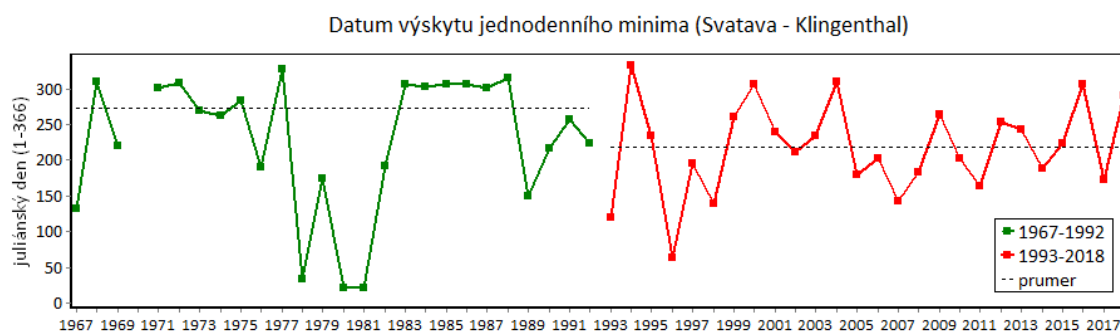
I přes výše uvedená fakta lze pozorovat určité rozdíly mezi polovinami sledovaného období (obrázek 39 a 40). Při srovnání s diagramy výskytu dní s průtokem Q_{355} je na první pohled patrné rovnoměrnější rozdělení jednodenních minim mezi jednotlivými měsíci v obou polovinách sledovaného období. Některé rysy jsou však podobné, například je opět zřetelný větší podíl jednodenních minimálních průtoků v chladnější polovině roku na nejvýše položené stanici Chaloupky. Dále je patrné, že stejně jako u průtoků Q_{355} a nedostatkových objemů dochází mezi dvěma polovinami k posunu ročních minim z chladnější do teplejší poloviny roku. Dle růžicových diagramů je touto změnou nejméně postižen profil Chaloupky na horní Rolavě, přestože i u něj je patrný přírůstek podílu absolutních minim v červnu a červenci na úkor prosince a podzimních měsíců. Na druhou stranu zbylé dvě vodoměrné stanice vykazují daleko

výraznější úbytek celoročních minim v listopadu, ale i jejich markantní nárůst v září (Rothenthal) a červenci (Klingenthal i Rothenthal). Na závěr je potřeba dodat, že hodnoty jednodenních minimálních průtoků vstupují také do výpočtů hodnot Low Flow indexu (*LFI*) pro jednotlivé hydrologické roky.



Obrázek 39 a 40: Měsíční podíly jednodenních minim 1967-1992 a 1993-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

Přesné datum (juliánský den) výskytu nejnižšího denního průtoků v hydrologickém roce může napovědět, jestli se tato minima v dlouhodobém horizontu posouvají. Pomocí IHA analýzy je možné poměrně jednoduše tato data vypočítat, rozdělit na dvě období a vizualizovat. Profil Klingenthal na horní Svatavě vykazuje posun průměrného výskytu jednodenního minima blíže začátku roku v druhé polovině sledovaného období (obrázek 41). Stejně tak se posun týká i obou zbylých stanic, nejmarkantnější je na horní Rolavě (tabulka 13).



Obrázek 41: Juliánský den výskytu ročních minimálních průtoků (zdroj vstupních dat: LFULG)

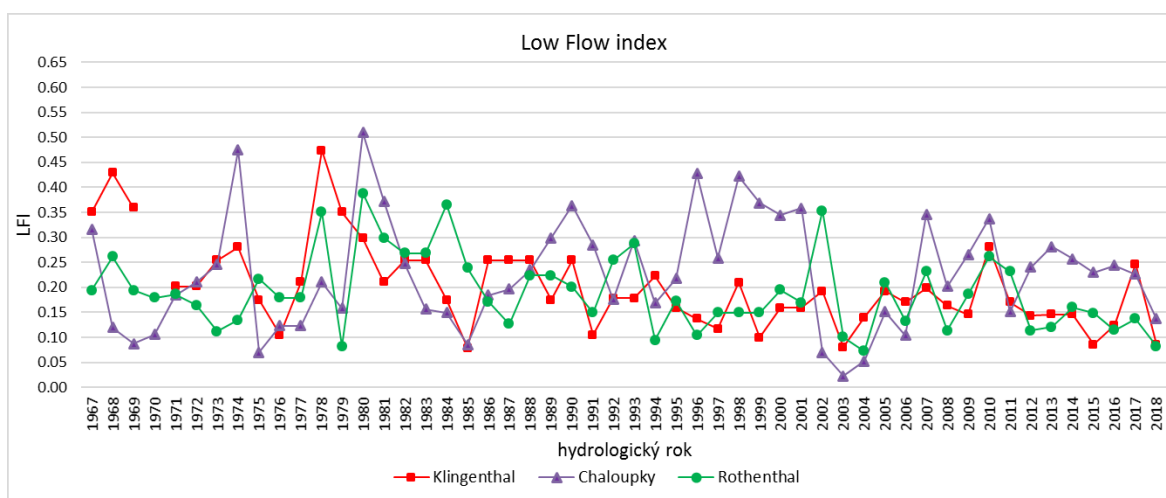
Tabulka 13: Průměrné datum výskytu Q_{min} v obou polovinách sledovaného období

Q _{min}	Klingenthal (Svatava)		Chaloupky (Rolava)		Rothenthal (Načetínský potok)	
	juliánský den	datum	juliánský den	datum	juliánský den	datum
1967-1992	273	30. září	310	6. listopad	304	31. říjen
1993-2018	218	6. srpen	224	12. srpen	246	3. září

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

5.2.4 Low Flow index

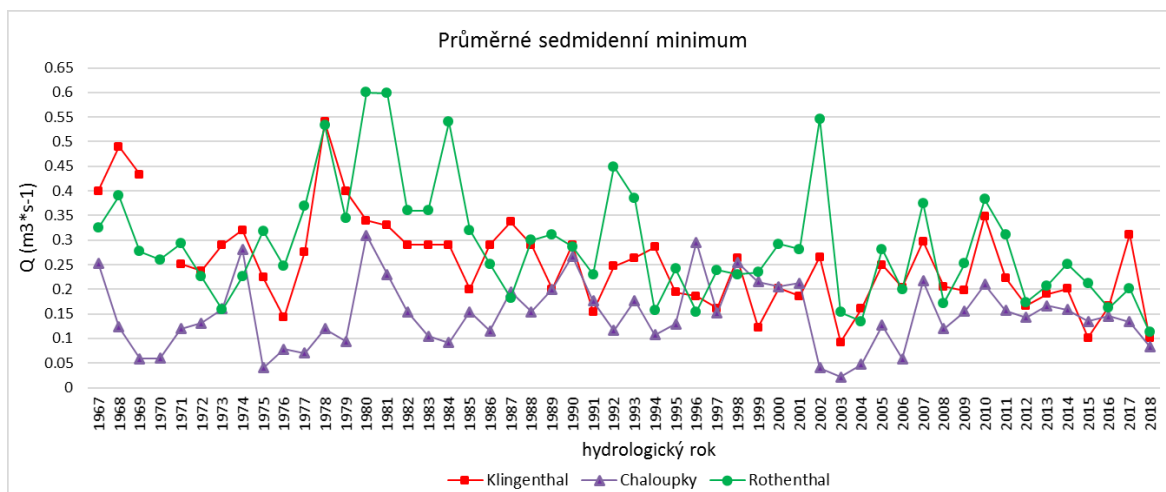
Jak bylo zmíněno v metodické části této práce a na předchozí straně, další metodou hodnocení sucha je LFI. Dle tohoto ukazatele je názorně vidět extremita roku 2003 pro stanice Klingenthal a Chaloupky. Tento rok patřil mimo jiné mezi nejsušší i dle ostatních ukazatelů ve všech třech povodích. Dle LFI byl pro profil Rothenthal na Načetínském potoce nejsušší rok 2018. Z grafu průběhu tohoto indexu pro všechny tři limnigrafy (obrázek 42) je patrná i větší variabilita profilu Chaloupky ve srovnání s ostatními dvěma stanicemi, což je vidět například na konci 90. let a přelomu tisíciletí. Při analýze trendů v řadách ročních hodnot LFI pro jednotlivé profily byl na 5% hladině významnosti zjištěn výrazný pokles pro horní Svavovu a Načetínský potok. Naopak LFI pro povodí horní Rolavy mírně stoupá, nicméně trend není statisticky významný.



Obrázek 42: Hodnoty LFI pro jednotlivé profily v letech 1967-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

5.2.5 Průměrné sedmidenní minimum

Dalším ukazatelem je průměrný sedmidenní minimální průtok (obrázek 43). Nejde o klasický index sucha, ale o průměrnou hodnotu průtoku sedmi nejsušších dní v roce. Opět je patrných několik rozdílů mezi povodími, zejména mezi profilem Chaloupky a zbylými dvěma.

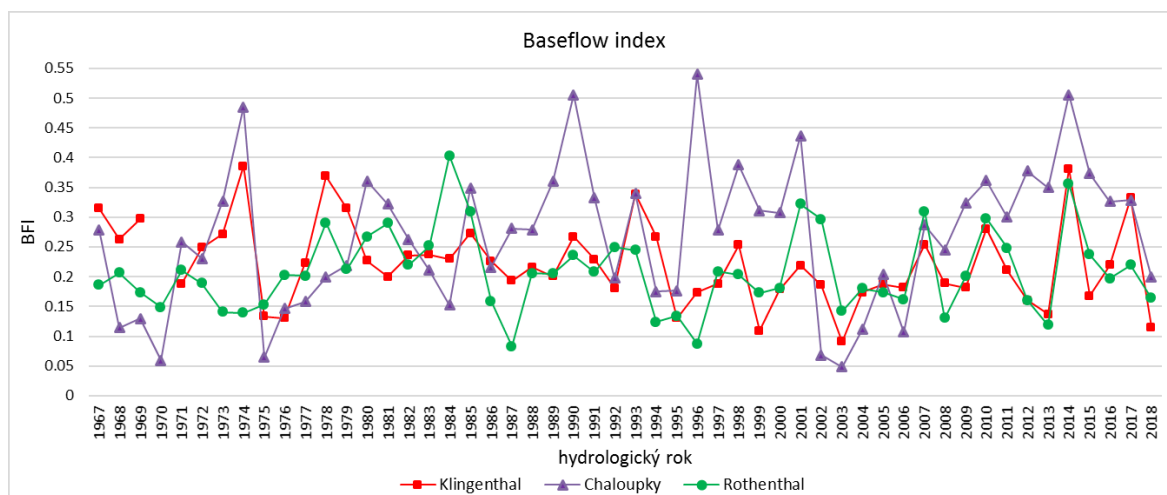


Obrázek 43: Hodnoty průměrného sedmidenního minima v letech 1967-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

Zatímco hodnoty pro profil Chaloupky mají na první pohled dlouhodobě relativně vyrovnaný průběh, stanice Klingenthal a Rothenthal vykazují zdánlivě spíše klesající tendenci. Výsledky testování trendů tyto domněnky potvrzují, statisticky významný sestupný trend vykazují stanice Klingenthal i Rothenthal, naopak na profilu Chaloupky nebyl detekován žádný trend. Pokud je pozornost zaměřena na nejméně výraznější amplitudy jednotlivých profilů, lze si znovu povšimnout let 2003 a 2018, ale také roku 1975 na Rolavě či 2015 na Svatavě.

5.2.6 Baseflow index

Hodnoty BFI jsou de facto poměr průměrného sedmidenního minima a průměrného průtoku daného hydrologického roku, zatímco hodnota LFI je vztažena na celé sledované období. Opět je patrná větší rozkolísanost indexu pro profil Chaloupky (obrázek 44), jež by mohla být do jisté míry způsobena větším příspěvkem podzemní vody na odtoku. Vzhledem k faktu, že v tomto povodí je největší zastoupení rašelinišť, se zdá tato teorie poměrně smysluplná, především pokud je zohledněna závislost odtoku z rašelinišť na jejich nasycení vodou, jak uvádí například Vlček (2018). Trendy hodnot BFI jsou pro jednotlivé stanice na rozdíl od předchozích dvou ukazatelů mírně odlišné. Na 5% hladině spolehlivosti byl prokázán pokles pouze na stanici Klingenthal, naopak profil Chaloupky vykazuje statisticky významný nárůst BFI ve sledovaném období. Dle výsledků MK-testu hodnoty BFI mírně narůstají také v povodí Načetínského potoka, ale trend nebyl vyhodnocen jako významný.



Obrazek 44: Hodnoty BFI pro jednotlivé profily v letech 1967-2018 (zdroje: ČHMÚ, LFULG)

Na závěr kapitoly jsou pro přehled uvedeny vždy tři nejsušší roky pro jednotlivá povodí dle jednotlivých ukazatelů v teplejší polovině roku (tabulka 14 na následující straně). Teplejší polovina roku byla zvolena zejména pro odlišení hydrologicky suchých epizod způsobených výlučně nedostatkem srážek ve vegetační sezóně od extrémně nízkých průtoků vyvolaných mrazem či akumulací srážek v podobě sněhu. Hlavním kritériem pro zahrnutí dané epizody sucha byla její minimální délka, která byla stanovena na 10 dní.

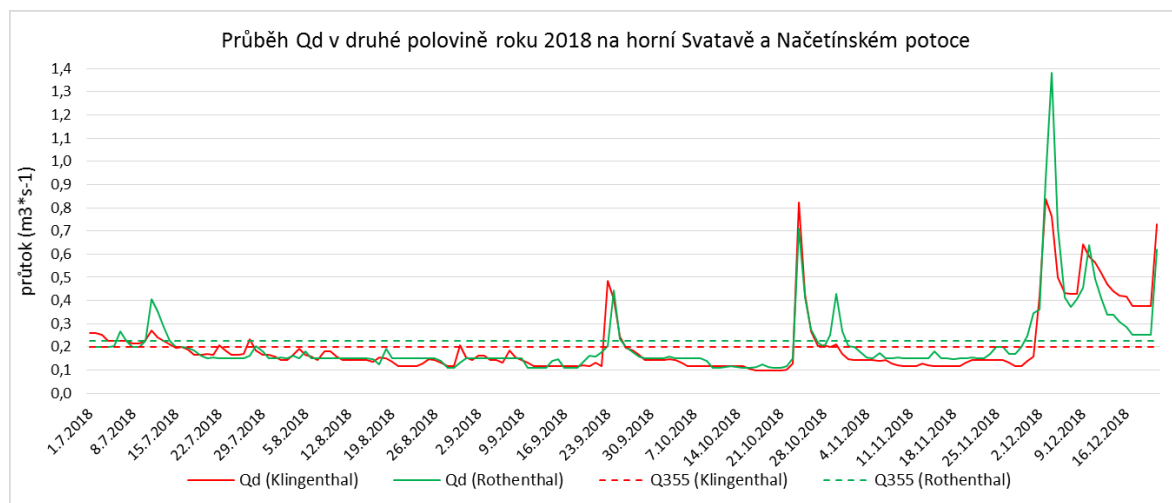
Na první pohled je zřejmé, že roky 2003 a 2018 se v tabulce objevují nejčastěji. Podle téměř všech použitých ukazatelů bylo období od května do října roku 2018 zatím absolutně nejsušší na závěrovém profilu Rothenthal. V tabulce jsou sice uvedeny výsledky pro rozmezí let 1967 až 2018, nicméně pro závěrový profil Načetínského potoka byl rok 2018 nejsušší i při použití celé datové řady od začátku měření v roce 1929. Na horní Svatavě byla podle většiny ukazatelů nejsušší teplejší polovina roku 2003, nicméně i tyto sezóny byly v letech 2018 a 2015 velmi suché. Na horní Rolavě byla taktéž výjimečně suchá vegetační sezóna roku 2003, dále pak bylo výrazné sucho v letech 1975 a 1969. Na rozdíl od dvou výše jmenovaných povodí se na horní Rolavě do výčtu třech nejsušších teplejších polovin roku dostaly i sezóny z let v první polovině sledovaného období.

Tabulka 14: Nejsušší teplejší poloviny roků dle jednotlivých ukazatelů

nejsušší teplejší poloviny roků (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetínský p.)		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
doba trvání	2018	2015	2003	2003	1979	2018	2018	2003	2008
magnituda (deficitní objem)	2018	2003	2015	2003	2018	1975	2018	2003	2008
intenzita (deficit/doba trvání)	2003	2018	2015	1975	2003	1969	2018	1994	2016
LFI	2003	2018	2015	2003	1975	1969	2018	1994	2003
BFI	2003	1999	2018	2003	1975	2018	2013	1994	2008
jednodenní minimum	2003	2018	2015	2003	1975	1969	2018	1994	2003
sedmidenní minimum	2003	2018	2015	2003	1975	2018	2018	2003	1994

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

Jak bylo již výše uvedeno, hydrologický rok 2018 byl vyhodnocen jako jeden z vůbec nejsušších nejen v Krušných horách. Nedostatek vody se však přenesl i do dalšího hydrologického roku, jak je patrné z křivek průběhu Q_d na profilech Klingenthal a Rothenthal (obrázek 45). Na obou zmíněných stanicích byl průtok Q_{355} zaznamenáván s menšími pauzami až do začátku prosince. Průběh denních průtoků také poukazuje na největší magnitudu sucha v říjnu 2018 pro oba profily, kdy se hodnoty pohybovaly kolem pouhých 100 litrů za sekundu. Pokud by se opakoval scénář několika posledních let, můžeme očekávat podobné či závažnější sucho i v roce 2019.



