Přírodovědecká fakulta UK

Ústav výzkumu globální změny AV ČR

Ústav pro hydrodynamiku AV ČR

Projekt TAČR SS05010124

Hodnocení vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii a klima v Krkonošském národním parku s využitím dálkového průzkumu Země a hydrologického modelování

Metodika pro monitoring vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii s využitím dálkového průzkumu Země a hydrologického modelování

Autorský kolektiv: Lucie Kupková, Markéta Potůčková, Lucie Červená, Alex Šrollerů, Jakub Lysák, Milada Matoušková, Vojtěch Vlach, Zuzana Lhotáková, Eva Neuwirthová, Jana Albrechtová, Lucie Homolová, Petr Lukeš, Vojtěch Bárta, Václav Šípek, Lukáš Vlček, Marek Purm

Praha, Brno březen 2025

Obsah

1. Úvod ... 3
1.1 Cíle metodiky ... 4
2. Hodnocení změn krajinného pokryvu s využitím volně dostupných družicových dat (s důrazem na změny lesních porostů) ... 5
2.1 Cíle ... 5
2.2 Využitá data ... 5
2.3 Navržené metody ... 6
2.3.1 Předzpracování dat: tvorba bezoblačných mozaik ... 7
2.3.2 Legenda ... 8
2.3.3 Klasifikace ... 9
2.3.4 Postklasifikační úpravy ... 11
2.3.5 Hodnocení přesnosti klasifikace ... 14
2.3.6 Integrated forest z-score a index disturbance ... 14
2.3.7 Analýzy časové řady ... 16
2.4 Závěr ... 17
2.5 Přílohy ... 18
3. Hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů ... 27
3.1 Úvod ... 27
3.2 Cíle ... 27
3.3 Zájmové území ... 27
3.4 Zdroje dat ... 28
3.5 Metody / metodický postup ... 29
4.5.1 Grafické metody pro analýzu změn srážko-odtokového režimu ... 29
3.5.2 Statistické metody pro detekci trendů v hydroklimatických datových řadách ... 31
3.6 Výsledky/implementace: ukázka aplikace MK-testu na hydroklimatické datové řady ... 32
4.6.1 Srážkové úhrny ... 32
3.6.2 Teplota vzduchu ... 34
3.6.3 Hydrologická data ... 36
3.6.4 Hodnocení hydrologických a klimatických extrémů ... 38
3.7 Závěr ... 42
4. Hydrologické modelování jako nástroj pro sledování změn krajinného pokryvu na hydrologický režim území ... 44

4.1 Úvod 44
4.2 Cíle 44
4.3 Využitá data 44
4.4 Navržený metodický postup 47
4.4.1 Model SWAT 47
4.5 Analýza výsledků 59
4.6 Implementace: Případová studie horní Úpy a Čisté 61
4.7 Závěr 65
5. Implementace metodiky: Aplikace pro automatizované zpracování dat DPZ a vyhodnocení hydrologických poměrů 66
5.1 Cíl a popis software 66
5.2 Uživatelská dokumentace 67
5.2.1 Downloader 67
5.2.2 Indexer 69
5.2.3 Classifier 70
5.2.4 TS Analyzer 71
5.2.5 ts_analyzer_area 71
5.2.6 ts_analyzer_pnt 72
5.2.7 LC2hydro 73
5.3 Manuál 74
6. Závěr 81
7. Literatura a zdroje 82

1. Úvod

Změny krajinného pokryvu, zdravotního stavu vegetace a vývoj hydrologických charakteristik představují zásadní faktory ovlivňující stav a fungování chráněných území a krajiny obecně. V prostředí horských oblastí, jako je Krkonošský národní park (KRNAP), mají tyto změny výrazné dopady na přírodní procesy, včetně lokálního klimatu, srážko-odtokového režimu, koloběhu živin či ekosystémových služeb. Pro efektivní řízení a ochranu těchto území je proto nezbytné sledovat dynamiku těchto jevů nejen s vysokým prostorovým, ale i časovým rozlišením.

V posledním desetiletí se jako klíčový nástroj pro sledování těchto změn uplatňuje dálkový průzkum Země (DPZ), který díky rozvoji technologií a otevřenému přístupu k datům umožňuje efektivní monitoring rozsáhlých území. DPZ poskytuje informace o stavu a vývoji vegetačního pokryvu, včetně identifikace disturbancí, jako jsou kůrovcové kalamity, větrné polomy nebo suchem způsobený ústup porostů. V kombinaci s hydrologickými modely pak umožňuje simulovat dopady těchto změn na vodní bilanci, odtokové procesy i výskyt extrémních jevů.

Předkládaná metodika vznikla jako výsledek řešení projektu TAČR SS05010124 a jejím cílem je systematicky popsat doporučené postupy a analytické nástroje pro hodnocení vlivu změn krajinného pokryvu na hydrologické a klimatické charakteristiky v zájmovém území KRNAP. Kromě využití pro konkrétní území je metodika navržena tak, aby byla snadno přenositelná i do jiných chráněných oblastí nebo regionů s obdobnou datovou základnou. Přínosem metodiky je také její otevřenost vůči kombinaci různých typů dat a metod.

Struktura metodiky vychází z logické návaznosti jednotlivých analytických kroků. První část (kapitola 2) se věnuje hodnocení změn krajinného pokryvu na základě volně dostupných družicových dat Landsat a Sentinel-2, včetně popisu klasifikace, tvorby časových řad a spektrálních indexů. Druhá část metodiky (kapitola 3) se soustředí na analýzu hydrologických a klimatických proměnných, včetně identifikace extrémních událostí a jejich trendů. Další část (kapitola 4) pak integruje tyto poznatky v rámci využití hydrologického modelu SWAT, na jehož základě lze simulovat dopady změn krajinného pokryvu na hydrologii zájmového území. Závěrečná část představuje softwarový nástroj – *Aplikaci pro automatizované zpracování dat DPZ a vyhodnocení hydrologických poměrů* – vyvinutý v rámci projektu pro automatizované zpracování a vizualizaci výstupů.

Výsledná metodika tak představuje komplexní rámec, který propojuje informace o dynamice vegetačního pokryvu s hydrologickými procesy. Jejím cílem není pouze vytvořit nástroj pro monitoring, ale také poskytnout oporu pro predikci vývoje a podporu rozhodování při správě chráněných území. Kromě Správy KRNAP může metodika najít uplatnění i v dalších národních parcích, CHKO nebo ve výzkumných a akademických institucích zabývajících se aplikacemi DPZ a hydrologie v krajině.

V rámci projektu TAČR vznikla také dílčí metodika, která se zabývá analýzou zdravotního stavu lesních porostů pomocí letecké hyperspektrální spektroskopie a krátkodobých trendů spektrálních ukazatelů. Tato metodika využívá komplexní a složitější nástroje a do značné míry data, která nejsou volně dostupná. Pro případné využití je metodika k dispozici na tomto odkazu: https://www.lucc4hydro.cz/wp-content/uploads/2025/02/V22_O_dilci_metodika_spektroskopie-3.pdf

1.1 Cíle metodiky

Cílem metodiky je popsat a standardizovat postupy pro efektivní monitoring a hodnocení vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii a klima v chráněných územích s využitím dat dálkového průzkumu Země (DPZ) a hydrologického modelování. Metodika poskytuje návod k získání, předzpracování, klasifikaci a analýze dat a zároveň přináší návrhy na vhodné analytické postupy včetně interpretace výsledků a vizualizace v podobě mapových a grafických výstupů. Pro implementaci metodiky byl navržen software, jehož smyslem je usnadnit praktickou realizaci vybraných kroků metodiky s minimalizací nutných interaktivních zásahů uživatele.

Metodika je primárně určena pro potřeby Správy KRNAP, ale její struktura a modularita umožňují širší využití i v jiných chráněných oblastech ČR i zahraničí. Důraz je kladen na praktickou využitelnost, kompatibilitu s běžně dostupným softwarem a možnost aplikace i bez pokročilé expertízy v oblasti DPZ a hydrologického modelování.

Dílčí cíle:

- Poskytnout strukturovaný metodický rámec pro monitoring změn krajinného pokryvu pomocí dat DPZ, pro hodnocení trendů hydroklimatických proměnných a pro hydrologické modelování.
- Definovat doporučené datové zdroje a metodické kroky pro: 1) monitoring změn krajinného pokryvu pomocí DPZ, 2) hodnocení trendů hydroklimatických proměnných.
- Ukázat možnosti propojení výstupů analýzy dat DPZ s hydrologickým modelováním a simulací dopadů změn krajinného pokryvu na odtokové režimy a mikroklima.
- Vytvořit uživatelsky přívětivý nástroj – softwarovou aplikaci – kombinující geoinformační, spektrální a hydrologické analýzy za účelem simulace možných dopadů změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii, který přispěje k udržitelnému managementu v území a podpoří rozhodování v ochraně přírody.
- Zpracovat metodiku tak, aby byla přenositelná do jiných území a na další typy krajinných ekosystémů.

2. Hodnocení změn krajinného pokryvu s využitím volně dostupných družicových dat (s důrazem na změny lesních porostů)

2.1 Cíle

Tato část metodiky popisuje postupy zpracování volně dostupných družicových dat vedoucí k vytvoření časové řady datových vrstev s prostorovým rozlišením 30 m obsahujících:

1. klasifikaci krajinného pokryvu (land cover) dle navržené legendy,
2. indikátorů zdravotního stavu lesa založených na znalosti spektrální odezvy lesní vegetace.

Dále ukazuje možnosti analýzy a interpretace vytvořených časových řad. Využitelnost metodiky a konkrétní implementace jsou dokumentovány na příkladu území povodí horní Úpy a horní Čisté.

2.2 Využitá data

Metodika je postavena na zpracování volně dostupných družicových dat vysokého prostorového rozlišení programů Landsat (Landsat, 2023) a Copernicus (Copernicus, 2023). Specificky se zaměřuje na multispektrální snímky pokrývající viditelné (RGB), blízké (NIR) a střední infračervené (SWIR) pásmo pořízené senzory uvedenými v tabulce 1. Data programu Landsat jsou volně dostupná např. z aplikace USGS EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) a data Sentinel-2 programu Copernicus z aplikace Copernicus Browser (https://browser.dataspace.copernicus.eu/).

Tabulka 1. Přehled družicových dat využitých pro tvorbu metodiky

<table>
<tr><th>Družice</th><th>Senzor</th><th>Prostorové rozlišení</th><th>Použitá spektrální pásma*</th><th>Dostupnost</th></tr>
<tr><td>Landsat 5</td><td>Thematic Mapper (TM)</td><td rowspan="3">30 m</td><td rowspan="2">RGB (3, 2, 1)
NIR (4)
SWIR (5, 7)</td><td>1984–2013</td></tr>
<tr><td>Landsat 7</td><td>Enhanced Thematic Mapper + (ETM+)</td><td>1999–2024</td></tr>
<tr><td>Landsat 8</td><td>Operational Land Imager (OLI)</td><td>RGB (4, 3, 2)
NIR (5), SWIR (6, 7)</td><td>od 2013</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sentinel-2</td><td rowspan="2">Multi-spectral Instrument (MSI)</td><td>10 m</td><td>RGB (4, 3, 2), NIR (8)</td><td rowspan="2">od 2015</td></tr>
<tr><td>20 m</td><td>RedEdge (5, 6, 7), NIR (8A), SWIR (11, 12)</td></tr>
</table>

* vlnové délky jednotlivých spektrálních pásem jsou dostupné z webových stránek příslušných senzorů TM, ETM+, OLI a MSI.

Ke sběru trénovacích dat pro řízenou klasifikaci družicových snímků byla použita ortofota dostupná z webové mapové služby Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK, 2023) a Správy KRNAP (KRNAP, 2023). Jako doplňková data pro klasifikaci nebo vývoj metodiky byl využit digitální výškový model SRTM (USGS, 2023), normalizovaný digitální model povrchu (nDSM) z let 2022 (LiDAR) a 2018 (letecké měřické snímkování) a vrstva lesních dřevin webové mapové služby Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL, 2023) (tabulka 2).

Tabulka 2. Přehled doplňkových dat využívaných pro tvorbu metodiky

Data	Rok pořízení	Rozlišení*	Zdroj
Ortofoto	1997–2000	0,50 m	ČÚZK, KRNAP
	2001–2008	0,50 m	
	2009–2015	0,25 m	
	2016–2022	0,20 m	
nDSM	2018	1 m+	ÚHÚL
	2022	1 m+	TAČR SS05010124
Lesní dřeviny	2017, 2019, 2022	-	ÚHÚL
SRTM DEM	2000	30 m	USGS

* v letech 1997 a 2000 snímky panchromatické, dále RGB, v roce 2022 dostupné i CIR snímky

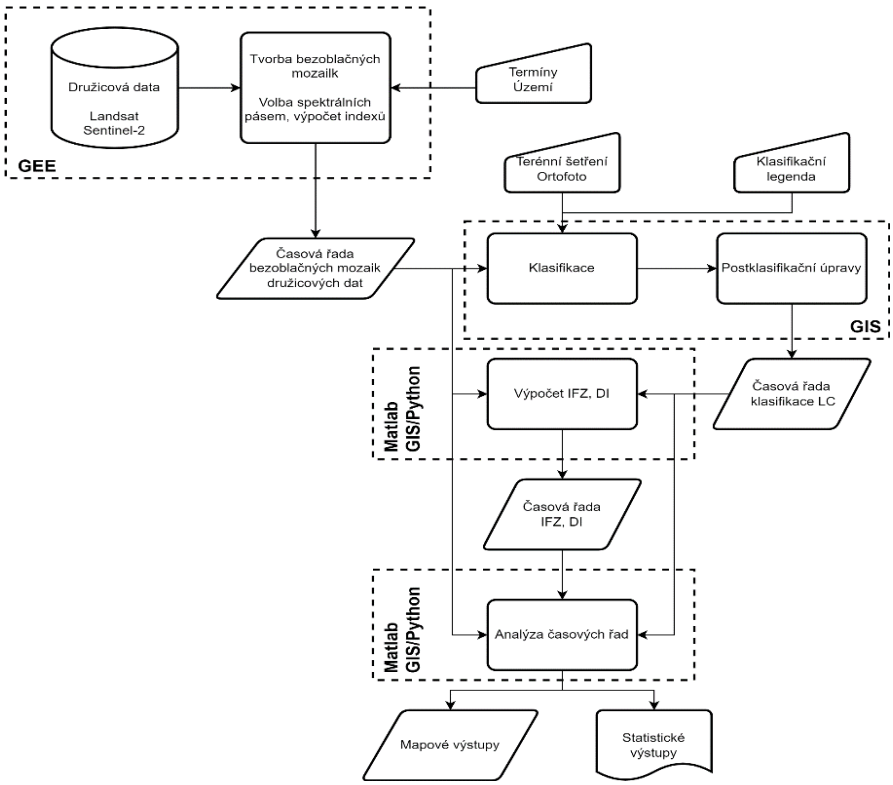
+ pro účel vývoje metodiky data byla data převzorkována na 10 m

V roce 2022 proběhlo terénní šetření, při němž byla sbírána validační data zejména pro kategorie přechodová stadia lesa, listnatý a smíšený les (viz sekce Legenda).

2.3 Navržené metody

Předkládaná metodika sestává ze čtyř základních kroků, a to výběr a předzpracování časové řady družicových dat, klasifikace, výpočet spektrálních indexů, analýza a interpretace časových řad. Zpracovatelský postup včetně všech použitých vstupů je schematicky znázorněn na obrázku 1. Pro ověření a implementaci byly využity softwarové nástroje Google Earth Engine (GEE), ArcGIS Desktop a ArcGIS Pro. Pro výpočet spektrálních indexů a některé z analýz byly vytvořeny skripty pro MATLAB a Python.

Obrázek 1. Navržený postup zpracování časové řady družicových dat za účelem klasifikace krajinného pokryvu a analýzy stavu lesních porostů. Softwary Google Earth Engine (GEE), ArcGIS Desktop a ArcGIS Pro a skripty pro MATLAB a Python byly použity v provedené implementaci metodiky.



2.3.1 Předzpracování dat: tvorba bezoblačných mozaik

Cílem předzpracování dat je vytvořit radiometricky homogenní časovou řadu snímků souvisle pokrývajících zájmové území. Jelikož se předpokládá přímé porovnávání radiometrických hodnot v časové řadě či z nich odvozených indexů, je vhodnější používat snímky po geometrické a radiometrické korekci (tzv. úroveň L2) obsahující hodnoty odrazivosti na zemském povrchu.

Změny krajinného pokryvu, resp. vývoj lesního porostu, mohou být sledovány s různou frekvencí a v různě dlouhých časových intervalech. Navržená metodika směřuje ke sledování meziročních změn. Z důvodu omezení detekce změn způsobených nikoliv meziroční změnou vegetace, ale změnou jejich fenologické fáze, je třeba vybrat snímky přibližně ze stejného dne v roce, resp. z téhož úseku vegetačního cyklu.

Zásadním problémem při zpracování optických dat je přítomnost oblačnosti, která často znemožňuje použití celé scény družicových dat ve zvoleném termínu. Při sledování meziročních změn lesní vegetace se proto přistupuje k tvorbě mozaik složených z pixelů bez oblačnosti, které ale pocházejí z různých snímků stanoveného časového intervalu (např. 1.7. – 31.8. daného roku). Pro výběr validních pixelů lze využít tzv. „pásmo kvality“ L2 produktů (dále QB), v němž jsou na základě klasifikace označeny pixely s oblačností, pixely zastíněné oblačností, pixely mimo rozsah radiometru atd. (Landsat QA, 2023; Sentinel-2 Level 2A, 2023).

Implementace

V rámci tvorby metodiky byl implementován **přístup využívající medián** (či zvolený percentil) **validních pixelů** v prostředí GEE na datech Landsat z let 1985–2022 a Sentinel-2 v časovém rozmezí 2017–2022 (spodní hranice je dána možnostmi GEE v době implementace na podzim 2022). Primárně byla použita data odrazivosti na zemském povrchu (L2). Data bez atmosférické korekce (L1) byla použita pro výpočet Tasseled cap transformace (viz níže).

V rámci každé vegetační sezóny (červen–září, DOY 150–270) byly v dostupných scénách Landsat/Sentinel-2 radiometrické hodnoty každého pixelu uspořádány vzestupně s označenými nevalidními hodnotami na konci řady. Následně byl zvolen percentil (blízký mediánu), který stanovil hodnotu vstupující do vytvářeného kompozitu. V případě Landsatu 5 byla pro některé roky nutná kombinace s daty Landsat 7. Roky, kde bezoblačného kompozitu nebylo možné v zájmovém území dosáhnout, byly vynechány, resp. nahrazeny dvou či tříletým kompozitem, v případě delší než roční mezery. Přehled o vytvořené časové řadě, použitých datech a parametrech je v tabulce 3. Ukázka podílu validních pixelů v časové řadě pokrývající vegetační sezónu vybraných let je na obrázku 2.

Výsledný kompozit obsahoval vybraná původní spektrální pásma daného senzoru a vypočtené spektrální indexy vhodné pro sledování stavu vegetace – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDII (Normalised Difference Infrared Index), NBR2 (Normalised Burn Ratio) a hodnoty Greenness, Brightness a Wetness Tasselled Cap transformace (TCG, TCB, TCW). Pro výpočet TC byly použity snímky Landsat a Sentinel-2 obsahující odrazivost na povrchu atmosféry a koeficienty dle Crist a Cicone (1984) pro Landsat 5, Baig et al. (2014) pro Landsat 8 a Shi, Xu (2019) pro Sentinel-2. Jako další vrstva byly přidány výšky z modelu SRTM. Struktura a rozsah výsledných dat (ve formátu tif, souřadnicový systém WGS 84/UTM 33N, kód EPSG 32633) je na obrázku 3.

Tabulka 3. Shrnutí časových horizontů, v nichž bylo možné vyhotovit roční bezoblačné kompozity družicových dat, resp. souvislé datové vrstvy krajinného pokryvu, a v nichž byla dostupná doplňková data pro klasifikaci (označeno křížky). Oranžové podbarvení označuje období, kdy byl použit dvouletý

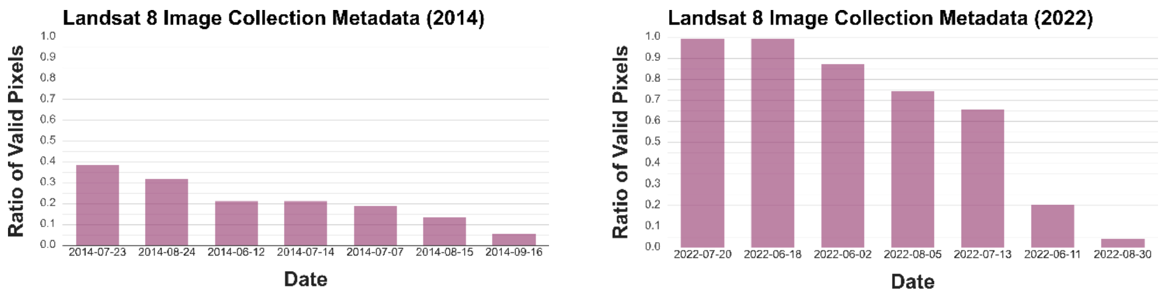
nebo tříletý kompozit (pouze ze snímků vegetační sezóny). V letech 1999 až 2002 a v roce 2006 byly kombinovány scény senzorů TM (Landsat 5) a ETM+ (Landsat 7). Percentil L5/L8 označuje percentil ve vzestupně uspořádané řadě radiometrických hodnot pixelu zvolený pro vytvoření bezoblačného kompozitu z dat Landsat. Pro Sentinel-2 byl použit vždy medián (percentil 50). Dolní polovina tabulky shrnuje datové vstupy použité pro sběr trénovacích a validačních množin.

Datové vstupy pro analýzu krajinného pokryvu

rok		1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Družicová data	L5	x	x		x		x	x	x		x	x		x		x	x	x	x	x
	L7															x	x	x	x	
	L8																			
	S-2																			
Percentil L5/L8		40	40		40		40	40	50		40	40		40		60	40	40	60	40
Ortofoto														x			x	x		
nDSM																				
Terénní šetření																				
Lesní dřeviny																				

rok		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Družicová data	L5	x	x	x	x		x	x	x											
	L7			x																
	L8											x		x		x	x	x		x
	S-2														x	x	x	x	x	x
Percentil L5/L8		40	40	50	40		40	40	40			50		50		50	50	50		50
Ortofoto		x	x		x			x	x			x		x		x		x		x
nDSM																x				x
Terénní šetření																				x
Lesní dřeviny															x		x			x

Obrázek 2. Podíl validních pixelů (bez oblačnosti, stínů) ve snímcích Landsat seřazených vzestupně dle podílu oblačnosti v zájmovém území pro vegetační sezónu 2014 (bezoblačný kompozit se nepodařilo vytvořit) a sezónu 2022.



Obrázek 3. Struktura vrstev výsledných bezoblačných kompozitů a rozsah jejich hodnot.

```
Poradi spektralnich pasem ve vyslednych kompozitech:
L5+L7 - B1,B2,B3,B4,B5,B7,TCB,TCG,TCW,NDVI,NDII,NBR2,SRTM
L8    - B2,B3,B4,B5,B6,B7,TCB,TCG,TCW,NDVI,NDII,NBR2,SRTM
S2    - B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B8A,B11,B12,TCB,TCG,TCW,NDVI,NDII,NBR2,SRTM

Hodnoty v pásmech:
B*                      reflectance * 10000      [0, 10000]
TCB, TCG, TCW           Taseled cap * 10000      [0, 10000]
NDVI, NDII, NBR2        index * 10000            [-10000, 10000]
SRTM                    n. vyska v metrech       [~550, ~1600]
```

2.3.2 Legenda

Návrh tříd pro klasifikaci vychází z požadavků legendy pro hydrologický model SWAT. Tato legenda do jisté míry vychází z land cover databáze CORINE. Na základě neřízené klasifikace provedené na datech Landsat 8 a Sentinel-2 v roce 2022 a 2018 bylo rozhodnuto o rozdělení třídy „jehličnatý les“ na „zapojený“ a „nezapojený“ (prosvítající půdní pokryv alespoň z 25 %) a „jehličnatý les odumřelý“. Ve třídě „kleč“ byla vyčleněna „kleč s příměsí smrku/jeřábu“, která se jinak výrazně mísila se třídou „přechodová stadia lesa a křoviny“. Tyto třídy lze rozlišit *in-situ* a z barevných ortofot, ale je problematické je vizuálně rozpoznat v případech, kdy trénovací množiny pro klasifikaci jsou definovány pouze na základě dat Landsat. Tam, kde bylo možné pro tyto třídy trénovací množiny

vytvořit, byly klasifikovány, ale v rámci zachování jednotné klasifikační legendy v celé časové řadě byly s výjimkou kategorie „jehličnatý les odumřelý“ následně zase spojeny do tříd „jehličnatý les“ a „kosodřevina“.

Výsledná klasifikační legenda je tvořena následujícími třídami:

Kód třídy	Třída krajinného pokryvu
100	Zástavba a komunikace
200	Louky (včetně přírodních), pastviny
310	Listnatý les
320	Jehličnatý les
323	Jehličnatý les odumřelý
330	Smíšený les
340	Přechodová stadia lesa a křoviny
350	Holiny, oblasti s nízkou vegetací
400	Kosodřevina
500	Rašeliniště
600	Skály, kamenná moře
700	Vodní plochy a toky

2.3.3 Klasifikace

Jako příznaky pro klasifikaci byly použity hodnoty odrazivosti v dílčích spektrálních pásmech a spektrální indexy, jak jsou uvedeny na obrázku 3. V první fázi byl aplikován neřízený přístup, který sice vymezil spektrálně homogenní plochy, ale jejich přiřazení do požadované klasifikační legendy se ukázalo být problematické. Z metod řízené klasifikace byl na základě předchozích zkušeností (Kupková et al., 2023) zvolen přístup „náhodných stromů“ (Random Forest, RF) z následujících důvodů. Jedná se o neparametrický, robustní klasifikátor, do něhož mohou vstupovat data rozdílných škál hodnot (v našem případě indexy, odrazivost, nadmořské výšky), podává informaci o významu jednotlivých příznaků (prediktorů) v klasifikaci, požadavek na množství trénovacích dat je nižší než v případě konvolučních neuronových sítí.

Základní metodou pro sběr trénovacích dat byla vizuální interpretace barevných (RGB, popř. CIR) ortofot, jejichž rozlišení (0,2 až 0,5 m) umožňuje spolehlivě určit výše stanovené třídy krajinného pokryvu. V aktuálním časovém horizontu je žádoucí hůře interpretovatelné oblasti doplnit terénním šetřením. nDSM je vhodnou datovou vrstvou pro odlišení růstových stadií vegetace a stromové vegetace na horní hranici lesa. V dostupné datové sadě byla k dispozici pouze v letech 2018 a 2022 a byla použita pro vymezení tříd „přechodová stadia lesa“ a „jehličnaté lesy“. Digitální výškový model STRM byl důležitým příznakem pro rozpoznání spektrálně podobných tříd „jehličnatý les“ a kosodřevina. Jeho využití vychází z poznatku výškové stupňovitosti vegetace v horských oblastech. Vizuální interpretace je časově náročná, nicméně se v případě existence ortofot ukázala být spolehlivější metodou oproti přenesení natrénovaného klasifikátoru mezi dílčími lety, což je z teoretického hlediska relevantní postup s ohledem na radiometricky korigovaná data.

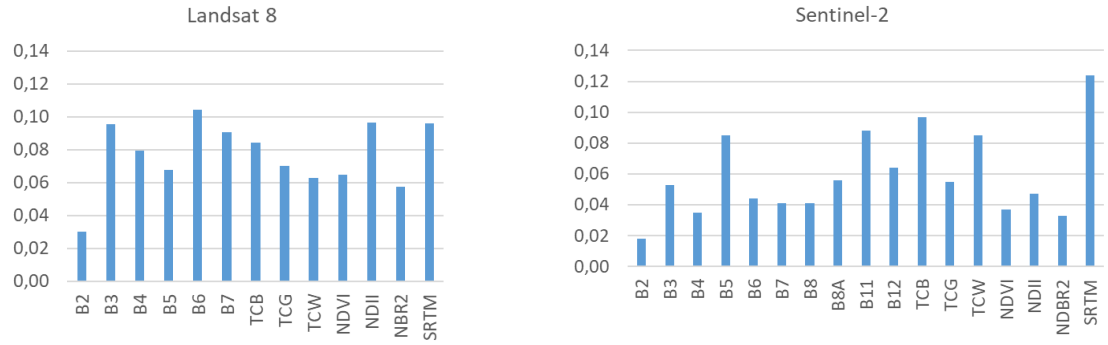
Implementace

Trénovací data pro všechny třídy byla nejprve zkušebně vytvořena nad ortofoty z let 2022 a 2018. Jako doplňková data pro trénování byl použit nDSM pro odlišení mladého lesa (do 5 m, kategorie 340) a vrstva lesních dřevin webové mapové služby ÚHÚL. V roce 2022 navíc proběhlo terénní šetření pro upřesnění některých kategorií (zejména přechodová stadia lesa).

Sběr trénovacích množin od roku 1997 proběhl vizuální interpretací dostupných ortofot v kombinaci, popř. kontrolou nad daty Landsat. U snímků z let 1985, 1988, 1991 a 1994 byly trénovací množiny sbírány jen interpretací snímků Landsat. V letech 1986, 1990 a 1992 byl přenesen klasifikátor z nejbližšího roku. Třída zástavba a komunikace byla vygenerována z Open Street Map a použita pro všechny časové horizonty. Stejně tak třída vodní plochy a toky, kterou ve 30 m rozlišení dat Landsat tvoří jen několik pixelů, byla zvektorizována nad ortofotem a vložena do výsledné klasifikace. Zmíněné vrstvy lze převzít i z jiných relevantních podkladů, jako je Základní báze geografických dat (ZABAGED, ČÚZK).

Pro klasifikaci byl použit algoritmus Random Trees (implementace v ArcGIS Desktop v10). Nad vytvořenými bezoblačnými kompozity Landsat 8 a Sentinel-2 s přidanými vrstvami spektrálních indexů byl sledován význam jednotlivých příznaků pro klasifikaci. Z grafů na obrázku 4 stojí za zmínku význam nadmořské výšky terénu jako důležitého příznaku provedené klasifikace. Dále byly testovány parametry klasifikátoru, které byly stanoveny na 300 stromů (number of trees) a maximální hloubku stromu (max tree depth) 60.

Obrázek 4. Důležitost spektrálních pásem, odvozených indexů a nadmořské výšky jako příznaků pro klasifikaci Random Trees pro data Landsat 8 a Sentinel-2, rok 2022.



V dalším kroku byla zkoumána přenositelnost klasifikátoru na další časový horizont (relevantní předpoklad pro data úrovně L2 pořízená z téhož senzoru). Z tabulky 4 vyplývá, že při použití klasifikátoru trénovaného v jiném časovém horizontu došlo v případě dat Landsat 8 k poklesu přesnosti klasifikace o 4 % a v případě dat Sentinel-2 o 6 %. Vzhledem k objemu manuální práce při úpravě trénovacích množin mezi jednotlivými časovými horizonty a nepřesnostem v definici trénovacích ploch pouze nad daty Landsat, byl přenos klasifikátoru použit pouze experimentálně na roky 1986, 1990 a 1992.

Tabulka 4. Porovnání přesnosti klasifikace v letech 2022 a 2018. V případě roku 2018 je porovnávána přesnost při použití klasifikátoru natrénovaného na trénovací množině vytvořené nad ortofotem z roku 2022 (klasifikátor 2022) a na trénovací množině vytvořené nad ortofotem z roku 2018 (klasifikátor 2018). V obou případech je použita stejná sada 1 500 validačních bodů.