Obrázek 45: Chod Q_d na Svatavě a Načetínském potoce v druhé polovině roku 2018 (zdroj dat: LFULG)

5.3 Testování trendů v časových řadách

Pro objasnění trendů v klimatických a hydrologických časových řadách bylo využito MK-testu jak v jeho původní, tak i sezónní variantě. Před samotným testováním výskytu statisticky významných trendů byla vypočtena hodnota sklonu KTRL. Kladná hodnota značí stoupající tendenci (světle oranžové podbarvení v tabulkách). Záporná hodnota poukazuje na sestupnou tendenci (světle modré podbarvení). Po vypočtení hodnoty KTRL bylo přistoupeno k testování trendů na 5% hladině významnosti. Při zamítnutí nulové hypotézy předpokládající neexistenci trendu byly v tabulce hodnoty MK-statistiky a p-hodnoty podbarveny, barevně analogicky jako u KTRL s tím rozdílem, že sytější odstín značí větší sílu trendu.

5.3.1 Teplotní průměry

V prvé řadě bylo přikročeno k hodnocení průměrných měsíčních, sezónních a ročních teplot vzduchu na vybraných klimatologických stanicích ve sledovaném období (tabulka 15). Jak je patrné již při zběžném pohledu, dle KTRL mají všechny stanice v měsíčních, sezónních i ročních průměrech vzestupnou tendenci. Výsledky MK-testu odhalily na všech stanicích signifikantní rostoucí trendy v měsíčních řadách zejména v jarních a letních měsících, zatímco v podzimních a zimních měsících trendy potvrzeny nebyly. V řadách sezónní průměrů byl odhalen na dvou stanicích vzestupný trend i na podzim, velmi výrazné jsou trendy na jaře a v létě.

Tabulka 15: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady T_m , T_r a T_s

Tm, Tr, Ts (1967-2018)	Carlsfeld			Elster-Bad Sohl			Fichtelberg			Marienberg		
	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.
listopad	0.033	2.43	0.055	0.025	2.07	0.102	0.044	3.24	0.011	0.029	2.13	0.093
prosinec	0.025	1.44	0.256	0.024	1.43	0.259	0.035	1.87	0.140	0.033	2.04	0.107
leden	0.014	0.80	0.528	0.022	1.04	0.412	0.018	0.89	0.482	0.025	1.22	0.336
únor	0.018	0.98	0.439	0.009	0.53	0.676	0.019	0.98	0.439	0.011	0.48	0.705
březen	0.037	2.09	0.099	0.019	1.47	0.246	0.024	1.15	0.364	0.015	0.75	0.554
duben	0.083	6.34	0.000	0.062	5.62	0.000	0.075	5.86	0.000	0.064	5.43	0.000
květen	0.057	4.30	0.001	0.043	3.63	0.004	0.050	3.87	0.002	0.036	3.02	0.017
červen	0.047	4.42	0.000	0.038	4.07	0.001	0.044	3.98	0.002	0.034	3.33	0.009
červenec	0.050	3.13	0.014	0.043	3.63	0.004	0.047	3.04	0.016	0.036	2.82	0.026
srpen	0.040	3.61	0.004	0.047	4.66	0.000	0.042	3.68	0.004	0.040	3.70	0.004
září	0.019	1.51	0.233	0.018	1.45	0.253	0.020	1.44	0.256	0.019	1.36	0.283
říjen	0.005	0.26	0.837	0.016	1.31	0.301	0.011	0.64	0.614	0.009	0.70	0.581
rok	0.035	5.54	0.000	0.032	5.42	0.000	0.035	5.94	0.000	0.030	4.86	0.000
III-V	0.060	6.04	0.000	0.046	5.19	0.000	0.051	5.28	0.000	0.042	4.51	0.000
VI-VIII	0.048	5.86	0.000	0.041	6.38	0.000	0.045	5.67	0.000	0.036	4.76	0.000
IX-XI	0.020	2.42	0.056	0.020	2.64	0.037	0.024	2.94	0.020	0.017	2.25	0.076
XII-II	0.020	1.52	0.230	0.017	1.38	0.276	0.021	1.54	0.224	0.019	1.60	0.207
XI-IV	0.034	4.20	0.001	0.027	3.22	0.011	0.034	4.49	0.000	0.028	3.56	0.005
V-X	0.034	5.66	0.000	0.036	6.33	0.000	0.034	5.42	0.000	0.025	4.86	0.000

zdroj vstupních dat: DWD

Největší sílu vykazují trendy pro průměry teplé poloviny roku a celoroční průměrné teploty. Zatímco na úrovni jednotlivých měsíců, kromě dubna, nebyly prokázány v chladnější polovině

roku vzestupné trendy téměř na žádné stanici, pro průměr celé této poloviny roku jsou trendy přeci jen potvrzeny i v 95% intervalu spolehlivosti. Zajímavá je shoda výsledků všech stanic i přes velký výškový rozdíl. Například stanice Elster-Bad Sohl je o 653 metrů níže než nejvýše položený Fichtelberg. Výše uvedené výsledky však hovoří jasně, v Krušných horách dochází ve vybraném období k výraznému zvýšení průměrné teploty vzduchu, zejména na jaře a v létě.

5.3.2 Srážkové úhrny

Na rozdíl od teplot vzduchu, kdy bylo prokázáno poměrně dost statisticky významných trendů, výsledky testů pro srážkové řady jsou daleko více nejednoznačné. Jak už mohou napovědět sloupce s hodnotami sklonu KTRL v tabulce 16, na všech stanicích dochází k mírnému nárůstu celkových úhrnů srážek v podzimních měsících, zatímco například v dubnu a květnu dle tohoto ukazatele klesají. Nicméně, statisticky významné jsou podle výsledků MK-testu z celého souboru sedmi srážkoměrných stanic pouze čtyři hodnoty. Jedná se o měsíc duben na stanicích Elster-Bad Sohl v západní části Krušných hor, kde výsledky trendové analýzy potvrdily klesající úhrny srážek. Další statisticky významnou hodnotu vykazuje nejvýše položená stanice Fichtelberg v lednu, kdy dle výsledků dochází k nárůstu srážkových úhrnů. Poslední potvrzený trend se vyskytl na stanici Carlsfeld na jaře. Celkově však může být řečeno, že se měsíční, sezónní a roční srážkové úhrny z dlouhodobé perspektivy výrazně nemění. Otázkou však zůstává, zdali se v průběhu sledovaného období nemění skupenství srážek v průběhu chladnější poloviny roku, zejména v souvislosti s probíhajícím oteplováním průměrných teplot vzduchu.

Tabulka 16: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady H_m , H_r a H_s

Hm, Hr, Hs (1967-2018)	Carlsfeld			Elster-Bad Sohl			Erlbach- Eubabrunn			Fichtelberg			Marienberg			Marienberg- Reitzenhain			Schöneck- Kottenheide		
	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p
listopad	0.37	1.14	0.37	0.19	0.88	0.49	0.36	1.62	0.20	0.40	1.33	0.29	0.21	0.84	0.51	0.25	1.00	0.43	0.35	1.53	0.23
prosinec	-0.31	-0.51	0.69	-0.04	-0.09	0.94	0.22	0.68	0.59	0.21	0.60	0.64	-0.20	-0.78	0.54	0.32	0.96	0.45	0.13	0.45	0.72
leden	0.12	0.29	0.82	0.31	1.30	0.30	0.36	1.37	0.28	0.92	2.54	0.05	-0.08	-0.29	0.82	0.40	1.30	0.30	0.62	1.78	0.16
únor	-0.24	-0.68	0.59	-0.25	-1.27	0.32	0.01	0.03	0.98	0.19	0.44	0.73	-0.08	-0.33	0.79	0.12	0.56	0.66	0.34	1.16	0.36
březen	-0.27	-0.72	0.57	-0.21	-1.08	0.39	-0.01	-0.02	0.99	0.14	0.55	0.66	-0.10	-0.58	0.65	0.13	0.69	0.59	0.14	0.50	0.69
duben	-0.77	-2.22	0.08	-0.39	-2.63	0.04	-0.50	-2.78	0.03	-0.50	-1.88	0.14	-0.34	-1.56	0.22	-0.34	-2.02	0.11	-0.34	-1.27	0.32
květen	-0.07	-0.22	0.86	-0.15	-0.69	0.59	-0.07	-0.27	0.83	-0.11	-0.23	0.86	-0.17	-0.58	0.65	-0.14	-0.56	0.66	-0.07	-0.25	0.84
červen	-0.22	-0.72	0.57	0.06	0.28	0.83	0.23	0.86	0.50	-0.25	-1.05	0.41	-0.46	-1.96	0.12	0.05	0.32	0.80	-0.15	-0.50	0.69
červenec	0.49	1.35	0.29	0.47	1.69	0.18	0.33	1.20	0.34	0.19	0.61	0.63	0.29	0.80	0.53	0.61	1.86	0.14	0.17	0.52	0.68
srpen	-0.74	-1.81	0.15	-0.31	-1.21	0.34	-0.62	-2.00	0.11	-0.39	-0.90	0.48	-0.11	-0.35	0.78	-0.28	-0.95	0.45	-0.79	-2.08	0.10
září	0.51	1.59	0.21	0.33	1.88	0.14	0.25	1.42	0.26	0.41	1.32	0.30	0.05	0.27	0.83	0.10	0.43	0.73	0.61	2.03	0.11
říjen	0.26	0.69	0.59	0.37	1.90	0.13	0.27	1.29	0.31	0.52	1.77	0.16	0.31	1.42	0.26	0.47	1.85	0.14	0.40	1.24	0.33
rok	-1.09	-0.88	0.49	-0.48	-0.48	0.70	0.36	0.26	0.84	2.08	1.52	0.23	-1.19	-1.06	0.40	1.43	1.40	0.27	0.39	0.38	0.76
III-V	-1.22	-2.54	0.05	-0.69	-1.98	0.12	-0.60	-1.44	0.26	-0.40	-0.92	0.47	-0.57	-1.82	0.15	-0.37	-1.07	0.40	-0.33	-0.68	0.59
VI-VIII	-0.29	-0.58	0.65	0.14	0.26	0.84	0.13	0.30	0.81	-0.29	-0.72	0.57	-0.02	-0.03	0.98	0.57	1.26	0.32	-0.70	-1.22	0.34
IX-XI	1.10	1.65	0.19	0.80	2.18	0.09	0.89	2.27	0.07	1.46	2.40	0.06	0.53	1.20	0.34	0.92	1.83	0.15	1.24	2.40	0.06
XII-II	-1.09	-1.22	0.34	-0.15	-0.46	0.72	0.35	0.60	0.64	1.22	1.78	0.16	-0.63	-1.55	0.22	0.51	1.02	0.42	0.56	0.97	0.44
XI-IV	-1.45	-1.75	0.17	-0.59	-0.96	0.45	-0.07	-0.16	0.90	1.55	1.86	0.14	-1.17	-1.95	0.12	0.61	0.99	0.43	0.85	1.16	0.36
V-X	0.52	0.44	0.73	0.54	0.84	0.51	0.43	0.62	0.62	0.75	0.92	0.47	0.16	0.10	0.94	1.12	1.16	0.36	0.24	0.28	0.83

zdroj vstupních dat: DWD

5.3.3 Sněhová pokrývka

Částečnou odpovědí na otázku z předchozí analýzy by mohla být analýza trendů datových řad sněhové pokrývky. Pro tyto účely byly využity údaje ze srážkoměrných stanic, které vyjadřují v měsíčním kroku sumy denních výšek sněhu. Výsledky analýzy homogenity těchto řad ukázaly poklesy středních hodnot v různých měsících od ledna do května pro 6 ze 7 stanic. Pro stejné stanice byl zároveň alespoň pro jeden měsíc taktéž potvrzen klesající trend na 5% hladině významnosti (tabulka 17). Nejvíce statisticky významných trendů bylo detekováno na dvou výše ležících stanicích Carlsfeld a Fichtelberg. Pro prvně uvedenou stanici byl zaznamenán klesající trend pro pět po sobě jdoucích měsíců od ledna do května, jako nejsilnější z nich byla vyhodnocena únorová hodnota. Na stanici Fichtelberg byl detekován sestupný trend výšky sněhové pokrývky v květnu, dále též od února do dubna. Další výrazně klesající trend v měsíční řadě byl testem detekován na stanici Elster-Bad Sohl v dubnu a také na stanicích Marienberg a Marienberg-Reitzenhain v květnu. Obecně je na níže položených stanicích v rámci měsíčních řad méně statisticky významných sestupných trendů než na těch, jež jsou položeny výše než 800 metrů nad mořem, což platí i pro sezónní a roční řady. Tento fakt může být do jisté míry způsoben i charakterem testovaných dat, přínosná by byla jistě i trendová analýza počtu dnů se sněhovou pokrývkou, bohužel tato data nebyla v měsíčním kroku k dispozici.

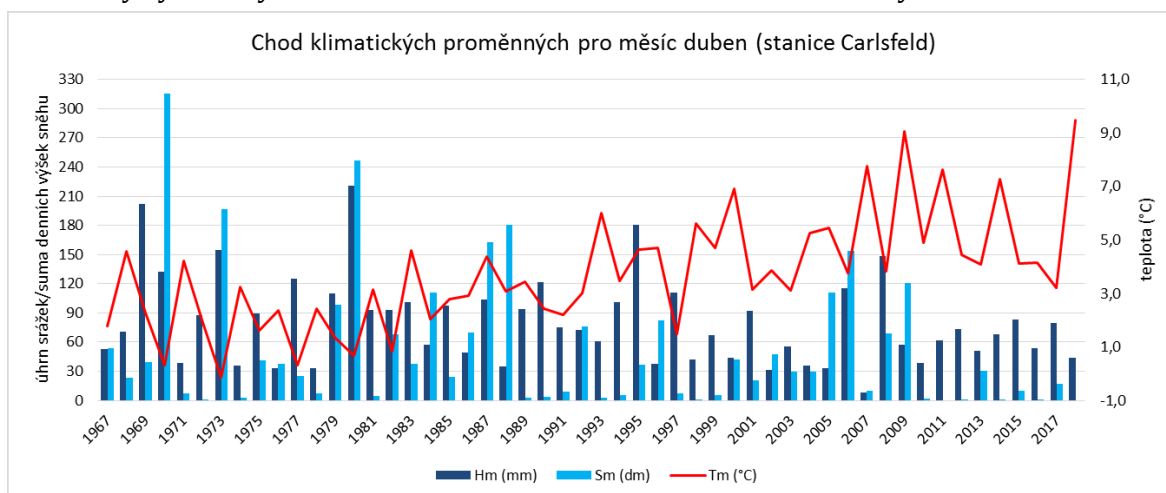
Tabulka 17: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady S_m , S_r a S_s

Sm, Sr, Ss (1967-2018)	Carlsfeld			Elster-Bad Sohl			Erlbach-Eubabrunn			Fichtelberg			Marienberg			Marienberg-Reitzenhain			Schöneck-Kottenheide		
	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p	KTRL	MK-S	p
listopad	-0.02	-2.19	0.08	-0.01	-1.70	0.18	-0.01	-0.71	0.57	-0.01	-0.59	0.64	-0.01	-1.47	0.24	-0.01	-1.22	0.34	-0.01	-1.74	0.17
prosinec	-0.07	-2.47	0.05	-0.02	-2.24	0.08	-0.02	-0.94	0.46	-0.06	-0.87	0.49	-0.01	-0.84	0.51	-0.01	-0.42	0.74	-0.04	-1.48	0.24
leden	-0.20	-2.93	0.02	-0.04	-1.75	0.17	0.01	0.33	0.79	-0.19	-1.61	0.20	-0.05	-2.36	0.06	-0.05	-1.04	0.41	-0.10	-1.94	0.13
únor	-0.25	-3.62	0.00	-0.02	-1.75	0.17	0.02	0.76	0.55	-0.25	-2.58	0.04	-0.03	-1.54	0.22	-0.06	-1.30	0.30	-0.07	-1.51	0.23
březen	-0.26	-3.12	0.01	-0.01	-2.00	0.11	0.01	0.54	0.67	-0.33	-2.76	0.03	-0.01	-1.05	0.41	-0.05	-1.46	0.25	-0.03	-0.81	0.52
duben	-0.04	-2.58	0.04	-0.01	-4.37	0.00	-0.03	-1.55	0.20	-0.33	-3.24	0.01	-0.01	-1.56	0.22	-0.01	-3.17	0.01	-0.01	-1.27	0.32
květen	-0.02	-1.91	0.02	-0.01	-0.72	0.09	-0.02	-0.69	0.10	-0.02	-5.79	0.00	-0.01	-2.53	0.01	-0.01	-2.30	0.01	-0.02	-2.08	0.02
červen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.01	-0.26	0.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—
červenec	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
srpen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
září	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.01	-1.14	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
říjen	-0.02	-0.44	0.69	-0.01	-0.53	0.56	0.01	0.85	0.33	-0.03	0.52	0.68	-0.01	-0.61	0.55	-0.01	0.52	0.65	-0.01	-0.89	0.39
rok	-1.07	-4.08	0.00	-0.11	-2.36	0.06	0.02	0.28	0.83	-1.45	-3.40	0.01	-0.02	-2.55	0.04	-0.32	-2.65	0.04	-0.30	-1.93	0.13
III-V	-0.32	-2.97	0.02	-0.01	-2.31	0.07	0.01	0.22	0.86	-0.77	-3.28	0.01	-0.02	-1.38	0.28	-0.06	-2.10	0.10	-0.04	-1.07	0.40
VI-VIII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.01	-0.26	0.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IX-XI	-0.02	-2.16	0.09	-0.01	-1.29	0.31	0.01	-0.29	0.82	-0.02	-0.29	0.82	-0.01	-1.19	0.35	-0.01	-0.83	0.51	-0.01	-1.81	0.15
XII-II	-0.57	-3.64	0.00	-0.08	-1.92	0.13	0.04	0.70	0.58	-0.49	-2.12	0.09	-0.01	-2.77	0.03	-0.16	-1.80	0.16	-0.20	-1.68	0.18
XI-IV	-1.07	-4.04	0.00	-0.11	-2.38	0.06	0.01	0.28	0.83	-1.33	-3.34	0.01	-0.02	-2.58	0.04	-0.32	-2.60	0.04	-0.29	-1.88	0.14
V-X	-0.01	-1.56	0.19	-0.01	-0.79	0.40	-0.01	0.50	0.58	-0.04	-5.30	0.00	-0.01	-2.89	0.01	-0.01	-2.01	0.10	-0.01	-2.34	0.04

zdroj vstupních dat: DWD

Pro datové řady výšek sněhové pokrývky ze všech stanic nebyl detekován žádný statisticky významný vzestupný trend ve sledovaném období. Za pozornost nicméně stojí stanice Erlbach-Eubabrunn, na které byl zaznamenán sice velmi mírný, ale i přesto vzestupný sklon KTRL v měsíčních, sezónních i ročních řadách měsíčních sum denní výšky sněhové pokrývky.

Lze se pouze domnívat, čím jsou tyto výsledky způsobeny, jelikož nezapadají ani do kontextu dvou nejbližších položených stanic, jimiž jsou Elster-Bad Sohl a Schöneck-Kottenheide. Výsledky taktéž nekorespondují ani s trendem stále se zvyšujících průměrných teplot. Možnou příčinou by mohla být poměrně řídká data vstupující do výpočtů, např. v říjnu nebo květnu. Naopak stanice Carlsfeld vykazuje signifikantní trend poklesu výšek sněhu kupříkladu v dubnu, což odpovídá zvyšujícím se průměrným teplotám v tomto měsíci. Obrázek 46 zachycuje průběh teplot, srážek a výšek sněhu právě v tomto měsíci. Se stále stoupajícími teplotami klesají i měsíční sumy denních výšek sněhové pokrývky, což bylo potvrzeno i MK-testem na 5% hladině významnosti. Naopak úhrny celkových srážek jsou v dubnu relativně vyrovnané, statisticky významný trend v datové řadě tohoto měsíce detekován nebyl.



Obrázek 46: Chod teplot, srážek a výšek sněhu pro měsíc duben na stanici Carlsfeld (zdroj dat: DWD)

5.3.4 Průměrné měsíční, sezónní a roční průtoky

Po dokončení testování datových řad klimatických parametrů bylo přikročeno k analýzám řad průtokových. Nejprve bylo provedeno testování průměrných průtokových hodnot pro měsíce, sezóny a roky. Analýza trendů měsíčních průměrných průtoků (tabulka 18) odhalila do velké míry podobné výsledky jako analýza průměrných měsíčních teplot (tabulka 15 na straně 72). Asi nejpatrnější shoda je v jarních a letních měsících, kdy byly detekovány statisticky významné klesající trendy na všech profilech. Největší sílu mají trendy průměrných průtoků od dubna do června, stejně jako tomu bylo u teplot.

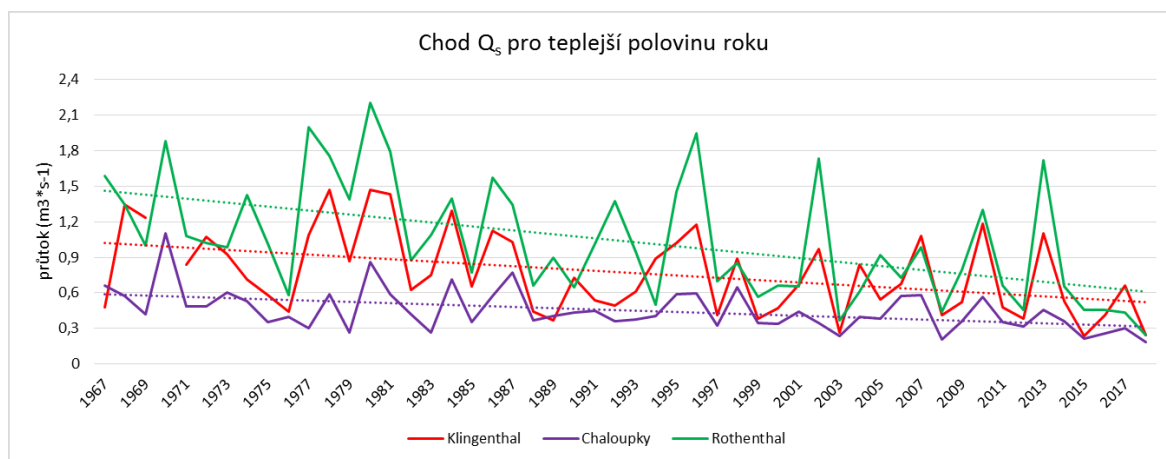
Naopak v rozmezí října až března nebyl na ani jednom profilu zaznamenán žádný trend na 5% hladině významnosti. Pokud je pozornost zaměřena na sklon KTRL, je možné zaznamenat několik rozdílů mezi povodími. Zatímco na závěrovém profilu Rothenthal na Načetínském potoce dochází ve všech měsících k poklesu průměrných průtoků, na horní Svatavě jsou zaznamenány mírné nárůsty v lednu a únoru. Pro nejvýše položený limnigraf Chaloupky na horní Rolavě je stejný jev pozorovaný dokonce v pěti po sobě jdoucích měsících, konkrétně od ledna až do března.

Tabulka 18: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady Q_m , Q_r a Q_s

Qm, Qr, Qs (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetiňský p.)		
	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota
listopad	-0.002	-0.45	0.715	0.001	0.36	0.776	-0.003	-0.26	0.621
prosinec	-0.005	-0.89	0.470	0.001	0.71	0.575	-0.009	-1.02	0.101
leden	0.002	0.32	0.795	0.002	0.90	0.478	-0.003	-0.20	0.754
únor	0.004	0.55	0.655	0.003	1.87	0.140	-0.001	0.07	0.903
březen	-0.001	-0.07	0.955	0.002	0.84	0.507	-0.006	-0.31	0.682
duben	-0.031	-4.09	0.001	-0.016	-5.38	0.000	-0.036	-2.16	0.005
květen	-0.018	-5.37	0.000	-0.011	-6.34	0.000	-0.026	-3.17	0.000
červen	-0.007	-2.91	0.018	-0.006	-4.40	0.001	-0.019	-2.88	0.000
červenec	-0.008	-3.25	0.008	-0.003	-2.77	0.029	-0.011	-2.08	0.005
srpen	-0.008	-3.27	0.008	-0.003	-3.08	0.015	-0.010	-2.00	0.003
září	-0.006	-2.52	0.041	-0.001	-1.08	0.394	-0.010	-1.72	0.019
říjen	-0.003	-1.20	0.330	-0.001	-0.54	0.670	-0.008	-1.30	0.062
rok	-0.008	-3.81	0.002	-0.003	-3.72	0.003	-0.015	-2.40	0.001
III-V	-0.019	-3.37	0.006	-0.009	-4.90	0.000	-0.026	-2.18	0.007
VI-VIII	-0.009	-3.13	0.011	-0.013	-3.79	0.003	-0.015	-2.32	0.001
IX-XI	-0.006	-1.91	0.121	-0.001	-0.30	0.813	-0.010	-1.62	0.015
XII-II	0.002	0.29	0.814	0.002	1.02	0.421	-0.006	-0.58	0.354
XI-IV	-0.007	-1.85	0.133	-0.002	-1.56	0.218	-0.011	-1.58	0.030
V-X	-0.010	-3.81	0.002	-0.005	-4.50	0.000	-0.016	-2.76	0.000

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

Sezónní průměry vykazují podobné tendence pro všechna povodí na jaře a v létě, kdy dochází k signifikantnímu poklesu. Pro podzim nebyl detekován žádný trend, stejně tak pro zimu, kde se navíc projevuje výše v hodnotách KTRL výše zmíněný mírný nárůst průtoků na horní Rolavě a horní Svatavě. Naopak pro teplejší polovinu roku byl zaznamenán signifikantní trend poklesu průměrných průtoků na všech profilech, to samé platí pro roční průměry. Celkově tedy lze říci, že pro trendy měsíčních a sezónních průtokových průměrů panuje velmi dobrá shoda s řadami teplotních průměrů. Dále se také zřejmě na klesajících průměrných průtocích na jaře projevuje úbytek sněhu v zimních, ale hlavně jarních měsících. Obrázek 47 znázorňuje průběh sezónních průměrných průtoků Q_s pro teplejší polovinu roku na vybraných profilech. Všechny zkoumané toky vykazují pokles, jak již naznačily výsledky KTRL a MK-testu.



Obrázek 47: Chod Q_s pro teplejší polovinu roku na vybraných profilech (zdroje dat: ČHMÚ, DWD)

5.3.5 Měsíční, sezónní a roční minimální průtoky

Po testování průměrných hodnot průtoků byly analyzovány časové řady měsíčních, sezónních a ročních minimálních průtoků Q_{min} (tabulka 19). Již na první pohled jsou patrně poměrně výrazné rozdíly ve výsledcích testů trendů oproti předchozí tabulce 18. U profilů Klingenthal a Rothenthal se pro měsíční Q_{min} prodloužilo období klesajících trendů až do září, respektive do října, zatímco na stanici Chaloupky byl zjištěn klesající trend na 5% hladině významnosti pouze od dubna do června s největší silou v květnu. Nicméně, p-hodnoty pro červenec a srpen se jen velmi těsně nevešly do 95% intervalu spolehlivosti. Mezi listopadem a březnem nebyl detekován žádný statisticky významný trend, KTRL však poukazuje na pokles v těchto měsících na Svatavě. Na Rolavě však dle KTRL dochází k mírnému nárůstu hodnot měsíčních minim mezi prosincem a březnem, pro povodí Načetínského potoka pak také v lednu a březnu.

Tabulka 19: Výsledky KTRL a MK-testu pro měsíční, roční a sezónní Q_{min}

Qmin (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetínský p.)		
	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota
listopad	-0.003	-1.64	0.183	-0.001	-0.53	0.676	-0.004	-1.68	0.185
prosinec	-0.002	-1.32	0.283	0.001	1.25	0.324	-0.001	-0.78	0.538
leden	-0.001	-0.28	0.820	0.001	0.15	0.906	0.002	0.53	0.676
únor	-0.002	-0.90	0.464	0.001	0.96	0.449	-0.002	-0.75	0.554
březen	-0.001	-0.37	0.763	0.001	0.38	0.764	0.001	0.40	0.752
duben	-0.014	-3.67	0.003	-0.005	-3.61	0.004	-0.021	-5.08	0.000
květen	-0.006	-5.05	0.000	-0.005	-4.90	0.000	-0.010	-5.09	0.000
červen	-0.005	-3.99	0.001	-0.002	-3.21	0.011	-0.008	-5.34	0.000
červenec	-0.005	-4.36	0.000	-0.001	-2.46	0.052	-0.006	-4.19	0.001
srpen	-0.004	-4.34	0.000	-0.002	-2.46	0.052	-0.007	-4.93	0.000
září	-0.006	-4.19	0.001	-0.001	-1.24	0.328	-0.007	-4.51	0.000
říjen	-0.003	-2.36	0.055	-0.001	-1.07	0.398	-0.007	-4.00	0.002
rok	-0.004	-5.30	0.000	0.001	1.07	0.398	-0.002	-3.08	0.015
III-V	-0.004	-4.32	0.000	-0.002	-3.13	0.013	-0.006	-4.20	0.001
VI-VIII	-0.005	-5.66	0.000	-0.001	-1.76	0.165	-0.005	-5.31	0.000
IX-XI	-0.003	-3.87	0.002	-0.001	-0.18	0.887	-0.003	-3.39	0.007
XII-II	-0.002	-2.32	0.059	0.001	1.55	0.221	0.001	0.40	0.752
XI-IV	-0.002	-2.20	0.074	0.001	1.84	0.146	0.001	0.75	0.554
V-X	-0.004	-5.64	0.000	-0.001	-0.21	0.868	-0.005	-5.23	0.000

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

Pro sezónní minima byl na stanicích Klingenthal a Rothenthal detekován silný klesající trend na jaře, v létě, na podzim a v teplejší polovině roku, naopak na Chaloupkách byl detekován pouze na jaře. U celoročních minim se pokles týká opět jen Svatavy a Načetínského potoka.

5.3.6 Měsíční, sezónní a roční nedostatkové objemy

Dalšími testovanými časovými řadami byly nedostatkové objemy, přičemž byly zvoleny dva různé přístupy. Prvním z nich byla analýza kumulativních nedostatkových objemů, které byly vypočteny na základě konstantní hodnoty Q_{355} pro celé sledované období. Aby se však dalo říci, jak se každý měsíc „vysušuje“ vzhledem ke svému normálu, bylo zapotřebí určit hodnoty Q_{355}

pro každý měsíc zvlášť. Nejprve jsou uvedeny výsledky dle přístupu s využitím konstantní hodnoty Q_{355} pro celé období (tabulka 20). Opět si lze všimnout podobných rysů Svatavy a Načetínského potoka, kde dle konstantní Q_{355} dochází k nárůstu deficitních objemů zejména v létě a na podzim. Nejsilnější jsou tyto trendy v srpnu a září. Na Rolavě stoupají nedostatkové objemy pouze v říjnu, naopak v prosinci je jejich trend klesající, hlavně díky zimám s nízkými průtoky na počátku sledovaného období. Je třeba uvést, že nízké průtoky v zimních měsících 60. a 70. let nebyly způsobeny nedostatkem srážek, ale hlavně nižšími teplotami v porovnání s druhou polovinou sledovaného období. Výše uvedené výsledky se projevují také v sezónních řadách, největší nárůst byl detekován v létě a na podzim na níže položených profilech Klingenthal a Rothenthal, zatímco Chaloupky nevykazují žádný statisticky významný trend. Při rozdělení roku na teplejší a chladnější polovinu byl zaznamenán významný nárůst opět na Svatavě a Načetínském potoce v teplejší části roku. Naopak v chladnější polovině byl detekován klesající trend nedostatkových objemů na horní Rolavě. Při analýze ročních sum deficitních objemů byl zjištěn výrazný nárůst v povodích horní Svatavy a Načetínského potoka.

Tabulka 20: Výsledky MK-testu pro řady nedostatkových objemů dle Q_{355}

nedostatkové objemy dle Q_{355} (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)		Chaloupky (Rolava)		Rothenthal (Načetínský p.)	
	MK-Statistika	p-hodnota	MK-Statistika	p-hodnota	MK-Statistika	p-hodnota
listopad	0.68	0.234	-0.44	0.495	-0.24	0.681
prosinec	—	—	-1.73	0.021	0.23	0.444
leden	—	—	-0.05	0.938	-0.26	0.610
únor	—	—	-0.10	0.864	-0.30	0.556
březen	0.06	0.839	0.11	0.794	0.07	0.816
duben	—	—	—	—	—	—
květen	—	—	—	—	—	—
červen	1.27	0.026	0.25	0.405	0.11	0.714
červenec	1.88	0.015	0.21	0.484	1.49	0.021
srpen	2.60	0.001	-0.04	0.957	3.29	0.000
září	3.46	0.000	-0.33	0.692	3.10	0.001
říjen	1.71	0.013	1.29	0.046	2.28	0.011
rok	4.55	0.000	-1.40	0.206	3.49	0.002
III-V	0.06	0.839	0.11	0.794	0.07	0.816
VI-VIII	3.27	0.001	0.16	0.840	3.45	0.000
IX-XI	3.63	0.000	-0.30	0.755	2.61	0.012
XII-II	—	—	-1.65	0.067	-0.37	0.567
XI-IV	0.76	0.230	-1.96	0.041	-0.78	0.325
V-X	4.19	0.000	-0.27	0.779	4.43	0.000

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

Výše uvedený přístup k trendovým testům však může setřít rozdíly v měsících, které obvykle nezaznamenávají výskyt průtoku Q_{355} vypočteného pro celé sledované období, jelikož jsou ze své podstaty nadprůměrně vodné. Z tohoto důvodu byly pro každý měsíc a sezónu definovány samostatné hodnoty průtoků Q_{355m} a Q_{355s} a pro ně byly následně vypočteny nedostatkové objemy. Výsledky této analýzy znázorňuje tabulka 21 na následující straně.