	Celková přesnost klasifikace		
	2022	2018	
		klasifikátor 2022	klasifikátor 2018
Landsat 8	0,75	0,68	0,72
Sentinel-2	0,81	0,74	0,80

2.3.4 Postklasifikační úpravy

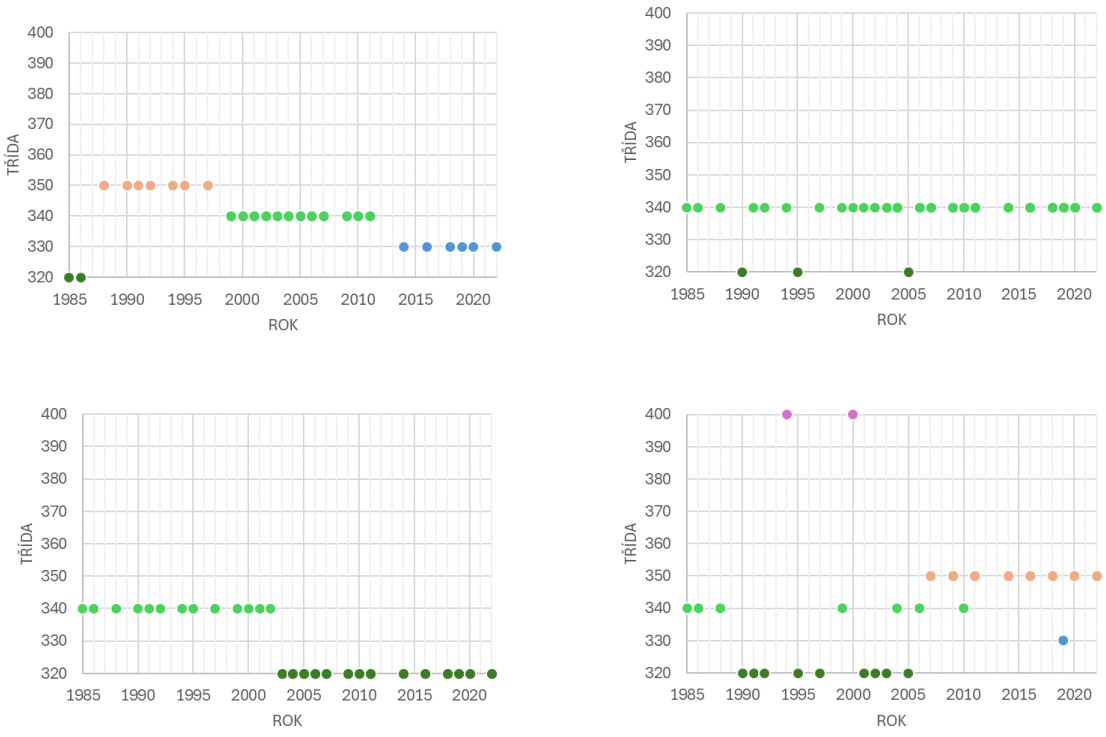
Výsledek klasifikace, která při zařazení do tříd pracuje s dílčími pixely, a nikoliv většími plošnými celky sdružující pixely sobě radiometricky podobné (objektový přístup), je zatížen náhodným šumem způsobeným vstupními daty (radiometrické hodnoty, definice trénovacích množin). Postklasifikační úpravy lze provést ve dvou krocích:

a) v každém časovém řezu zvlášť použitím majoritního filtru a stanovením minimální mapovací jednotky. Tento krok vede k odstranění osamocených pixelů uvnitř nebo na okraji homogenních oblastí.
b) vyhlazením časové řady, tj. odstraněním nereálných změn krajinného pokryvu v rámci časové řady.

V případě majoritního filtru je hodnota pixelu nahrazena, pokud jsou splněny podmínky „většiny“ ve zvoleném okolí a pixely tvořící většinu musí být vzájemně propojeny přes hranu (4 sousedé) nebo vrchol (8 sousedů) se středem filtru. Minimální mapovací jednotka je volena vzhledem k velikosti objektů ve skutečnosti a velikosti pixelu. Její minimální hodnota se obvykle se volí 1×2 nebo 2×2 pixely.

Při vyhlazení časové řady se mění hodnota pixelu v daném roce na základě porovnání s jeho hodnotou v letech okolních dle zadaných pravidel, které respektují reálné možnosti změn krajinného pokryvu v čase. Obrázek 5 ilustruje příklady, kdy lze změny v časové řadě považovat za skutečné a kdy se jedná o nepravděpodobné změny, které budou v rámci postklasifikačních úprav vyhlazeny.

Obrázek 5. Příklady pravděpodobných změn (vlevo) a nepravděpodobných změn (vpravo) v časové řadě krajinného pokryvu. Změny v grafech vpravo budou identifikovány jako falešné a budou vyhlazeny v rámci postklasifikační úpravy časové řady.



Implementace

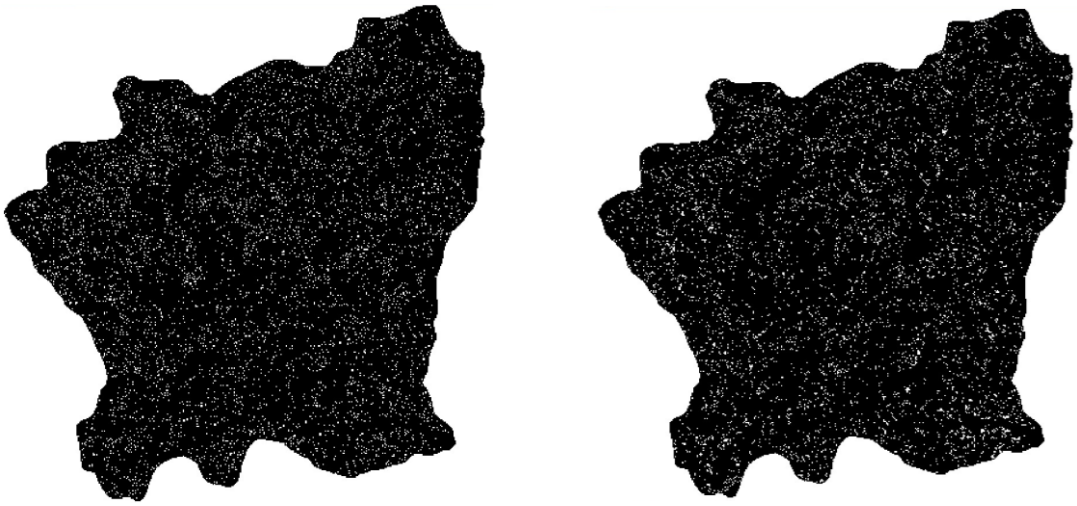
Postklasifikační úpravy byly provedeny v ArcGIS Pro a programováním v Python. S každou úpravou byl zároveň vyhodnocován její vliv na přesnost klasifikace.

Aplikace **majoritního filtru** (MF) měla minimální vliv na přesnost klasifikace, jak ukazuje tabulka 5 na příkladu dat z let 2001 a 2010. Počet změněných pixelů nepřekročil 6 %. Uvedené statistické údaje se prakticky neliší pro případ 4 a 8prvkového sousedství. Vzhledem k menšímu vyhlazení okrajů homogenních ploch bylo dále použito sousedství 4. Prostorové rozmístění změněných pixelů bylo rovnoměrné v celém zájmovém území, jak ukazuje obrázek 6.

Tabulka 5. Vliv použití majoritního filtru (MF) na přesnost klasifikace a počet změněných bodů na příkladu klasifikací z let 2001 a 2010. AO – absolutní přesnost klasifikace (před sloučením tříd jehličnatého lesa a kosodřeviny). 4/8 značí sousedství přes hranu/vrchol.

	2001			**2010**		
	původní	MF 4	MF 8	původní	MF 4	MF 8
OA	0,656	0,655	0,647	0,680	0,676	0,670
Počet změněných pixelů	-	4782	5874	-	4678	5888
% změn z celkového počtu pixelů	-	5,4	5,7	-	5,4	5,7

Obrázek 6. Prostorové rozložení změněných pixelů v roce 2001 (MF 4) a v roce 2010 (MF 8).



Aplikace minimální mapovací jednotky (MMJ) 1×2 pixely byla realizována následujícími procesy v ArcGIS Pro:

- identifikace spojitých regionů (RegionGroup),
- identifikace izolovaných pixelů, resp. ploch menších než MMU (ExtractByAttributes),
- nahrazení hodnot izolovaných pixelů (Nibble).

Vedle přesnosti klasifikace a počtu změněných pixelů byl jako další ukazatel vlivu provedené filtrace vypočten počet změn tříd každého pixelu v časové řadě (V). Z tabulky 6 vyplývá, že zatímco vliv filtrace na přesnost klasifikace byl minimální, počet pixelů s neměnnou třídou krajinného pokryvu (V = 1) či jen jednou změnou (V = 2) vzrostl. Mapový výstup v příloze I ukazuje prostorové rozložení počtu tříd v jednotlivých pixelech před a po filtraci kombinace MF4 a MMJ.

Tabulka 6. Vliv použití majoritního filtru (MF) a minimální mapovací jednotky (MMJ) na přesnost klasifikace 2001 a 2010 a počet změněných bodů v celé časové řadě po aplikaci filtrace. AO – absolutní přesnost klasifikace (po sloučením tříd jehličnatého lesa a kosodřeviny). 4/8 značí sousedství přes hranu/vrchol.

	2001				**2010**			
	původní	MF 4	MMJ	MF4 + MMJ	původní	MF 4	MMJ	MF4 + MMJ
OA	0,699	0,694	0,700	0,697	0,722	0,713	0,719	0,710

Výsledek analýzy časové řady				
Počet změn	původní	MF 4	MMU	MF4 + MMU
V = 1	18 %	21 %	19 %	21 %
V = 2	24 %	26 %	26 %	28 %
Max V	8	7	7	7
Mean V	2,8	2,6	2,7	2,6
σ_V	1,2	1,2	1,2	1,2

Filtrace časové řad krajinného pokryvu byla provedena v těchto krocích:

a) kódování tříd krajinného pokryvu každého pixelu do řetězce 27 znaků:

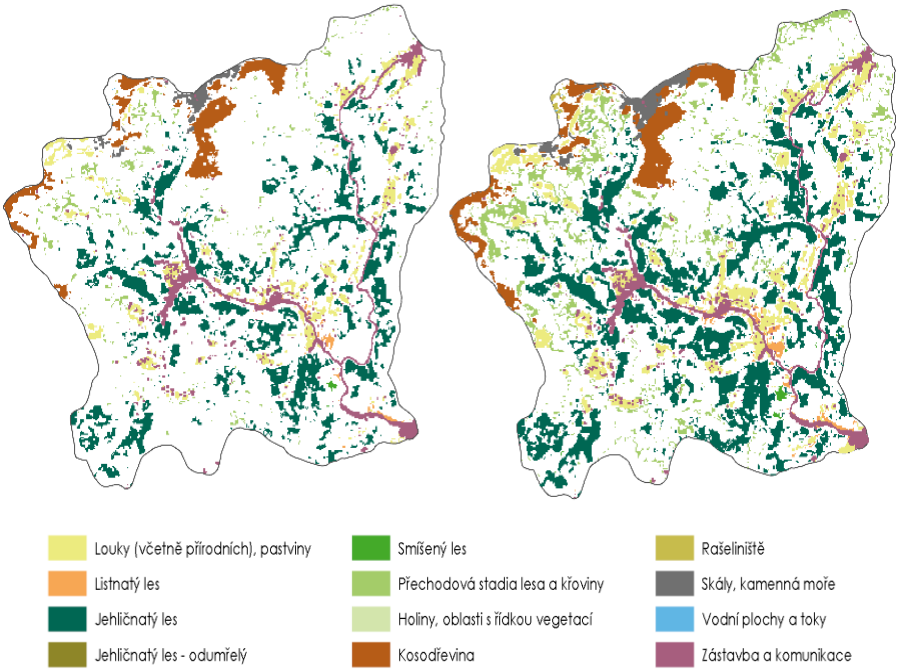
Kód dle legendy	200	310	320	323	330	340	350	400	500	600
Znak	l	o	j	d	m	p	h	k	r	s

Příklad: holina – přechodové stadium – jehličnatý les: hhhhhpppppppppppppppjjjjjj

b) aplikace regulárních výrazů vytvořených dle následujících pravidel a nahrazení hodnot pixelů:
   - identifikace jednoročních výkyvů, tj. mezi dvěma roky s jednou třídou krajinného pokryvu se nachází hodnota jiná
     př. hhhhhpppppplppppppppppjjjjj -> hhhhhpppppppppppppppppjjjjj
   - identifikace dvouročních výkyvů, tj. mezi dvěma roky s jednou s jednou třídou krajinného pokryvu se nachází dvakrát jiná, ale stejná hodnota – bylo aplikováno pouze pro třídy lesa (jehličnatý, smíšený, listnatý, kosodřevina)
     př. hhhhhpppppppjjppppppppppjjjjj -> hhhhhpppppppppppppppppjjjjj
   - identifikace přímého přechodu skály a kamenného moře na jehličnatý les nebo kosodřevinu (nebylo aplikováno na listnatý/smíšený les z důvodu, že první sukcesní vegetace je listnatá a v datech se místo „přechodová stadia lesa a křoviny“ občas jeví jako listnatý/smíšený les)
     př. sssssssjppppppppppjjjjj -> sssssssspppppppppjjjjj
   - identifikace oblastí, kde minimálně ve 22 případech byla skála nebo kamenné moře a nahrazení jiných tříd skálou/kamenným mořem
   - př. sssssssjpppssssssssss -> sssssssssssssssssssss

První a poslední roky zůstaly neměnné. Filtrace nebyla aplikována na třídy zástavba a vodní plochy, které byly stanoveny jako stabilní v celé časové řadě. Přesnost klasifikace zůstala prakticky neměnná, respektive vzrostla zpět na původní hodnotu před aplikací MF a MMJ, viz tabulka 6. Množství pixelů s nezměněnou třídou (V=1) vzrostl na 35 % (viz také obrázek 7). Filtrace klasifikace v rámci časové řady slouží jako kontrolní mechanismus pro předchozí úpravy (MF + MMJ). Pokud byl pixel v rámci jednoho roku špatně překlasifikován, pak je pravděpodobné, že v rámci časové řady bude překlasifikován na správnou hodnotu.

Obrázek 7. Stabilní oblasti dle klasifikace krajinného pokryvu před postklasifikačními úpravami (vlevo) a po provedených úpravách (vpravo).



Výsledné datové vrstvy klasifikace po provedených úpravách byly podkladem pro další analýzy a pro mapy krajinného pokryvu, které lze nahlížet na webové stránce projektu TAČR SS05010124: https://www.lucc4hydro.cz/krkonose-tacr-lc/. Ukázka mapových výstupů je v příloze II.

2.3.5 Hodnocení přesnosti klasifikace

Při hodnocení přesnosti klasifikace se vychází z kontrolních/validačních bodů, jejichž zařazení do dílčích tříd by mělo ideálně vycházet z přesnějšího/podrobnějšího zdroje, než jsou data vstupující do klasifikace. Strategie rozdělení bodů v zájmovém území mohou být různé (Jensen, 2005), nejčastěji se používá stratifikované rozdělení se stanovením minimálního počtu bodů na třídu. Počet bodů se odvíjí od požadovaného intervalu spolehlivosti dle Foody (2009).

Implementace

Přesnost klasifikace byla hodnocena na 1500 bodech stratifikovaně rozdělených do jednotlivých tříd, dle Foody (2009) pro oboustranný interval spolehlivosti $\alpha = 5$ % a $h = 0{,}025$. Třída klasifikace byla validačním bodům přidělena na základě interpretace ortofot (dostupných přes WMS KRNAP a ČÚZK). V roce 2022 bylo 94 z těchto bodů, zejména tříd přechodová stadia lesa, listnatý a smíšený les, ověřeno v terénu. Vzhledem k počtu validačních bodů byla validace provedena jen v 5 časových horizontech v případě dat Landsat, jak ukazuje tabulka v příloze III. Klasifikace z dat Sentinel-2 byla provedena jen zkušebně v letech 2018 a 2022. Z tabulky vyplývá, že celková přesnost klasifikace z dat Landsat dosahuje 70 až 80 %. Z vegetačních tříd F1 skóre nabývá nejvyšších hodnot pro louky a pastviny, jehličnatý les a kosodřevinu. Data Sentinel-2 díky vyššímu prostorovému a spektrálnímu rozlišení umožňují docílit vyšší přesnost klasifikace, a to až o 10 %.

2.3.6 Integrated forest z-score a index disturbance

Vedle NDVI byl pro hodnocení změn lesních porostů spočítán index označovaný jako „integrated forest z-score“ (IFZ, Huang et al., 2010) a index disturbance (DI, Healey et al., 2005).

IFZ se odvozuje z normovaných hodnot odrazivosti v červeném (R) a středních infračervených pásmech (SWIR1 a SWIR 2) dle vztahů:

$$FZ_i = \frac{b_i - \bar{b_i}}{SD_i} \qquad IFZ = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{3} FZ_k^2}{3}},$$

kde hodnoty $\underline{b_i}$ a SD_i představují průměr a směrodatnou odchylku odrazivosti pixelů odpovídajících lesnímu porostu. Dle Huang et al. (2010) lesní porosty v časové řadě vykazují hodnoty IFZ < 3. Nárůst IFZ nad tuto prahovou hodnotu indikuje odlesnění.

Pro výpočet DI je třeba provést transformaci Tasseled cap a podobně jako u IFZ normovat hodnoty jasu (B), zeleně (G) a vlhkosti (W) pomocí průměru a směrodatné odchylky těchto hodnot v pixelech odpovídajících lesním porostům.

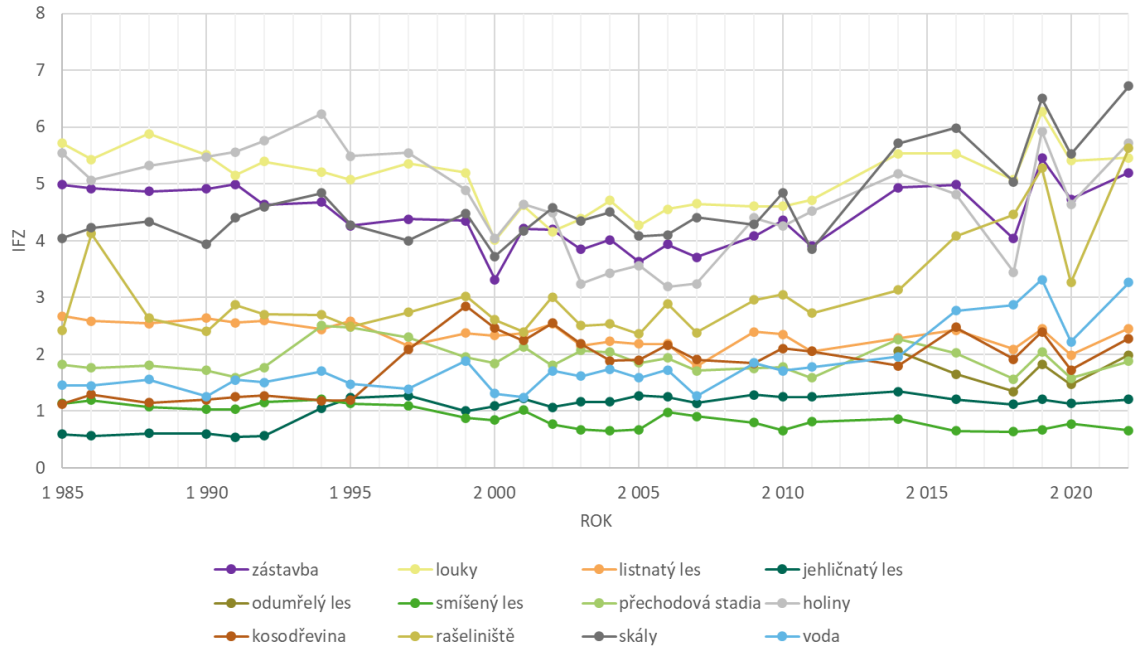
$$DI = B_r - (G_r + W_r),$$

Kde *Br*, *Gr* a *Wr* jsou normované hodnoty komponent Tasseled cap transformace. DI vychází z předpokladu, že nedávno vykácený nebo degradující les vykazuje vysoký jas a nízké hodnoty zeleně a vlhkosti ve vztahu ke zdravému nebo obnovujícímu se lesu. Z trendu DI (tj. hodnota směrnice regresní přímky) v daném časovém úseku lze sledovat vývoj celkového stavu lesního porostu.

Implementace

IFZ a DI byly vypočteny pro všechny časové horizonty pomocí skriptu pro MATLAB. Pro normalizaci byly využity hodnoty pixelů spadajících do tříd nepoškozeného vzrostlého lesa (jehličnatý, listnatý, smíšený) a kosodřeviny (tj. třídy 310, 320, 330, 400). Obrázek 8 ukazuje průměrné hodnoty IFZ pro jednotlivé třídy krajinného povrchu v dílčích letech. Příslušnost ke třídě krajinného pokryvu vychází z klasifikace popsané výše. Z grafu je patrné rozdělení tříd odpovídajících lesní vegetaci včetně přechodových stadií a kosodřeviny s IFZ < 3 a tříd odpovídajících loukám, holinám, skalám a zástavbě s IFZ > 3. Specifickou kategorií jsou rašeliniště, která se pohybují mezi oběma skupinami krajinného pokryvu. Dle Huang et al. (2010) by vodní plochy a v našem případě i rašeliniště měly být z analýzy IFZ odmaskovány, protože mohou mylně indikovat lesní porosty (nejtmavší pixely v obrazu).

Obrázek 8. Časová řada průměrných hodnot IFZ v zájmovém území dle kategorií krajinného pokryvu.



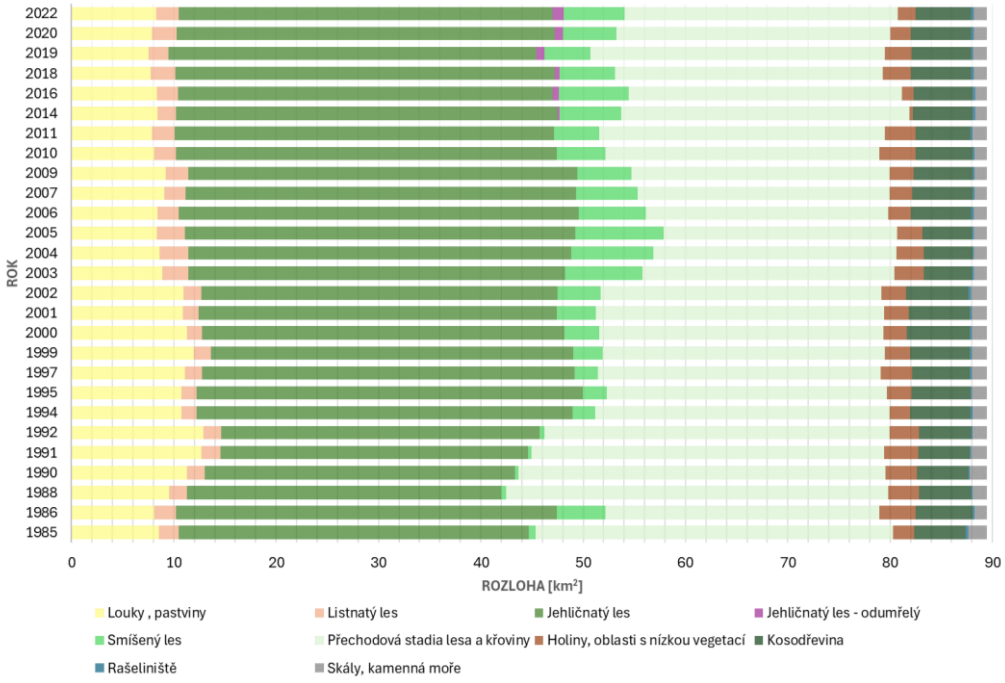
2.3.7 Analýzy časové řady

Získané časové řady klasifikace a spektrálních indexů jsou předmětem analýz vedoucích k vyhodnocení změn lesních porostů v zájmovém území. Výsledky analýz lze prezentovat mapovými výstupy a statistickými ukazateli, jejichž příklady následují.

Příklady analýzy časové řady výstupů klasifikace

Na základě časové řady klasifikace lze identifikovat stabilní plochy v zájmovém území, jak ukazuje mapa v příloze IV. Graf na obrázku 9 vyjadřuje plochu klasifikovaných kategorií ve sledovaném období. Mapa v příloze V vedle stabilních ploch lesa indikuje, kde v průběhu sledovaného období došlo k přeměně holiny nebo přechodového stádia lesa na vzrostlý les (smíšený, listnatý nebo jehličnatý). Mapa v příloze VI prezentuje počáteční a koncový časový horizont z hlediska nezměněných ploch a tříd krajinného pokryvu v místech mimo nezměněné plochy.

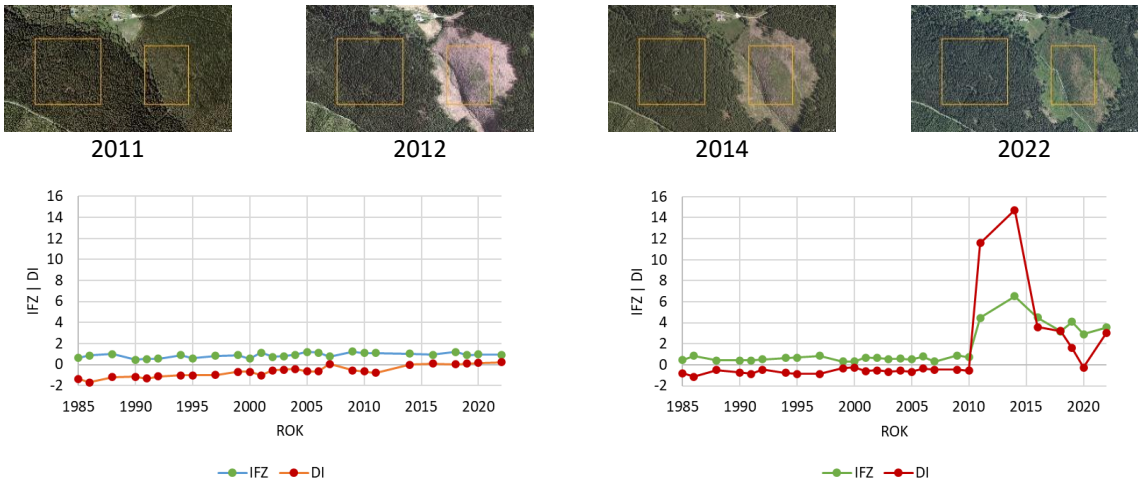
Obrázek 9. Rozloha klasifikovaných tříd v zájmovém území v průběhu sledovaného časového období.



Příklady analýzy časové řady vybraných indexů

Analýza časových řad odvozených indexů – NDVI, IFZ, DI umožňuje detekovat termín degradace lesního porostu (polom, zničení lesa škůdcem, vykácení) či naopak jeho obnovy (obrázek 10). Z vypočteného trendu DI lze lokalizovat území se zlepšujícím/zhoršujícím se stavem lesního porostu ve zvoleném časovém období, jak ukazuje mapa v příloze VII. K určení termínu největší změny lesního porostu lze využít algoritmus LandTrendr (Kennedy et al., 2010) – na mapě v příloze VIII byl aplikován na index IFZ.

Obrázek 10. Grafy IFZ a DI v oblasti Chaloupky (50°41'37.61"N, 15°43'19.53"E), kde došlo v roce 2012 k odlesnění. Graf vlevo ukazuje průměrné hodnoty IFZ a DI trvale zalesněné plochy, graf vpravo plochy odlesněné. V časové řadě chybí data z let 2012 a 2013.



2.4 Závěr

Navržený metodický postup využití družicových dat DPZ pro monitoring změny krajinného pokryvu s důrazem na hodnocení změn lesních porostů byl úspěšně ověřen na datové sadě Landsat z období 1985–2022. Jako vedlejší produkt vznikl skript pro předzpracování dat v prostředí Google Earth Engine, který může být využíván a popř. dále rozvíjen. Byla navržena sada postklasfikačních pravidel. Vytvořená časová řada klasifikace krajinného pokryvu v zájmových povodí vykazuje v kontrolních časových řezech konzistentní přesnost mezi 70–80 %. Bude využita jako vstup pro simulaci vlivu změn krajinného pokryvu na vývoj hydrologických charakteristik v modelu SWAT.

Možností analýzy časových řad výsledků klasifikace a vybraných vegetačních indexů (NDVI, IFZ, DI) pro hodnocení vývoje lesních porostů existuje celá řada, jejich výběr závisí na konkrétních požadavcích uživatele. V závěrečné sekci této metodiky jsou zmíněny jen některé z nich.

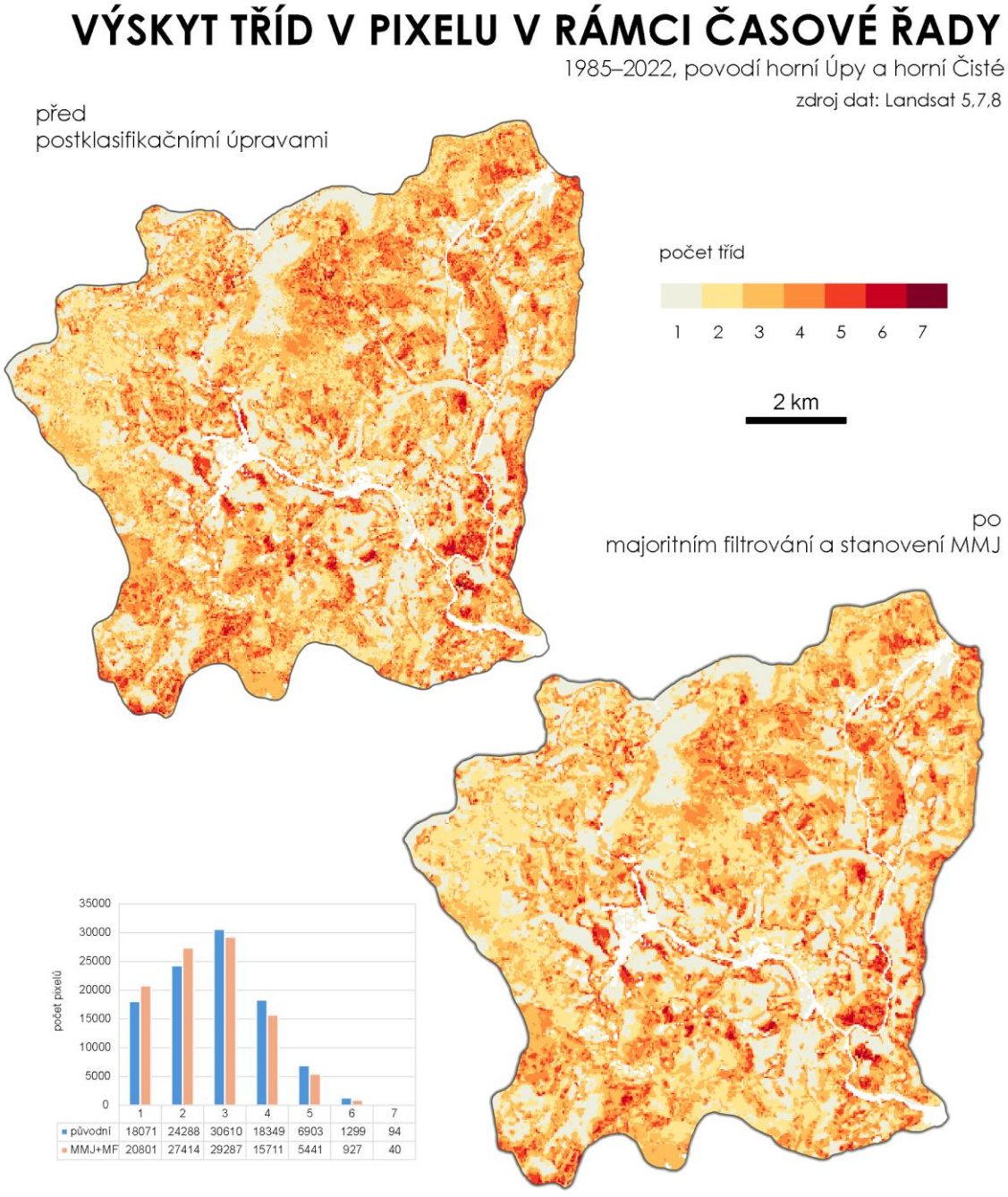
Navržená metodika je přenositelná na jiné typy družicových dat podobného spektrálního a prostorového rozlišení (zejména Sentinel-2), popř. harmonizovaných produktů (např. HLS)

Použitý postup řízené klasifikace vyžadující manuální sběr trénovacích a validačních dat je primárně určen pro hodnocení stavu relativně homogenní lesní vegetace a v ploše odpovídající sledovaným povodím, tj. do 100 km^2. Naopak indikátory stavu lesní vegetace založené na spektrálních charakteristikách jsou snadno implementovatelné pro větší území i více heterogenní porosty. Manuální práci lze do jisté míry nahradit přenosem klasifikátoru z jiných let, což může mít vliv na snížení přesnosti klasifikace v případě nedostatečného radiometrického vyrovnání snímků mezi dvěma a více časovými horizonty, jak bylo v implementační části metodiky ukázáno.