Při srovnání s tabulkou 20 na předchozí straně jsou rozdíly patrné na první pohled. Nejsilnější statisticky významné trendy pro stanice Klingenthal a Rothenthal se na úrovni měsíců nyní nevyskytují v srpnu a září, ale zejména v dubnu, květnu a červnu. Pro duben a květen přitom při použití konstantní hladiny průtoku Q_{355} pro celé sledované období nebyly nedostatkové objemy zaznamenány vůbec. Nyní je však možné pozorovat, že i v těchto měsících v průběhu sledovaného období dochází k nárůstu deficitních objemů, což ostatně naznačovaly i výsledky MK-testu pro průměrné měsíční průtoky a měsíční minima (tabulky 18 a 19).

Tabulka 21: Výsledky MK-testu pro řady nedostatkových objemů dle Q_{355m} a Q_{355s}

nedostatkové objemy dle Q_{355m} a Q_{355s} (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)		Chaloupky (Rolava)		Rothenthal (Načetínský p.)	
	MK-Statistika	p-hodnota	MK-Statistika	p-hodnota	MK-Statistika	p-hodnota
listopad	0.70	0.221	-0.43	0.505	0.14	0.784
prosinec	1.20	0.036	-1.87	0.018	0.49	0.244
leden	0.07	0.889	0.02	0.969	-0.26	0.610
únor	0.06	0.839	-0.10	0.864	-0.30	0.556
březen	-0.37	0.459	0.11	0.794	-0.16	0.754
duben	0.78	0.218	1.49	0.021	2.80	0.001
květen	2.34	0.004	1.54	0.052	2.62	0.002
červen	1.63	0.026	0.01	0.989	1.89	0.007
červenec	1.27	0.064	-0.51	0.466	1.63	0.020
srpen	1.11	0.026	-0.29	0.653	1.65	0.011
září	1.26	0.046	-0.08	0.875	1.39	0.047
říjen	1.30	0.040	1.29	0.046	1.38	0.065
rok	4.55	0.000	-1.40	0.206	3.49	0.002
III-V	1.86	0.048	2.37	0.014	3.60	0.000
VI-VIII	1.80	0.027	-0.56	0.548	3.09	0.000
IX-XI	2.14	0.009	0.50	0.579	1.75	0.044
XII-II	0.99	0.149	-1.79	0.055	-0.19	0.786
XI-IV	1.71	0.084	-0.73	0.496	1.76	0.095
V-X	2.73	0.006	0.84	0.441	3.63	0.000

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

Při použití Q_{355m} a Q_{355s} byl také detekován nárůst nedostatkových objemů v prosinci na profilu Klingenthal, ačkoli ve stejném měsíci byl na stanici Chaloupky zaznamenán přesně opačný trend. Profil Chaloupky obecně nevykazuje mnoho výrazných rozdílů při použití dvou různých přístupů výpočtu kritické hladiny pro určení nedostatkových objemů ani na sezónní úrovni. Pouze na jaře byl zaznamenán mírně rostoucí trend, naopak v chladnější polovině roku už není významný klesající trend při použití sezónní hodnoty Q_{355s} . U zbylých dvou profilů došlo také k výskytu rostoucího trendu na jaře a dále pak ke zmírnění trendu v teplé polovině roku oproti předešlé analýze s konstantní hodnotou Q_{355} .

5.3.7 Trendy v ročních řadách ukazatelů sucha

V tabulce 22 na další straně jsou uvedeny výsledky trendových analýz pro roční hodnoty jednotlivých ukazatelů sucha. Z výsledků je k vidění zásadní rozdíl mezi vodoměrným profilem

Chaloupky na horní Rolavě a níže položenými stanicemi Klingenthal a Rothenthal. Povodí horní Rolavy vykazuje v drtivé většině výsledků analýz velmi rozdílné výsledky. Možné důvody tohoto faktu tkví v kombinaci více faktorů. Vyšší průměrná nadmořská výška je jedním z nich, povodí Svatavy a Načetínského potoka mají pouze 10, respektive 22 % procent své plochy výše než 800 m n. m., zatímco povodí horní Rolavy je celé nad touto izolinií. S tím jsou spojené nižší průměrné teploty na Rolavě či delší doba akumulace sněhu. Další faktory jako např. výrazně menší rozloha, minimální antropogenní ovlivnění, či vyšší podíl trvale zamokřených ploch také hrají významnou roli při rozdílném formování odtoku v povodí horní Rolavy a zbylých dvou.

Tabulka 22: Výsledky KTRL a MK-testu pro jednotlivé ukazatele sucha

ukazatele sucha (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetínský p.)		
	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota	KTRL	MK-Stat.	p-hodnota
LFI	-0,003	-4,85	0,001	0,001	1,07	0,398	-0,002	-3,08	0,015
BFI	-0,002	-2,87	0,024	0,002	2,93	0,021	0,001	0,31	0,807
jednodenní minimum	-0,004	-5,30	0,000	0,001	1,07	0,398	-0,002	-3,08	0,015
sedmidenní minimum	-0,003	-4,61	0,000	0,001	0,75	0,554	-0,003	-3,73	0,003
doba trvání (počet dní Q355)	—	5,37	0,000	—	-1,27	0,251	—	3,72	0,001
nedostatkové objemy	—	4,76	0,000	—	-1,39	0,209	—	3,49	0,002
intenzita	—	3,99	0,000	—	-1,48	0,181	—	2,97	0,009

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG

5.3.8 Testování delších průtokových řad

Jedna z hypotéz této práce zní, že délka datové řady má vliv na výsledky trendových analýz. Různě dlouhé řady byly testovány za účelem zjištění, zdali a jak délka těchto řad ovlivní výstupy testů trendů. Jako první byly analyzovány průměrné Q pro Svatavu a Načetínský potok. Řady těchto vodních toků přesahují primárně sledované období této práce, které činí 52 let (1967-2018). Průtoková data pro limnigraf Klingenthal na horní Svatavě jsou k dispozici již od hydrologického roku 1961, vodoměrná stanice Rothenthal na Načetínském potoce měří dokonce již od roku 1929. Dle pramenů uvedených v rešerši této práce byly na území Česka zaznamenány velmi suché epizody ve 30., 40. i 50 letech 20. století, pročež se již před zahájením výpočtů daly očekávat určité rozdíly v porovnání se zkrácenou řadou počínající hydrologickým rokem 1967. Z důvodu názornosti jsou v tabulkách opět uvedeny i výsledky trendových testů kratších řad, jež byly již uvedeny a interpretovány dříve v práci.

Na stanici Klingenthal došlo při prodloužení řady o 6 let k několika změnám, obecně jsou však výsledky relativně podobné v porovnání s testy kratší řady. Například srpen a září nevykazují statisticky významný trend poklesu hodnot průměrných průtoků, zároveň klesající trendy teplejší poloviny roku a ročních průměrů nejsou tak silné. Podle sklonu KTRL však dochází při prodloužení řady k nárůstu průměrných průtoků listopadu, prosinci a březnu. Daleko výraznější rozdíly ukazují výsledky MK-testu pro stanici Rothenthal, kde je při použití kompletní řady detekován rostoucí trend v zimě a březnu, naopak v létě se nevyskytuje žádný. Tato fakta mají zásadní vliv také na výsledky sezónních a ročních analýz, jelikož jarní a letní

klesající trendy nejsou při testování delší řady vůbec přítomny. Na druhou stranu byl nově detekován signifikantní trend nárůstu hodnot průtoků v zimě. V teplejší ani chladnější polovině roku nebyl detekován statisticky významný trend, nicméně sklon KTRL napovídá, že od května do října vody spíše mírně ubývá, zatímco od listopadu do dubna vody mírně přibývá. Pro roční průměry 90 let dlouhé řady Načetínského potoka taktéž nebyl na 5% hladině významnosti potvrzen žádný trend (tabulka 23).

Tabulka 23: Výsledky MK-testu různě dlouhých řad Q_m , Q_r a Q_s

Qm, Qr, Qs	Klingenthal (Svatava)						Rothenthal (Načetínský p.)					
	1967-2018			1961-2018			1967-2018			1929-2018		
	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.
listopad	-0.002	-0.45	0.715	0.001	0.68	0.640	-0.003	-0.26	0.621	0.001	0.33	0.908
prosinec	-0.005	-0.89	0.470	0.001	0.18	0.901	-0.009	-1.02	0.101	0.005	5.97	0.037
leden	0.002	0.32	0.795	0.009	2.08	0.152	-0.003	-0.20	0.754	0.007	5.85	0.041
únor	0.004	0.55	0.655	0.007	1.46	0.315	-0.001	0.07	0.903	0.006	5.39	0.060
březen	-0.001	-0.07	0.955	0.002	0.32	0.826	-0.006	-0.31	0.682	0.007	5.67	0.048
duben	-0.031	-4.09	0.001	-0.032	-5.66	0.000	-0.036	-2.16	0.005	-0.011	-7.35	0.010
květen	-0.018	-5.37	0.000	-0.018	-7.20	0.000	-0.026	-3.17	0.000	-0.010	-10.23	0.000
červen	-0.007	-2.91	0.018	-0.008	-4.32	0.003	-0.019	-2.88	0.000	-0.005	-6.21	0.030
červenec	-0.008	-3.25	0.008	-0.006	-3.66	0.012	-0.011	-2.08	0.005	-0.004	-5.19	0.070
srpen	-0.008	-3.27	0.008	-0.004	-2.32	0.110	-0.010	-2.00	0.003	-0.001	-3.29	0.252
září	-0.006	-2.52	0.041	-0.003	-1.73	0.234	-0.010	-1.72	0.019	-0.001	-0.65	0.821
říjen	-0.003	-1.20	0.330	0.001	0.15	0.918	-0.008	-1.30	0.062	-0.002	-2.93	0.307
rok	-0.008	-3.81	0.002	-0.006	-3.60	0.013	-0.015	-2.40	0.001	-0.001	-0.21	0.942
III-V	-0.019	-3.37	0.006	-0.017	-4.56	0.002	-0.026	-2.18	0.007	-0.004	-3.79	0.187
VI-VIII	-0.009	-3.13	0.011	-0.007	-3.66	0.012	-0.015	-2.32	0.001	-0.003	-4.13	0.150
IX-XI	-0.006	-1.91	0.121	-0.001	-0.02	0.989	-0.010	-1.62	0.015	-0.001	-0.03	0.992
XII-II	0.002	0.29	0.814	0.006	1.62	0.265	-0.006	-0.58	0.354	0.007	7.53	0.009
XI-IV	-0.007	-1.85	0.133	-0.004	-1.26	0.386	-0.011	-1.58	0.030	0.003	4.09	0.154
V-X	-0.010	-3.81	0.002	-0.008	-4.16	0.004	-0.016	-2.76	0.000	-0.003	-5.53	0.054

zdroj vstupních dat: LFUL

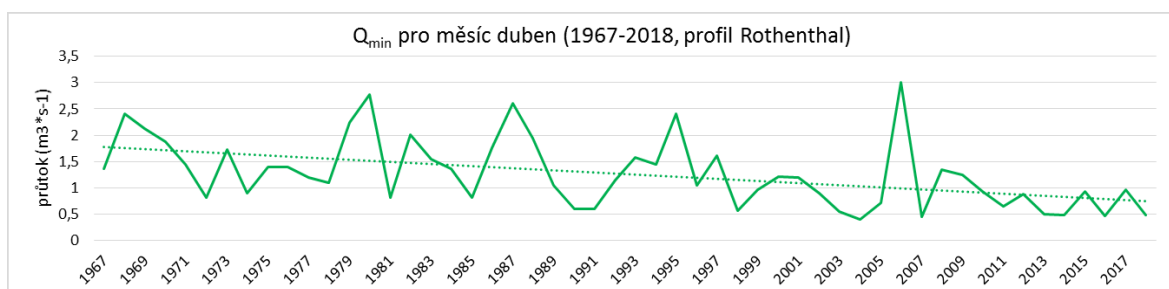
Dalšími testovanými řadami s různou délkou byly časové řady měsíčních, sezónních a ročních minimálních průtoků Q_{min} . Opět jsou zaznamenány poměrně velké podobnosti kratší i delší řady pro profil Klingenthal na horní Svatavě, kde byly všechny signifikantní trendy potvrzeny ve stejných měsících, jen s rozdílnou silou. V delší řadě se nejsilnější klesající trendy vyskytují na rozdíl od kratší řady v rozmezí dubna a června. Dle KTRL se při použití delší řady mírně zvyšují hodnoty minimálních průtoků v rozmezí ledna a března. Pro sezónní a roční průměry bylo detekováno zesílení všech trendů potvrzených na 5% hladině významnosti, jež byly zjištěny i pro kratší řady. Pro povodí Načetínského potoka a jeho závěrový profil Rothenthal jsou však patrné daleko větší rozdíly při použití nezkrácených datových řad. Za pozornost stojí absence dříve přítomných statisticky významných trendů od června do října, ale také zesílení klesajícího trendu pro květen. V zimních měsících se změnil pouze sklon KTRL, pro sezónní a roční minima byl zjištěn jediný trend, klesající pro léto. Kompletní výsledky trendové analýzy jsou uvedeny v tabulce 24 na následující straně.

Tabulka 24: Výsledky KTRL a MK-testu různě dlouhých řad Q_{min}

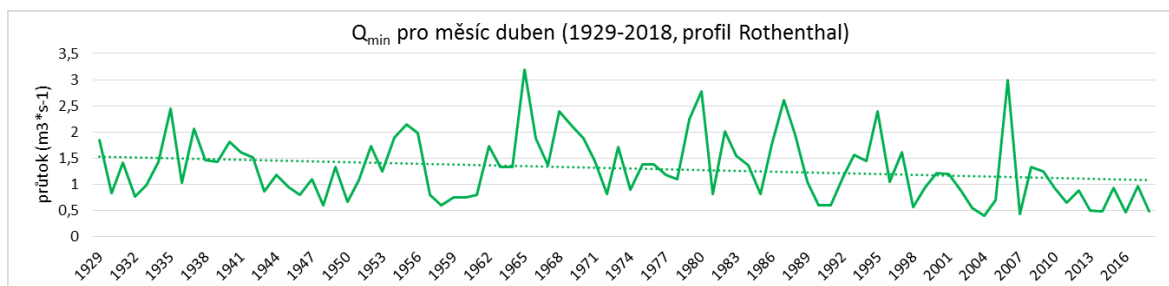
Qmin	Klingenthal (Svatava)						Rothenthal (Načetínský p.)					
	1967-2018			1961-2018			1967-2018			1929-2018		
	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.	KTRL	MK-S	p-hod.
listopad	-0.003	-1.64	0.183	-0.001	-1.15	0.428	-0.004	-1.68	0.185	-0.001	-2.48	0.387
prosinec	-0.002	-1.32	0.283	-0.001	-0.39	0.788	-0.001	-0.78	0.538	0.001	0.58	0.840
leden	-0.001	-0.28	0.820	0.001	0.78	0.591	0.002	0.53	0.676	0.003	5.53	0.054
únor	-0.002	-0.90	0.464	0.001	0.47	0.746	-0.002	-0.75	0.554	0.002	3.64	0.204
březen	-0.001	-0.37	0.763	0.001	0.63	0.664	0.001	0.40	0.752	0.002	3.40	0.236
duben	-0.014	-3.67	0.003	-0.016	-5.73	0.000	-0.021	-5.08	0.000	-0.006	-7.35	0.010
květen	-0.006	-5.05	0.000	-0.008	-7.12	0.000	-0.010	-5.09	0.000	-0.005	-10.92	0.000
červen	-0.005	-3.99	0.001	-0.004	-4.87	0.001	-0.008	-5.34	0.000	-0.002	-5.12	0.074
červenec	-0.005	-4.36	0.000	-0.004	-4.67	0.001	-0.006	-4.19	0.001	-0.001	-4.33	0.131
srpen	-0.004	-4.34	0.000	-0.004	-4.48	0.002	-0.007	-4.93	0.000	-0.001	-4.88	0.089
září	-0.006	-4.19	0.001	-0.003	-3.69	0.011	-0.007	-4.51	0.000	-0.001	-3.49	0.224
říjen	-0.003	-2.36	0.055	-0.001	-1.84	0.205	-0.007	-4.00	0.002	-0.001	-3.03	0.291
rok	-0.004	-5.30	0.000	-0.003	-6.10	0.000	-0.002	-3.08	0.015	-0.001	-4.52	0.115
III-V	-0.004	-4.32	0.000	-0.004	-4.44	0.002	-0.006	-4.20	0.001	-0.001	-4.47	0.119
VI-VIII	-0.005	-5.66	0.000	-0.004	-6.48	0.000	-0.005	-5.31	0.000	-0.001	-5.97	0.037
IX-XI	-0.003	-3.87	0.002	-0.002	-3.99	0.006	-0.003	-3.39	0.007	-0.001	-4.31	0.133
XII-II	-0.002	-2.32	0.059	-0.001	-1.01	0.486	0.001	0.40	0.752	0.001	2.26	0.431
XI-IV	-0.002	-2.20	0.074	-0.001	-1.94	0.181	0.001	0.75	0.554	0.001	1.43	0.618
V-X	-0.004	-5.64	0.000	-0.003	-6.07	0.000	-0.005	-5.23	0.000	-0.001	-5.14	0.073

zdroj vstupních dat: LFULG

Pro vizualizaci rozdílů při použití různě dlouhých řad byly vytvořeny diagramy minimálních průtoků pro měsíc duben. Horní graf (obrázek 48) znázorňuje průběh Q_{min} pro zkrácenou řadu, naopak v dalším grafu (obrázek 49) jsou vyneseny hodnoty pro kompletní řadu od roku 1929. Rozdíly již naznačily výsledky KTRL a MK-testu. Zatímco při použití kratší řady je síla trendu a sklon KTRL větší, použitím kompletní řady trend mírně zeslábnul. V posledních letech, počínaje rokem 2007, je k vidění poměrně dlouhé období bez výraznější kladné amplitudy. Podobná perioda byla též zaznamenána v období 1943-51, ale s relativně vyššími hodnotami.



Obrázek 48: Chod dubnových Q_{min} na stanici Rothenthal v letech 1967-2018 (zdroj vstupních dat: LFULG)



Obrázek 49: Chod dubnových Q_{min} na stanici Rothenthal v letech 1929-2018 (zdroj vstupních dat: LFULG)

Poslední testovanou charakteristikou byly řady nedostatkových objemů na základě měsíčních a sezónních hodnot Q_{355m} a Q_{355s} . Podobně jako u předchozích časových řad i zde stojí za zmínku některé výrazné rozdíly při analyzování různě dlouhých řad, především pro profil Rothenthal. Při testování delší řady zde nebyly prokázány narůstající tendence deficitních objemů v letních a podzimních měsících. V sezónních řadách byly zaznamenány rostoucí trendy pouze na jaře a v teplejší polovině roku, nicméně oproti kratší řadě jsou tyto trendy slabší. Naproti tomu byla na závěrovém profilu Načetínského potoka zvýrazněna síla trendu pro měsíce duben a květen (tabulka 25). Výsledky trendové analýzy pro delší řady stanice Klingenthal na horní Svatavě nevykazují tolik rozdílu. Rostoucí trend měsíční řady pro prosinec není již pro delší časovou řadu statisticky významný, stejně tak pro sezónní řady jara a léta. Jako mírně slabší byl zjištěn i trend ročních nedostatkových objemů, naopak lehce zesílily rostoucí trendy téměř všech měsíčních řad od května do října, ale i sezónních řad podzimu a teplejší poloviny roku.

Tabulka 25: Výsledky MK-testu různě dlouhých řad nedostatkových objemů

nedostatkové objemy dle Q_{355m} a Q_{355s}	Klingenthal (Svatava)				Rothenthal (Načetínský p.)			
	1967-2018		1961-2018		1967-2018		1929-2018	
	MK-Stat.	p-hodn.	MK-Stat.	p-hodn.	MK-Stat.	p-hodn.	MK-Stat.	p-hodn.
listopad	0.70	0.221	0.94	0.142	0.14	0.784	-0.48	0.718
prosinec	1.20	0.036	0.90	0.205	0.49	0.244	-1.27	0.339
leden	0.07	0.889	-0.28	0.662	-0.26	0.610	-1.22	0.388
únor	0.06	0.839	-0.37	0.422	-0.30	0.556	-1.81	0.224
březen	-0.37	0.459	-1.16	0.102	-0.16	0.754	-1.90	0.202
duben	0.78	0.218	1.08	0.128	2.80	0.001	6.60	0.000
květen	2.34	0.004	2.88	0.002	2.62	0.002	5.34	0.001
červen	1.63	0.026	2.05	0.013	1.89	0.007	2.07	0.185
červenec	1.27	0.064	1.17	0.156	1.63	0.020	2.35	0.115
srpen	1.11	0.026	1.29	0.021	1.65	0.011	2.34	0.078
září	1.26	0.046	1.56	0.028	1.39	0.047	1.07	0.493
říjen	1.30	0.040	1.60	0.024	1.38	0.065	2.45	0.132
rok	4.55	0.000	3.71	0.006	3.49	0.002	2.84	0.270
III-V	1.86	0.048	1.65	0.141	3.60	0.000	5.88	0.007
VI-VIII	1.80	0.027	1.87	0.051	3.09	0.000	3.53	0.064
IX-XI	2.14	0.009	2.68	0.004	1.75	0.044	1.03	0.621
XII-II	0.99	0.149	0.79	0.338	-0.19	0.786	-3.51	0.073
XI-IV	1.71	0.084	1.54	0.189	1.76	0.095	1.18	0.623
V-X	2.73	0.006	3.2	0.005	3.63	0.000	4.57	0.034

zdroj vstupních dat: LFULG

Na základě výše uvedených výsledků tedy lze považovat hypotézu o vlivu délky časových řad na výsledky analýz dlouhodobých trendů jako opodstatněnou. Prodloužení řad o jednotky let většinou nezpůsobí výrazné rozdíly ve výsledcích trendových analýz, Naopak při použití řad delších o desítky let mohou být detekovány větší rozdíly, jelikož řady mohou zahrnovat více významných událostí. V souvislosti s tímto faktem je třeba brát v potaz určitou míru nejistoty při interpretaci dosažených výsledků analýz pro zkrácené řady. Na druhou stranu je však velmi důležité sjednotit časový rámec jednotlivých povodí pro jejich vzájemné porovnávání.

5.4 Vzájemné korelace mezi časovými řadami

Jak již bylo uvedeno v metodické části práce, spolu s výpočtem hodnoty Kendallova koeficientu pořadové korelace τ_b byla testována i jeho signifikance na 5% hladině významnosti. Hodnoty, jež jsou v tabulkách zvýrazněny tučně, byly testem označeny jako signifikantní, tudíž byla vyvrácena nulová hypotéza o nezávislosti dvou korelovaných proměnných. Podbarvení buňky zároveň poukazuje na výskyt středně silné závislosti. V případě pozitivní závislosti je políčko obarveno světle zelenou, v případě negativního vztahu je podbarvení světle oranžové.

Před korelační analýzou řad jednotlivých klimatických parametrů s průtokovými řadami bylo přistoupeno k testování teplotních a sněhových řad na klimatických stanicích (tabulka 26). Jedním z důvodů pro testování těsnosti vztahu těchto dvou parametrů byla jejich poměrně výrazná změna v průběhu sledovaného období a také soulad jejich trendů s trendy průtoků. Dalším důvodem byla také absence trendů a zlomů v řadách celkových úhrnů srážek, které se v dlouhodobém horizontu na území vybraných povodí tolik nemění.

Z výsledků přiložených v tabulce 26 je možné vyčíst, že všechny teplotní a sněhové řady vykazují negativní hodnoty koeficientu. Tato skutečnost značí, že rostoucí teploty obvykle vedou k poklesu výšky sněhové pokrývky v daných měsících. Jak moc těsný tento vztah je, či není v jednotlivých měsících, nám může prozradit blízkost koeficientu k hodnotě -1. Jako nejsilnější se tento vztah jeví v říjnu a listopadu na výše položených stanicích Carlsfeld a Fichtelberg, zatímco na nejnižše položené stanici Elster-Bad Sohl se zdá být závislost výšky sněhu na teplotě vzduchu nejsilnější v lednu a březnu. Je však třeba zmínit, že pro žádný měsíc ani roční řady nebyla prokázána velmi silná závislost s hodnotami koeficientu nad 0,7.

Tabulka 26: Kendallův koeficient pořadové korelace τ_b pro T_m a S_m

Kendallovo τ_b	Carlsfeld	Elster-Bad Sohl	Fichtelberg	Marienberg
listopad	-0.593	-0.493	-0.499	-0.490
prosinec	-0.440	-0.378	-0.359	-0.431
leden	-0.297	-0.505	-0.218	-0.459
únor	-0.303	-0.473	-0.270	-0.378
březen	-0.425	-0.565	-0.355	-0.427
duben	-0.270	-0.449	-0.163	-0.129
květen	-0.269	-0.143	-0.363	-0.175
červen	—	—	-0.125	—
červenec	—	—	—	—
srpen	—	—	—	—
září	—	—	-0.363	—
říjen	-0.555	-0.316	-0.507	-0.487
rok	-0.395	-0.437	-0.253	-0.345

zdroje vstupních dat: DWD, LFULG

Pro řady jednotlivých vodoměrných profilů byla testována těsnost vztahů mezi vybranými průtokovými a klimatickými řadami pro nejbližší stanici, jež disponuje potřebnými parametry. V případě Klingenthalu byly hydrologické řady korelovány se srážkovými a sněhovými řadami stanice Schöneck-Kottenheide, která se nachází přímo v povodí, ale nejbližší teplotní řady byly k dispozici ze stanice Elster-Bad Sohl. Stejný problém byl řešen pro profil Rothenthal, kde byly srážky a sníh použity ze stanice Marienberg-Reitzenhain, zatímco teploty pocházely ze stanice Marienberg. Pro profil Chaloupky byla využita kompletní klimatická data ze stanice Carlsfeld.

Jako první jsou uvedeny hodnoty Kendallova τ_b pro povodí horní Svatavy. Na první pohled je patrná absence silných korelací mezi průtokovými a klimatickými řadami, ať už jde o korelace průměrných, minimálních i nedostatkových průtoků. Nejvíce středně silných korelací bylo zjištěno mezi průměrnými měsíčními průtoky a srážkovými úhrny, ale i zde jsou zjištěné pozitivní závislosti spíše slabší, než by se dalo očekávat. Jako nejsilnější se tato závislost jeví v srpnu, září a listopadu. Negativní vztah teplot a průměrných průtoků byl odhalen v červenci a srpnu. Pro minimální průtoky byla potvrzena středně silná negativní závislost na teplotách v květnu, červnu a srpnu, pozitivní vztah byl naopak detekován pro leden. Mezi řadami nedostatkových objemů a klimatickými řadami nebyla zjištěna žádná závislost (tabulka 27).

Tabulka 27: Kendallovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Klingenthal)

Kendallov τ_b	Klingenthal (Svatava)								
	Qm			Qmin			nedostatkový objem		
	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh
listopad	0.009	0.421	0.156	-0.047	0.206	0.157	0.185	-0.133	-0.201
prosinec	0.124	0.353	-0.007	-0.058	0.055	0.011	0.127	-0.211	-0.217
leden	0.247	0.438	0.061	0.353	0.287	-0.071	-0.192	-0.072	0.173
únor	0.341	0.244	-0.198	0.292	0.169	-0.211	-0.143	0.071	0.032
březen	0.184	0.359	0.096	0.212	0.210	-0.170	0.021	-0.238	-0.139
duben	-0.166	0.138	0.329	-0.194	0.161	0.335	0.231	-0.072	-0.144
květen	-0.316	0.105	0.242	-0.377	0.216	0.245	0.226	-0.041	-0.196
červen	-0.273	0.376	—	-0.380	0.325	—	0.178	-0.332	—
červenec	-0.350	0.319	—	-0.339	0.103	—	0.204	-0.101	—
srpen	-0.351	0.464	—	-0.411	0.261	—	0.331	-0.238	—
září	-0.299	0.417	—	-0.239	0.214	—	0.157	-0.128	—
říjen	0.071	0.217	-0.111	0.110	0.010	-0.134	-0.101	0.051	0.047
rok	-0.233	0.313	0.325	-0.217	0.145	0.160	0.177	-0.169	-0.275

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG, DWD

Pro profil Chaloupky na horní Rolavě bylo taktéž nejvíce středně silných korelací nalezeno mezi průměrnými měsíčními průtoky a klimatickými řadami. Tyto průtoky korelují pozitivně a středně silně se srážkami v lednu, březnu, srpnu a září. Nejsilnější korelace byla zaznamenána mezi průměrnými ročními průtoky a úhrny srážek (0,51). Další kladná závislost byla zjištěna v únoru a březnu pro teploty, ale také v dubnu a květnu pro výšku sněhu. Naopak v červnu s rostoucí teplotou klesají průměrné i minimální průtoky. Pozitivní závislost byla též zjištěna mezi průměrnými průtoky a výškou sněhu v dubnu, květnu a pro roční řady (tabulka 28).

Tabulka 28: Kendalovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Chaloupky)

Kendalovo τ_b	Chaloupky (Rolava)								
	Qm			Qmin			nedostatkový objem		
	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh
listopad	-0.057	0.414	0.192	-0.097	0.223	0.166	0.011	-0.202	-0.088
prosinec	0.200	0.165	-0.054	0.078	0.027	-0.027	-0.174	0.111	0.082
leden	0.245	0.312	-0.040	0.283	0.149	-0.020	-0.171	0.004	-0.049
únor	0.363	0.106	-0.164	0.267	0.075	-0.115	-0.152	0.164	0.195
březen	0.387	0.351	-0.077	0.315	0.219	-0.071	-0.194	-0.068	0.210
duben	-0.249	0.219	0.403	-0.242	0.235	0.263	0.293	-0.261	-0.054
květen	-0.266	0.186	0.493	-0.303	0.112	0.473	0.099	-0.090	-0.180
červen	-0.377	0.237	—	-0.432	0.216	—	0.230	-0.097	—
červenec	-0.281	0.282	—	-0.235	0.143	—	-0.098	-0.137	—
srpen	-0.343	0.390	—	-0.300	0.105	—	0.226	0.104	—
září	-0.152	0.434	—	-0.143	0.232	—	0.018	-0.108	—
říjen	0.059	0.233	-0.046	0.139	-0.094	-0.138	-0.146	0.142	0.080
rok	-0.181	0.510	0.354	0.069	0.135	-0.094	0.032	-0.029	-0.011

zdroje vstupních dat: ČHMÚ, DWD

Hodnoty Kendalova koeficientu pořadové korelace jsou pro průtokové řady Načetínského potoka (tabulka 29) relativně hodně podobné ve srovnání s horní Rolavou (tabulka 28). Korelace průměrných průtoků a srážek jsou téměř shodné, taktéž hodnoty pro korelaci se sněhem jsou velmi podobné. Negativní vztah teplot s průměrnými a minimálními průtoky se pro Rothenthal vyskytují v květnu, nikoli jako v předešlém případě v červnu. Naopak pozitivní závislost mezi teplotami a průtoky nebyla potvrzena, na rozdíl od Chaloupek, pro žádný měsíc. Zároveň ani jeden ze všech tří sledovaných profilů nevykazuje závislost nedostatkových objemů na klimatických charakteristikách. V neposlední řadě je třeba vzít v potaz, že s jednou výjimkou žádná hodnota koeficientu nepřekročila 0,5, což jen potvrzuje spíše slabé závislosti mezi řadami jednotlivých parametrů.

Tabulka 29: Kendalovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Rothenthal)

Kendalovo τ_b	Rothenthal (Načetínský potok)								
	Qm			Qmin			nedostatkový objem		
	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh	teplota	srážky	sníh
listopad	-0.102	0.448	0.207	0.002	0.141	0.035	0.037	-0.244	-0.080
prosinec	0.090	0.248	0.038	-0.032	-0.003	-0.086	-0.109	-0.016	-0.001
leden	0.255	0.409	-0.039	0.301	0.196	-0.215	-0.193	0.022	0.049
únor	0.251	0.188	-0.152	0.231	0.076	-0.169	-0.117	0.226	0.219
březen	0.143	0.288	0.129	0.311	0.188	-0.224	-0.205	-0.041	0.221
duben	-0.210	0.231	0.475	-0.282	0.316	0.447	0.276	-0.297	-0.074
květen	-0.399	0.315	0.293	-0.411	0.263	0.201	0.107	-0.090	-0.048
červen	-0.274	0.184	—	-0.345	0.085	—	0.246	0.084	—
červenec	-0.300	0.296	—	-0.295	0.122	—	-0.089	-0.137	—
srpen	-0.299	0.414	—	-0.272	0.245	—	0.188	0.040	—
září	-0.246	0.496	—	-0.245	0.240	—	0.000	-0.099	—
říjen	-0.021	0.200	-0.148	0.011	0.007	-0.262	-0.149	0.114	0.125
rok	-0.264	0.389	0.345	-0.076	0.185	0.086	0.054	-0.019	-0.005

zdroje vstupních dat: DWD, LFULG

6 Diskuze

Problematika hydrologického sucha a jeho souvislosti se změnami srážko-odtokových režimů řek v důsledku klimatické změny je stále velmi častým tématem studií a výzkumů po celém světě. V nedávné minulosti se však začala problematika sucha ukazovat jako velmi aktuální i v regionech, které dříve nebyly deficitem vody sužovány tak často. Proto je při porovnávání výsledků této práce se zjištěními jiných studií důležité brát zřetel nejen na rozdílné fyzicko-geografické podmínky porovnávaných lokalit, ale také na různé časové rozmezí zkoumaných jevů a jejich datových souborů.