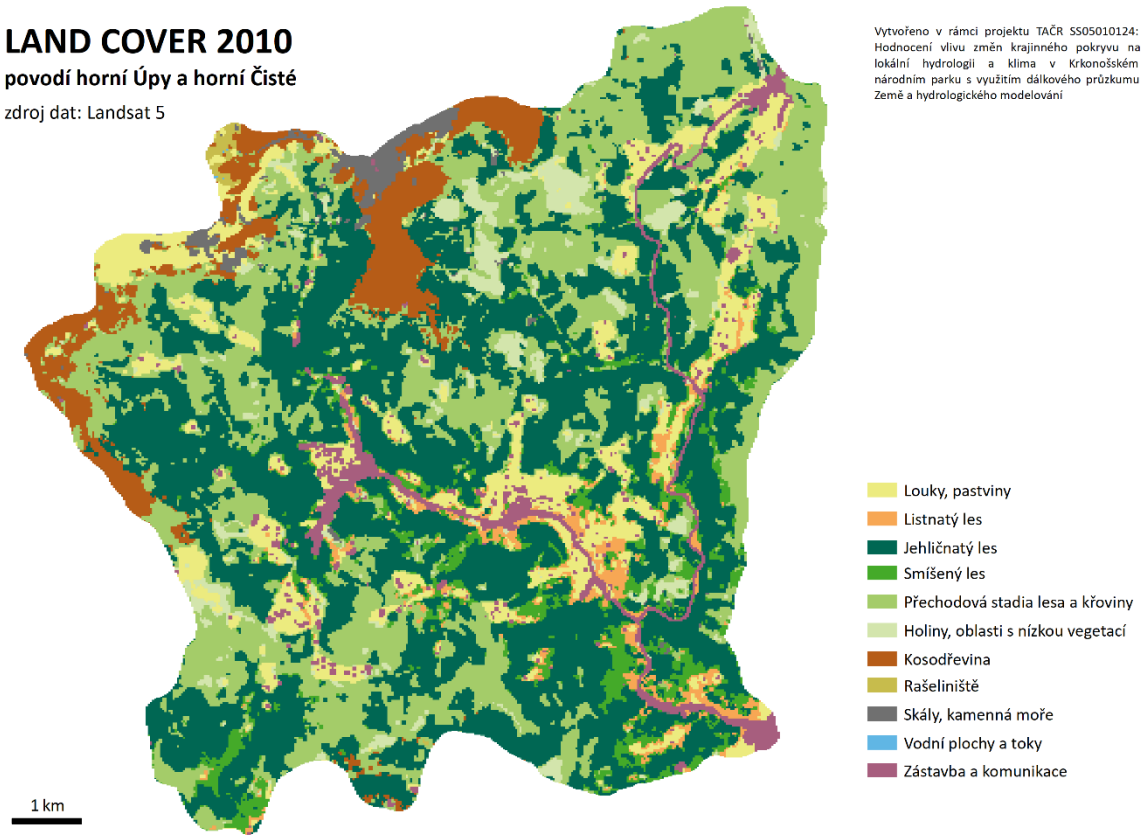
Požadavek existence ortofot pro sběr trénovacích dat a cíl pořídit bezoblačnou mozaiku s co nejmenším počtem scén z vedlejších let způsobil, že vytvořená časová řada není zcela pravidelná, což má své důsledky v možnosti včasné detekce některých změn, resp. jejich rozpoznání vůbec. Nepravidelnost časové řady ovlivňuje i výsledek vyhlazení klasifikace, popř. indexů mezi časovými horizonty. Tento nedostatek je dán kvalitou snímků, resp. vysokým stupněm oblačnosti v konkrétním zájmovém území, a dostupností podpůrných dat. Vlastní metodický postup je na použitém modelovém příkladu nezávislý.

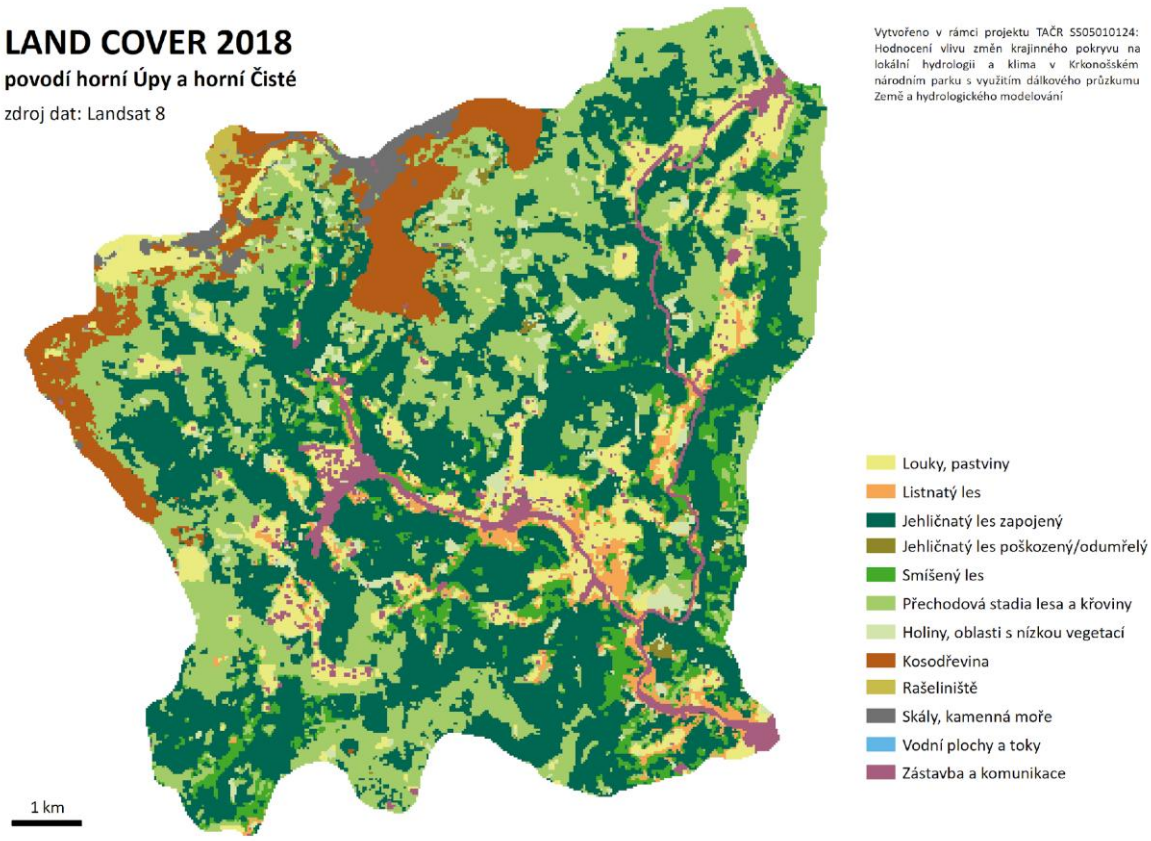
2.5 Přílohy

Příloha I: Vliv monotemporální filtrace na počet změn klasifikační třídy



Příloha II: Mapy krajinného pokryvu 2010 a 2018





Příloha III: Celková (AO), uživatelská (UA) a zpracovatelská (PA) přesnost a F1 skóre dosažené pro klasifikace krajinného pokryvu z dat Landsat a Sentinel-2 v letech 2001, 2010, 2016, 2018 a 2022.

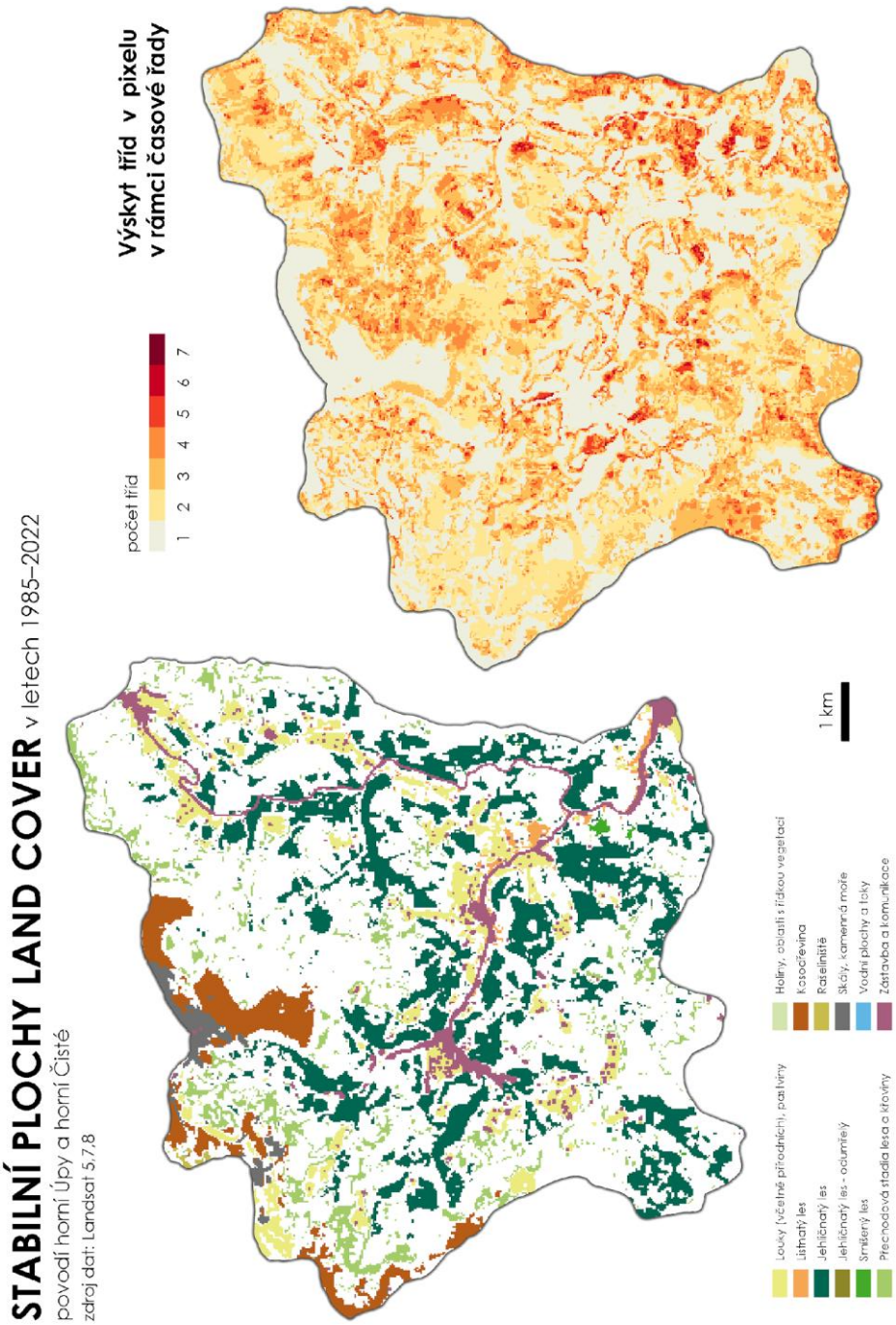
Přesnost byla hodnocena na základě 1500 validačních bodů získaných interpretací ortofot. Třídy zástavba a vodní plochy nevznikly na základě klasifikace a nebyly tudíž hodnoceny. Význam kódů tříd klasifikace (class) je uveden v sekci 2.3.2 Legenda.

Landsat 2022		**OA = 0,82**		**Landsat 2018**		**OA = 0,78**		**Landsat 2016**		**OA = 0,81**	
Class	**UA**	**PA**	**F1**	**Class**	**UA**	**PA**	**F1**	**Class**	**UA**	**PA**	**F1**
200	0,90	0,91	0,91	200	0,93	0,74	0,83	200	0,89	0,88	0,89
310	0,53	0,53	0,53	310	0,52	0,62	0,56	310	0,79	0,67	0,73
320	0,60	0,89	0,89	320	0,87	0,89	0,88	320	0,91	0,88	0,89
323	0,89	0,72	0,75	323	0,91	0,41	0,56	323	0,84	0,62	0,71
330	0,78	0,54	0,57	330	0,55	0,50	0,53	330	0,57	0,67	0,61
340	0,74	0,80	0,77	340	0,74	0,76	0,75	340	0,72	0,80	0,76
350	0,78	0,79	0,78	350	0,44	0,73	0,55	350	0,67	0,76	0,71
400	0,93	0,88	0,91	400	0,85	0,93	0,89	400	0,83	0,82	0,82
500	0,98	0,98	0,98	500	0,98	0,90	0,93	500	1,00	0,74	0,85
600	0,97	0,74	0,84	600	0,93	0,74	0,82	600	0,97	0,66	0,79

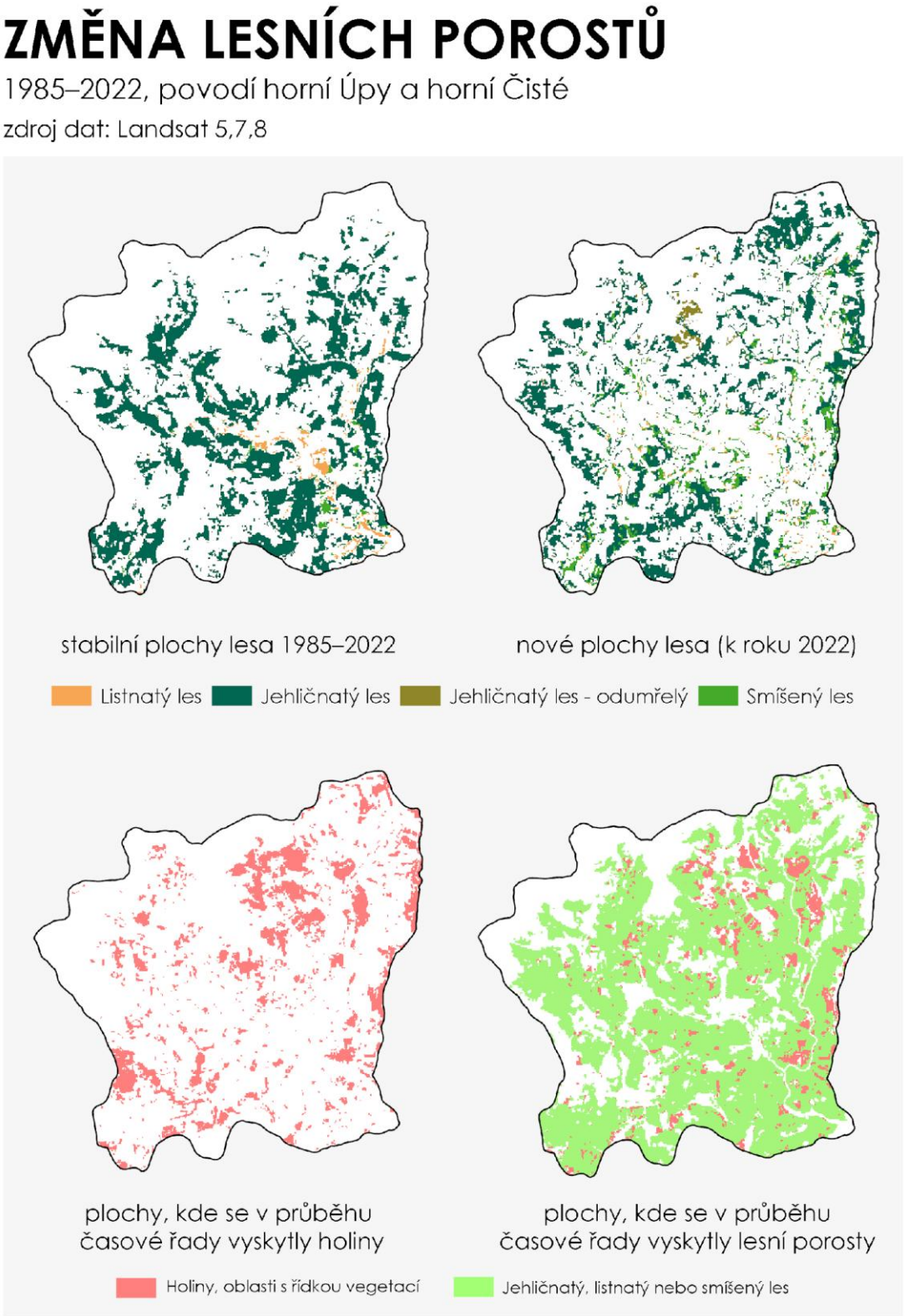
Landsat 2010		**OA = 0,70**		**Landsat 2001**		**OA = 0,70**	
Class	**UA**	**PA**	**F1**	**Class**	**UA**	**PA**	**F1**
200	0,86	0,86	0,86	200	0,67	0,86	0,75

310	0,54	0,67	0,60	310	0,61	0,51	0,56
320	0,84	0,75	0,80	320	0,86	0,76	0,81
330	0,52	0,35	0,42	330	0,62	0,33	0,43
340	0,56	0,75	0,64	340	0,57	0,76	0,65
350	0,31	0,53	0,39	350	0,52	0,36	0,42
400	0,83	0,81	0,82	400	0,72	0,71	0,72
500	1,00	0,52	0,68	500	0,97	0,73	0,83
600	0,94	0,88	0,91	600	0,76	0,78	0,77

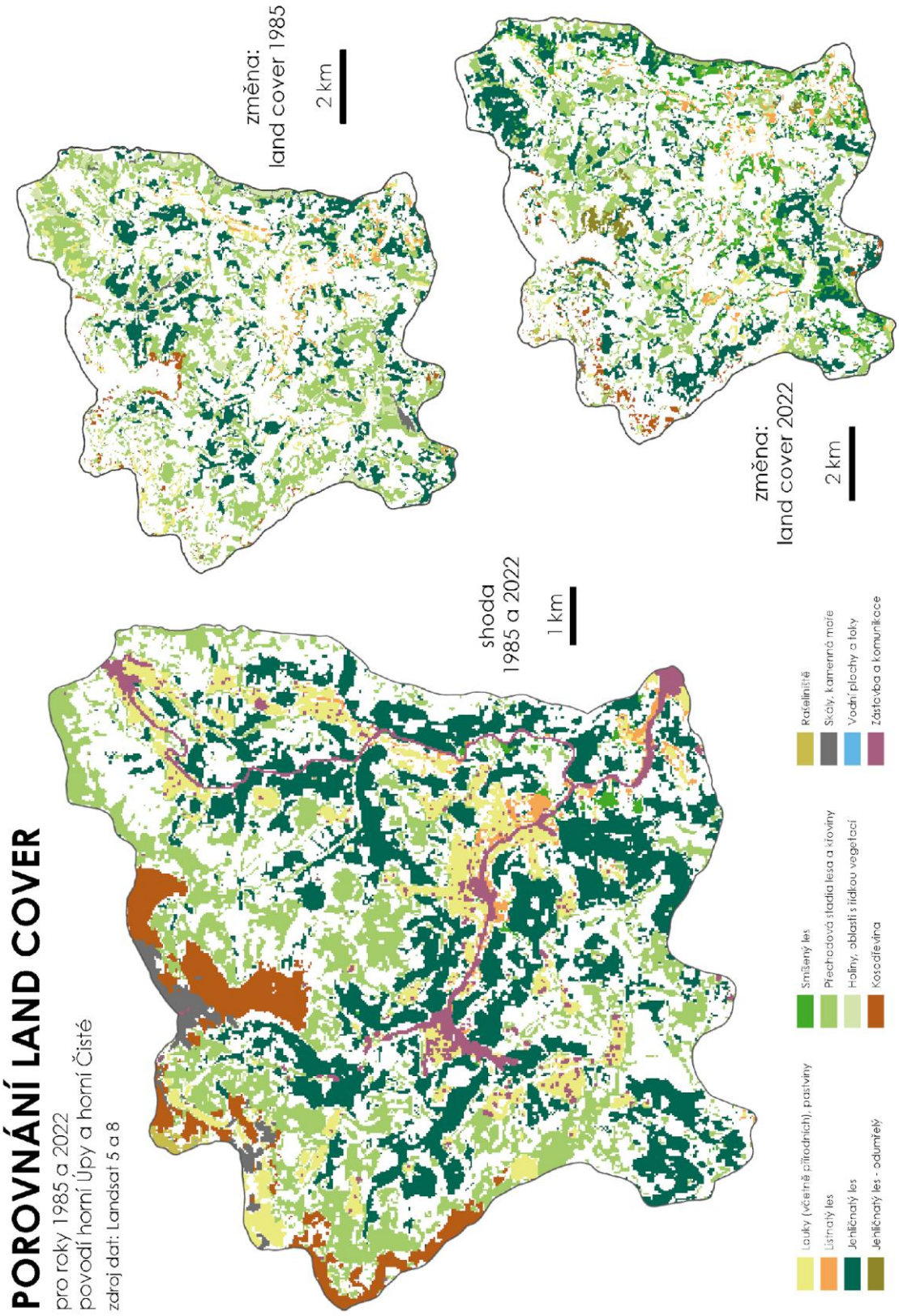
Příloha IV: Stabilní plochy krajinného pokryvu v letech 1985–2022



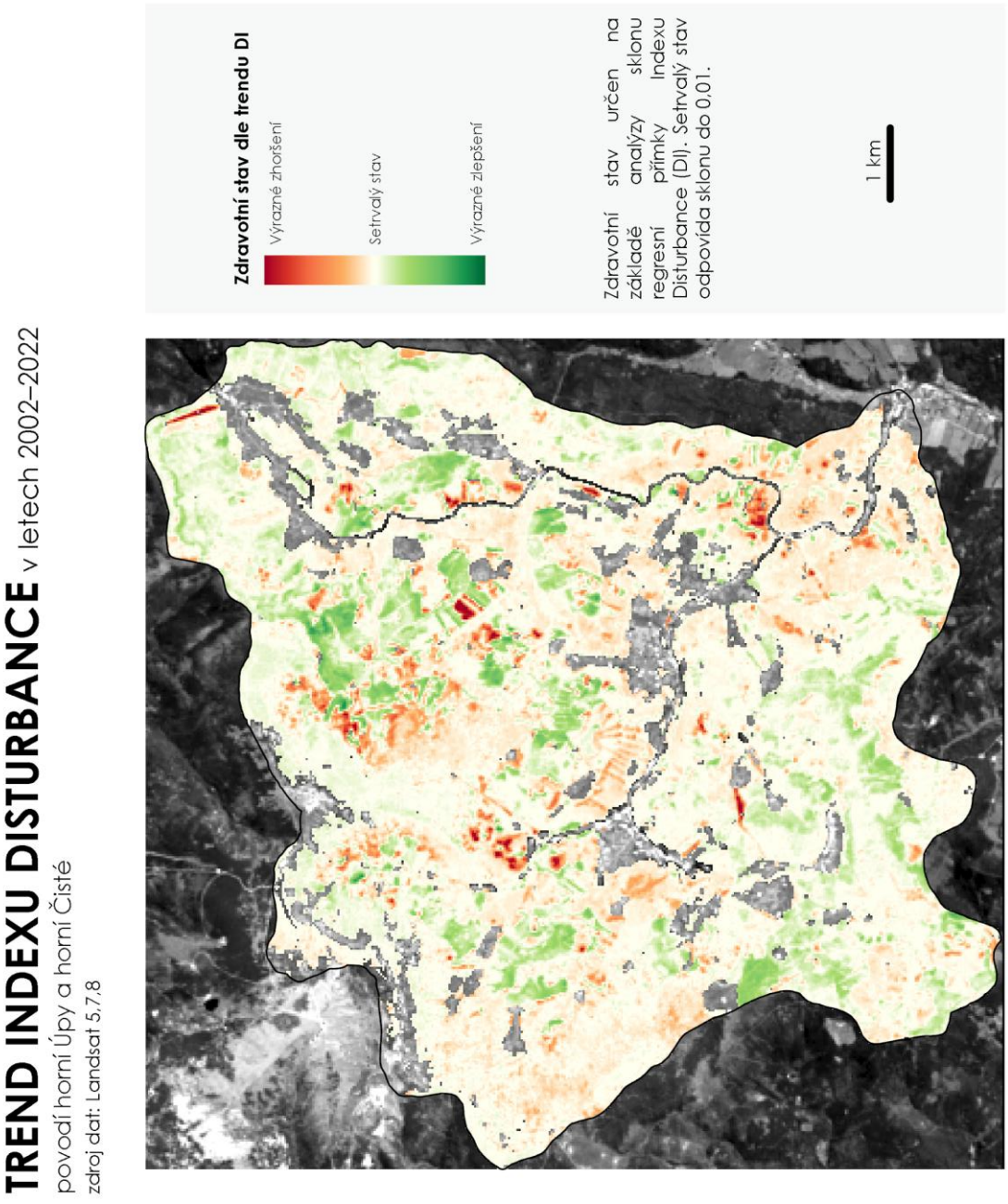
Příloha V: Změny lesních porostů na základě klasifikace dat Landsat 1985–2022



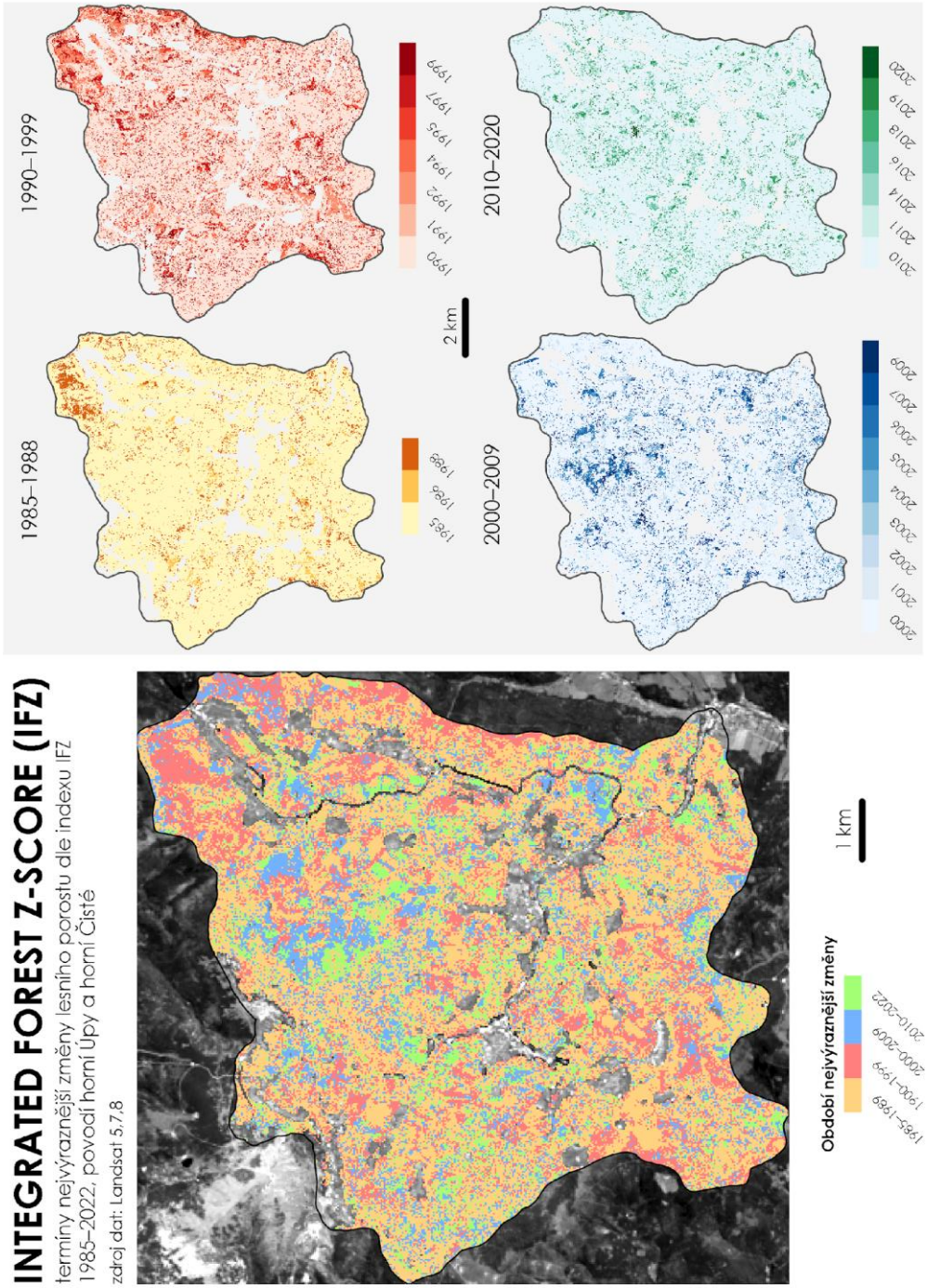
Příloha VI: Porovnání krajinného pokryvu v letech 1985 a 2022



Příloha VII: Trend indexu disturbance 2002–2022



Příloha VIII: Nejvýznamnější změna IFZ mezi roky 1985–2022



3. Hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů

3.1 Úvod

Tato část metodiky specifikuje doporučené metody a postupy pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů. Je postavena na zpracování a vyhodnocení volně dostupných dat monitorovaných ČHMÚ.