Výsledky této práce do jisté míry korespondují s různými přírodními podmínkami zájmových povodí. Jako nejméně ohrožené suchem se zdá být povodí horní Rolavy, zejména díky vyšší průměrné nadmořské výšce, průměrné sklonitosti terénu, vyššímu podílu rašelinišť a trvale zamokřených ploch či téměř zanedbatelnému antropogennímu ovlivnění odtoku. Srážkoměrná stanice Carlsfeld, jež se nachází nejbližší tomuto povodí, je zároveň jedním z nejdeštivějších míst v celých Krušných horách. Díky v podstatě nechráněnému návětrnému svahu tato stanice dlouhodobě zaznamenává vyšší roční úhrny srážek, než například o 300 metrů výše položená stanice Fichtelberg. I díky kombinaci těchto faktorů nejsou letní sucha na horní Rolavě zdaleka tak výrazná, jako na zbylých dvou profilech. Povodí horní Svatavy je naproti tomu poměrně výrazně antropogenně modifikováno, i přes vysoký podíl zalesněných ploch, zejména v údolí Svatavy a jejího hlavního levostranného přítoku Brunndöbry. V průběhu posledních 70 let došlo k dvojnásobnému nárůstu podílu zástavby na ploše povodí, s čímž souvisí i nárůst místní populace a její spotřeba vody. Nepříznivá je pro retenci vody v povodí i poměrně velká sklonitost svahů s absencí náhorních plošin. S tím souvisí i do jisté míry odlišný půdní kryt, jelikož se v tomto povodí nevyskytují trvale zamokřené plochy či rašeliniště. Povodí Načetínského potoka je sice od povodí horní Svatavy poněkud vzdáleno, nicméně téměř ve všech analýzách této práce vykazují velmi podobné výsledky. A to i přes např. diametrálně odlišnou převládající orientaci svahů. Na území pramenné oblasti Načetínského potoka se vyskytují stejně jako v povodí horní Rolavy rašeliniště, ale podíl na ploše povodí mají zde spíše marginální. Některé zamokřené lesní plochy jsou zároveň dle dostupných mapových podkladů odvodňovány pomocí poměrně husté sítě melioračních a odvodňovacích struh, což může mít negativní vliv na jejich nasycení ve srážkově sušších obdobích.

6.1 Hydrologické sucho v kontextu regionální změny klimatu

Pokud se dílčí výstupy analýz této diplomové práce zasadí do globálnějšího rámce, je možné i na mikroregionálním měřítku pozorovat podobné rysy regionálních či kontinentálních studií.

Samozřejmě je třeba brát výsledky malých horských povodí v porovnání s výzkumy na bázi větších území s rezervou, nicméně se zdá, že se i v krušnohorském prostředí projevuje vliv globálního oteplování na častější výskyt sucha, jak uvádějí Sheffield, Wood a Roderick (2012) či Dai (2013). Pokud se výběr studií zabývajících se vlivem změn klimatu na hydrologický režim zúží na úroveň Evropy, stále se lze setkat s relativně dobrou shodou výsledků pozorovaných i předpovídaných tendencí odtokových režimů řek. Lehner (2006) uvedl, že při pokračujícím tempu oteplování, jaké bylo pozorováno do roku 2005, se v regionu střední Evropy se do roku 2070 výrazně zkrátí průměrná doba opakování velmi intenzivních suchých epizod. V případě stoletých such autor uvádí budoucí frekvenci výskytu menší než 50 let. Zjištění Lehnera (2006) potvrdili ve své studii i Feyen a Dankers (2009), kteří zároveň uvedli, že očekávané zvýšení frekvence a intenzity sucha se bude týkat výhradně teplejší poloviny roku. Jako kriticky ohrožené regiony sice označují oba výše uvedené výzkumy jižní a jihovýchodní Evropu, avšak zvýšené riziko sucha se bude dle deset let starých propočtů týkat i ostatních regionů Evropy. Lodní doprava, zemědělství, energetika či dodávka pitné vody. Přesně tyto odvětví ekonomiky označili Feyen a Dankers (2009) za nejvíce negativně ovlivněné nedostatkem vody. Treml (2012) vyhodnotil nejextrémnější hydrologická sucha ve 20. století. Dle autora článku byla zaznamenána nejintenzivnější sucha v letech 1947, 1953 a 1921. Jako výrazně suchý je označen taktéž rok 2003, nicméně dle výsledků analýz nepatří mezi ty historicky nejsušší (Treml, 2012).

Na první pohled by se mohlo zdát, že pro pramenné oblasti Krušných či jiných českých hor problémy s dodávkou pitné vody nehrozí. Opak je však pravdou, dokonce i obce nacházející se na horních tocích řek, jež odvodňují příhraniční pohoří, musely v létě 2018 vyhlásit omezení odběrů vody v důsledku sucha. Jednou z nich je město Kraslice, jehož katastr začíná ihned za závěrovým profilem Klingenthal na horní Svatavě. Městský úřad vydal 30. 7. 2018 poprvé v historii vyhlášku o zákazu veškerého odběru povrchových vod z vodních toků a nádrží. Zákaz byl odvolán až 22. 11. téhož roku (Městský úřad Kraslice, 2018).

Potřeba řešení stále častějších epizod nedostatku povrchových vod i v horských a podhorských oblastech oživila diskuze na téma obnovy zaniklých retenčních nádrží, nebo stavby nových přehrad. Výše zmíněné město Kraslice na česko-saském pomezí se již čtvrtým rokem potýká s akutním nedostatkem vody v letních měsících. Pročež opět vyvstala otázka vybudování menší přehrady s kapacitou přibližně 150 000 m³ na Stříbrném potoce, jenž je levostranným přítokem Svatavy. Návrh nyní prochází procesem studie vlivu na životní prostředí, nicméně správa státního podniku Povodí Ohře tuto stavbu nemá dle vyjádření jejího tiskového mluvčího v plánu. Více pravděpodobná je dle tvrzení mluvčího Povodí Ohře realizace vodního díla Kryry nedaleko Podbořan, kde je nedostatek srážek a zásob vody výraznější (Havlová, 2019). Výjimečnost suchých epizod posledních let potvrzuje předběžná zpráva o vyhodnocení sucha

z roku 2018 (ČHMÚ, 2019). Dle tohoto reportu byl rok 2018 z pohledu srážek druhý nejsušší hned po roce 2003, a to od začátku evaluace such v roce 1961. Stejně tak bylo léto v roce 2018 společně s létem 2003 vůbec nejteplejším obdobím od počátku sledování. Dále je ve zprávě uvedeno, že 2018 byl pátý suchý rok v řadě, což mělo velký vliv na umocnění nedostatku vod povrchových i podzemních (ČHMÚ, 2019).

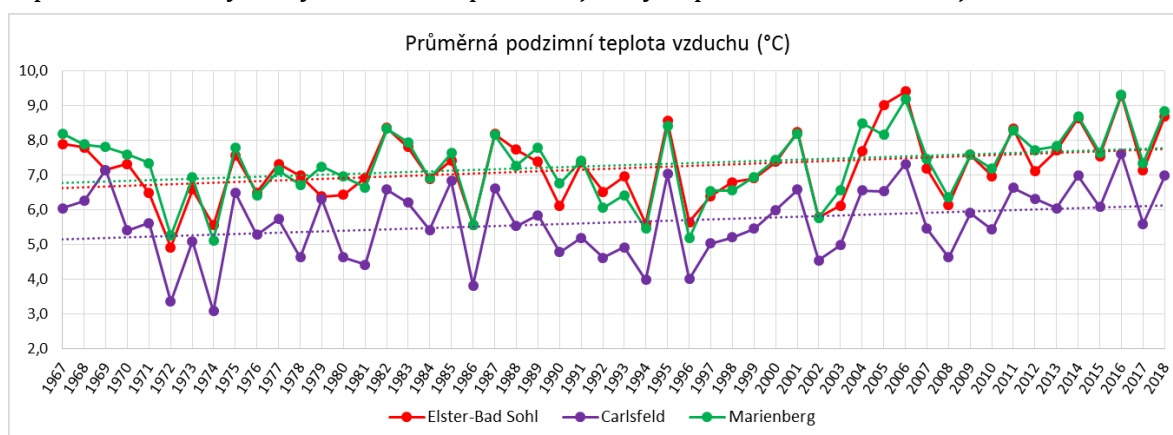
6.2 Trendy průměrných a nízkých průtoků

Vliv různě dlouhých zkoumaných období je názorně vidět ve výsledcích na sebe navazujících publikací (Hannaford a Marsh, 2006; Hannaford a Buys, 2012). V prvně jmenované práci byly analyzovány trendy průtoků ve Spojeném království pomocí MK-testu v období 1973 až 2002. Zjištění pozitivního trendu průměrných průtoků ve většině zkoumaných povodí bylo podle autorů výrazně ovlivněno velmi suchým obdobím na počátku sledovaného období. Novější výsledky pro prodloužené řady (1969-2008) však poukázaly na větší sezónní i prostorové změny v průtocích řek, například nárůst odtoku na podzim a v zimě či jeho pokles na jaře. Dále autoři uvádějí absenci negativních trendů průměrných i minimálních průtoků, což v porovnání s výstupy trendových analýz této diplomové práce nelze nazvat shodou. Tyto výsledky jsou však poplatné trochu rozdílnému ostrovnímu klimatu a výše uvedenému časovému rozmezí, ale jelikož i Velká Británie prožívá v posledních letech nebývalá sucha v létě, lze se domnívat, že by zahrnutí aktuálních dat znamenalo určité změny. Dle výsledků analýzy trendů průtoků v malých, přírodě blízkých povodí patnácti evropských zemích, jež provedla Stahl et al. (2010) pro období 1962–2004, může být usuzováno, že pramenné oblasti Krušných hor vykazují velmi podobné tendence jako jejich bližší i vzdálenější okolí. Povodí v regionu střední Evropy vykazují shodně výrazný pokles průtoků v teplejší polovině roku. Zejména v dubnu dochází k signifikantnímu poklesu průtoků ve sledovaném období, jenž vrcholí v srpnu. Tyto výsledky, ačkoliv nezahrnují posledních 15 let, poukazují na úbytek vody v korytech středoevropských řek zejména na jaře a v létě. Kolektiv autorů uvádí příčiny těchto trendů, kterými jsou zejména rychlejší odtávání sněhu na jaře v důsledku oteplování. Při použití dostupných datových řad byl prokázán pokles signifikance rostoucích i klesajících trendů průměrných ročních průtoků, což platí např. i pro Načetínský potok v této práci.

Výsledky trendových analýz této práce se poměrně dobře shodují i s případovou studií horního toku řeky Hron ve slovenských Nízkých Tatrách (Blahušiaková a Matoušková, 2016). Stejně jako ve všech třech krušnohorských povodích je na horním Hronu zaznamenán sestupný trend průměrného ročního průtoků. Klesající tendence je však výrazná zejména v rozmezí listopadu a února, což je výrazný rozdíl oproti Krušným horám, kde průtoky klesají zejména v jarních a letních měsících. Taktéž dochází na horním Hronu ke značnému poklesu hodnot minimálních

průtoků v chladném půlroce, totéž platí pro teplý půlrok, ale pokles není tak výrazný. Shodné rysy jsou k nalezení v nejdelších periodách sucha, hlavně v roce 2003. Na rozdíl od Krušných hor bylo největší sucho v tomto roce na horním Hronu od února do dubna. Hodnoty BFI podle autorek neznačí výrazné změny ve sledovaném období, což platí v rámci Krušných hor pouze pro nejvýše položený profil Chaloupky na horní Rolavě (Blahušiaková a Matoušková, 2016).

Při nahlédnutí do čistě středoevropských studií, které se zabývaly přímo či částečně i oblastí Krušných hor, jsou i v těchto výzkumech k nalezení společné rysy, ale i dílčí rozdíly s výsledky této diplomové práce. Franke et al. (2004) zaznamenal výrazný pokles letních a výrazný nárůst srážkových úhrnů v Sasku v rozmezí let 1951-2000. Pro využití klimatické stanice v této práci však podobné tendence zjištěny nebyly. Na druhou stranu je vidět jistá podobnost v nárůstu frekvence a délky suchých period v teplejší polovině roku. Dalším rozdílem je podzimní pokles teploty (září až listopad) o 0,4 °C v Krušných horách v období 1951-2000. Na tomto příkladu je názorně vidět důležitost vybraného období, jelikož pro období 1967-2018 průměrná podzimní teplota roste na vybraných stanicích poblíž zájmových povodí, což znázorňuje obrázek 50.



Obrázek 50: Průměrné podzimní teploty na vybraných klimatologických stanicích (zdroj dat: DWD)

Renner a Bernhofer (2011) odhalili při zkoumání průtokových a klimatických řad saských stanic pro období 1930 a 2009 zlom v průměrných teplotách vzduchu v roce 1988, což souhlasí s výsledky této práce. Autoři také uvádějí posun vysokých průtoků z jarního tání až o tři týdny dříve než v první polovině sledovaného období, zejména ve výše položených povodích. V rámci této diplomové práce sice nebyly analyzovány jarní vysoké průtoky, nicméně podle výsledků trendových analýz průměrných měsíčních průtoků, teplot vzduchu a výšek sněhové pokrývky lze usuzovat, že k dřívějšímu tání opravdu dochází i ve třech zájmových povodích.

Další část diskuze výsledků je zaměřena výhradně na území Česka. Ledvinka (2015) ve své studii poukázal na výrazný kontrast mezi západem a východem naší republiky v trendech nedostatkových objemů v období 1961-2005. Dle autora deficitní objemy v západní polovině Česka klesají, dále nebyly zjištěny signifikantní sestupné trendy sedmidenních minim, což

ovšem není ve shodě s výsledky této práce. Důvodem může opět být nestejná délka datových řad, ale také rozdílné fyzickogeografické charakteristiky vybraných povodí.

Vlnas (2015) zaznamenal v letech 1980-2013 nárůst průměrných měsíčních průtoků v březnu pro 31 stanic v Čechách o zhruba 15 %, což nelze v rámci třech sledovaných krušnohorských povodí považovat za shodu. Naopak o 13 % poklesl průměrný průtok v květnu pro 32 stanic převážně na severu Čech, o 15 % se snížil průtok také v srpnu na 17 profilech. V těchto měsících klesají průměrné průtoky i ve všech třech povodích vybraných pro tuto diplomovou práci. Autor dále uvádí, že pokles měsíčních minimálních průtoků je silnější než pro měsíční průměry, což platí také pro profily Klingenthal a Rothenthal nicméně na vodoměrné stanici Chaloupky je tomu naopak (tabulky 17 a 18 na stranách 76 a 77). Sestupné tendence měsíčních minim jsou dle Vlnase (2015) četné a výrazné natolik, že ovlivňují i trendy ročních minimálních průtoků.

V rámci studií z domácích zdrojů je jistě zajímavé porovnání výsledků této práce s výstupy Skály (2017), jenž aplikoval podobné metodické přístupy k výzkumu hydrologického sucha a změn v jeho výskytu na Šumavě. Zde se opět projevuje problematika analýz a testování trendů různých dlouhých řad, jelikož autorovy výsledky vycházejí z delších souborů, které mají počátek v 30. letech 20. století. To má velký vliv na výsledky trendových analýz, které poukazují na sestupný trend nedostatkových objemů pro všechny zkoumané profily. Nicméně z tohoto pohledu jsou tyto výsledky v rozporu s výstupem trendové analýzy kompletní řady pro profil Rothenthal v Krušných horách, který je v provozu od roku 1929. Tato vodoměrná stanice totiž i za využití devadesátileté řady vykazuje nárůst nedostatkových objemů v jarních měsících. Dále autor uvádí, že dochází k postupné marginalizaci epizod sucha ve sledovaném období, což je opět v rozporu s většinou výsledků analýz pro Krušné hory. Tento fakt ale může být ovlivněn chybějícími roky 2015 až 2018 právě v práci Skály (2017).

Autor se také na základě výsledků analýz domnívá, že se suché epizody na výše položených šumavských profilech více koncentrovaly před rokem 1980. To částečně platí i pro profil Chaloupky na horní Rolavě s dalšími dvěma zkoumanými povodími v Krušných horách, nicméně i zde pro přesnější porovnání chybí delší datová řada průtoků. Dle analýzy sezonality dní s výskytem hydrologického sucha určeného prahovou hodnotou Q_{355} autor poukázal na koncentraci suchých dní spíše do podzimních a zimních měsíců, což poukazuje na určité rozdíly ve srovnání s výsledky pro Krušné hory, kde se suché dny vyskytují více v letních měsících a na podzim. Jako příčinné faktory rozdílů výskytu a rozdílné sezonality suchých dní autor uvádí návětrný či závětrný efekt daný expozicí svahů, nicméně dále neuvádí například analýzy klimatických nebo srážkových dat k případné validaci těchto tvrzení.