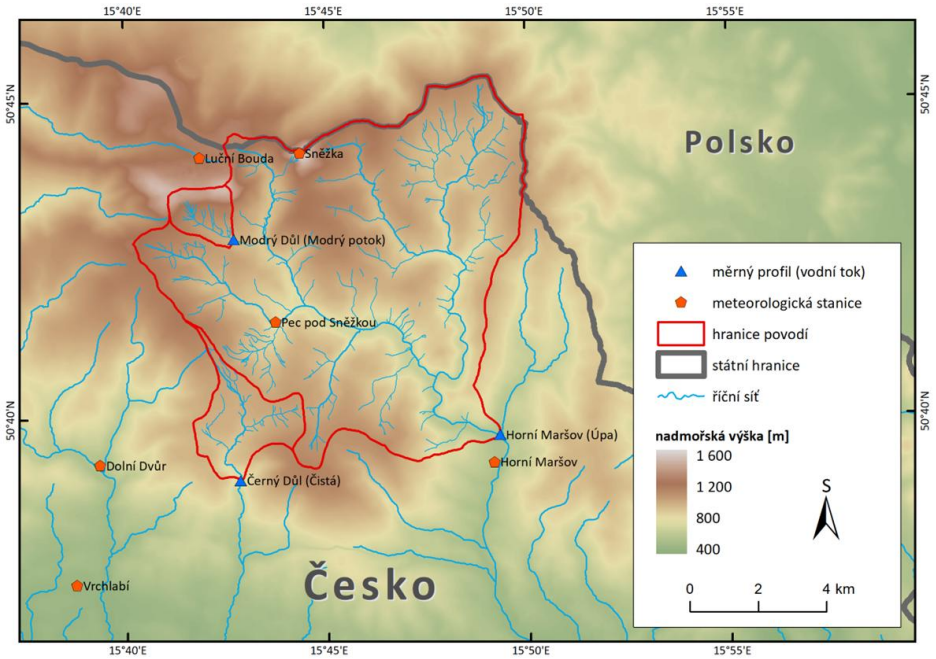
3.2 Cíle

Hlavním cílem metodiky je pomocí grafických a statistických metod detekovat změny srážko-odtokového režimu a identifikovat dlouhodobé trendy základních hydroklimatických proměnných: teploty vzduchu, srážek a průtoků. Dále se metodika zaměřuje na analýzu hydrologických extrémů, konkrétně metod pro vyhodnocení hydrologického sucha.

3.3 Zájmové území

Zájmovým územím, v rámci něhož byla metodika vyvinuta, jsou povodí horní Úpy, včetně Modrého potoka a povodí horní Čisté v Krkonoších. Plocha povodí horní Úpy po závěrový profil Horní Maršov činí 81,99 km^2. Plocha povodí Čisté po závěrový profil Černý Důl je 6,53 km^2 (obrázek 11).

Obrázek 11. Zájmové území – povodí horní Úpy a horní Čisté v Krkonoších s lokalizací monitorujících stanic ČHMÚ.



3.4 Zdroje dat

Pro veškeré aplikované analýzy lze využít volně dostupná klimatická a hydrologická data ČHMÚ z těchto odkazů:
https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace
https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb

Pro zájmová povodí horní Úpy a horní Čisté byly využity následující limnigrafické a meteorologické stanice (obrázek 1, tabulka 7).

- limnigrafická stanice Úpa – Horní Maršov (013000): 1981–2021, datová řada Qd, Qm
  Poloha 64,000 ř.km, nadmořská výška 570,450 m n. m., plocha povodí: 81,99 km^2
- limnigrafická stanice Čistá – Černý Důl (003100): 1981–2021, datová řada Qd, Qm
  Poloha: 15,700 ř.km, nadmořská výška717,461 m n. m., plocha povodí: 6,53 km^2
- limnigrafická stanice Úpa – Obří Důl (009000), 1987–2021, výpadek 05/2003–11/2003
  Poloha74,800 ř. km, nadmořská výška: 888,104 m n. m., plocha povodí: 8,89 km^2
- limnigrafická stanice: Modrý potok – Modrý Důl (009000), 1980–2021, výpadek 10/1983–11/1984
  Poloha 1,000 ř. km, nadmořská výška1 009,467 m n. m., plocha povodí 2,61 km^2

Tabulka 7. Přehled hodnocených parametrů pro limnigrafické a meteorologické stanice v období monitoringu

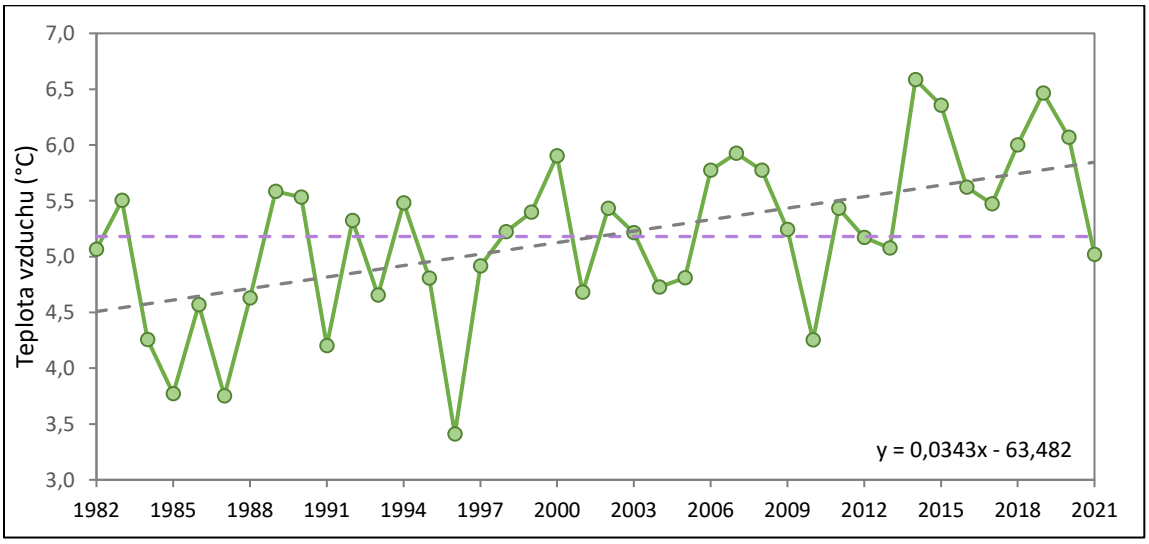
		denní data	denní data	chybějící měření
Parametr	**Stanice**	od	do	
Qd [m3/s]	Horní Maršov (Úpa)	01.11.1981	31.12.2021	
Qd [m3/s]	Černý důl (Čistá)	01.11.1930	31.12.2021	**1941–1948**
Qd [m3/s]	Obří důl (Úpa)	01.11.1987	31.12.2021	**05/2003–11/2003**
Qd [m3/s]	Modrý důl (Modrý potok)	01.11.1980	31.12.2021	**10/1983–11/1984**
Tavg [°C]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	**01/1965–12/1965**
Tavg [°C]	Pec pod Sněžkou	01.01.1961	31.12.2021	**1972–1988**
Tavg [°C]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	**1999–2002**
Tavg [°C]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	**1970–2009**
SRA [mm]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	**01/1962–12/1962, 01/1965–12/1965**
SRA [mm]	Dolní Dvůr	01.04.1963	31.12.2021	**1972–1973**
SRA [mm]	Horní Maršov	01.01.1961	31.12.2021	**1987–1988**
SRA [mm]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	**1999–2002**
SRA [mm]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	**1970–2009**
SRA [mm]	Pec pod Sněžkou	01.01.1961	31.12.2021	**1972–1988**
SRA [mm]	Horní Malá Úpa	01.05.1997	31.12.2021	
SCE [cm]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	**01/1962–12/1962, 01/1965–12/1965, 01/2020–09/2020, 01/2021–09/2021**
SCE [cm]	Dolní Dvůr	01.04.1963	31.12.2021	
SCE [cm]	Horní Maršov	01.01.1961	31.12.2021	**1987–1988**
SCE [cm]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	**1999–2002**
SCE [cm]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	**1970–2009**

3.5 Metody / metodický postup

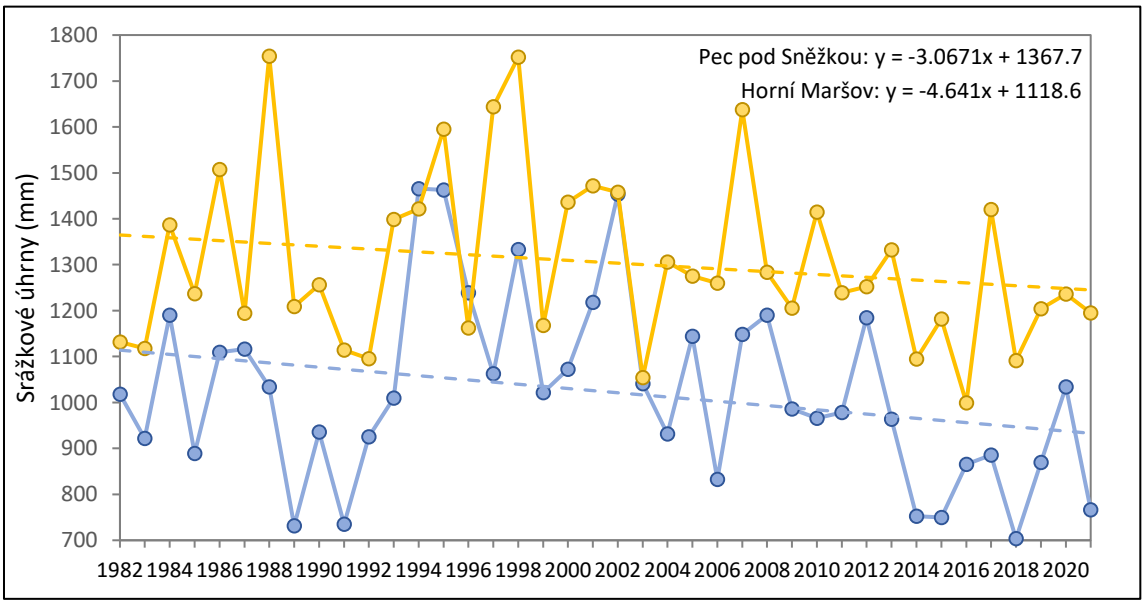
4.5.1 Grafické metody pro analýzu změn srážko-odtokového režimu

Základní metodou pro analýzu klimatických a hydrologických datových řad jsou grafy dlouhodobého vývoje jednotlivých proměnných, které je možné proložit dlouhodobým průměrem nebo směrnicí lineárního trendu. Vstupními daty jsou průměrné roční teploty vzduchu (obrázek 12), roční srážkové úhrny (obrázek 13) a průměrná roční výška sněhové pokrývky (obrázek 14).

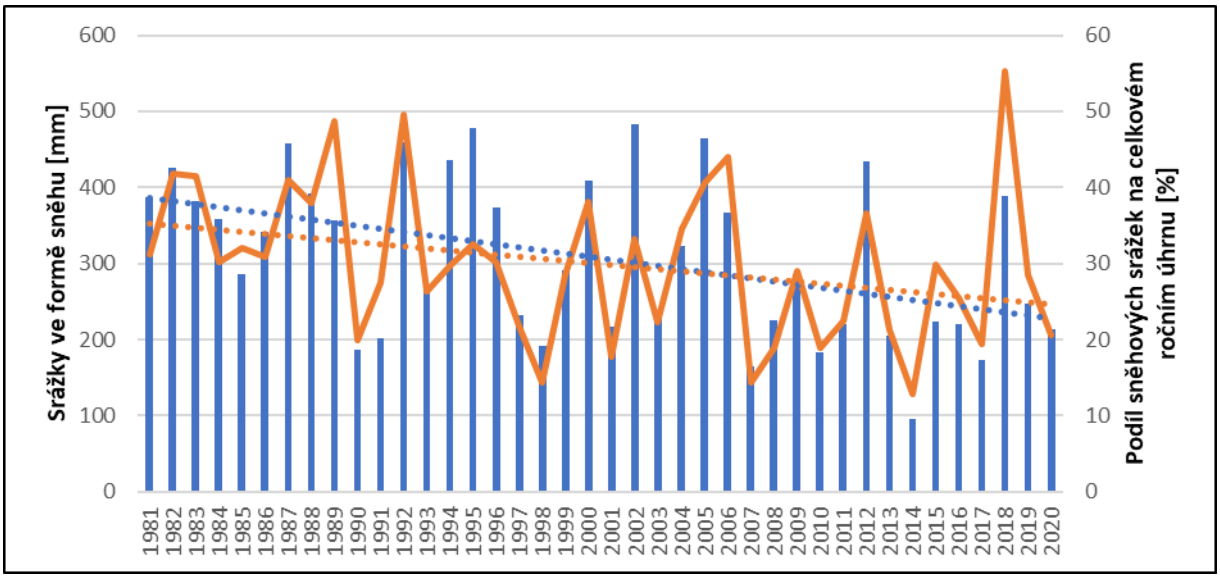
Obrázek 12. Vývoj průměrné roční teploty vzduchu na stanici Pec pod Sněžkou (1982–2021). Fialová linie: průměr za sledované období, šedá linie: lineární trend. Zdroj dat: ČHMÚ.



Obrázek 13. Roční úhrny srážek, stanice Pec pod Sněžkou (oranžově) a Horní Maršov (modře) s vyznačením lineárního trendu za sledované období 1982–2021. Zdroj dat: ČHMÚ.

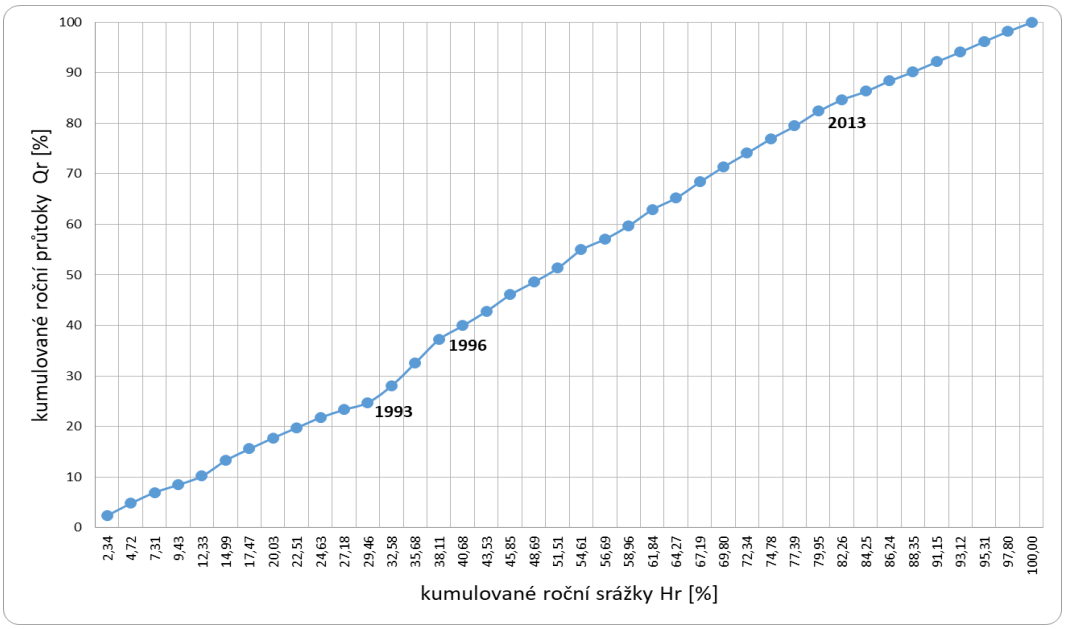


Obrázek 14. Vývoj množství srážek ve formě sněhu (modře) a podílu těchto srážek na celkovém ročním úhrnu srážek (oranžově), stanice Pec pod Sněžkou, s vyznačením lineárního trendu (1981–2020). Zdroj dat: ČHMÚ, Kavalír (2024).



Standardní metodou pro hodnocení změn ve vývoji hydroklimatických parametrů jsou jednoduché a podvojné součtové čáry, tzn. kumulativní čáry denních/měsíčních/ročních srážkových úhrnů a průměrných denních/měsíčních/ročních průtoků za sledované období (obrázek 15). Součtové čáry jsou konstruovány za účelem zjištění, zda a případně kdy došlo v časové řadě ke změně trendu. Zjištěné body zlomu se následně mohou stát kritériem pro rozdělení datových řad do dvou či více období.

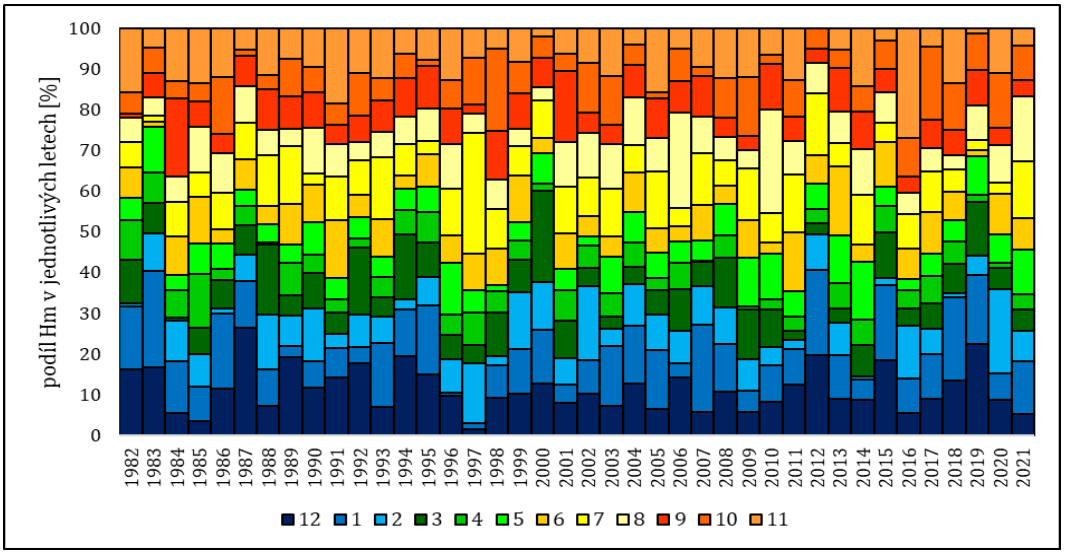
Obrázek 15. Podvojná součtová čára ročních úhrnů srážek Hr a průměrných ročních průtoků Qr za období 1982–2021 v profilu Čistá Dolní Dvůr. Zdroj dat: ČHMÚ.



Dále je vhodné konstruovat grafy měsíčního rozložení teploty vzduchu Tm, srážek Hm a průtoků Qm ve sledovaném období (obrázek 16), ze kterých lze vyčíst procentuální podíly jednotlivých měsíců na

celkovém ročním úhrnu srážek, či ročním odtoku a zároveň zhodnotit sezonalitu dle ročních období (jaro, léto, podzim, zima).

Obrázek 16. Rozložení chodu měsíčních srážek, stanice Dolní Dvůr (1982–2021). Zdroj dat: ČHMÚ.



3.5.2 Statistické metody pro detekci trendů v hydroklimatických datových řadách

Mann-Kendallův neparametrický test (Mann 1945; Kendall, 1938, Kendall 1975) je vhodnýt k detekci trendů v dlouhodobých datových řadách, a to jak k detekci ročních, sezónních i měsíčních trendů. Test má dva základní parametry. Prvním je p-hodnota, též míra signifikance, která udává sílu testu. Druhým je MK-S statistika, určující velikost a směr trendu, který může být klesající či rostoucí. V případě, že je hodnota MK statistiky kladná je trend rostoucí, u záporné hodnoty je trend klesající. Velkou výhodou Mann-Kendallova testu je, že není ovlivněn chybějícími daty. Test nepracuje s absolutními hodnotami v datovém souboru, ale s jejich relativními rozdíly. Z dostupných dat je nejprve nutné vypočítat statistiku S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i), \quad \text{kde } \operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{pokud } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{pokud } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{pokud } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Kde počet pozorování je označen n a sgn (Xj–Xi) nabývá třech možných hodnot: (–1), 0 a 1 v závislosti na tom, jaký je rozdíl j-té a i-té hodnoty. Všechny hodnoty v datovém souboru jsou porovnány se všemi ostatními hodnotami, je jim přiřazena jedna ze tří hodnot a tyto hodnoty jsou následně sečteny a výsledkem je statistika S. Při vyšším počtu dat (zpravidla nad 40 pozorování) a při výskytu duplicit se dále spočítá variance S a testová statistika Zs podle rovnic (Gilbert 1987 in Kavalír 2024):

$$\operatorname{var}(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)\right]$$

$$Z_s = \{\frac{S-1}{\sqrt{var(S)}}\ pokud\ S > 0\ \ 0\ pokud\ \ S = 0\ \frac{S+1}{\sqrt{var(S)}}\ pokud\ S < 0$$

Kde n je opět celkový počet pozorování, m je počet duplicitních hodnot a ti jsou jednotlivé duplicitní hodnoty. Mann-Kendallův neparametrický test je využíván pro analýzu dat v hydrologii pro trendy průtoků a v klimatologii pro změnu a hodnocení vývoje klimatických proměnných jako je teplota vzduchu či srážkové úhrny. Doporučujeme pracovat s průměrnými měsíčními a ročními vstupními proměnnými. Výsledky aplikace M-K testu pro průměrné, minimální a maximální průtoky uvádí tabulka 8.

Tabulka 8. Výsledky MK testu pro profil Horní Maršov za období 1981–2020

	Průměrné průtoky		Minimální průtoky		Maximální průtoky	
	MK statistika	p-hodnota	MK statistika	p-hodnota	MK statistika	p-hodnota
Leden	-1,15	0,25	-1,32	0,19	-0,49	0,62
Únor	0,73	0,46	0,92	0,36	0,96	0,34
Březen	0,64	0,52	1,91	0,06	0,66	0,51
Duben	-0,62	0,54	0,10	0,92	-1,47	0,14
Květen	**-2,88***	**4.10^{-3}**	**-2,07**	**0,04**	**-2,19**	**0,03**
Červen	**-2,32**	**0,02**	-1,93	0,05	-0,98	0,33
Červenec	-1,04	0,30	-0,63	0,53	-0,63	0,53
Srpen	-1,88	0,06	-0,80	0,42	**-2,32**	**0,02**
Září	-1,43	0,15	-1,10	0,27	-0,56	0,58
Říjen	0,27	0,79	-0,20	0,84	1,21	0,23
Listopad	-0,94	0,34	-0,20	0,84	**-2,21**	**0,03**
Prosinec	-0,90	0,37	0,19	0,85	-1,33	0,18
Rok	-2,09	0,04	0,75	0,46	-1,64	0,10

*Vysvětlivky: tučně jsou zvýrazněny statisticky významné na hladině spolehlivosti α=0,05; * jsou označeny hodnoty významné na hladině spolehlivosti α=0,01, zdroj dat: ČHMÚ, (Kavalír, 2024).*

Pokud je v datových řadách přítomna autokorelace, což může ovlivnit výsledky standardního neparametrického Mann-Kendallova testu je možno pro detekci trendů použít modifikovaný MK-test Hamed, Rao (1998).

3.6 Výsledky/implementace: ukázka aplikace MK-testu na hydroklimatické datové řady

4.6.1 Srážkové úhrny

V případě časových řad úhrnů srážek (30 let +) jsou trendy pomocí MK – testu detekovány zřídka, což je i případ analyzovaných srážkoměrných stanic v zájmovém území. Přehled trendového testování pro jednotlivé měsíce znázorňuje tabulka 9. Z výsledků je patrné, že níže položené stanice (Dolní Dvůr či Horní Maršov) vykazují za poslední desetiletí v dlouhodobém průměru téměř neměnné srážkové úhrny. Výjimkou je měsíc duben, kde byly poklesové trendy detekovány téměř na všech zájmových stanicích. Žádné jiné významné trendy v rámci měsíčních průměrů úhrnů srážek na níže položených stanicích detekovány nebyly a případné změny ve srážkoodtokových režimech v zájmových povodích jsou z meteorologického hlediska řízeny více nárůstem teplot vzduchu než změnou úhrnů srážek.

Tabulka 9. Výsledky trendového testování měsíčních dat srážek (1962–2021), interval spolehlivosti = 95 %

Dolní Dvůr*			H. Maršov		Labská b.		Luční b.		Pec p/Sněž*		Sněžka	
M	***Zs***	***p***	Zs	***p***	Zs	***p***	Zs	***p***	Zs	***p***	Zs	***p***
1	1.56	0.12	0.31	0.76	1.95	0.05	1.58	0.12	1.15	0.25	1.89	0.06
2	-0.22	0.82	-0.43	0.67	0.83	0.40	0.59	0.55	0.57	0.57	0.22	0.82
3	-0.48	0.63	-0.18	0.86	1.91	0.06	0.17	0.86	0.92	0.36	-0.12	0.90
4	-2.84	0.01	-4.83	<0.00	-0.88	0.38	-2.19	0.03	-2.45	0.01	-3.58	<0.00
5	-0.31	0.76	-1.58	0.12	0.49	0.63	-0.50	0.61	-0.82	0.41	-2.85	0.00
6	-0.84	0.40	-1.11	0.27	0.30	0.76	-0.29	0.77	-5.32	<0.00	-2.48	0.01
7	0.01	1.00	0.79	0.43	2.04	0.04	1.88	0.07	0.07	0.94	-1.01	0.31
8	0.61	0.55	-0.27	0.79	1.16	0.25	0.98	0.33	-0.73	0.47	-1.61	0.11
9	0.76	0.45	0.53	0.59	1.27	0.21	2.05	0.04	0.62	0.54	0.38	0.71
10	1.40	0.16	0.43	0.67	1.82	0.07	1.96	0.05	0.48	0.63	0.59	0.56
11	-0.99	0.35	-3.67	<0.00	0.57	0.57	0.14	0.89	-1.95	0.05	-1.09	0.28
12	-0.58	0.56	-0.68	0.50	1.88	0.06	-1.31	0.19	-0.89	0.38	0.52	0.60

*Vysvětlivky: P-hodnoty <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota M = měsíc, Zs = S-statistika, p = p-value, červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. Hodnoty zaokrouhlena na 0.05 a trend není v tabulce vyznačen, značí to, že výsledná hodnota před zaokrouhlením převyšuje hranici 0.05. *Pozn.: Listopad (Dolní Dvůr): detekován poklesový trend při použití MK-testu citlivého pro autokorelaci v datech. Drobná autokorelace byla sice dle ACF korelogramů detekována, ale vzhledem ke grafickému průběhu srážek byl nakonec upřednostněn standardní MK-test, jehož výsledky jsou zveřejněny v tabulce. Červen (Pec p/Sněžkou): trend detekován pouze za předpokladu použití modifikovaného MK-testu pro zohlednění autokorelací v datové řadě. Zdroj dat: ČHMÚ.*

Pro jednotlivé stanice je možno dále testovat trendy ročních průměrů. V našem případě pro 4 časová období: 1962–2021, 1962–1981, 1982–2001, 2002–2021. V rámci níže položených stanic nebyly pro celou délku časové řady (1962–2021) u srážek detekovány žádné trendy a ani interanuální variabilita nevykazovala výraznou dynamiku. Zcela jiné chování je však na stanicích ve vyšších nadmořských výškách – Labská a Luční bouda a také na samotné Sněžce. Jak na Labské, tak i na Luční boudě byl detekován statisticky signifikantní kladný rostoucí trend srážkových úhrnů. Zcela opačná situace panuje na stanici Sněžka. Data z její polské strany pro období 1962–2021 ukazují zřetelný pokles ročních úhrnů srážek, který je patrný především od druhé poloviny 90. let, kdy roční průměry jen zřídka překračují hranici 1300 mm. Podrobnou analýzu trendů v jednotlivých časových obdobích a dekádách prezentuje tabulka 10.

Tabulka 10. Výsledky trendové analýzy ročních průměrů srážek pro jednotlivá časová období, interval spolehlivosti = 95 %

Dolní Dvůr				Horní Maršov			Pec pod Sněžkou			Labská bouda		
Období	***Zs***	τ	***p***	***Zs***	τ	***p***	***Zs***	τ	***P***	***Zs***	τ	***P***
1962–2021	-0.59	-0.05	0.55	-1.49	-0.13	0.14	-1.01	-0.09	0.31	4.92	0.33	0.00
1962–1981	0.55	0.10	0.58	0.75	0.13	0.46	-0.10	-0.02	0.92	1.59	0.26	0.11
1982–2001	1.11	0.19	0.26	1.53	0.25	0.13	1.33	0.22	0.18	2.17	0.36	0.03

2002–2021	-1.78	-0.30	0.07	-2.56	-0.42	0.01	-1.40	-0.23	0.16	0.29	0.05	0.77

Luční bouda				Sněžka		
Období	***Zs***	τ	***p***	***Zs***	τ	***p***
1962–2021	2.81	0.18	0.01	-2.66	-0.24	0.01
1962–1981	0.81	0.14	0.42	0.00	0.00	1.00
1982–2001	2.11	0.35	0.04	1.33	0.22	0.18
2002–2021	-0.29	-0.05	0.77	-0.55	-0.10	0.58

Zs = S-statistika, p = p-value, τ = Kendallovo τ. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Zdroj dat: ČHMÚ.

3.6.2 Teplota vzduchu

V rámci testování dalšího parametru: teploty vzduchu lze očekávat signifikantní detekci pozitivních trendů. Stoupající teplota vzduchu, na rozdíl od srážek, je potvrzený fakt, který významně ovlivňuje evapotranspirační bilanci a celkovou dynamiku srážkoodtokového režimu. Dle předpokladů, pozitivní trendy je možno detekovat na všech stanicích v zájmovém území, s dominantním výskytem v jarních a letních měsících. Můžeme však pozorovat rozdíly mezi jednotlivými stanicemi v rámci jejich nadmořské výšky. U níže položené stanice (Pec pod Sněžkou) je patrný nástup oteplení již v zimních měsících, naopak u vysokohorských stanic tomu tak není a signifikantní oteplení zde začíná až v dubnu.

Tabulka 11 uvádí výsledky trendové analýzy dle modifikovaného MK-testu a ve vysvětlivkách pod tabulkou jsou uvedeny i výsledky dle standardního MK-testu. Jako nejstabilnější měsíce se jeví září a říjen, naopak nejvíce výrazné oteplení je patrné v letních měsících (červen-srpen), a to na všech zájmových stanicích. Tato razantní oteplení v letních měsících významně ovlivňují dynamiku průměrných ročních teplot, kde absolutní maxima za celou dobu pozorování byla detekována v posledních letech datové řady.

Tabulka 11. Výsledky trendového testování měsíčních dat teploty vzduchu (1962–2021), interval spolehlivosti = 95%

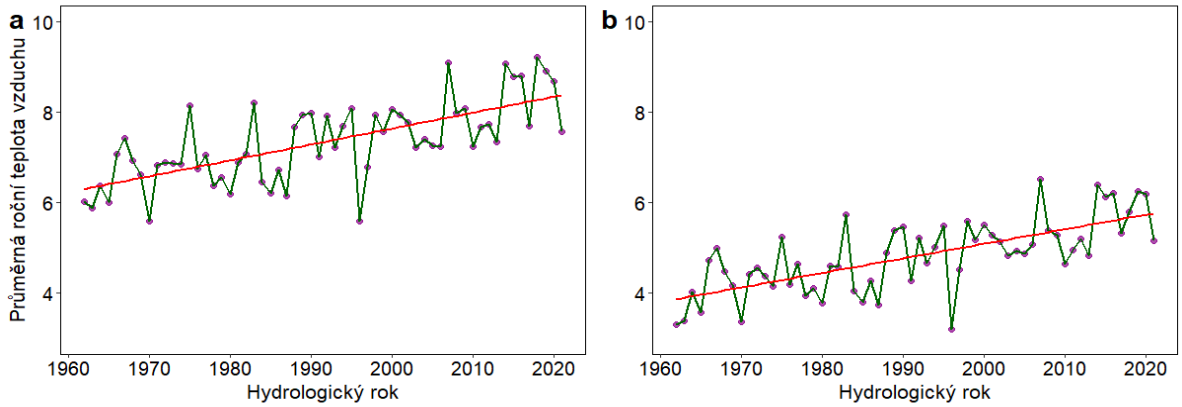
Labská bouda*			**Luční bouda***		**Pec p/Sněžkou**		**Sněžka**	
M	**S**	***p***	**S**	***p***	**S**	***p***	**S**	***p***
1	0.87	0.38	1.70	0.09	2.20	0.03	1.16	0.25
2	3.52	<0.00	4.39	<0.00	2.09	0.04	3.01	0.00
3	1.92	0.06	2.05	0.04	2.19	0.03	1.65	0.10
4	3.04	0.00	3.20	0.00	4.03	<0.00	2.57	0.01
5	1.59	0.11	2.33	0.02	1.98	0.05	1.78	0.08
6	3.04	0.00	3.22	0.00	3.38	<0.00	3.32	<0.00
7	2.21	0.03	2.39	0.02	2.48	0.01	3.27	0.00
8	3.46	<0.00	4.25	<0.00	3.32	<0.00	4.19	<0.00
9	0.91	0.36	1.38	0.17	0.70	0.48	1.96	0.05

10	0.78	0.44	1.27	0.21	1.44	0.15	0.72	0.47
11	2.03	0.04	2.10	0.04	2.53	0.01	2.51	0.01
12	1.84	0.07	2.85	0.00	2.80	0.01	2.12	0.03

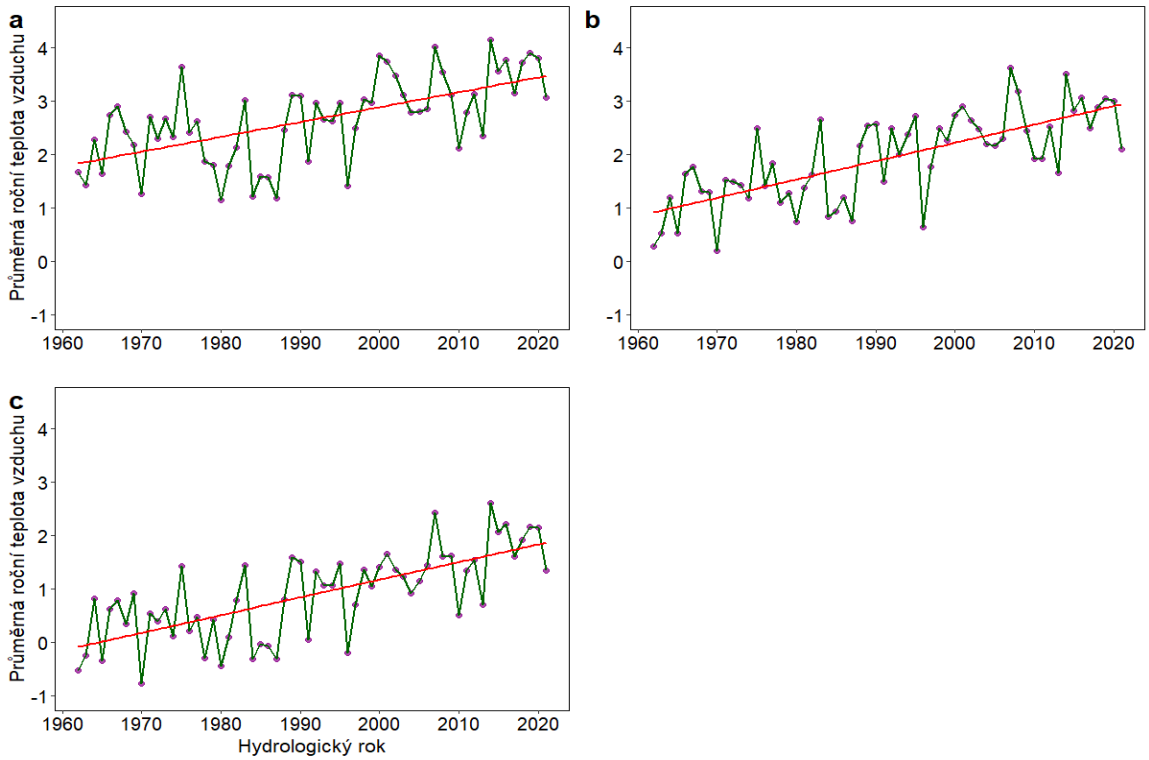
*Vysvětlivky: M = měsíc, S = S-statistika, p = p-value. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. *Pozn.: Únor (Labská bouda): trend detekován pouze při zohlednění lehké autokorelace, která byla v datové řadě nalezena. Při použití standardního MK-testu vychází Z-statistika: 1.646 a p-value: 0.100 a trend není signifikantní. Únor (Luční bouda): trend detekován pouze při zohlednění lehké autokorelace, která byla v datové řadě nalezena. Při použití standardního MK-testu vychází Z-statistika: 2.054 a p-value: 0.070 a trend není signifikantní. Zdroj dat: ČHMÚ.*

Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu lze vyhodnotit rovněž graficky viz. obrázek 17 a obrázek 18. Nejteplejším obdobím v historii pozorování je poslední dekáda (2012–2021), jejíž průměr výrazně převyšuje „dlouhodobý normál“, a to na všech zájmových stanicích. Příkladem může být stanice Sněžka, kdy v tomto období poprvé v historii průměrná roční teplota překročila 2.5°C. Obdobně i na Labské či Luční boudě, kde byly překročeny hodnoty 4, resp. 3.5°C. Pokud se zaměříme detailněji na sklon trendu u níže a výše položených stanicích, pak se hodnoty liší jen nepatrně. Nejmenší sklon nárůstu teplot vzduchu má datová řada Labské boudy, kde lze tedy predikovat, že oteplení probíhá o něco pomaleji v porovnání s okolními stanicemi. Jiným ukazatelem, jak vyjádřit míru oteplení pomocí sklonu datové řady je vyjádření jeho změny za určitý časový úsek, zpravidla za dekádu, a to pomocí lineární regrese. Z těchto dat uvádíme následující výsledky: Pec pod Sněžkou +0.32°C/10 let, Labská bouda +0.28°C/10 let, Luční bouda +0.34°C/10 let a Sněžka +0.33°C/10 let. I z těchto dat je tedy patrné, že rychlost oteplení je nejmírnější na Labské boudě.

Obrázek 17. Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962–2021) na níže položených stanicích Vrchlabí (a) a Pec Pod Sněžkou (b). Zdroj dat: ČHMÚ.



Obrázek 18. Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962–2021) na výše položených stanicích Labská bouda (a), Luční bouda (b) a Sněžka (c). Zdroj dat: ČHMÚ.



Obdobně jako i v rámci datové řady srážek, tak i zde byla analýza trendů pomocí MK-testu vývoje ročních průměrů rozdělena na 4 časová období: 1962–2021, 1962–1981, 1982–2001 a 2002–2021. Výsledky této analýzy uvádí tabulka 12.

Tabulka 12. Výsledky trendové analýzy ročních průměrů teploty vzduchu pro jednotlivá časová období, interval spolehlivosti = 95%

Labská bouda				**Luční bouda**			**Pec p/Sněžkou**			**Sněžka**		
Obd.	***S***	***τ***	***p***	***S***	***τ***	***p***	***S***	***τ***	***p***	***S***	***τ***	***p***
62–21	4.27	0.44	<.0	5.56	0.49	<.0	5.52	0.49	<.0	5.40	0.50	<.0
62–81	-0.23	-0.04	0.82	0.75	0.13	0.46	0.88	0.15	0.38	-0.36	-0.06	0.72
82–01	2.04	0.34	0.04	1.91	0.31	0.06	1.53	0.25	0.13	1.72	0.28	0.09
02–21	1.46	0.24	0.14	0.49	0.08	0.63	1.98	0.33	0.05	1.78	0.30	0.07

S= S-statistika, p = p-value, τ = Kendallovo τ, Obd. = Období, 62–21 => 1962–2021, 62–81 => 1962–1981, 82–01 => 1982–2001, 02–21 => 2002–2021. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <.0 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Zdroj dat: ČHMÚ.

3.6.3 Hydrologická data

Hydrologická data se v ČR standardně vyhodnocují pro hydrologický rok, tj. od listopadu do října roku následujícího. Míra autokorelace v rámci měsíčních hydrologických dat byla zanedbatelná, byl tedy aplikován standardní neparametrický MK-test.

Tabulka 13 ukazuje výsledky trendové analýzy pro jednotlivé měsíce hydrologického roku. Z výsledků jsou patrné signifikantní poklesy vodností v jarních měsících (duben, květen) a to na všech závěrových profilech. Tyto výsledky korespondují také se zjištěnými trendy v rámci srážek – detekovaný pokles v dubnu a květnu, a teplot – detekovaný nárůst ve výše zmíněných měsících.

Dále byly detekovány poklesy vodnosti v letních měsících především na níže položených závěrových profilech (Hostinné, Horní Maršov). Co se týče povodí Modrého potoka, zde byly poklesy průtoků detekovány také výhradně v letních měsících (červenec, srpen). Relativně stálé vodnosti u tohoto povodí v jarních měsících jsou dány vysokou nadmořskou výškou, dlouhodobější sněhovou pokrývkou a posunem doby jejího tání oproti níže položeným povodím.

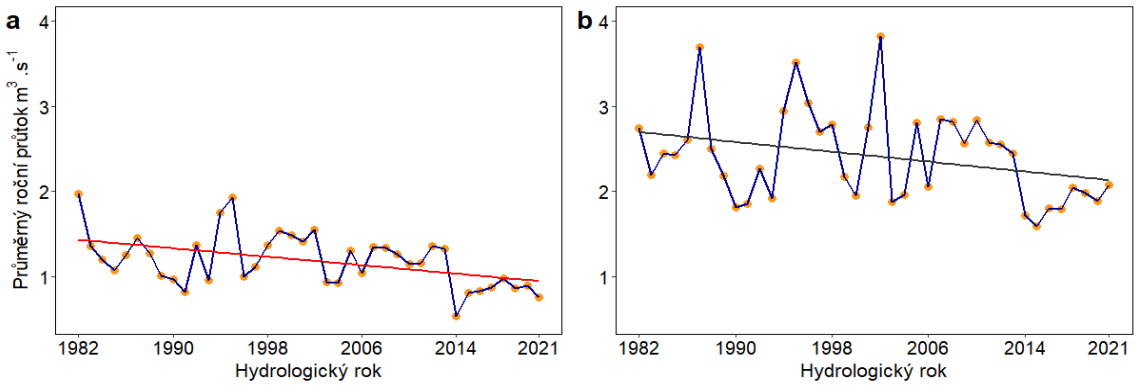
Tabulka 13. Výsledky trendového šetření dynamiky průtoků pro jednotlivé měsíce v rámci analyzovaných povodí, interval spolehlivosti = 95%

	Čistá – Černý Důl		**Čistá – Hostinné**		**Modrý potok**		**Úpa – H. Maršov**		**Úpa – Obří Důl**	
M	S	***p***	S	***p***	S	***p***	S	***p***	S	***p***
11	-0.32	0.75	-1.34	0.18	-0.20	0.84	-0.83	0.41	-0.47	0.64
12	1.18	0.24	-1.15	0.25	-1.01	0.31	-0.92	0.36	0.15	0.88
1	-0.52	0.60	-0.87	0.38	-0.50	0.62	-1.41	0.16	-0.92	0.36
2	1.48	0.14	0.72	0.47	-0.29	0.77	1.13	0.26	-0.12	0.91
3	0.73	0.46	-1.25	0.21	0.00	1.00	1.07	0.29	-0.86	0.39
4	0.43	0.67	-3.06	0.00	1.39	0.17	-1.18	0.24	0.24	0.81
5	-2.39	0.02	-2.99	0.00	-1.78	0.08	-2.90	0.00	-2.19	0.03
6	-1.18	0.24	-1.92	0.06	-1.95	0.05	-2.90	0.00	-1.87	0.06
7	-0.41	0.68	-1.06	0.29	-2.13	0.03	-0.36	0.72	-1.84	0.07
8	-0.62	0.54	-2.25	0.03	-2.59	0.01	-1.13	0.26	-1.69	0.09
9	-0.92	0.36	-2.13	0.03	-1.63	0.10	-1.04	0.30	-1.90	0.06
10	0.85	0.40	-1.13	0.29	0.87	0.38	0.76	0.45	0.95	0.34

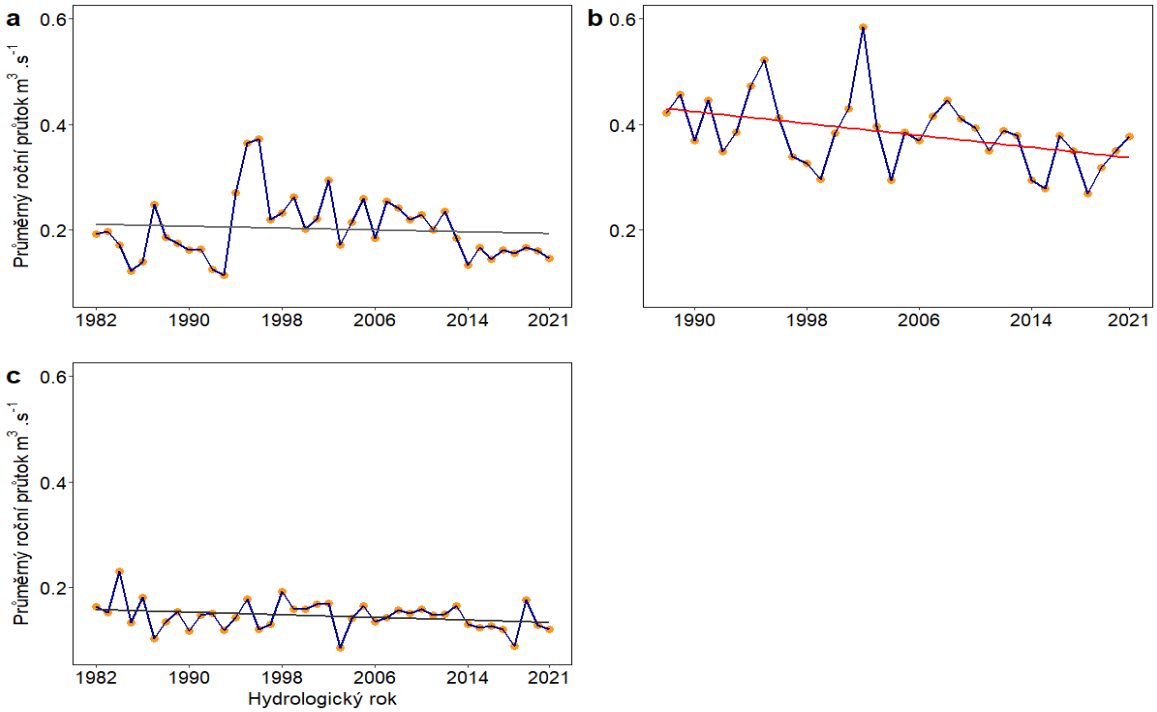
M = měsíc, S = S-statistika, p = p-value. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota zaokrouhlena na 0.05 a trend není v tabulce vyznačen, značí to, že výsledná hodnota před zaokrouhlením převyšuje hranici 0.05. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Kromě profilu Obří Důl (1988–2021) jsou všechny analýzy vedeny v časovém období hydrologických let 1982–2021. Zdroj dat: ČHMÚ.

Grafické vyjádření změn odtokového režimu znázorňují obrázek 19 a obrázek 20. Patrné změny za tyto 4 dekády byly zaznamenány ve všech zkoumaných povodích a profilech, avšak statisticky signifikantní trendy byly detekovány pouze na dvou profilech: Čistá – profil Hostinné a na Úpě – profil Obří Důl. Vzhledem ke zkrácené datové řadě na profilu Obří Důl je však třeba k těmto trendům přistupovat obezřetně, neboť mohou být snadno zaměnitelné s přirozenou hydrologickou dynamikou v rámci interanuální variability. Na všech stanicích, kromě Modrého potoka, jsou patrné výrazné změny vodnosti v poslední dekádě (2012–2021).

Obrázek 19. Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků v rámci dvou níže položených závěrových profilů: Čistá – Hostinné (a), Úpa – Horní Maršov (b). Zdroj dat: ČHMÚ.



Obrázek 20. Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků výše položených závěrových profilů: Čistá – Černý Důl (a), Úpa – Obří Důl (b) a Modrý potok (c). Zdroj dat: ČHMÚ.

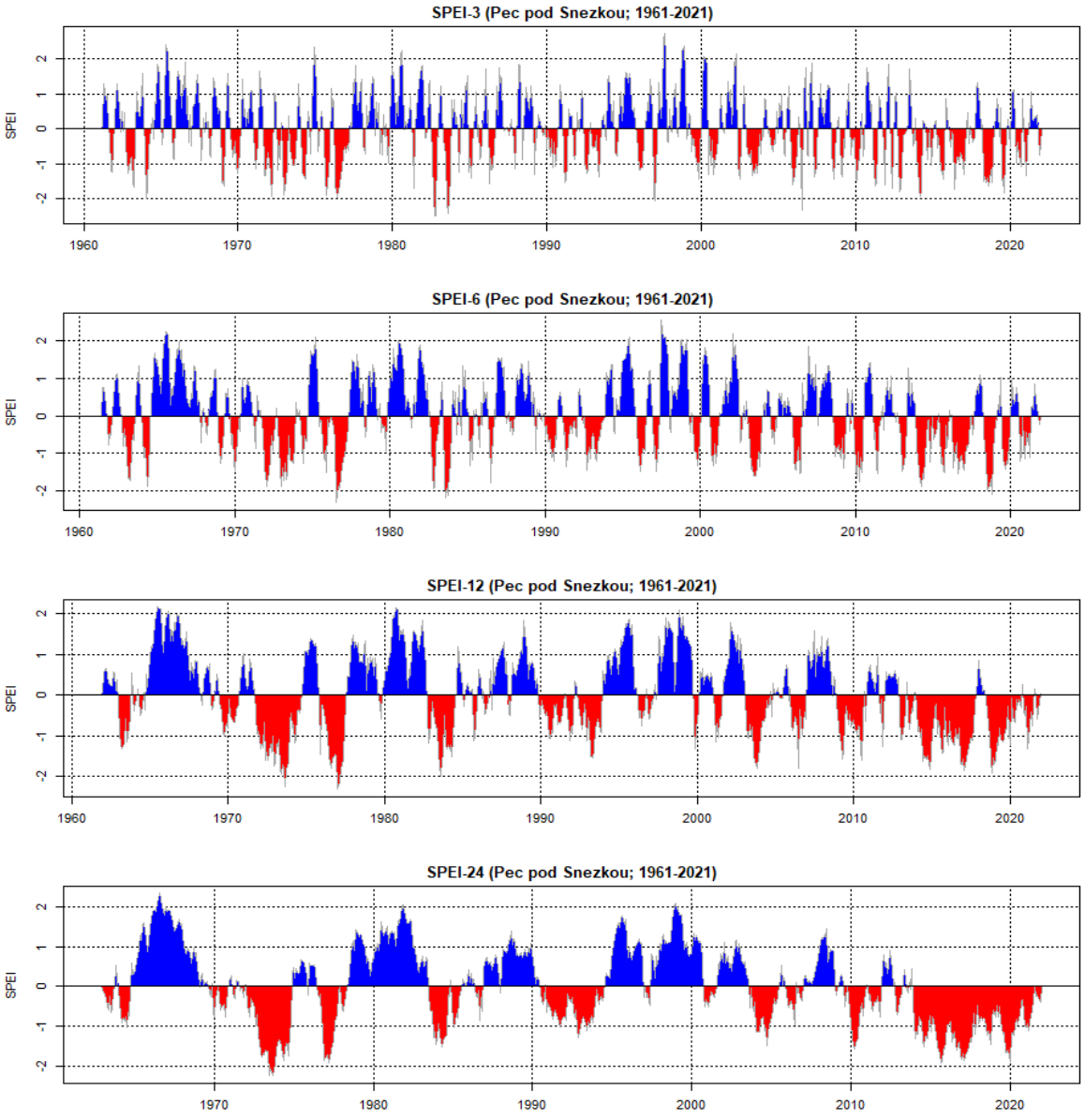


3.6.4 Hodnocení hydrologických a klimatických extrémů

Indexy pro vyhodnocení extremity hydroklimatických jevů použité v tomto projektu byly vybrány na základě dvou hlavních kritérií. Jedním byla dostupnost vhodných dat, tím druhým pak jednoduchá srovnatelnost analýz mezi dílčími povodími. Analýza zahrnovala také hodnocení hydrologických a klimatických charakteristik během 4 desetiletí (1982–1991, 1992–2001, 2002–2011 a 2012–2021) s cílem poukázat na nejvýraznější změny odtokových charakteristik během celého sledovaného období. Z časových řad byly vypočteny následující charakteristiky:

1**) SPEI index** vyjadřující vláhovou bilanci. Tento ukazatel je standardizovaným rozdílem spadlých srážek a potenciálního výparu z povodí, kdy je výpar vypočten jednoduchou formulí z dostupných dat o teplotě vzduchu (Beguería et al., 2014). Hodnoty SPEI indexu blízko nuly vyjadřují normální stav. Pokud hodnoty indexu klesnou pod -0,5, můžeme hovořit o suchu, naopak hodnoty vyšší než 0,5 značí nadbytek zásob vody oproti dlouhodobému normálu. Výstupy indexu pro retrospektivu 3, 6, 12 a 24 měsíců opět hovoří o výjimečnosti desetiletí 2012–2021, ve kterém bylo zájmové území zasaženo suchem kvůli deficitu srážek a také zvýšenému výparu vlivem nadnormálních teplot vzduchu (obrázek 21).

Obrázek 21. Vývoj SPEI indexu (SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12 a SPEI-24) pro stanici Pec pod Sněžkou.



Zdroj dat: ČHMÚ.

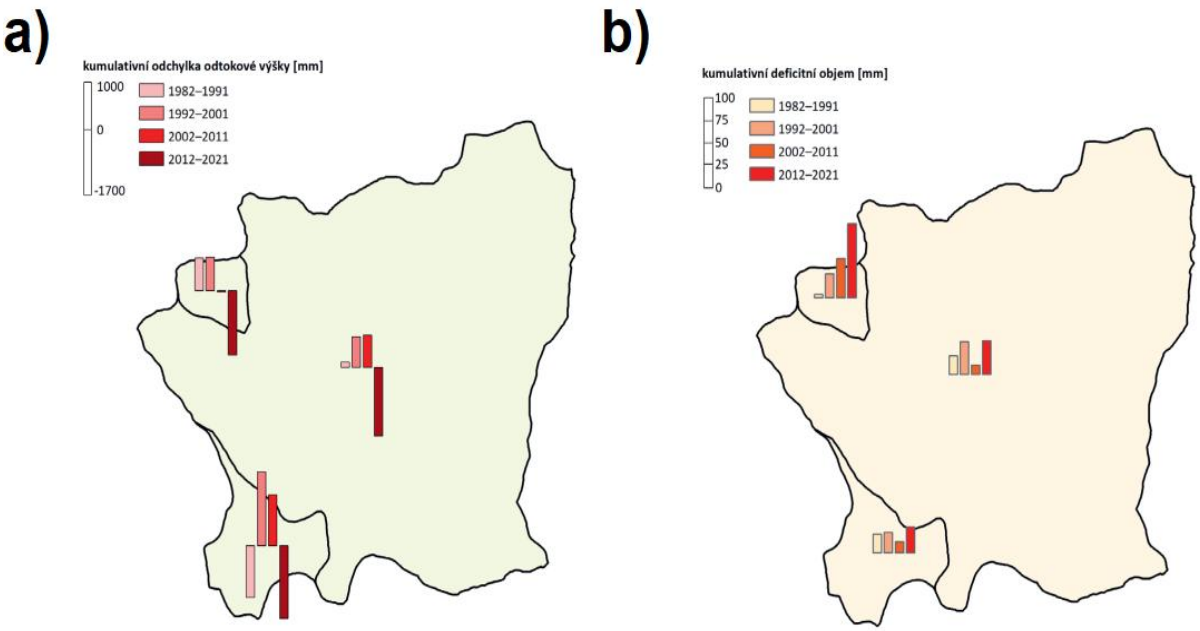
2) **Překročení prahové hodnoty – Q90**. Pro hranici hydrologického sucha a hodnocené jeho sezonality byla vybrána hranice kvantilu Q90. Tato hodnota odpovídá průtoku s pravděpodobností

překročení 90 %. Kvantil Q90 byl vybrán na základě manuálu WMO pro hodnocení nízkých průtoků (Gustard a Demuth, 2008). Tato hranice poté slouží při výpočtu níže uvedených charakteristik. Pro hranici opačného extrému, tedy povodní, byla s přihlédnutím k histogramu průtokových dat všech vybraných stanic použita metoda N-letosti povodně. Tedy průtok, který se objeví v průměru jednou za N-let. Jako povodeň byla tedy označena dvouletá voda, tedy hodnota průtoku, která se vyskytne v průměru jednou za 2 roky.

3) **Odtoková výška** – celkový objem vody vztažený na plochu povodí, který odteče za daný časový úsek. I pomocí této proměnné byla zcela jasně vidět výjimečnost období 2012–2021, kdy byla průměrná roční odtoková výška nejnižší ve všech povodích. Při bližší analýze kumulativního deficitu odtokové výšky vůči normálu je patrné, že během posledního desetiletí byl zaznamenán výrazný deficit v celkovém odtoku ze všech tří povodí – v průměru 1642 mm, tedy 164,2 mm za rok. V povodí horní Čisté bylo z tohoto pohledu odtokově podprůměrné i období 1982–1991 (obrázek 22a).

4) **Magnituda hydrologického sucha – kumulativní deficitní objemy** v období, kdy byla hodnota průtoku menší než Q90 – tedy průtok s 90 % pravděpodobností překročení. Pro lepší porovnání mezi jednotlivými povodími byl tento objem opět přepočten na plochu povodí v milimetrech. V chladné polovině roku pozorujeme spíše úbytek nedostatkových objemů v průběhu sledovaného období, zatímco v teplé polovině roku deficitní objemy v korytech vodních toků rostou. Nejvýraznější a kontinuální nárůst je patrný v povodí Modrého potoka, kde v porovnání prvního a posledního desetiletí vzrostl deficit o 120 mm – obrázek 22b. Ve zbylých dvou povodích je průběh více variabilní, i tak ale nejvyšší hodnoty nedostatkových objemů korespondují s nejteplejším a nejsušším obdobím 2012–2021.

Obrázek 22. kumulativní odchylka odtokové výšky; b) kumulativní deficitní objem pro vybraná desetiletí v rámci zájmových povodí. Zdroj dat: ČHMÚ.



5) **Index sezonality (seasonality index – SI)** představuje průměrné sezónní rozložení hydrologického sucha pro dané časové období (Laaha a Blöschl, 2006). SI je založen na dvou parametrech (Θ a r), které jsou vypočítány z juliánských dnů všech pozorování, kdy hodnoty průtoku byly pod prahovou hodnotou, v našem případě Q90. Parametr Θ představuje míru průměrné sezónnosti sucha pomocí průměrného dne výskytu v radiánech (hodnoty se pohybují od 0 do 2π, kde 0 znamená 1. leden, π odpovídá 1. červenci atd.). Parametr r představuje průměrný výsledný den výskytu a je bezrozměrným ukazatelem sezónní variability sucha. Hodnoty r se pohybují mezi 0 a 1, kde 0 znamená, že sucho nemá žádnou sezónnost a v dlouhodobém měřítku je jeho výskyt rovnoměrně rozložen během celého roku. Hodnoty blížící se 1 odpovídají velmi silné sezónnosti sucha (každé sucho se vyskytuje každý rok zhruba ve stejné době. Dny s měřeným průtokem rovným nebo nižším, než Q90 jsou extrahovány za celé sledované období (1982–2021) a převedeny na juliánské dny (Dj), které představují cyklickou proměnnou zobrazitelnou na jednotkové kružnici jako vektor. Směrový úhel v radiánech je poté vypočítán následovně:

$$\Theta_j = \frac{D_j\, 2\pi}{365}$$

Střední hodnoty souřadnic x_Θ and y_Θ součtu *n* dnů *j* byly označeny jako:

$$x_\theta = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\cos(\theta_j) \quad ; \quad y_\theta = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sin(\theta_j)$$

Na základě toho byl úhel směru průměrného vektoru odvozen jako:

$\Theta = arctan\left(\frac{y_\Theta}{x_\Theta}\right)$ pro první a čtvrtý kvadrant: $x > 0$

$\Theta = arctan\left(\frac{y_\Theta}{x_\Theta}\right) + \pi$ pro druhý a třetí kvadrant: $x < 0$

Průměrný den výskytu nízkého průtoku byl následně odvozen převedením průměrného úhlu zpět do formátu juliánského dne následujícím způsobem:

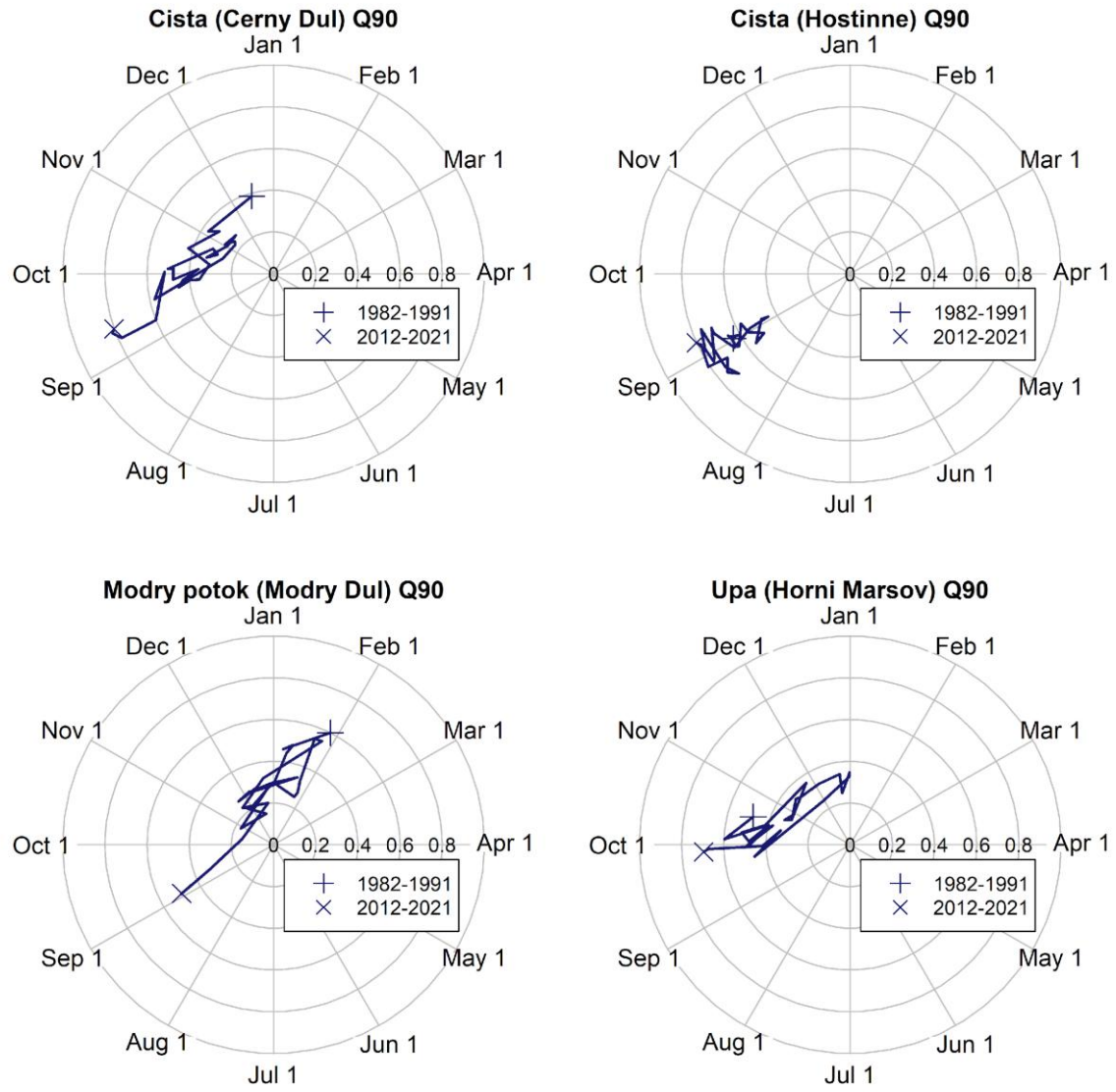
$$D = \Theta\frac{365}{2\pi}$$

Nakonec byla délka průměrného vektoru *r*, která představuje variabilitu dnů se suchem, odvozena jako:

$$r = \sqrt{x_\Theta^2 + y_\Theta^2}$$

Kombinace *r* a *D* může být poté vizualizována v prstencovém grafu pro každý měrný profil za účelem zjištění vývoje průměrného dne výskytu sucha během sledovaného období spolu s jeho variabilitou. Tyto výsledné hodnoty indexu sezonality (SI) byly znázorněny jako desetileté klouzavé průměry, aby poskytly obrázek o postupném vývoji průměrného výskytu sucha během daného období (obrázek 23).