Další studií v šumavských pramenných oblastech je výzkum Bernsteinové et al. (2015), jenž se zabýval vlivem lesních disturbancí a změny klimatu na odtok horní Vydry a Große Ohe. V letech 1978-2011 nebyly zjištěny změny v průměrných ročních průtocích a srážkách, stejně tak v případě sezónního rozložení úhrnů srážek. V případě průtoků se výsledky neshodují s výstupy analýz pro Krušné hory, což může být dáno výrazně vyšší průměrnou nadmořskou výškou šumavských povodí, avšak v ostatních parametrech se obě studie shodují. V obou pohořích oteplování posouvá tání sněhové pokrývky do dřívějších týdnů jara. Vliv změny krajinného pokryvu na odtok lze však na rozdíl od Šumavy v Krušných horách jen velmi obtížně kvantifikovat. Krajinný pokryv se zde, s výjimkou povodí Svatavy, za 50 let téměř nezměnil, zatímco šumavská povodí zaznamenala signifikantní disturbance lesa. Proto je také obtížné interpretovat či porovnávat výskyt zlomového bodu právě v roce 1998 pro průtokové řady šumavských pramenných oblastí. Kolektiv autorů také neobjevil žádné sestupné trendy pro řady minimálních průtoků v jarních či letních měsících, což naopak v povodích Krušných hor zjištěno bylo, ale jak již bylo zmíněno v rešeršní části této práce, Bernsteinová et al. (2015) použila pro analýzy data končící rokem 2011.

Asi nejpodobnější časové rozmezí se zájmovým obdobím této diplomové práce bylo použito k analýze sezónního rozložení suchých dní na středním toku řeky Lužnice v letech 1965-2010. Pro profil Pilař s nadmořskou výškou 436 m byla k definici suchých dní použita hodnota Q_{355} (Svoboda, 2011, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015). Drtivá většina dní s výskytem hydrologického sucha se koncentruje v rozmezí července a září, což je příznačné pro stanice ve středních polohách. Toto povodí odvodňující velkou část Novohradských hor je sice výrazně větší v porovnání s povodími v této práci, nicméně výsledky do jisté míry korespondují s výstupy analýzy sezonality sucha pro povodí horní Svatavy a Načetínského potoka.

6.3 Nejistoty výsledků

Při testování trendů v časových řadách pomocí MK-testu zvyšuje výskyt autokorelace v datové řadě pravděpodobnost detekce statisticky významného trendu, jinými slovy je zvýšené riziko, že se vyskytne chyba 1. řádu (Von Storch, 1995 cit. ve Vlnas, 2015). V této práci byla využita verze MK-testu, která obsahuje právě automatickou korekci autokorelace, tudíž by měly být nesprávně identifikované trendy vyfiltrovány.

Určitá nejistota je spatřena také v doplnění chybějících klimatických dat z jednotlivých stanic na základě lineární regrese ze stanic okolních. Co se týče měsíčních teplotních průměrů, koeficienty determinace mezi stanicemi se pohybovaly v rozmezí 0,91 až 0,95, tudíž by mohla být doplněná teplotní data považována za relativně spolehlivá. U srážek je tento přístup problematictější vzhledem k jejich plošně nerovnoměrné distribuci. Na rozdíl od teplot však

bylo ve srážkových řadách podstatně méně výpadků, hodnoty koeficientů determinace mezi blízkými stanicemi byla taktéž relativně slušná (0,79-0,88). Průtokové řady v denním kroku byly k dispozici kompletní, protože nebylo potřeba je homogenizovat. Při testech homogenity datových řad bylo zjištěno relativně velké množství nehomogenit. Tento fakt může vypovídat o změnách, nicméně je třeba brát v potaz vlastní kvalitu těchto řad a možné chyby v nich, např. v důsledku doplnění chybějících dat pomocí interpolace či lineární regrese. Dalším možným faktorem, který může částečně zkreslit výsledky, je přirozená variabilita klimatu a přírodních procesů s ní spojených. Například provádění analýz pro jednotlivé měsíce může být v tomto ohledu do jisté míry problematické, nicméně i výsledky ostatních studií napovídají, že výskyt hydrologického sucha se v souvislosti s klimatickou změnou opravdu mění.

Při zohlednění nejistot je třeba uvést taktéž rozdílnou rozlohu, průměrnou nadmořskou výšku vybraných povodí či jejich antropogenní ovlivnění. Výběr zájmových povodí pro tuto práci byl do jisté míry ovlivněn délkou dostupných časových řad denních průtoků, ale zejména také polohou samotných profilů či výskytem vodních děl v povodí. Oblast Krušných hor, kupříkladu oproti Šumavě, nedisponuje tolika měrnými profily s datovou řadou delší než 40 až 50 let. To platí i pro saskou stranu tohoto pohoří na severozápadní hranici Česka. Nejmenší a zároveň nejméně antropogenně ovlivněné povodí horní Rolavy bylo vybráno též za účelem porovnání s ostatními povodími, ve kterých je větší míra vlivu člověka na odtokové procesy.

Další možnou nejistotou v této práci je samotná délka časových řad. Jak již bylo výše několikrát zmíněno i potvrzeno, délka řady má zásadní vliv na výsledky analýz trendů. Tato práce je do jisté míry omezena svým časovým rozpětím pro porovnání všech tří povodí. Nejen délka řad však může ovlivnit potenciální výsledky analýz. Například řada denních průtoků horní Rolavy na profilu Chaloupky je již delší dobu předmětem zájmu pracovníků ČHMÚ. Dle výstupů práce Ledvinky (2008) se totiž odtokový koeficient pro povodí horní Rolavy pohyboval celkem výrazně nad 100 %. Vloni byla tedy tato řada i samotná vodoměrná stanice podrobena hlubší kontrole, která vyústila ve značnou úpravu a přehodnocení přepočtu vodních stavů na průtoky (Ledvinka, osobní sdělení ze dne 18. 3. 2018). V této práci byla využita upravená datová řada, což se projevilo velmi výrazně ve výsledcích trendových analýz pro povodí horní Rolavy v porovnání s dříve publikovanými studii. Ledvinka (2008) uvádí výrazný nárůst odtoku v zimě pro období 1967-2007, dále také neexistující korelace mezi srážkami a průtoky. V neposlední řadě autor zmiňuje poměrně závažné hodnoty koeficientu odtoku, jež často přesahovaly 150 %. Upravená řada použitá v této práci již takovéto hodnoty nevykazuje. Otázkou zůstává samotná vhodnost použití řad, se kterými bylo vícekrát manipulováno, či byla měněna metodika jejich měření. Proto by měl být v případném budoucím studiu upravovaných řad kladen větší důraz na verifikaci věrohodnosti samotných datových sad.

7 Závěry

Teoretické i praktické přístupy k problematice sucha uvedené v zahraniční i domácí literatuře byly shrnuty v rešeršní části práce. Právě na základě průzkumu literatury se ukázalo, že se stále zvětšuje množství konceptů a indexů k hodnocení sucha, tudíž by měl nyní být kladen důraz na jejich systematizaci pro monitoring či předpověď sucha a adaptační opatření proti němu. Výsledky práce do jisté míry korelují s výzkumy, které předpovídají zvýšené riziko výskytu sucha ve spojitosti s probíhajícím globálním oteplováním, a to i v regionu střední Evropy. Toto riziko se však netýká jen tradičně sušších oblastí, ale i výše položených regionů či pohoří s obvykle vyšší srážkovou dotací, které do jisté míry předurčují vodnost dolních toků řek.

Výsledky práce naznačily určitá specifika v reakci vybraných krušnohorských povodí na deficit srážek a výskyt hydrologického sucha. I když celkové srážkové úhrny v této oblasti dlouhodobě neklesají, hodnoty průměrných i minimálních průtoků vykazují v průběhu sledovaného období sestupnou tendenci. Lze se tedy domnívat, že hlavními příčinami zvyšujícího se výskytu epizod sucha s velkou intenzitou je především oteplování klimatu. Zvýšení teploty má za následek menší akumulace sněhu v zimních měsících a jejich rychlejší tání na jaře, což také zřejmě přispívá k posunu data výskytu minimálních průtoků blíže k začátku roku v druhé polovině vybraného období. Výjimečnost extremity suchých period v posledních letech na území Česka potvrdily i výsledky této práce. Na profilu Rothenthal v povodí Načetínského potoka byl rok 2018 absolutně nejsušším od počátku měření v roce 1929 z pohledu nedostatkových objemů i doby trvání sucha. Naopak v povodí horní Rolavy nebylo sucho v létě 2018 zdaleka tak výrazné, např. ve srovnání s rokem 2003, což dokazuje, že každé povodí reaguje na nedostatek srážek rozdílně v závislosti na dalších fyzickogeografických faktorech.

Budoucí výzkum by se mohl zabývat změnami v časovém rozložení srážkových úhrnů a jejich skupenstvím v detailnějším měřítku, než na úrovni měsíčních průměrů. V návaznosti by pak mohl být posouzen vliv těchto změn na výskyt hydrologického sucha v dané oblasti. Přínosné by jistě bylo i detailní zkoumání krušnohorských rašelinišť, například jejich hydrologického režimu během dlouhých epizod s nedostatkem srážek.

Na základě provedených výpočtů vycházejících z dostupných datových souborů pro zájmová povodí Krušných hor byly následně vyvozeny tyto závěry:

- Průměrné teploty vzduchu se ve všech zájmových povodích konstantně zvyšují. V řadách teplot vzduchu, výšek sněhové pokrývky a průměrných průtoků byly nalezeny zlomové body v rozmezí let 1987-1992, po kterých dochází k oteplení, úbytku sněhu a vodnosti jednotlivých toků.

- V průběhu sledovaného období dochází k signifikantnímu posunu v sezónnosti výskytu hydrologického sucha. Po roce 1993 se suché dny koncentrují v rozmezí července a října, zároveň dochází k výraznému úbytku extrémně nízkých průtoků v chladnější polovině roku.
- Analýzy trendů potvrzují pokles průměrných i minimálních průtoků ve všech povodích, zejména v jarních měsících. Vzestupné trendy nedostatkových objemů byly však zjištěny pouze na horní Svatavě a Načetínském potoce.
- K výraznější změně krajinného pokryvu došlo ve sledovaném období pouze v povodí horní Svatavy v souvislosti s přírůstkem zástavby. Ve všech povodích však dochází k mírnému nárůstu lesních ploch.
- Nejvýše položené povodí horní Rolavy s významným podílem rašelinišť a nejmenší měrou antropogenního ovlivnění vykazuje rozdílné chování ve srovnání s ostatními povodími, zejména v sezonalitě výskytu sucha a trendech nedostatkových objemů.

8 Seznam literatury a zdrojů

8.1 Literatura

- ABDI, H. (2007): The Kendall rank correlation coefficient. *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Sage, Thousand Oaks, CA, s. 508-510.
- ALEXANDERSSON, H. (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), s. 661-675.
- ALEXANDERSSON, H., MOBERG, A. (1997): Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of climatology*, 17(1), s. 25-34.
- BACHMAIR, S., STAHL, K., COLLINS, K., HANNAFORD, J., ACREMAN, M., SVOBODA, M., KNUTSON, C., SMITH, K. H., WALL, N., FUCHS, B., CROSSMAN, N. D. (2016): Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(4), s. 516-536.
- BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. *Kartografie Praha*, 79 s.
- BERANOVÁ, Z. (2011): Průzkum a hodnocení ekologického stavu vodních toků při zohlednění evropských standardů. Aplikace v modelovém povodí Rolavy. Diplomová práce, KFGG PŘF UK, Praha, 144 s.
- BERNSTEINOVÁ, J., BÄSSLER, C., ZIMMERMANN, L., LANGHAMMER, J., BEUDERT, B. (2015): Changes in runoff in two neighbouring catchments in the Bohemian Forest related to climate and land cover changes. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(4), s. 342-352.
- BLAHUŠIAKOVÁ, A., MATOUŠKOVÁ, M. (2016): Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron river basin, Slovakia. *AUC Geographica*, 51 (2), s. 189-204.
- BRÁZDIL, R., TRNKA, M. et al. (2015): Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost. *Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky*, 400 s.
- DAI, A. (2013): Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), s. 52-58.
- DE VAUS, D. (2002): *Analyzing social science data: 50 key problems in data analysis*. Sage Publishers, London, 138 s.
- DEMEK, J., MACKOVČIN P. et al. (2006): Hory a nížiny. *Zeměpisný lexikon ČR. MŽP ČR*. 580 s.
- DÉRY, S. J., STAHL, K., MOORE, R. D., WHITFIELD, P. H., MENOUNOS, B., BURFORD, J. E. (2009): Detection of runoff timing changes in pluvial, nival and glacial rivers of Western Canada, *Water Resources Research*, 45(4), 11 s.
- FEYEN, L., DANKERS, R. (2009): Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D17), 17 s.
- FRANKE, J., GOLDBERG V., EICHELMANN, U., FREYDANK, E., BERNHOFER, C. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. *Climate Research*, 27, s. 145-150.

- GRANATO, G. E. (2006): Kendall-Theil Robust Line (KTRLine--version 1.0): A visual basic program for calculating and graphing robust nonparametric estimates of linear-regression coefficients between two continuous variables: Techniques and Methods of the U. S. Geological Survey, book 4, chapter A7, 31 s.
- GUILFORD, J. P. (1953): The correlation of an item with a composite of the remaining items in a test. *Educational and Psychological Measurement*, 13(1), s. 87-93.
- GUMBEL, E. J. (1963): Statistical forecast of droughts. *Hydrological sciences journal*, 8, s. 5-23.
- GUSTARD, A., BULLOCK, A., DIXON, J. M. (1992): Low flow estimation in the United Kingdom. Wallingford, Institute of Hydrology, Report no. 108, 88 s.
- HANNAFORD, J., BUYS, G. (2012): Trends in seasonal river flow regimes in the UK. *Journal of Hydrology*, 475, s. 158-174.
- HANNAFORD, J., MARSH, T. (2006): An assessment of trends in UK runoff and low flows using a network of undisturbed catchments. *International Journal of Climatology*, 26(9), s. 1237-1253.
- HÄNSEL, S., USTRNUL, Z., ŁUPIKASZA, E., SKALÁK, P. (2019): Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe. *Advances in Water Resources*, 42 s. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.005>
- HAO, Z., SINGH, V. P. (2015): Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, s. 668–678.
- HIRSCH, R. M., SLACK, J. R. (1984): A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20 s. 727-732.
- HLADNÝ, J., NĚMEC, J., BLAŽEK, V. (2006): Voda v České republice. Consult, Praha, 255 s.
- CHANG, F. C., WALLACE, J. M. (1987) Meteorological conditions during heat waves and droughts in the United States great plains. *Monthly Weather Review*. 115 (7), s. 1253-1269.
- CHEN, Z., GRASBY, S. E. (2009): Impact of decadal and century-scale oscillations on hydro-climate trend analyses. *Journal of Hydrology*, 365(1-2), s. 122-133.
- CHYTRÝ, M., KUČERA, T., KOČÍ, M., GRULICH, V., LUSTYK P. (2010): Katalog biotopů České republiky. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, 447 s.
- KAŇOK, J. (1999): Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodí Odry po profil Kozle. Spisy prací Přírodovědecké Fakulty Ostravské Univerzity. Ostrava, č. 10.
- KENDALL, M. G. (1955): Rank Correlation Methods, 2nd edition. New York. Hafner Publishing Company.
- KHALIQ, M. N., OUARDA, T. B. M. J. (2007): On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(5), s. 681-687.
- KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2007): Změny srážko-odtokových poměrů v pramenných oblastech povodí Otavy. In: Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině. UK Praha, 317–332.