Obrázek 23. Zobrazení sezónnosti hydrologického sucha dle kvantilu Q90 pomocí SI pro vybrané vodoměrné stanice. Zdroj dat: ČHMÚ.



3.7 Závěr

Navržený metodický postup pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů byl aplikován na klimatické a hydrologické datové řady v základním období 1982–2021. Pro aplikaci byla využita volně dostupná data ze srážkoměrných, klimatických a hydrologických stanic ČHMÚ. Hlavním cílem metodiky bylo pomocí grafických a statistických metod detekovat změny srážko-odtokového režimu a identifikovat trendy základních hydroklimatických proměnných: teploty vzduchu, srážek a průtoků. Dále se metodika zaměřuje na analýzu hydrologických extrémů, konkrétně metod pro vyhodnocení hydrologického sucha.

Vhodných postupů pro analýzu dlouhodobých datových řad existuje celá řada, jejich výběr závisí na konkrétních cílech a požadavcích uživatele. V rámci této dílčí metodiky jsme vybrali následující metody a výpočty: lineární regresi dlouhodobých datových řad, jednoduché a podvojné součtové čáry, analýzu sezonality pomocí rozložení chodu Tm, Hm, Qm. Mann-Kendallův neparametrický test

ve standardní verzi (Mann, 1945, Kendall 1975) a modifikovaný Mann-Kendallův text (Hamed, Rao (1998), 1998) pro datové řady s autokorelací. Pro analýzy klimatických a hydrologických extrémů jako vhodné doporučujeme aplikovat: SPEI index, metodu překročení prahové hodnoty Q90, vyhodnocení změn odtokové výšky, kumulativní deficitní objemy a index sezonality SI.

V případě dlouhodobých datových řad lze pomoci názorných grafických metod zpravidla snadno identifikovat změny, avšak je tyto změny je vhodné následně ověřit pomocí statistických testů a výpočtů. Pro klimatické i hydrologické datové řady se osvědčila aplikace Mann-Kendallova neparametrického testu, neboť test lze aplikovat na měsíční proměnné a zároveň nevadí krátkodobé chybějící záznamy v datových řadách. V případě hydrologického sucha se dobře osvědčily SPEI index, vyhodnocení změn v odtokových výškách pro jednotlivé dekády a index sezonality SI.

Navržená metodika je přenositelná na jiné typy analýz v klimatických a hydrologických datových řadách.

4. Hydrologické modelování jako nástroj pro sledování změn krajinného pokryvu na hydrologický režim území

4.1 Úvod

Hydrologické modelování představuje efektivní nástroj pro sledování změn krajinného pokryvu na hydrologický režim území. Vyžaduje vstupy získané na základě mapování změn krajinného pokryvu (kapitola 2) a hodnocení trendů hydroklimatických proměnných (kapitola 3). Na základě těchto vstupů specifikuje tato část metodiky doporučené metody a postupy pro hodnocení vlivu změn pokryvu krajiny na odtokové poměry, formy odtoku a výpar. Navržená metodika je postavena na volně dostupném hydrologickém modelu SWAT (Arnold et a., 2012), volně dostupných hydrometeorologických datech ČHMÚ, volně dostupných prostorových datech o půdním pokryvu a digitálním modelu terénu.

4.2 Cíle

Tato část metodiky popisuje postupy pro odhad vlivu změny land cover na hydrologický režim v prostorovém měřítku povodí a denním časovém kroku. Metodiku lze rozdělit do čtyř částí:

- Příprava prostorových a hydrometeorologických dat
- Sestavení hydrologického modelu
- Kalibrace a validace běhu modelu
- Analýza výsledků

Metodika a konkrétní kroky jsou dokumentovány na příkladu území povodí horní Úpy a horní Čisté.

4.3 Využitá data

Pro sestavení hydrologického modelu Soil and Water Assessement Tool, tj. SWAT (Neitsch et al. 2009) je třeba získat relativně široké spektrum vstupních dat. Rozsáhlejší příprava dat se týká především klimatických dat ze staničního měření.

Do modelu SWAT vstupují tato data:

- Digitální model reliéfu (např. SRTM a DMR 5G), vrstva vymezených povodí, vrstva vodních toků (https://heis.vuv.cz/)
- Vrstva krajinného pokryvu (data z programu Landsat, Sentinel, případně COPERNICUS – CORINE Land Cover (CLC) 2018)
- Vrstva půdního pokryvu (pro ČR je vhodným vstupem mapa 1:200 000, Němečková (2008) - Ústav pro hydrodynamiku AV ČR)
- Klimatická data – denní/hodinové měření minimální a maximální teploty vzduchu, úhrnů srážek, relativní vlhkosti vzduchu, průměrné rychlosti větru a solární radiace. Denní data jsou volně dostupná data z ČHMÚ.

Digitální model reliéfu

Jeden z požadovaných vstupů do modelu je digitální model reliéfu (DMR). V práci byl využit Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G), který byl vytvořen a je spravován Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). Jedná se o zobrazení přirozeného nebo lidskou činností ovlivněného zemského povrchu v digitálním tvaru. DMR5G je vytvořen ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškové referenčním systému Balt po vyrovnání s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu.

Vrstva krajinného pokryvu

V rámci projektu (viz kapitola 2) byly vytvořeny vrstvy krajinného pokryvu klasifikací dat systému Landsat za různá období, díky kterým může být zachycena změna a vývoj land cover v zájmových povodích.

Jako alternativní vstupní data pro klasifikaci krajinného pokryvu mohou být využita data družice Sentinel-2A (viz kapitola 5), která jsou též volně dostupná, mají lepší prostorové a spektrální rozlišení, ale jejich časová řada je ve srovnání s daty Landsat zásadně kratší (data jsou dostupná od cca roku 2016). Dále mohou být využity i vrstvy služby COPERNICUS – CORINE Land Cover (CLC) 2018. Vrstvy krajinného pokryvu v rámci evropského programu Coordination of Information of the Environment (CORINE) jsou vyvářeny od roku 1990 v rámci celoevropské databáze. Program má několik částí: krajinný pokryv, biotopy a ovzduší. Výstupem projektu je mimo jiné zmíněná mapa krajinného pokryvu v měřítku v měřítku 1:100 000 s nejmenší mapovací jednotkou 25 ha a s minimální šířkou 100 m pro liniové prvky. Vrstva CLC je rozdělena do tří úrovní. První vrstvu tvoří pět základních tříd, které se dále dělí do tříd druhé a třetí úrovně. Druhou úroveň představuje 15 tříd a třetí úroveň celkově 44 tříd, přičemž na území Česka se vyskytuje 29 tříd. V zájmových povodích se nachází celkem 10 tříd krajinného pokryvu.

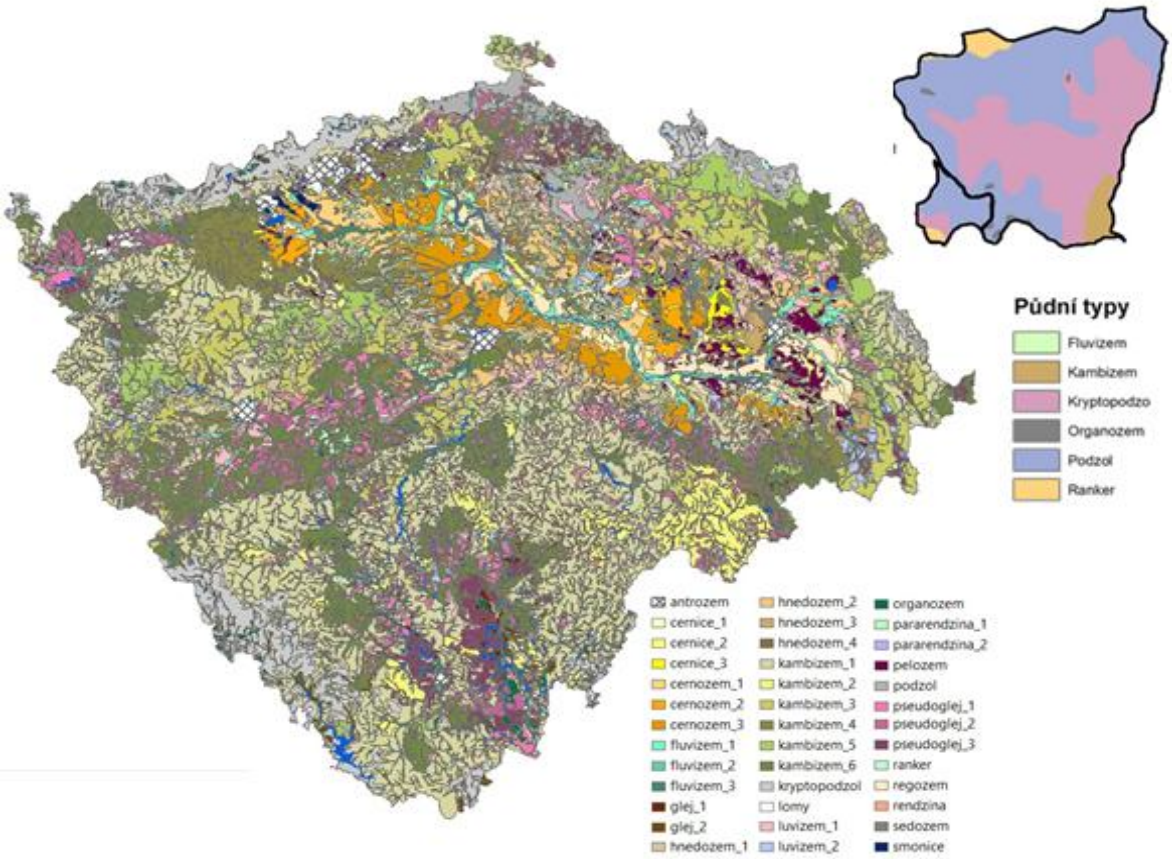
Vrstva půdního pokryvu

Pro sestavení modelu byla využita mapa půdních subtypů české části povodí Labe a tabulky fyzikálních, které byly vytvořeny Němečkovou (2008) (obrázek 24). Mapa byla odvozena z Digitální mapy půd 1:200 000 (Němeček 2000) metodou shlukové analýzy na základě údajů o fyzikálních vlastnostech půd jednotlivých půdních sond pocházejících z komplexního průzkumu půd. Celkově mapa vymezuje dvacet půdních typů, které jsou dále na základě fyzikálních vlastností rozčleněny do jednoho až šesti subtypů. Celkově tedy mapa obsahuje 39 subtypů. Pro každý subtyp je k dispozici vertikální rozdělení do jednotlivých horizontů, přičemž každý horizont je charakterizován mocností, zrnitostí, objemovou hmotností, porozitou, základními hydrolimity (dostupnou vodní kapacitou pro rostliny a polní kapacitou), nasycenou hydraulickou vodivostí, obsahem uhlíku a dusíku a náchylností půdy k erozi (Němečková 2008). V zájmových povodích se nachází celkem 7 půdních typů.

Hydrometeorologická data

Pro sestavení vstupních klimatických dat byly pro modelová povodí horní Úpy a Čisté vybrány stanice zmíněné v tabulce 14, která zároveň znázorňuje nadmořskou výšku stanice, období měření a měřené klimatické veličiny. Klimatické a srážkoměrné stanice se vyskytují napříč zájmovým povodím nebo v jeho blízkosti a zároveň se nachází v rozdílných nadmořských výškách. Poznámky k jednotlivým stanicím a příprava data je popsána v textu dále.

Obrázek 24. Mapa půdních subtypů pro povodí Labe (Němečková, 2008) s výřezem povodí horní Úpy a Čisté



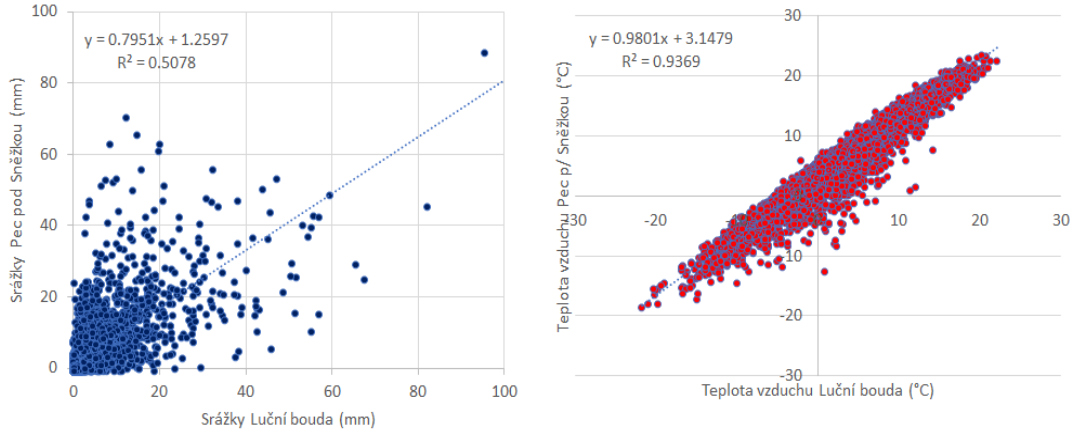
Tabulka 14. Klimatická data. TMAX, TMIN – maximální, minimální teplota vzduchu, SRA – úhrn srážek, RVV – relativní vlhkost vzduchu, PRV – průměrná rychlost větru, RAD – solární radiace

název stanice	**nadm. výška [m n. m.]**	**počátek měření**	**klimatické veličiny**
Pec pod Sněžkou	816	1991	TMAX, TMIN, SRA, RVV, PRV, RAD
Luční bouda	1413	1/2009	TMAX, TMIN, SRA, RVV, PRV, RAD
Dolní Dvůr	560	1991	SRA
Černý Důl	715	6/2005	SRA
Pomezní boudy	1050	5/1997	SRA
Horní Maršov	585	1991	SRA

Jedinou stanicí, která poskytuje kontinuální měření všech potřebných veličin v období 1991–2021, je klimatická stanice Pec pod Sněžkou. Druhou klimatickou stanicí v zájmovém území nebo jeho okolí je stanice na Luční boudě, u které probíhá měření až od 20. 1. 2009. Proto byla chybějící perioda doplněna daty z klimatické stanice Pec pod Sněžkou. Úhrny srážek a teploty vzduchu byly přepočítány pomocí lineární regrese v závislosti na nadmořských výškách stanic. Dále se v zájmovém území nebo

jeho okolí vyskytují čtyři srážkoměrné stanice s různými počátky měření (viz. tabulka 14). Chybějící periody úhrnů srážek byly doplněny z klimatické stanice Pec pod Sněžkou opět pomocí lineární regrese (obrázek 25) v závislosti na nadmořských výškách stanic. Stejným způsobem byly přepočítány a doplněny údaje o teplotách vzduchu. Denní hodnoty zbývajících veličin (relativní vlhkost vzduchu, průměrná rychlost větru a solární radiace) byly převzaty z klimatické stanice Pec pod Sněžkou.

Obrázek 25. Ukázka vztahu srážek (vlevo) a teplot vzduchu (vpravo) mezi stanicemi Luční bouda a Pec p/ Sněžkou



4.4 Navržený metodický postup

Pro zhodnocení vlivu změny krajinného pokryvu na hydrologické toky v měřítku povodí je zapotřebí využít hydrologické modely, protože řadu stavových veličin (např. nasycení půdy vodou, množství podzemní vody) ani hydrologických toků nelze v měřítku povodí efektivně měřit. Hydrologických modelů existuje celá řada, a ne všechny lze pro odhad změny land cover využít. Základním předpokladem je zahrnutí vlivu land cover do výpočtu hydrologického modelu v dostatečném prostorovém rozlišení. Jedním z modelů, které zahrnují pokryv krajiny do svého výpočtu v dostatečném rozlišení je hydrologický model Soil and Water Assesment Tool (SWAT). Navržený metodický postup se sestává z následujících kroků a je zobrazen i na obrázku 26:

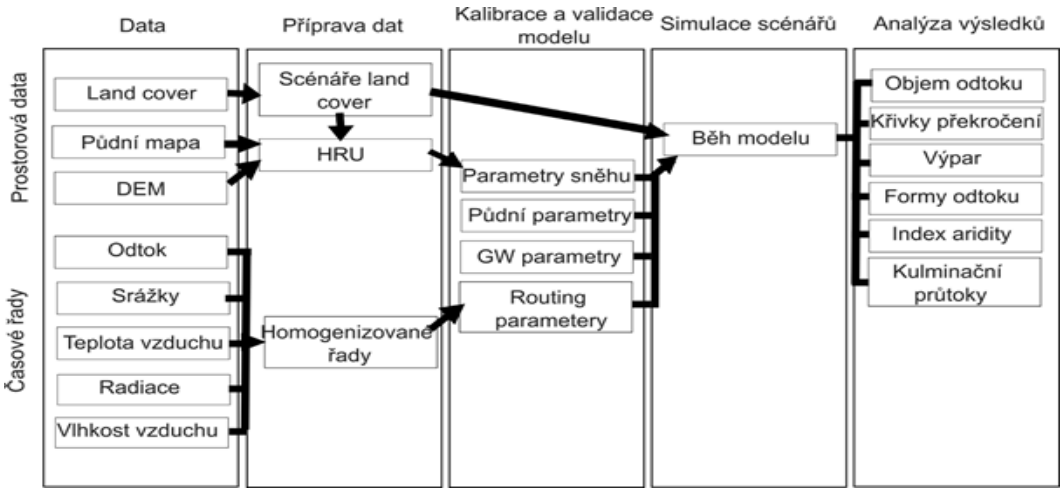
- Představení modelu SWAT
- Sestavení modelu
- Kalibrace a validace modelu SWAT
- Vyhodnocení vlivu změny land cover na hydrologické poměry

4.4.1 Model SWAT

Model byl vytvořen na United States Department Agriculture – Agricultural Research Service (USDA-ARS). Jedná se o kontinuální a semi-distribuovaný model, kde jsou fyzikální zákony uplatňovány ve zjednodušené, koncepční formě. SWAT je model, který se využívá ke kontinuálnímu modelování a umožňuje pracovat v denním, měsíční a ročním časovém kroku. Modelované povodí je nejdříve rozděleno do více dílčích povodí. Každé dílčí povodí je reprezentováno právě jedním vodním tokem. Poté dochází k vytvoření tzv. Hydrological response units (HRUs). HRUs jsou plochy, které představují jedinečné kombinace kategorie krajinného pokryvu, půdního typu a třídy sklonitosti (Arnold a kol. 2012).

Model SWAT prošel a stále prochází celou řadou aktualizací od svého prvního sestavení v 90. letech. Klíčovými verzemi modelu byly SWAT 94.2, 96.2, 98.1, 99.2 a 2000. Tyto verze jsou detailně popsány v pracích Arnolda a Fohrerové (2005) and Neitscheho a kol. (2009). Verze 2000 byla doplněna modulem kinetiky vodního toku QUAL2E (Brown, Barnwell 1987). Posledními verzemi jsou SWAT2005, SWAT 2012 a SWAT+, jejichž charakteristika a jednotlivé moduly jsou detailně rozepsány v uživatelských manuálech dostupných na webových stránkách vydavatele modelu - https://swat.tamu.edu/.

Obrázek 26. Navržený metodický postup pro hodnocení vlivu land cover na hydrologické chování území



Je třeba zmínit, že SWAT má vytvořený relativně přehledný a funkční „interface“ v prostředí geoinformačních systémů, tj. ArcMap, QGIS. Prostředí GIS umožňuje přehledné sestavení a spouštění modelu, manuální kalibraci a základní vizualizaci výsledků.

Hlavními komponenty modelu jsou moduly povrchového odtoku, evapotranspirace, infiltrace půdní vody, podzemní vody (mělká a hluboká zvodeň), nádrží, nutrientů, bakterií a další. Většina výše zmíněných částí je počítána zvlášť pro každé HRU v denním kroku. Výsledky jsou následně agregovány pro jednotlivá subpovodí až povodí. Detailní popis modelu je popsán v rozsáhlé teoretických dokumentacích (Neitsch a kol. 2009; Arnold a kol. 2012).

Prvním komponentou je bilancování povrchového odtoku. K výskytu povrchového odtoku dochází, když vstupní úhrn srážek překročí infiltrační rychlost. Pokud je iniciální půdní profil relativně nenasycený, infiltrační rychlost je vysoká a dochází k postupnému nasycení. Při překročení infiltrační rychlosti dochází k naplňování depresí a následně vzniká povrchový odtok (Neitsch a kol. 2009). SWAT poskytuje dvě metody pro výpočet povrchového odtoku: metodu SCS CN křivek (USDA SCS 1985) a infiltrační metodu Green & Ampt (Green a Ampt 1911). V rámci výpočtu výparu je nejdříve počítána intercepce pro danou kategorii krajinného pokryvu (jejího indexu listové plochy – LAI) a kategorii sklonu, z výsledků vycházejí výpočty transpirace. Transpirace je simulována jako lineární funkce potenciální evapotranspirace a indexu listové plochy (LAI), tj. poměr plochy listů k ploše HRU (Neitsch a kol. 2009). K výpočtu potenciální evapotranspirace je možno využít tří rozdílných metod: Penman-Monteith metoda (Monteith 1965), Priestley-Taylor metoda (Priestley a Taylor 1972) a Hargreaves metoda (Hargreaves a kol. 1985). V závislosti na výběru metody je třeba poskytnout modelu rozdílná vstupní data. Penman-Monteith metoda vyžaduje datovou řadu solární radiace, teploty vzduchu, relativní vlhkosti a průměrné rychlosti větru. Metoda Priesley-Taylor vyžaduje vstupy solární radiace, teploty vzduchu, a relativní vlhkosti. Při volbě metody dle Hargreavese jsou

potřebná pouze data teploty vzduchu. V dalším kroku je počítána aktuální evapotranspirace. SWAT nejdříve počítá výpar vody zadržené intercepcí. Následují výpočty aktuální evapotranspirace zvlášť pro půdu a rostliny s využitím přístupu podle Ritchieho (1972). Pokud se v zájmovém území vyskytuje sněhová pokrývka zahrnuje model do výpočtu i proces sublimace (Neitsch a kol. 2009).

V závislosti na hydropedologických vlastnostech půdního profilu a jednotlivých horizontů dochází k rozdílnému proudění infiltrované vody nesaturovanou zónou. Bilance půdního profilu obsahuje komponenty infiltrace, laterálního odtoku, perkolace a water plant uptake. Voda může proudit půdním modelem v nesaturovaných a saturovaných podmínkách. Nesaturovaný odtok je nepřímo simulován jako funkce distribuce water plant uptake a distribuce hloubek evaporace z půdy. K saturovanému odtoku dochází, kdy hodnota půdní vlhkosti přesáhne hodnotu polní kapacity (Neitsch a kol. 2009). Množství vody proudící laterárním směrem je ovlivněno nasycenou hydraulickou vodivostí půdních horizontů, jejich mocností, sklonem uložení a délkou svahu. Množství perkolace je zase dáno funkcí půdní vlhkosti, půdními hydrolimity a teplotou půdy (Neitsch a kol. 2009). Pokud je teplota půdní vrstvy pod 0 °C, není počítáno s pohybem vody v půdě.

Tání sněhové pokrývky je počítáno na základě přístupu použitého v modelu CREAMS (Knisel, 1980), kde sníh taje v lineární závislosti na teplotě. Rychlost tání je kontrolována a kalibrována pomocí parametrů SMFMX a SMFMN [mm H2O/ºC·den^{-1}] (Arnold a kol. 2012).

Modul podzemní vody je reprezentován celistvým modelem pro jednotlivá dílčí povodí, který rozděluje podzemní vody do dvou nádrží – mělký a hluboký kolektor. V obou případech může docházet k příspěvku z kolektorů do povrchových toků, tzv. return flow. Jedná se však o lineární aproximaci, založenou na nasycené hydraulické vodivosti zvodně a kolísání hladiny podzemní vody (Neitsch a kol. 2009). Výška hladiny podzemní vody je funkcí množství perkolace, koeficientu základního odtoku, specifické vydatnosti a doby zdržení, která řídí časovou distribuci perkolace.

Tento přístup ignoruje prostorově distribuované parametry (nasycenou hydraulickou vodivost, transmisivitu, atd.). Vhodným řešením tohoto omezení je integrace SWAT modelu s hydrogeologickým modelem např.: MODFLOW (Kim a kol. 2008). Přesnější informace o hydrogeologických charakteristikách zájmové lokality mohou hrát významnou roli při pochopení hydrologických procesů, především pak v suchém období při kvantifikaci a distribuci tzv. return flow (Neitsch a kol. 2009).

Sestavení modelu

Příprava dat, sestavení a simulace modelu SWAT proběhla v prostředí Arcmap 10.5. Nejdříve bylo nutné stáhnout rozšiřující balíček ArcSWAT z webové stránky vydavatele modelu - https://swat.tamu.edu/. Po instalaci rozšiřujícího balíčku ArcSWAT je možné zahájit sestavování modelu. Hlavní menu programu ArcSWAT je zobrazeno na obrázku 27.

Topografická část

Prvním krokem při sestavení modelu **definice vodních toků a subpovodí**. Tento krok lze provést dvěma způsoby, a to buď vložením DMR, vrstev předdefinovaných vodních toků a subpovodí. V tomto kroku se využívá nástroje *Watershed Delienation*. Pokud uživatel nevyužívá předdefinovaných vodních toků, hlavních a dílčích povodí, postupuje se ve vymezení povodí a dalších charakteristiky následovně:

- Vymezení povodí
  - Vložení DMR
  - Vymezení hranic hlavního povodí a dílčích subpovodí

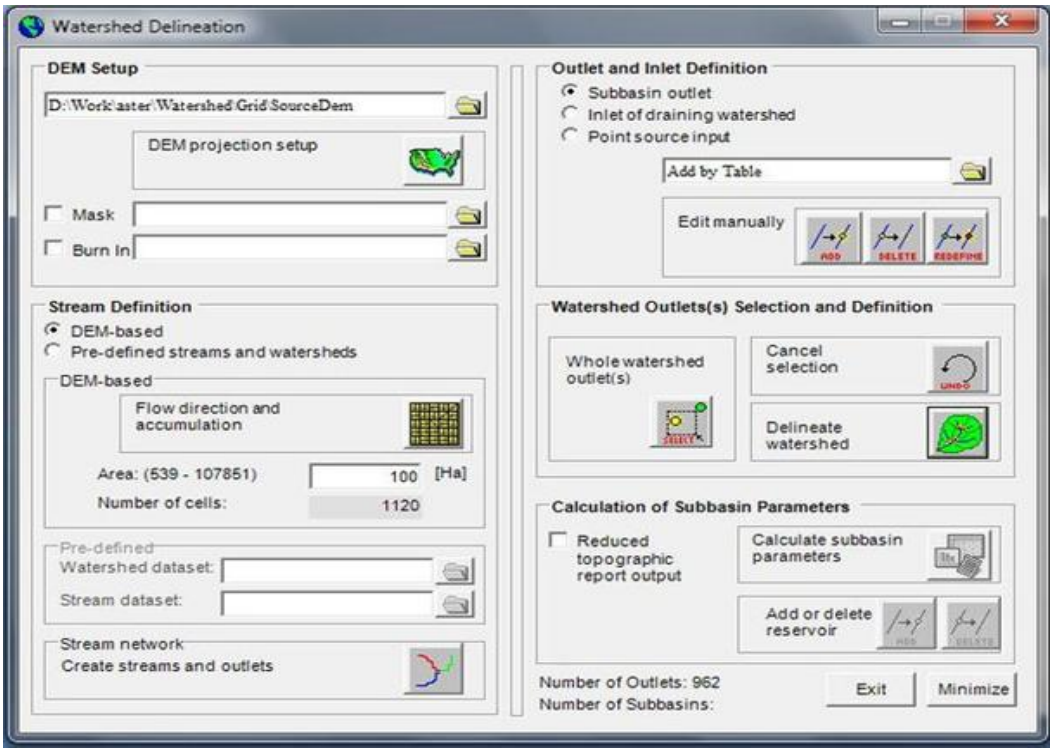
- Výpočet parametrů hlavního a dílčích povodí

· Definice vodních toků v povodí

- Určení vodních linií na základě výpočtu směru proudění a akumulace (funkce *Flow Direction, Flow Accumulation*)
- Nastavení prahové hodnoty minimální velikosti dílčích povodí v procentech z celkové plochy hlavního povodí
- Vytvoření odtokových buněk

V další části nástroje je umožněno vkládat dodatečné vstupy a výstupy z povodí. Pokud se například v oblasti nachází bodové zdroje vypouštěné vody a jsou dostupná kontinuální data o vypouštění, je možno takové bodové zdroje do modelu vložit (*Point source input*) pro zpřesnění výpočtu vodní bilance. V této části se bodově vkládají informace o umístění a parametrech vodních nádržích v dílčích povodích. Po načtení potřebných vstupních dat a lze nástroj ukončit klinutím na *Calculate subbasin parameters*, čímž dojde k delineaci povodí a vygenerování topografického reportu pro každé dílčí povodí.

Obrázek 27. Hlavní menu programu ArcSWAT



Druhým krokem je **definice Hydrological response units (HRU).** V nástroji *HRU definition* je potřebné načíst vstupní data krajinného pokryvu a půd. Vrstvy lze vkládat jak v rastrové, tak vektorové podobě. Jak již bylo zmíněno, SWAT je vyvíjený americkou USDA-ARS a má svoji vlastní databázi krajinného pokryvu a půd. Proto pokud nejsou využívána americká vstupní data s definovanou terminologií pro jednotlivé třídy krajinného pokryvu a typu půd, je nutné v této fázi vložit převodní tabulky, které následně propojí názvy využitých dat s americkou terminologií (viz. tabulka 15).

Nástroj *Slope* definuje třídy sklonitosti na základě vloženého DMR v předešlém kroku. Povodí lze rozdělit až do pěti tříd. Hodnoty sklonů se zadávají v procentech. V rámci příkladu na povodí Úpy a Čisté byly povodí rozděleny do pěti kategorií sklonitosti (0–2°, 2–5°, 5–10°, 10–20°, 20° a více).

Tabulka 15. Převodní tabulka mezi třídami krajinného pokryvu a SWAT kódy land cover

Třída krajinného pokryvu	**Kód SWAT**
Zástavba a komunikace	URML
Louky (včetně přírodních), pastviny	PAST
Listnatý les	FRSD
Jehličnatý les	FRSE
Jehličnatý les odumřelý	FRSE
Smíšený les	FRST
Přechodová stadia lesa a křoviny	SHRB
Holiny, oblasti s nízkou vegetací	BSVG
Kosodřevina	SHRB
Rašeliniště	MIGS
Skály, kamenná moře	BARR
Vodní plochy a toky	WATR

Jak již bylo zmíněno model SWAT rozděluje dílčí povodí do hydrologických jednotek (HRU), které představují unikátní kombinaci třídy krajinného pokryvu, půdy a sklonitosti, a v kterých probíhá většina výpočetních procesů samostatně. Až poté dochází k agregaci výstupů z HRUs do dílčích povodí až po uzávěrový profil hlavního povodí. K definici a vytvoření HRU slouží nástroj *HRU definition*. Je nutné definovat tzv. hraniční hodnoty (*HRU tresholds*) pro jednotlivé komponenty (kategorie krajinného pokryvu, půd a sklonitostí). Hraniční hodnoty se udávají v procentech a vyjadřují minimální dovolený podíl plochy třídy k celkové ploše dílčího povodí. Pokud je podíl třídy (např. jehličnatých lesů nebo v případě půd podzolů) v dílčím povodí nižší než zadaná hraniční hodnota, zanedbá model tuto třídu při tvorbě HRU. Obecně lze říci, že čím nižší je hraniční hodnota, tím více HRUs bude v dílčím povodí vytvořeno a nebude tak potlačena heterogenita území a naopak. Ne vždy však nižší hraniční hodnoty zaručí kvalitní výstupy z modelu (Her a kol. 2015). S rostoucím počtem HRU rovněž významně vzrůstá výpočetní a kalibrační doba modelu. Vhodná volba hraničních hodnot je jedním z nejdiskutovanějších témat v uživatelské komunitě modelu SWAT. Správnou definicí hraničních hodnot se zabývalo mnoho autorů Arabi (2006), Kumar a Merwade (2009) nebo Cho a kol. (2010). Model SWAT uvádí základní nastavení hraničních hodnot 20 % pro kategorie krajinného pokryvu, 10 % pro půdní typy a 20 % pro třídy sklonitosti. Pří uvážení velikosti zájmového území, heterogenity povodí horní Úpy a po vyzkoušení mnoha variant byly zadány hraniční hodnoty pro tvorbu HRU: krajinný pokryv – 10 %, půdy– 10 %, sklony – 20 %.

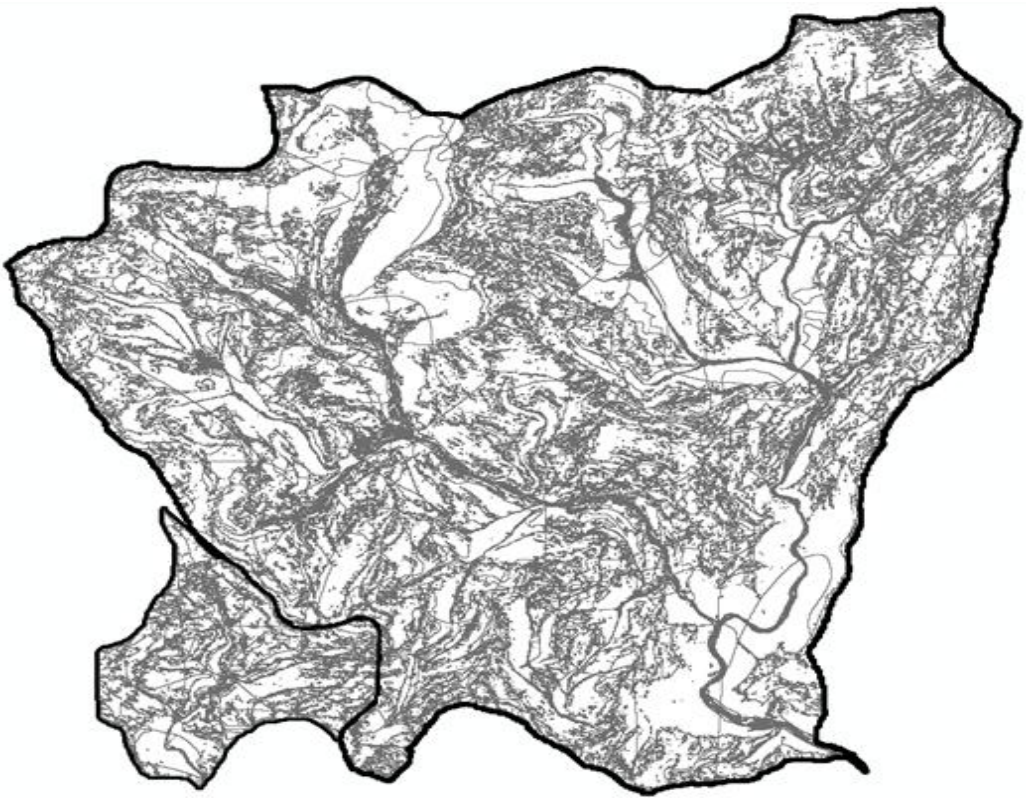
Může se stát, že se v zájmovém území nachází kategorie krajinného pokryvu, která má sice malý podíl plochy na celkové ploše dílčího povodí, ale může mít významný vliv na odtokové procesy. V takovém případě lze v nástroji *Exception* vybrat tuto třídu a udělit ji „výjimku“. Ačkoli vybraná kategorie krajinného pokryvu nedosahuje hraniční hodnoty, bude vytvořena samostatná HRU a nedojde tak k zanedbání této kategorie krajinného pokryvu. Povodí horní Úpy je například charakteristické

výskytem rašelinišť a zamokřených půd. Proto byla kategorie *Wetlands* označena jako výjimka a přítomnost rašelinišť byla zachována i při výpočtu modelu.

Pokud byly všechny vrstvy a převodní tabulky správně načteny je možno pomocí tlačítka *Overlay* vygenerovat vrstvu HRUs. Spolu s vytvořením vrstvy se zároveň generuje textový soubor se statistickými údaji popisující jednotlivých dílčích povodí a HRUs.

Na povodí horní Úpy bylo celkem vymezeno 27 dílčích povodí, která byla následně rozdělena do 146 různých kombinací jednotek hydrologické odezvy (HRU). Každá HRU se mohla v rámci subpovodí nacházet na mnoha místech, a tudíž výsledný počet vymezených polygonů je výrazně větší. Ukázka vymezených HRU je na obou modelových povodí znázorněna na obrázku 28.

Obrázek 28. Vymezené jednotky HRU na povodích Čisté a horní Úpy



Klimatická data

Klimatická data se do modelu vkládají formou textových souborů. Pokud nemá uživatel informace o některé z požadovaných klimatických charakteristik (např. průměrná denní rychlost větru), je možno využít integrovaného generátoru počasí *(WGEN*), který doplní chybějící data. Po úspěšném načtení klimatických dat, jsou nahrána veškerá požadovaná vstupní data a s pomocí nástroje *Write SWAT Database Tables* jsou veškerá vstupní data importována do databáze modelu. Meteorologické vstupní data do modelu postihovaly na příkladu Úpy a Čisté časovou periodu kalendářních let 1991 až 2020.

Editace vstupních dat

Pokud je třeba jakákoli úprava vstupních dat nebo parametrů před nastavením a spuštěním simulace, je možné využít nástroj *Edit SWAT Input*. Tímto nástrojem lze rovněž nastavit výběr výpočetní metody povrchového odtoku nebo evapotranspirace (v sekci *Watershed data -> General Data*). V této práci byla nastavena metoda CN křivek pro výpočet povrchového odtoku a Penman-Montheit pro výpočet evapotranspirace. Ačkoli metoda simulace povrchového odtoku podle Green-Ampta představuje fyzikálněji přesnější popsání povrchového odtoku, v této práci byla využita metoda CN křivek z důvodu, že nebyly dostupné srážkové úhrny v podrobnějším než denním časovém měřítku.

Nastavení simulace

Nástroj *SWAT simulation* umožňuje finální nastavení a spuštění simulace. Simulační časová perioda byla nastavena na kalendářní roky 1991–2020. Je nutné nastavit počet zahřívacích let (NSKIP), během kterých bude model simulovat přírodní procesy, ale nebudou vypisovány výsledky z tohoto období. NSKIP slouží k vytvoření iniciálních podmínek. V rámci této práce byla zadána NSKIP perioda dvou let na základě doporučení Arnolda a kol. (2012). Vypisování výsledků simulace bylo nastaveno na denní chod.

Kalibrace a validace modelu SWAT

Kalibrace modelu je nezbytným prvním krokem práce s hydrologickým modelem. V rámci tohoto kroku dojde k nastavení parametrů výpočtu modelu, které nelze změřit. Hodnoty parametrů jsou postupně měněny a model je v iteracích spouštěn. Výsledky reprezentované simulovaným průtokem v uzávěrovém profilu jsou porovnány s měřeným průtokem pomocí objektivní funkce. Model SWAT zahrnuje celou řadu parametrů, kdy pouze některé z nich výrazněji ovlivňují výpočet hydrologické části modelu. Seznam parametrů použitých v rámci modelové úlohy je zobrazen v tabulce 16.

Pro kalibraci modelu SWAT je výhodné využít *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP), který je polo-automatickým kalibračním programem vyvinutým pro potřeby modelu SWAT (Abbaspour a kol. 2013). Jedná se o nejpoužívanější nástroj pro kalibraci, validaci a citlivostní analýzy modelu SWAT (Abbaspour a kol. 2007). Základní verze programu je volně dostupná. Za poplatek je možné pořízení rozšířené uživatelské verze. Od verze základní se odlišuje především využitím funkce *Parallel processing*, která umožňuje zapojení všech dostupných procesorů do výpočtů a dochází tak ke značnému zrychlení kalibračních a validačních procesů. V rozšířené verzi jsou k dispozici balíčky, které obsahují skripta pro usnadnění některých procesů, např. automatické vytvoření elevačních pásem (Abbaspour 2013).

Tabulka 16. Kalibrované parametry, SWAT-CUP

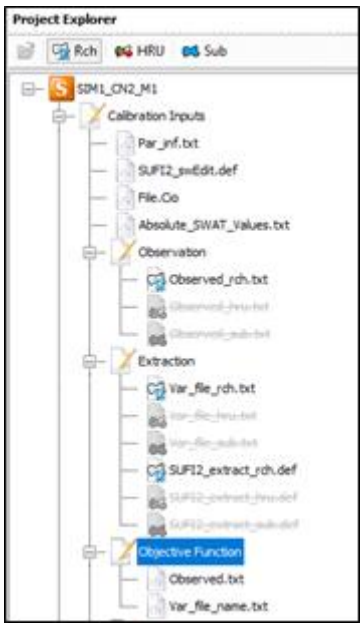
parametry	popis parametru	jednotky	rozmezí hodnot	nejlepší simulace	jednotka
SFTMP	Snowfall temperature	°C	-1 až 1	0,6	sněhová pokrývka
SMTMP	Base temperature of snow melt	°C	-2 až 2	-1,35	sněhová pokrývka
SMFMX	Maximum melt rate for snow during the year	mm	0,5 až 5	1,57	sněhová pokrývka

		H_2O/°C/den			
SMFMN	Minimum melt rate for snow during the year	mm H_2O/ºC/den	0.01 až 3	0,38	sněhová pokrývka
TIMP	Snow pack temperature lag factor	-	0–1	0,14	sněhová pokrývka
GW_DELAY	Groundwater delay	dny	100–190	148,4	podzemní voda
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	mm	0–500	1740,3	podzemní voda
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallowaquifer for "revap" to occur	mm	0–315	243,4	podzemní voda
sol_bd (rel. změna)	Moist bulk density	mg/m^3	-0.2 až 0,25	+ 0,25	půda
SOL_K (rel. změna)	Saturated hydraulic conductivity of a soil layer	mm/hod	-0,1 až 0,35	+ 0,09	půda
Alpha_bnk	Baseflow alpha factor for bank storage	dny	0,4–0,75	0,65	koryto
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in channel aluvium	mm/hod	0–100	15.5	koryto
ch_N2	Mannings „n“ value for the main channel	-	0,01–0,19	0,054	koryto
ov_N	Mannings „n“ valu efor overland flow	-	0,33–0,7	0,52	koryto
CN2 (rel. změna)	SCS runoff curve number	-	-0,2 až 0.35	+ 0,26	povrchový odtok

Základní verze SWAT-CUP nabízí pět kalibračních algoritmů – SUFI-2, GLUE, ParaSol, PSO a McMc (Abbaspour 2013). Jednotlivé varianty pak dále nabízí odlišné přístupy k citlivostním analýzám, kalibraci, validaci. Porovnáním kalibračních algoritmů v prostředí SWAT-CUP se blíže zabýval Shivhare a kol. (2018). V rámci programu SWAT-CUP je možná vizualizace zájmového povodí a využitých meteorologických stanic prostřednictvím Bing mapy (Abbaspour 2013).

Při zakládání nového projektu je nutné připojit výstupy z modelu SWAT. Jedná se o adresář s názvem *TxtInOut*, který je vytvořen po úspěšné simulaci modelu v adresáři *Scenarios*. Dále je nutné zvolit jeden z kalibračních algoritmů. V této modelové studie bylo využito algoritmu SUFI-2.

Obrázek 29. SWAT-CUP, výřez nástroje *Project Explorer*



V první fázi se je třeba využít nástroj *Project Explorer* (obrázek 29), který slouží k nastavení kalibrace, výběru parametrů, vkládání kalibračních dat (průtoků, hladin podzemní vody atd.), vizualizaci výsledků citlivostních analýz, kalibrace a validace. Před zahájením kalibračního procesu je nutné postupovat v tomto pořadí:

- Nejdříve je nutné v sekci *Par_inf.txt* vybrat parametry, které budou kalibrovány. Z výsledků citlivostní analýzy lze dále určit, které parametry jsou citlivé, tudíž mají větší vliv na výsledky nebo naopak méně citlivé parametry, které mají zanedbatelný nebo žádný vliv na výsledky a můžou se tak z kalibrace vyloučit (Abbaspour 2013). V této sekci se rovněž nastavuje počet simulací. Abbaspour (2013) doporučuje ve finální iteraci alespoň 500 simulací.
- Následuje sekce *SUFI_swEdit.def* (v případě výběru metody SUFI-2), kde se zadává hodnota počáteční a konečné iterace. Hodnota konečné iterace musí korespondovat s hodnotou zadanou v předešlé sekci. V případě, že z jakéhokoli důvodu je spuštěná kalibrace přerušena a uživatel ví, jaké je číslo poslední uzavřené iterace, je možné v dalším spuštění kalibrace začít od této hodnoty a nikoli znovu od počáteční iterace. To může v mnoha případech ušetřit výpočetní čas (Abbaspour a kol. 2007a; Abbaspour 2013).
- V sekci *File.Cio* slouží ke kontrole a editaci vstupních údajů do nástroje SWAT-CUP. Probíhá kontrola dat počátku a konce výstupů z modelu SWAT. Je třeba zmínit, že kalibrace může být úspěšně spuštěna jen v případě, že počátek a konec simulačního období je první, resp. poslední den kalendářního roku. Nelze tak nastavit časovou periodu s počátkem a koncem hydrologického roku. Tento fakt je potřeba brát v potaz při přípravě vstupních dat a sestavování modelu.
- *Absolute_SWAT_Values.txt* je textový dokument s doporučenými hraničními hodnotami parametrů, které by se při kalibraci neměli překročit. Rozmezí parametrů musí respektovat reálné podmínky a musí respektovat fyzikální procesy.

- Následuje sekce, kde je třeba doplnit kalibrační naměřená data. V tomto případě byly ke kalibraci použita data průtoků z uzávěrového profilu, proto byla zvolena varianta – *Observed_rch.txt*.
- Posledním krokem nastavení je výběr objektivní funkce. Lze vybírat z deseti možných variant objektivních funkcí, viz. manuál (Abbaspour 2013).
- Nyní může proběhnout samotná kalibrace.

Parametrizace v prostředí SWAT-CUP

Jak již bylo zmíněno, povodí je rozděleno do HRUs v závislosti na sklonitosti, krajinném pokryvu a půdě. Prostorově distribuované parametry (např. nasycená hydraulická vodivost, CN2) lze definovat a kalibrovat zvlášť pro každé HRU. Uživatel tak musí během přípravy kalibrace vyhodnotit, nejen jaké parametry využije při kalibraci, ale zda-li je bude kalibrovat globálně (pro celé území) nebo regionálně (pro vybraná dílčí povodí a HRU, kategorie krajinného pokryvu, atd.). Pokud se rozhodne pro regionální přístup, musí definovat kalibraci určitého parametru za pomocí popsaného postupu níže (Abbaspour 2013):

x__<parname>_<hydrogrp>_<landuse>_<subbsn>_<slope>,

kde x__ definuje typ změny parametru užívaného během kalibrace:

- v__ znamená, že daný parametr bude nahrazen zadanou hodnotou nebo rozmezím hodnot
- a__ znamená, že definovaná hodnota bude přidána, k již existující hodnotě parametru
- r__ vyjadřuje relativní změnu parametru
- Níže jsou vysvětleny další faktory:
- <parname> název SWAT parametru
- <ext> prostorová distribuce parametru, např. pro jednotlová HRU (.hru), půdy (.sol) a další
- <hydrogrp> hydrologická skupina půd (A, B, C nebo D)
- <landuse> kategorie krajinného pokryvu
- <subbsn> čísla, definující jednotlivé subbasiny
- <slope> kategorie sklonitosti

K popisu parametru lze použít jakoukoli kombinaci výše uvedených faktorů. Pokud jsou parametry kalibrovány globálně, jsou faktory <hydrogrp>, <soltext>, <landuse>, <subbsn> a <slope> vynechány.

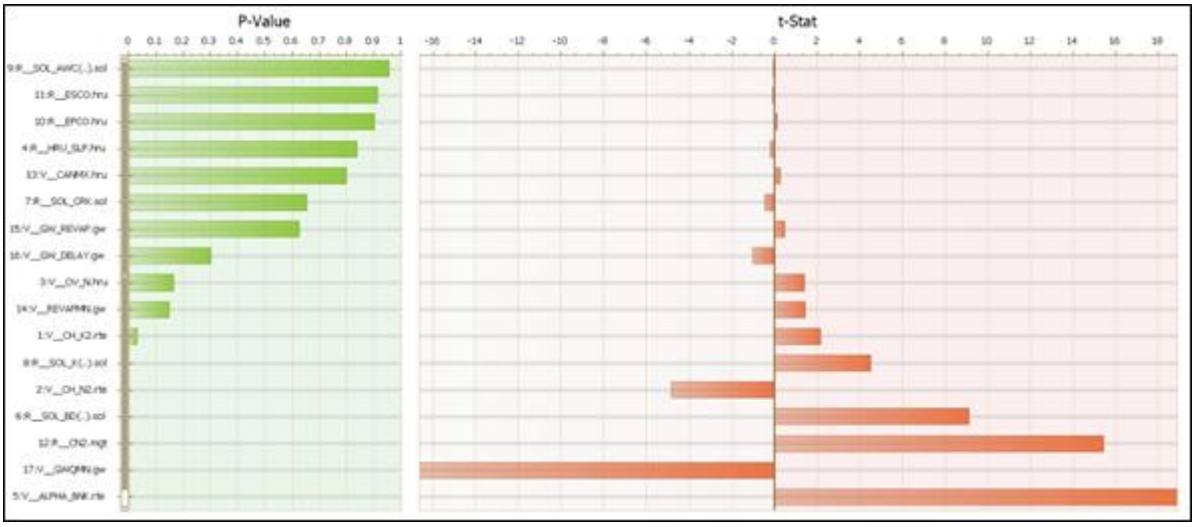
SUFI-2 algoritmus

Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) je polo-automatický algoritmus, který je v prostředí SWAT-CUP využíván ke kalibraci, validaci, citlivostním analýzám a analýzám nejistot (Abbaspour a kol. 2004). Algoritmus SUFI-2 vyjadřuje všechny nejistoty parametrů vyjádřené distribucí, resp. rozsahem jejich hodnot. Snahou je zachytit většinu naměřených dat v rámci 95% nejistoty předpovědi (95PPU) modelu v iteračním procesu. 95PPU se počítá na 2,5 a 97,5 % úrovně získané kumulativní distribuce výstupní proměnné prostřednictvím metody *Latin cube sampling* (Abbaspour a kol. 2004). Pro hodnocení úspěšnosti simulace se porovnávají dvě pásma: 95PPU pro modelovou simulaci a pásmo představující naměřená data.

Pro hodnocení úspěšnosti simulace byly vytvořeny dva indexy označované jako P faktor a R faktor (Abbaspour a kol. 2004). Hodnota P faktoru vyjadřuje podíl naměřených kalibračních dat, která jsou ohraničena pásmem 95PPU. P faktor může nabývat hodnot od nuly do jedné. Hodnota jedna označuje, že 100 % naměřených dat spadá do pásma 95PPU a s přihlédnutím k nejistotám předpovědi modelu se jedná o „dokonalou předpověď“. Získaná hodnota ze vzorce *1 - P faktor* může být označována jako chyba modelu. Pro simulaci průtoků je hodnota P faktoru větší než

0,7 považována za adekvátní (Abbaspour a kol. 2004). Výsledek však závisí na rozsahu projektu, kvalitě vstupních dat a kalibračních dat. Na druhou stranu R faktor popisuje poměr průměrné šířky pásma 95PPU a směrodatné odchylky naměřených dat. Abbaspour a kol. (2004) uvažuje jako adekvátní hodnotu menší než 1,5.

Obrázek 30. Výsledky citlivostní analýzy v prostředí SWAT-CUP



Tyto dva indexy jsou spolu s objektivními funkcemi používány k hodnocení úspěšnosti kalibrace a validace. Větší hodnoty P faktoru lze dosáhnout na úkor většího R faktoru (jsou zadána široké rozpětí kalibračních parametrů). Proto je nutné dosáhnout rovnováhy mezi těmito dvěma indexy. Ve finální iteraci, kdy hodnoty P faktoru R faktoru a objektivní funkce jsou považovány za adekvátní, jsou rozpětí parametrů považovány za finální.

SUFI-2 umožňuje v programu SWAT-CUP výběr z deseti různých objektivních funkcí (Abbaspour 2013). Pro porovnání výsledků simulací s reálnými daty (denními průtoky) byly vybrány kritéria – Nash-Sutclifův koeficient účinnosti (NSE) a procentuální systematická chyba (PBIAS).

NSE vyjadřuje sílu předpovědi modelu. V hydrologickém modelování se jedná o jednu z nejvyužívanějších objektivních funkcí sloužící k hodnocení účinnosti a přesnosti simulací. NSE je definován jako:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2} \quad ,$$

kde O je průměr pozorovaných dat, y_i a O_i jsou simulovaná a pozorovaná dat. V situaci dokonalého modelu se výsledná hodnota NSE rovná jedné.

Další využitou objektivní funkcí byla procentuální odchylka (PBIAS), která určuje, zda-li simulovaná data mají tendenci být průměrně vyšší či nižší než pozorované veličiny. V hydrologickém modelování je PBIAS často používána pro kvantifikaci chyb vodní bilance (Moriasi a kol. 2007). Optimální hodnota PBIAS se blíží k nule a počítá se dle rovnice:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs})} \quad ,$$

kde Y_i^{obs} je pozorovaná hodnota naměřená v čas i, Y_i^{sim} je simulovaná hodnota v čase i a *n* je počet pozorování.

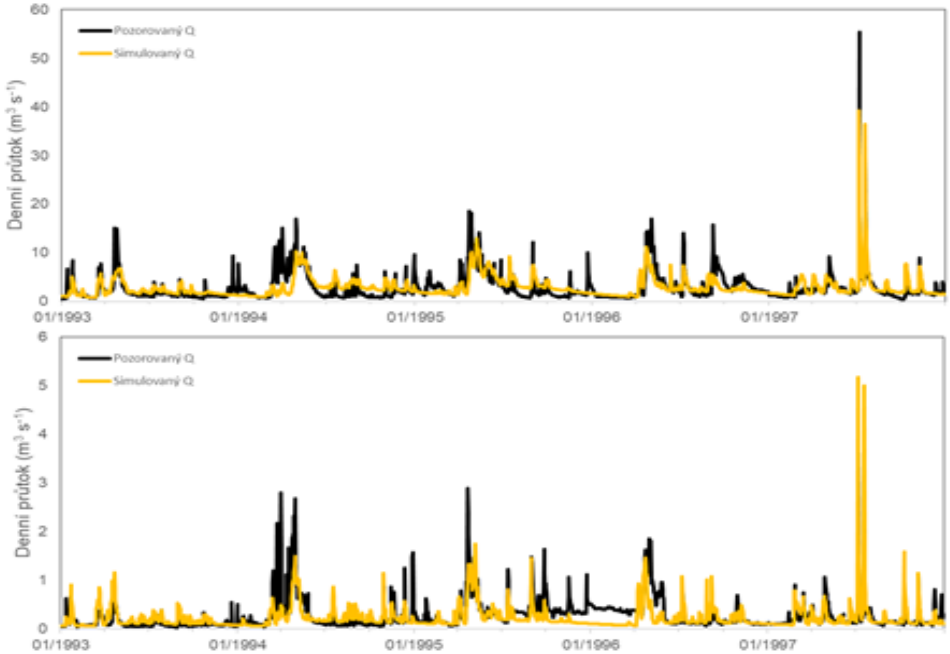
Všeobecně lze považovat za uspokojivé výsledky hodnoty – NSE > 0,50 a PBIAS ± 25%, při kalibraci na průtoky (Moriasi a kol. 2007). Během hodnocení statistických ukazatelů je však potřeba respektovat nejistotu vstupních dat a kalibračních dat. Pokud se používají data získávané různými metodikami nebo data s omezenou přesností, je nutné tyto okolnosti zohlednit a diskutovat v hodnocení. Hodnocení úspěšnosti simulace průtoků dle Moriasiho a kol. (2007) je zobrazeno v tabulce 17. Jedná se o všeobecné vytvoření kategorií úspěšnosti modelu a je tedy potřeba brát v úvahu veškeré okolnosti týkající se konkrétně řešeného projektu (Moriasi a kol. 2007).

Tabulka 17. Hodnocení úspěšnosti simulace průtoků, Moriasi a kol. (2007)

Hodnocení	NSE	PBIAS
velmi dobré	0,75 < NSE < 1	< ± 10
dobré	0,65 < NSE < 0,75	± 10 < PBIAS < ± 15
uspokojující	0,5 < NSE < 0,65	± 15 < PBIAS < ± 25
neuspokojící	< 0,5	> ± 25

Hydrologický SWAT model byl kalibrován na obrobí let 1993–1997 s použitím dvou letého rozběhového období (1991–1992). V rámci kalibračního období bylo dosaženo hodnot Nash-Suctliffova koeficientu 0,47 pro Úpu a 0,45 pro Čistou. Ve validačním období jsou hodnoty koeficientu 0,50 a 0,51. Dle Moriasiho et al. (2007) je tedy simulace ve validačním období uspokojující. Ukázka běhu modelu v letech 1993–1997 je zobrazena na obrázku 31. Chyba v simulaci objemu odtoku je rovná +9,8 % v případě Úpy a -4,8 % u Čisté.

Obrázek 31. Pozorované a simulované průtoky na profilech Horní Maršov, Úpa (horní panel) a Černý Důl, Čistá (dolní panel) za období 1993–1997.

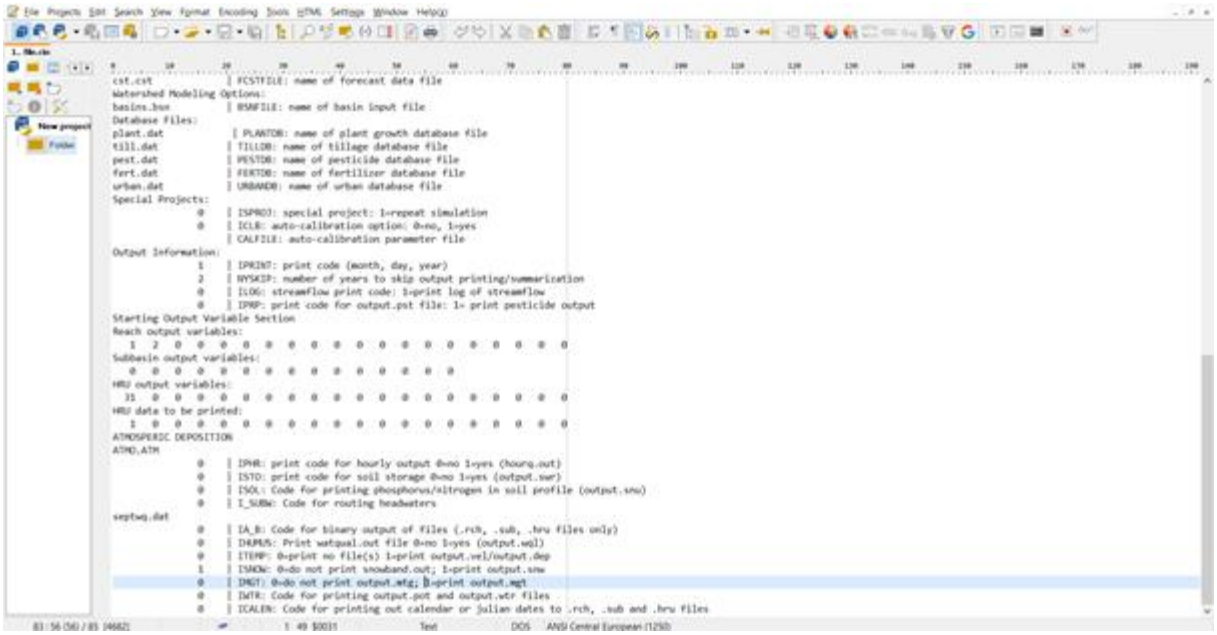


4.5 Analýza výsledků

Po nastavení parametrů modelu je pro analýzu změny land cover na hydrologický režim zapotřebí simulovat hydrologické chování povodí na delším období (např. 20 a více let). Důvodem je zahrnutí vlhkých a suchých sezón, zim s větší/menší sněhovou pokrývkou a povodňových situací a sucha do výsledné analýzy. Následně je nutné sestavit hydrologický model SWAT znovu, tzn. vytvořit nové HRU, se změněnou vrstvou land cover (tzv. scénářem). Simulace modelu se scénářem proběhne s nezměněnými parametry získanými v rámci původní kalibrace.

Vypisování zájmových proměnných, které uživatel pro analýzu chce použít se nastavují v souboru *file.cio* (viz. Obrázek 32). Výsledné hodnoty jednotlivých zájmových proměnných jsou za subpovodí a HRU v souborech *output.sub* a *output.hru*.

Obrázek 32. Nastavení vypisovaných proměnných v souboru *file.cio*



Pro popis vlivu změn land cover na hydrologický režim povodí lze při využití modelu SWAT zahrnout analýzu:

- Odtoku – jak se v jednotlivých scénářích mění kulminační průtok, celkový objem odtoku a načasování odtokových událostí. Například urbanizace může vést k vyšším špičkovým průtokům a rychlejšímu odtoku, zatímco zalesňování může snížit odtok a zvýšit doplňování podzemních vod.
- Základního odtoku a doplňování podzemních vod – dopad na základní odtok, který je v urbanizovaných oblastech často snížen v důsledku nižší infiltrace a zvýšeného povrchového odtoku. Na druhou stranu by zalesňování nebo obnova mokřadů mohly zvýšit doplňování podzemních vod a základní odtok.
- Vlhkosti půdy a infiltrace – změna vlhkosti půdy a míra infiltrace. Zalesněné nebo vegetací porostlé oblasti mají obecně vyšší infiltraci ve srovnání s urbanizovanými nebo neplodnými půdami.

- Evapotranspirace – změna celkového výparu z území, může být dána jednak rozlišnou intercepcí a jednak rozdíly v množství vody zadržené v půdě, a tudíž jinou hodnotou transpirace. Urbanizace a odlesňování obvykle snižují míru ET, zatímco zalesňování zvyšuje ET, což následně ovlivňuje místní hydrologickou bilanci.