- KRÁLOVEC, V., KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2016): Evaluation of runoff response on the basis of a comparative paired research in mountain catchments with the different land use. Case study of the Blanice River, Czechia. *Geografie*, 121, 2, s. 209–234.
- LEDVINKA, O. (2008): Trendy srážkoodtokového režimu v povodí Rolavy. Diplomová práce, KFGG PřF UK, Praha, 123 s.
- LEDVINKA, O. (2015): Evolution of low flows in Czechia revisited. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 369, s. 87-95.
- LEHNER, B., DOLL, P., ALCAMO, J., HENRICHS, T., KASPAR, F. (2006) Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75, s. 273–299.
- LIBISELLER, C. (2004): MULTMK/PARTMK. A Program for the computation of multivariate and partial Mann-Kendall test. LIU, Linköping, 18 s.
- LIBISELLER, C., GRIMVALL, A. (2002): Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics*, 13, s. 71-84.
- LLOYD-HUGHES, B. (2014): The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3-4), s. 607-611.
- MISHRA, A. K., SINGH, V. P. (2010): A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391, s. 202-216.
- NAVRÁTILOVÁ, D. (2018): Trendy hydroklimatických faktorů ve vybraných povodí Krušných hor. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 61 s.
- NEUHÄUSLOVÁ, Z., MORAVEC, J., CHYTRÝ, M., SÁDLO, J., RYBNÍČEK, K., KOLBEK, J., JIRÁSEK, J. (2001): Mapa potenciální přirozené vegetace České republiky 1: 500 000. Botanický ústav AV ČR, Průhonice.
- NIEMEYER, S. (2008): New drought indices. *Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens*, 80, s. 267-274.
- NOVICKÝ, O., KAŠPÁREK, L., FRIDRICHOVÁ, R., FIALA, T., BRZÁKOVÁ, J., KOURKOVÁ, H., TREML, P., VACULÍK, M. (2008): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha, 59 s.
- PETTITT, A. N. (1979): A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 28, no. 2, s. 126-135.
- POFF, N. L., WARD, J. V. (1989). Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: a Regional Analysis of Streamflow Patterns. *Canadian Journal of Aquatic Sciences*, 46, s. 1805-1818.
- POTOP, V., BORONEANT, C., MOŽNÝ, M., ŠTĚPÁNEK, P., SKALÁK, P. (2014): Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and applied climatology*, 115(3-4), s. 563-581.
- PRUDHOMME C., GIUNTOLI I., ROBINSON, E. L., CLARK, D. B., ARNELL, N. W., DANKERS, R., FEKETE, B. M., FRANSSSEN, W., GERTEN, D., GOSLING, S. N., HAGEMANN, S., HANNAH, D. M., KIM, H., MASAKI, Y., SATOH, Y., STACKE, T., WADA, Y., WISSER, D. (2014): Hydrological

- droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the Nat Academy of Sciences*, 111(9), s. 3262-3267.
- PUTH, M. T., NEUHÄUSER, M., RUXTON, G. D. (2015): Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. *Animal Behaviour*, 102, s. 77-84.
- PYRCE, R. (2004): Hydrological low flow indices and their uses. Watershed Science Centre, WSC Report 04-2004, Peterborough, Ontario, 33 s.
- RENNER, M., BERNHOFER, C. (2011): Long term variability of the annual hydrological regime and sensitivity to temperature phase shifts in Saxony/Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (6), s. 1819-1833.
- RICHTER B. D., BAUMGARTNER J. V., BRAUN D. P., POWELL J. (1998): A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 4, s. 329-340.
- ROBINSON, M., COGNARD-PLANCQ, A. L., COSANDEY, C., DAVID, J., DURAND, P., FÜHRER, H. W., HALL, R., HENDRIQUES, M. O., MARC, V., MCCARTHY, R., MCDONELL, M., MARTIN, C., NISBET, T., O'DEA, P., RODGERS, M., ZOLLNER, A. (2003): Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186(1-3), s. 85-97.
- SAJIKUMAR, N., REMYA, R. S. (2015): Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of environmental management*, 161, s. 460-468.
- SHEFFIELD, J., WOOD, E. F., RODERICK, M. L. (2012): Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), s. 435-438.
- SCHMIDT, P. A., HEMPEL, W., DENNER, M., DÖRING, N., GNÜCHTEL, A., WALTER, B., WENDEL, D. (2003): Erstellung einer Übersichtskarte der potenziell-natürlichen Vegetation M 1:50 000 von Deutschland sowie Erfassung und vegetations-kundliche Erhebungen naturnaher Wälder als Grundlage für nationale und internationale Naturschutzplanungen-Sachsen. 3. Sachsen, TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften und Biologie, Tharandt und Dresden.
- SKÁLA, V. (2017): Hydrologické sucho v pramenných oblastech šumavských toků. Diplomová práce, KFGG PřF UK, Praha, 77 s.
- STAHL, K., HISDAL, H., HANNAFORD, J., TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H. A. J., SAUQUET, E., DEMUTH, S., FENDEKOVÁ, M., JODAR, J. (2010): Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 14, s. 2367-2382.
- 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, 579 s.
- THEIL, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis (parts 1-3). In *Ned. Akad. Wetensch. Proc. Ser. A. Vol. 53*, s. 1397-1412.
- TIJDEMAN, E., HANNAFORD, J., STAHL, K. (2018): Human influences on streamflow drought characteristics in England and Wales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), s. 1051-1064.

- TOLASZ, R. et al. (2007): Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého, 1. vydání, 256 s.
- TREML, P. (2012): Největší hydrologická sucha 20. století. In Smelík, L., Jandora, J., Workshop Adolfa Patery, s. 251-258.
- TRENBERTH, K. E., DAI, A., VAN DER SCHRIER, G., JONES, P. D., BARICHIVICH, J., BRIFFA, K. R., SHEFFIELD, J. (2014): Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), s. 17-22.
- ÚSTAV PRO HOSPODÁŘSKOU ÚPRAVU LESŮ (1999): Oblastní plán rozvoje lesů: Přírodní lesní oblast 01 Krušné hory. Brandýs nad Labem, pobočka Plzeň, 635 s.
- VAN LOON, A. F. (2015): Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), s. 359-392.
- VAN LOON, A. F., GLEESON, T., CLARK, J., VAN DIJK, A. I., STAHL, K., HANNAFORD, J., DI BALDASSARRE, G., TEULING, A. J., TALLAKSEN, L. M., UIJLENHOET, R., HANNAH, D. M. (2016): Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9 (2), s. 89-91.
- VLACH, V. (2016): Extrémní hydrologické jevy v povodí Rolavy. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 66 s.
- VLČEK, L. (2018): Retence vody v půdách horských oblastí na příkladu Šumavy. Disertační práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 127 s.
- VLNAS, R. (2015): Pozorované změny složek hydrologické bilance z hlediska využitelných vodních zdrojů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 57(4-5), s. 27-32.
- VOLKOVÁ, A. (2010): Změny ve srážko-odtokovém režimu v povodí Stropnice. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 130 s.
- WANG, H., CHEN, Y., DENG, H., PAN, Y. (2015): Detecting changes in extreme streamflow in the Tarim River, Northwest China. *Quaternary International*, 380, s. 149-158.
- WILHITE, D. A. (1994): *Preparing for Drought: A Guidebook for Developing Countries*. Diane Publishing, 78 s.
- YANG, T., CUI, T., XU, C. Y., CIAIS, P., SHI, P. (2017): Development of a new IHA method for impact assessment of climate change on flow regime. *Global and Planetary Change*, 156, s. 68-79.
- ZARGAR, A., SADIQ, R., NASER, B., KHAN, F. I. (2011): A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, s. 333-349.
- ZEHE, E., GRÄFF, T., MORGNER, M., BAUER, A., BRONSTERT, A. (2010): Plot and field scale soil moisture dynamics and subsurface wetness control on runoff generation in a headwater in the Ore Mountains. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), s. 873-889.

8.2 Datové a internetové zdroje

- ADDINSOFT INC.: XLSTAT statistical and data analysis solution. Boston, USA. [online]. [cit. 3. 2. 2019] Dostupné z: <https://www.xlstat.com/en/download>
- ARCDATA PRAHA: ArcČR 500 - digitální geografická databáze, verze 3.3. [online]. [cit. 28. 10. 2018]. Dostupné z: www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500
- CARNIFLORA.CZ ©: Národní přírodní rezervace Velký močál. [online]. [cit. 13. 2. 2019]. Dostupné z: <http://www.carniflora.cz/?velky-mocal,65>
- CENIA - ČESKÁ INFORMAČNÍ AGENTURA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ: Prohlížecké služby: Topografická mapa ČR, Mapa potenciální přírodní vegetace ČR. [online]. [cit. 2. 2. 2019]. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/wms/>
- CLIMATE-DATA.ORG: Climate diagrams: Kalek, Klingenthal, Přebuz. [online]. [cit. 4. 2. 2019]. Dostupné z: <https://en.climate-data.org>
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA: WMS Geologická mapa GeoČR50. [online]. [cit. 1. 1. 2019]. Dostupné z: <http://mapy.geology.cz/arcgis/services/Geologie/geocr50/MapServer>
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: Datová řada denních průtoků profilu 2091 – Rolava, Chaloupky.
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2018): Hydrologické sucho. [online]. [cit. 21. 12. 2018]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO>.
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (2019): Sucho v roce 2018, předběžné hodnocení. [online]. [cit. 30. 3. 2019]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2019/Predbezna_zprava_o_suchu_2018.pdf
- ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘIČSKÝ A KATASTRÁLNÍ: Prohlížecké služby WMS – ZM10 a Ortofoto. [online]. [cit. 1. 1. 2019]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz>
- ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘIČSKÝ A KATASTRÁLNÍ: Základní báze geografických dat ZABAGED [online]. [cit. 1. 1. 2019]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz>
- DEUTSCHER WETTERDIENST: Climate Data Center. [online]. [cit. 2. 1. 2019]. Dostupné z: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: Corine Land Cover database [online]. [cit. 1. 1. 2019]. Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- HAVLOVÁ N. (2019): Kraslice se bojí sucha. Chtějí malou přehradu. NAŠE VODA: informační portál o vodě. [online]. [cit. 29. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/kraslice-se-boji-sucha-chteji-malou-prehradu/>
- LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE SACHSEN: Datenportal iDA [online]. [cit. 1. 1. 2019] Dostupné z: <https://umwelt.sachsen.de/umwelt46037.htm?>

- KINŠT, P. (2018): Údolí Načetínského potoka mezi Kalkem a Gabrielinou Hutí. In: Wikipedia [online]. [cit. 21. 12. 2018]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/30/Načetínský_potok_2018-11-10_Údolí.jpg
- MĚSTSKÝ ÚŘAD KRASLICE (2018): Veřejná vyhláška. Opatření obecné povahy při nedostatku vody ze dne 30. 7. 2018. [online]. [cit. 29. 3. 2019]. Dostupné z: http://www.kraslice.cz/e_download.php?file=data/uredni_deska/obsah2547_39.pdf&original=304.pdf
- OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS ©: BaseMap World Topographic Map.
- STRAKTUR (2014): Verlauf der Zwota in Oberzwota. CC BY 3.0. In: Wikipedia [online]. [cit. 12. 2. 2019]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31307953>
- THE NATURE CONSERVANCY (2009): Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1. User's Manual. [online]. [cit. 13. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.conservationgateway.org>
- U. S. GEOLOGICAL SURVEY: Publications, Techniques and Methods. [online]. [cit. 15. 2. 2019] Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm4a7/TM4A7/ktinstall.zip>
- VÝZKUMNÝ ÚSTAV SILVA TAROUČY PRO KRAJINU A OKRASNÉ ZAHRADNICTVÍ, v. v. i.: Databáze Topolanduse. Mapy využití krajiny ve formátu ESRI shapefile v souřadnicovém systému S-JSTK pro období let 1836-52, 1876-80, 1953-57, 1988-1996, 2002-2006.
- VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA, v. v. i.: Digitální báze vodohospodářských dat DIBAVOD. [online]. [cit. 1. 1. 2019] Dostupné z: <http://dibavod.cz>

9 Seznam příloh

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Meandry Svatavy u obce Oberzwota	13
Obrázek 2: Průběh výskytu různých typů sucha	15
Obrázek 3: Schéma šíření sucha v antropocénu	17
Obrázek 4: Hypotetické schéma rozlišení různých příčin sucha	17
Obrázek 5: Obecný diagram metody prahové hodnoty	19
Obrázek 6: Časový vývoj podílu oblastí zasažených suchem na Zemi dle indexu PDSI	22
Obrázek 7: Vývoj globální průměrné hodnoty PDSI a podílu oblastí zasažených suchem	23
Obrázek 8: Trendy průměrných ročních průtoků v Evropě.....	30
Obrázek 9: Trendy průměrných měsíčních průtoků v Evropě, část první.....	30
Obrázek 10: Trendy průměrných měsíčních průtoků v Evropě, část druhá.....	31
Obrázek 11: Přehledová mapa vybraných klimatologických a srážkoměrných stanic	36
Obrázek 12: Přehledová mapa zájmových povodí.....	42
Obrázek 13: Nadmořské výšky zájmových povodí.....	44
Obrázek 14: Hypsografické křivky zájmových povodí.....	44

Obrázek 15: Sklonitostní poměry zájmových povodí.....	46
Obrázek 16: Údolí Načetínského potoka mezi Kalkem a Gabrielinou Hutí	47
Obrázek 17: Orientace svahů v zájmových povodích	47
Obrázek 18: Půdních typy v zájmových povodích	49
Obrázek 19: Lokalita bývalé osady Chaloupky ve 40. letech 20. století a nyní	52
Obrázek 20: Změny krajinného pokryvu v povodí horní Svatavy	53
Obrázek 21: Změny krajinného pokryvu v povodí horní Rolavy	53
Obrázek 22: Povodí horní Rolavy poblíž profilu Chaloupky.....	54
Obrázek 23: Velký močál poblíž bývalého dolu Sauersack	54
Obrázek 24: Změny krajinného pokryvu v povodí Načetínského potoka	54
Obrázek 25: Modelové klimadiagramy obcí Klingenthal a Přebuz	55
Obrázek 26: Modelový klimadiagram pro obec Kalek.....	56
Obrázek 27: Podvojně součtové čáry Hr a Qr pro jednotlivá povodí	61
Obrázek 28: Počet dnů s výskytem Q355 na jednotlivých profilech	62
Obrázek 29: Počet dnů s výskytem Q355 v teplejší polovině roku	63
Obrázek 30: Počet dnů s výskytem Q355 v chladnější polovině roku	63
Obrázek 31: Standardizované roční nedostatkové objemy	64
Obrázek 32: Podíl nedostatkových objemů na odtokové výšce	64
Obrázek 33: Měsíční podíly Q355 v období 1967-2018	65
Obrázek 34: Měsíční podíly nedostatkových objemů v období 1967-2018.....	65
Obrázek 35: Měsíční podíly Q355 v období 1967-1992	66
Obrázek 36: Měsíční podíly nedostatkových objemů v období 1967-1992.....	66
Obrázek 37: Měsíční podíly Q355 v období 1993-2018	67
Obrázek 38: Měsíční podíly nedostatkových objemů v období 1993-2018.....	67
Obrázek 39: Měsíční podíly jednodenních minim v období 1967-1992.....	68
Obrázek 40: Měsíční podíly jednodenních minim v období 1993-2018.....	68
Obrázek 41: Juliánský den výskytu ročních minimálních průtoků	68
Obrázek 42: Hodnoty LFI pro jednotlivé profily v letech 1967-2018.....	69
Obrázek 43: Hodnoty průměrného sedmidenního minima v letech 1967-2018	69
Obrázek 44: Hodnoty BFI pro jednotlivé profily v letech 1967-2018	70
Obrázek 45: Chod Qd na Svatavě a Načetínském potoce v druhé polovině roku 2018.....	71
Obrázek 46: Chod teplot, srážek a výšek sněhu pro měsíc duben na stanici Carlsfeld.....	75
Obrázek 47: Chod Qs pro teplejší polovinu roku na vybraných profilech	76
Obrázek 48: Chod dubnových Qmin na stanici Rothenthal v letech 1967-2018.....	82
Obrázek 49: Chod dubnových Qmin na stanici Rothenthal v letech 1929-2018.....	82
Obrázek 50: Průměrné podzimní teploty na vybraných klimatologických stanicích.....	90

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vybraných hydrologických stanic	35
Tabulka 2: Přehled vybraných srážkoměrných a klimatologických stanic	36
Tabulka 3: Základní hydrografické údaje o zájmových povodích	43
Tabulka 4: Geomorfologické členění zájmového území	45
Tabulka 5: Orientace svahů a jejich podíly na rozloze povodí.....	48
Tabulka 6: Plochy a procentuální podíly půdních typů ve vybraných povodích	50
Tabulka 7: Procentuální podíly ploch typů krajinného pokryvu	52
Tabulka 8: Měsíční, roční a sezónní průměry vybraných klimatologických stanic	56
Tabulka 9: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady T_m , T_r a T_s	57
Tabulka 10: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady H_m , H_r a H_s	58
Tabulka 11: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady S_m , S_r a S_s	59
Tabulka 12: Výsledky Pettittova a SNHT testu pro řady Q_m , Q_r a Q_s	60
Tabulka 13: Průměrné datum výskytu Q_{min} v obou polovinách sledovaného období.....	68
Tabulka 14: Nejsušší teplejší poloviny roků dle jednotlivých ukazatelů.....	71
Tabulka 15: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady T_m , T_r a T_s	72
Tabulka 16: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady H_m , H_r a H_s	73
Tabulka 17: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady S_m , S_r a S_s	74
Tabulka 18: Výsledky KTRL a MK-testu pro řady Q_m , Q_r a Q_s	76
Tabulka 19: Výsledky KTRL a MK-testu pro měsíční, roční a sezónní Q_{min}	77
Tabulka 20: Výsledky MK-testu pro řady nedostatkových objemů dle Q_{355}	78
Tabulka 21: Výsledky MK-testu pro řady nedostatkových objemů dle Q_{355m} a Q_{355s}	79
Tabulka 22: Výsledky KTRL a MK-testu pro jednotlivé ukazatele sucha	80
Tabulka 23: Výsledky KTRL a MK-testu různě dlouhých řad Q_m , Q_r a Q_s	81
Tabulka 24: Výsledky KTRL a MK-testu různě dlouhých řad Q_{min}	82
Tabulka 25: Výsledky MK-testu různě dlouhých řad nedostatkových objemů	83
Tabulka 26: Kendallův koeficient pořadové korelace τ_b pro T_m a S_m	84
Tabulka 27: Kendallovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Klingenthal).....	85
Tabulka 28: Kendallovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Chaloupky)	86
Tabulka 29: Kendallovo τ_b pro průtokové a klimatické řady (Rothenthal).....	86