V případě připravených datových souborů lze využít řadu analýz pro porovnání změny v hydrologickém chování jednotlivých scénářů mezi sebou.

V případě **celkového odtoku** jde například o celkový objem odtoku, čáru překročení průtoků nebo četnosti překročení vybraného kulminačního průtoku. Z hlediska **výparu** je možné porovnávat celkové množství výparu nebo jeho časové rozložení v průběhu sezóny. V případě **formování odtoku** model SWAT umožňuje kvantifikovat jeho tři druhy, a to odtok přímý (SURQ), laterální (LATQ) a odtok z podzemní vody (GWQ). Opět je možné porovnávat celkové sumy jednotlivých forem odtoku a jejich rozložení v čase.

Na testování odlišnosti dvou datových souborů, u kterých nemáme informace o rozdělení dat se využívá Kruskal-Wallisův test. Kruskal-Wallisův test je neparametrický statistický test používaný k porovnání mediánů více než dvou nezávislých skupin. Tento test je alternativou k jednofaktorové analýze rozptylu (ANOVA), která předpokládá normální rozdělení dat a stejné rozptyly ve všech skupinách. Kruskal-Wallisův test nevyžaduje tento předpoklad, takže je vhodný pro situace, kdy jsou data nelineární, nebo když není splněno normální rozdělení.

Rovnice pro Kruskal-Wallisův test se používá k výpočtu testové statistiky *H*, která určuje, zda existují statisticky významné rozdíly mezi více než dvěma nezávislými skupinami.

Testová statistika *H* se vypočítá pomocí následující rovnice:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

kde:

- N je celkový počet pozorování ve všech skupinách (součet počtu všech vzorků ve všech skupinách),
- k je počet skupin (tzn. počet různých kategorií, které porovnáváme),
- R_i je součet pořadí v i-té skupině (součet všech pořadí pro hodnoty v dané skupině),
- n_i je počet pozorování v i-té skupině (velikost skupiny i).

Rozdělení *H* je přibližně chi-kvadrátové s k−1 stupni volnosti. Pokud hodnota testu *H* je větší než kritická hodnota z chi-kvadrátové tabulky při dané hladině významnosti (obvykle 0,05), zamítáme nulovou hypotézu, že mediány ve všech skupinách jsou stejné.

Při vyčíslení aktuální a potencionální evapotranspirace a v kontextu znalosti množství srážek lze stanovit míru ohrožení území ze strany nedostatku vody. V horkých suchých oblastech, kde jsou srážky výrazně nižší, než potenciální evapotranspirace je úhrn aktuální evapotranspirace určen právě množstvím srážek a tyto oblasti tedy lze označit jako *vodou limitované*. Naopak v chladných vlhkých podmínkách, kde srážky výrazně převyšují potencionální evapotranspiraci, je aktuální evapotranspirace *limitována dostupnou energií* pro výpar, tj. potencionální evapotranspirací. Poměr

potencionální evapotranspirace a srážek (PET/P) je základem pro index aridity, kdy hodnoty nižší, než jedna indikují regiony, kde je výpar limitován dostupnou energií, a hodnoty vyšší než jedna naopak oblasti limitované dostupností vody.

Na indexu aridity je založen koncept Budyko křivky, která popisuje rozdělení srážek na výpar a odtok. Budykův vztah vlastně představuje jednouchou verzi celistvého hydrologického modelu, který oproti běžným modelům poskytuje hrubý odhad rozdělení srážek na výpar a odtok s minimálním množstvím parametrů. Zároveň může být koncept Budyko křivky využit pro analýzu citlivosti odtokových poměrů na změnu klimatu nebo charakteristik povodí, zejména land cover. Koncept Budyko křivky dává do vztahu poměry potencionální a aktuální evapotranspirace a srážek, a umožňuje určit, zda je hydrologické chování povodí limitované nedostatkem energie nebo vody. Posun pozice povodí v rámci grafu v horizontálním směru naznačuje změnu poměru potencionální evapotranspirace a srážek, a tedy měnící se klima. Posun ve směru vertikálním svědčí o změně podílu aktuální evapotranspirace na srážkách a jedná se tedy o indikátor změny charakteristik povodí.

Budyko křivka může být vyjádřena řadou vzorců, které všechny obsahují určitou formu mocninné funkce s využitím jednoho parametru. Například lze uvést původní Budykův vztah nebo jeho variaci:

$$\frac{AET}{P} = \left(\frac{PET}{P} tan\left(\frac{P}{PET}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{PET}{P}\right)\right)\right)^{0,5}$$

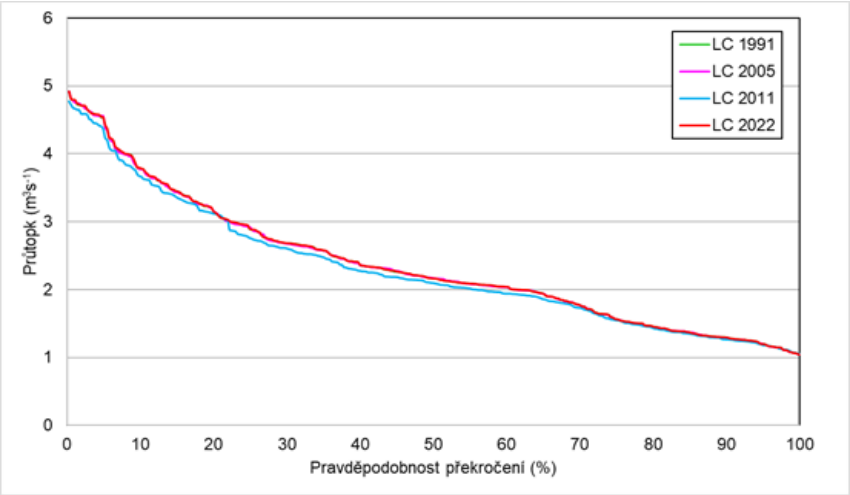
$$\frac{E}{P} = \frac{1}{\left(1+\left(\frac{P}{PET}\right)^{w}\right)^{\frac{1}{w}}}$$

kde AET a PET jsou roční úhrn aktuální a potencionální evapotranspirace (mm·rok−1), P je roční úhrn srážek (mm·rok−1) a w je parametr charakterizující stav povodí reprezentující topografii, land use a půdní pokryv (-).

4.6 Implementace: Případová studie horní Úpy a Čisté

Na modelových povodích byly zpracovány čáry překročení průměrných denních průtoků za čtyři scénáře vývoje land cover (obrázek 33). Jedná se o roky 1991, 2005, 2011 a 2022 (více viz analýza časových řad v kaptitole 2), který reprezentují jednotlivé zlomy ve vývoji krajinného pokryvu. V období 1991 až 2005 došlo postupně k největšímu rozšíření lesních porostů (zejména smíšených lesů) na úkor přechodových stadií mezi lesem a křovinami (cca na 13 % rozlohy). Od 2005 do roku 2011 pak podíl poklesl o 5 % opět při navýšení podílu přechodových stadií. Následná změny do roku 2022 již nebyly příliš významné. Čáry překročení při všech čtyřech modelových scénářích land cover se nijak zvlášť nelišily, a to zejména z důvodu malých změn v procentuálním zastoupení jednotlivých tříd land cover a zároveň malých hydrologických rozdílů mezi zmíněnými třídami. Malými rozdíly se rozumí v celkovém množství odtoku ne v jeho jednotlivých formách.

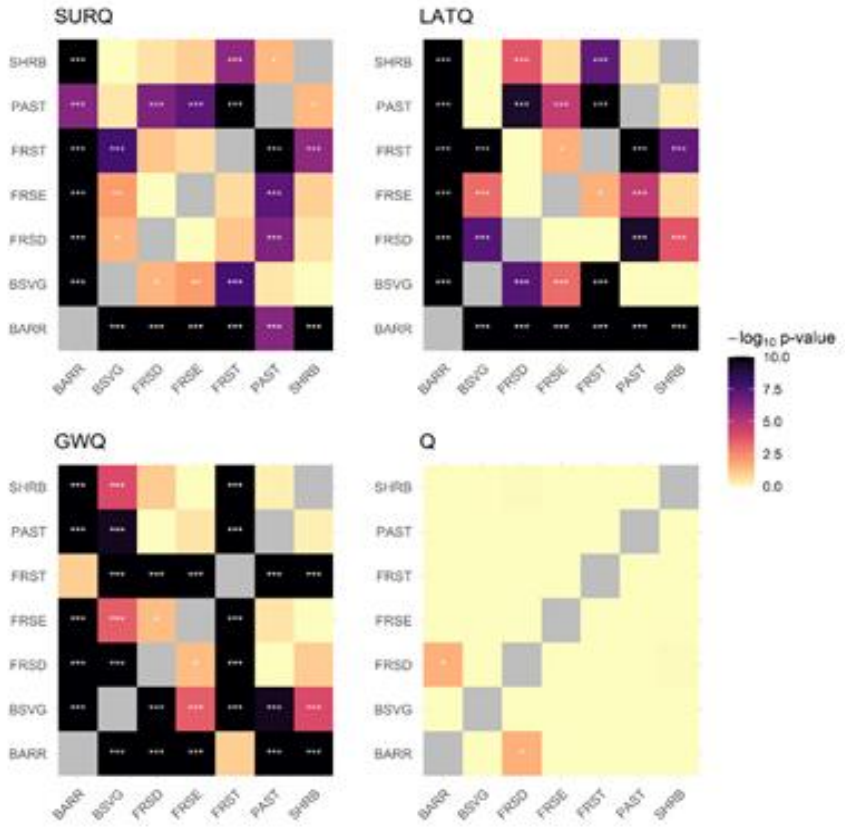
Obrázek 33. Čára překročení průměrných denních průtoků v uzávěrovém profilu Horní Maršov, Úpa při porovnání čtyř scénářů vývoje land cover.



Dokumentovaná změna krajinného pokryvu měla jen malý vliv na objem modelovaných odtoků, protože dlouhodobý modelovaný objem odtoku se u jednotlivých scénářů krajinného pokryvu lišil maximálně do 3 %. To je dáno velmi malými rozdíly ve aktuální evapotranspiraci (rozdíly do 0,5 % v dlouhodobém průměru). Malé rozdíly v aktuální evapotranspiraci byly dány velmi nízkými hodnotami potenciální evapotranspirace (< 550 mm.rok^{-1}), a protože v oblasti dopadá v průměru velké množství srážek >1300 mm.rok^{-1}, většina vody odtéká z povodí různými odtokovými cestami. Jediným viditelným rozdílem bylo, že čím větší plocha byla pokryta lesem, tím více se vytvářelo laterálního podpovrchového a podzemního odtoku na úkor povrchového odtoku. Tak tomu bylo v případě scénářů reprezentujících krajinný pokryv z let 2005 a 2011. Rozdíly se však pohybovaly do 1,2 % celkového objemu odtoku a nebyly tedy statisticky významné. Nicméně menší rozloha lesa vedla k vyšším kulminačním odtokům při početních událostech (> 25 m^3.s^{-1}).

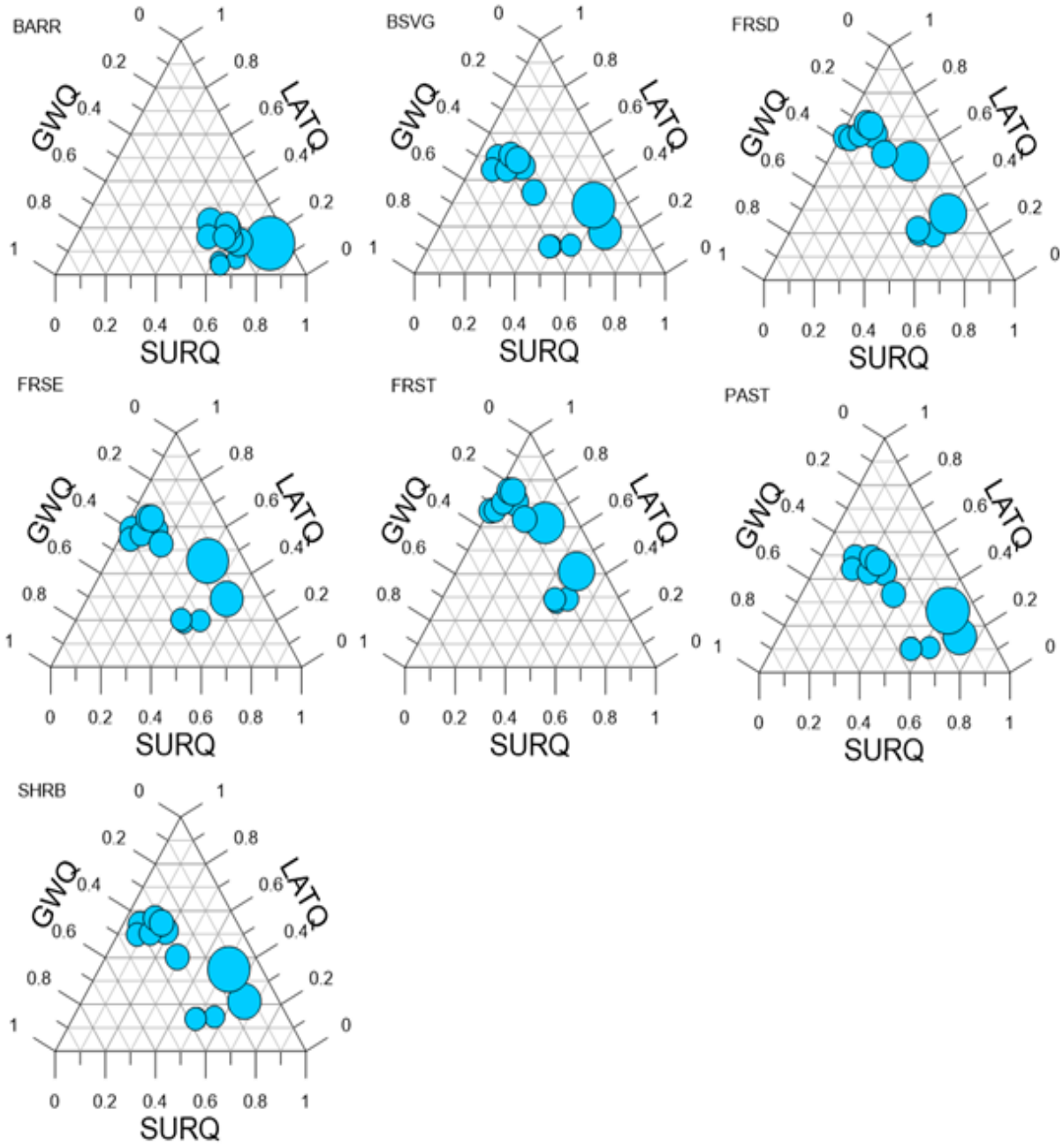
Na modelových povodích došlo k porovnání zastoupení jednotlivých forem odtoku pro jednotlivé třídy land cover ve všech existujících hydrotopech pomocí Kruskal-Wallisova testu (viz. obrázek 34). Obrázek popisuje statistiky významné rozdíly v množství jednotlivých forem odtoku zejména mezi holinou na jedné straně a na zalesněnými plochami na straně druhé. Třetím statisticky odlišným land coverem jsou pastviny. Rychlý přímý odtok (SURQ) byl nejvyšší (>600 mm.rok^{-1}) v hydrotopech pokrytými holou skálou (BARR). Ve srovnání s ostatními všemi ostatními krajinnými pokryvy se tento odtok tvořil v průměru 2–3× více. Nejnižší hodnoty SURQ byly modelovány z lesních ploch (220–300 mm.rok^{-1}). Všechny ostatní krajinné pokryvy zahrnující pastviny (PAST) a pozemky s křovinami (SHRB) nebo řídkou vegetací (BSVG) dosahovaly vyšších dlouhodobých průměrů přímého odtoku 413, 326 a 349 mm.rok^{-1}. Naproti tomu laterální podpovrchový odtok (LATQ) se tvořil nejrychleji v lesních hydrotopech, kde tvořil průměrné roční hodnoty odtoku 450 až 550 mm.rok^{-1}. Kromě zalesněných hydrotopů se tvorba LATQ pohybovala v rozmezí 300–400 mm.rok^{-1} v hydrotopech pokrytých pastvinami, křovinami a řídkou vegetací. Průměrné roční hodnoty podílu podzemní vody (GWQ) na odtoku se pohybovaly od 179 mm.rok^{-1} v hydrotopech bez vegetačního pokryvu do 289 mm.rok^{-1} v hydrotopech s řídkou vegetací. Hydrotopy s vegetací (PAST, SHRUB, FRSD, FRSE) dosahovaly průměrných ročních hodnot příspěvku podzemní vody k odtoku od 241 do 260 mm.rok^{-1}. Nižší rychlost proudění podzemní vody byla modelována pro hydrotopy se smíšeným lesem (197 mm.rok^{-1}), protože jako hlavním způsobem tvorby odtoku byl laterální podpovrchový odtok.

Obrázek 34. Výsledky Kruskal-Wallisova testu popisující statistické rozdíly mezi jednotlivými landcovery v období 1991–2020. Hvězdičky indikují statisticky významné rozdíly (na 5% hladině významnosti) a barvy významnost rozdílů.



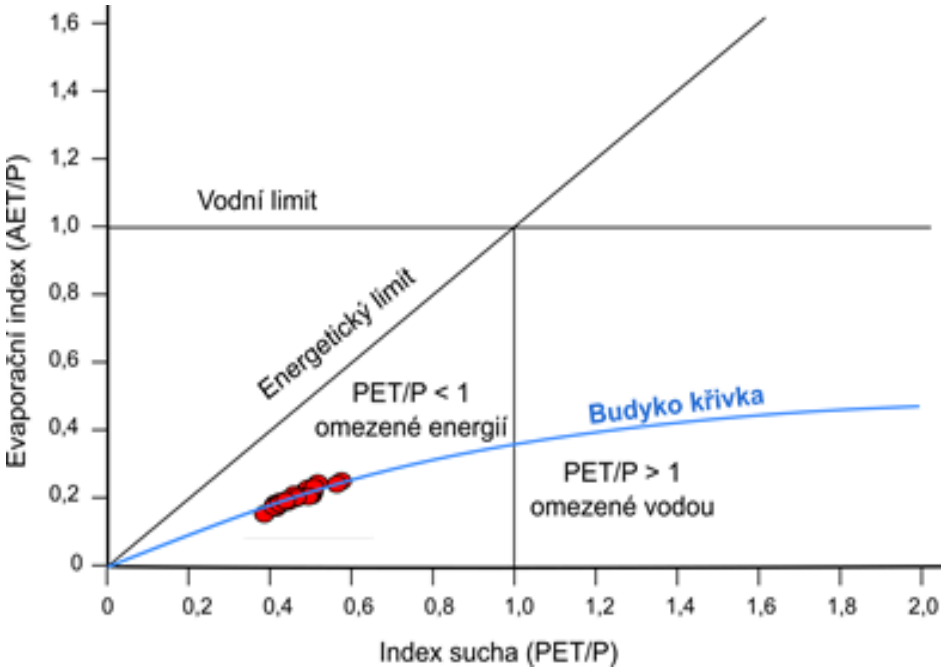
Pro zobrazení sezónních změn v zastoupení jednotlivých forem odtoku je vhodné využít trojúhelníkový graf, kde každý měsíc je zobrazen jedním bodem, jehož velikost odpovídá velikosti odtoku v daném měsíci (obrázek 35). Ukazuje se, že v hydrotopech pokrytých obnaženou půdou tvořil přímý odtok v průměru 63 % celkového odtoku a tento podíl byl v průběhu roku stabilní. Pouze 13 % odtoku bylo modelově tvořeno laterálním podpovrchovým odtokem a méně než 25 % příspěvkem podzemní vody. V hydrotopech pokrytých řídkou vegetací byl průměrný podíl všech typů odtoku téměř vyrovnaný (33 % SURQ, 33 % LATQ, 34 % GWQ), přičemž v zimě převažoval přímý odtok a v létě byl podíl přímého a laterálního odtoku vyrovnaný (~45 %). Převažující zimní role přímého odtoku byla pozorována ve všech hydrotopech dokumentována výraznou skupinou bodů (prosinec až duben) v pravé části trojúhelníkových grafů. Je to dáno nasycenou půdou v tomto období, což má za následek tendenci tající/dešťové vody stékat po povrchu půdy nebo půdním profilem mělkými laterálními cestami. Na plochách pokrytých křovinami a pastvinami převažoval v letním období odtok laterální (~45 %), přičemž odtok z podzemní vody tvořil 30–40 % odtoku celkového. Laterální odtok byl v průměru nejvyšší v hydrotopech pokrytých lesem (>45 %), zejména ve smíšeném lese, kde dosahoval v průměru 56,5 % celkového odtoku. Podíl odtoku z podzemní vody se v lesnatých lokalitách pohyboval od 22,2 % (FRST), přes 25,8 % (FRSD) do 30,5 % (FRSE). Přímý odtok byl nejméně významný na lesních lokalitách, kde se v létě podílel na odtoku pouze z 10 %. V letních měsících se smíšené lesy lišily od stále zelených a listnatých vyšším příspěvkem laterálního podpovrchového proudění na úkor příspěvků přímého (do 5 %) a podzemního proudění.

Obrázek 35. Průměrné měsíční příspěvky k celkovému odtoku pro hydrotopy pokryté všemi sedmi zkoumanými land covery. Získáno jako průměr ze simulace modelu SWAT v letech 1991–2021.



Poslední analýzou bylo vyhodnocení míry ohrožení povodí ze strany změny klimatu nebo land cover. Pro každý rok byl spočítán index sucha (PET/P) a Evaporační index (AET/P) tak, aby bylo možné sledovat posuny jednotlivých let v Budyko prostoru. Jak je z obrázku 36 patrné, tak pro modelový scénář krajinného pokryvu z roku 1991 nedošlo mezi jednotlivými roky k výraznému posunu směrem k vodnímu limitu. Povodí je celou dobu limitováno ze strany dostupné energie na výpar, čili se nemohou projevit rozdíly, které by mohly nastat ve chvíli, kdy by jednotlivé typy vegetace byly limitovány nedostatkem vody. Pozice jednotlivých let (červené body) poukazuje na výrazný přebytek srážek nad aktuálním výparem.

Obrázek 36. Vyhodnocení míru ohrožení suchem na povodí horní Úpy pomocí konceptu Budyko křivky na základě scénáře land cover z roku 1991. Červené body reprezentují jednotlivé roky 1991–2021.



4.7 Závěr

Navržený metodický postup pro hodnocení vlivu změn land cover na hydrologický režim povodí byl aplikován na povodí horní Úpy a Čisté v období 1991–2021. Pro aplikaci byla využita volně dostupná data ze srážkoměrných, klimatických a hydrologických stanic ČHMÚ, vrstvy půd a digitálního modelu terénu a vrstvy land cover vzniklé v rámci projektu. Hlavním cílem metodiky bylo zhodnotit jakým způsobem se projevila pozorovaná změna krajinného pokryvu na množství odtoku a výparu, režimu odtoku a zastoupení jednotlivých forem odtoku.

Pro tento účel byl aplikován hydrologický model SWAT, tak aby bylo možné zhodnotit jednotlivé scénáře land cover a zároveň kvantifikovat jejich vliv na obtížně měřitelné části hydrologického cyklu. Modelem získané proměnné byly analyzovány pomocí čar překročení průměrných denních průtoků, změny v objemu odtoku, testování rozdílů v mediánech dvou na sobě nezávislých souborů pomocí Kruskal-Wallisova testu a grafické analýze sezónního zastoupení různých forem odtoku.

Na zkoumaných povodích nebyly při analýze změn krajinného pokryvu detekovány žádné významné rozdíly ve vodní bilanci. Tato skutečnost byla dána zejména nízkou mírou potencionální evapotranspirace a vysokým množstvím srážek. Hydrologický režim povodí tedy odpovídá situaci, kdy je povodí limitováno dostupnou energií, a ne nedostatkem vody.

Navržený metodický postup slouží k analýze změn land cover jak v případě historicky pozorovaných změn, tak je aplikovatelný na virtuální scénáře možného vývoje krajinného pokryvu.

5. Implementace metodiky: Aplikace pro automatizované zpracování dat DPZ a vyhodnocení hydrologických poměrů

5.1 Cíl a popis software

Pro implementaci metodiky byl navržen software – ***Aplikace pro automatizované zpracování dat DPZ a vyhodnocení hydrologických poměrů***, jejímž smyslem je usnadnit praktickou realizaci vybraných kroků metodiky (části zaměřené na volně dostupná družicová data Sentinel-2A a části hydrologické) s minimalizací nutných interaktivních zásahů uživatele, které jsou při zpracování dat DPZ jinak poměrně běžné. Tomu odpovídá i forma výsledku v podobě sady dílčích aplikací pro příkazový řádek. Součástí vytvořeného díla je jednak dokumentace (popisující vstupy, výstupy a možnosti jednotlivých skriptů, dále obsahující užitečné tipy a poznámky k jejich nastavení a ukázky zadání konkrétních parametrů), a jednak manuál, který realizaci popisuje na konkrétním příkladu a území a ilustruje na něm způsob použití parametrů. Software je tvořený celkem 5 moduly na získávání dat DPZ, výpočty indexů nad daty DPZ, klasifikaci dat DPZ, analýzu časových řad dat DPZ a výpočet vodní bilance. **Software včetně dokumentace a manuálu je možné stáhnout zde:**

https://www.lucc4hydro.cz/2024-2/

Vývoj softwaru proběhl v jazyce Python 3 s využitím vývojového prostředí PyCharm. Využity byly standardní knihovny, a navíc i knihovna arcpy. Knihovna arcpy se nainstaluje při instalaci softwaru ArcGIS Pro od společnosti ESRI. Jde o v současné době nejrozšířenější komerční GIS software, kterým disponuje nejen pracoviště tvůrců výsledků, ale naprostá většina institucí z akademické sféry i státní správy, která pracuje s prostorovými daty. Uvedená knihovna umožňuje neinteraktivně pracovat s funkcemi ArcGIS Pro. Dalším argumentem pro její využití je stabilita a optimalizace pro práci s rozsáhlými datovými sadami, s čímž mívají volně dostupné knihovny určité problémy.

Výsledné dílo má podobu aplikace pro příkazový řádek. Funguje na PC se systémem Windows 10 a 11 s nainstalovaným softwarem ArcGIS Pro. Aplikace zahrnuje celkem pět modulů, jejichž běh na sebe logicky navazuje:

1. downloader slouží pro automatizované stahování dat. Pracuje se Sentinel-2, další datové zdroje lze snadno přidat.

2. indexer slouží pro výpočet indexů (lineárních kombinací, případně poměrů pásem), které následně mohou vstupovat do klasifikace, resp. analýzy časových řad. Sada indexů je předdefinována, další indexy lze velmi snadno přidat.

3. classifier slouží pro řízenou klasifikaci snímků s možností zadání celé řady parametrů, zejména automatickému opakování klasifikace a generalizace výsledku. Použitelné metody: Maximum Likelihood, Random Trees, Support Vector Machine.

4. ts_analyzer (ts = time series) slouží pro analýzu vývoje území v čase. Pracuje s vektorovými i rastrovými daty, s bodovou informací o změně či s celou plochou. Produkuje informace určené k dalšímu snadnému uživatelskému zpracování a náhledy grafů.

5. LC2hydro určí vodní bilanci lokality po jednotlivých typech krajinného pokryvu, Výpočet: založeno na dlouhodobých simulacích jednotlivých složek hydrologického cyklu (výpar, odtok) na

předem definovaných plochách (listnatý/jehličnatý les, louka, pastvina, holina apod.). Při změně krajinného pokryvu pak lze usuzovat na dlouhodobé změny ve vodním režimu. Lze využít i na what-if analýzy, s tím, že lze odhadovat budoucí stav hydrologie například na základě analýzy dat DPZ. V místě, kde v analýze dat DPZ vyjde les poškozený, v následné what-if analýze budou tato místa zadána jako bezlesí.

Podrobnější informace o jednotlivých skriptech jsou k dispozici v Dokumentaci, příklad jejich použití pak v Manuálu, které jsou součástí výsledku. Jednotlivé moduly mají podobu samostatných skriptů v jazyce Python. Pro přehlednost je zachována zásada modul = soubor (s výjimkou modulu 4, kde jsou soubory dva).

5.2 Uživatelská dokumentace

Aplikace zahrnuje celkem pět modulů, jejichž běh na sebe logicky navazuje:

1. downloader slouží pro automatizované stahování dat. Pracuje se Sentinel-2, další datové zdroje lze snadno přidat.

2. indexer slouží pro výpočet indexů (lineárních kombinací, případně poměrů pásem), které následně mohou vstupovat do klasifikace, resp. analýzy časových řad. Sada indexů je předdefinována, další indexy lze velmi snadno přidat.

3. classifier slouží pro řízenou klasifikaci snímků s možností zadání celé řady parametrů, zejména automatickému opakování klasifikace a generalizace výsledku. Použitelné metody: Maximum Likelihood, Random Trees, Support Vector Machine.

4. ts_analyzer (ts = time series) slouží pro analýzu vývoje území v čase. Pracuje s vektorovými i rastrovými daty, s bodovou informací o změně či s celou plochou. Produkuje informace určené k dalšímu snadnému uživatelskému zpracování a náhledy grafů.

5. LC2hydro určí vodní bilanci lokality po jednotlivých typech krajinného pokryvu, Výpočet: založeno na dlouhodobých simulacích jednotlivých složek hydrologického cyklu (výpar, odtok) na předem definovaných plochách (listnatý/jehličnatý les, louka, pastvina, holina apod.). Při změně krajinného pokryvu pak lze usuzovat na dlouhodobé změny ve vodním režimu. Lze využít i na what-if analýzy, s tím, že lze odhadovat budoucí stav hydrologie na základě analýzy DPZ dat. V místě, kde v analýze dat DPZ vyjde les poškozený, v následné what-if analýze budou tato místa zadána jako bezlesí.

Pro správné fungování je potřeba: OS Windows, ArcGIS Pro verze 3.2 a novější, Python s běžnými moduly plus arcpy, kvalitní připojení k internetu v případě modulu 1

Technologie: sada skriptů pro příkazovou řádku. Parametry jsou popsány a vysvětleny níže. Příklady praktického využití viz též v manuálu.

5.2.1 Downloader

Stáhne scény Sentinel-2 Level 2-A ze zájmového území podle parametrů zadaných uživatelem, vybere a převzorkuje relevantní pásma pro další výpočty a výsledek ořízne na zájmové území.

Syntaxe volání:

01_downloader.py [-h] -area AREA – start START -end END -max_cloud

MAX_CLOUD -out_dir OUT_DIR -work_dir WORK_DIR -user

USER -password PASSWORD

-h: vypíše nápovědu k syntaxi skriptu

-area: zájmové území. Čtveřice čísel oddělených čárkou bez mezer, po řadě zeměpisná délka levého dolního rohu zájmového území, zeměpisná šířka levého dolního rohu, zeměpisná délka pravého horního rohu, zeměpisná šířka pravého horního rohu

-start: počátek časového období, ve formátu YYYYMMDD

-end: konec časového období, ve formátu YYYYMMD. Budou staženy všechny snímky spadající do období mezi start a end

-max_cloud: číslo od 0 do 100, maximální přípustné pokrytí scény oblačností

-out_dir: složka, kam bude uložen výstup

-work_dir: složka, kam se budou ukládat dočasné soubory

-user: uživatelské jméno pro DataHub, viz poznámky níže

-password: heslo po DataHub, viz poznámky níže

Příklad použití:

01_downloader.py -area "15.6247100,50.6852986,15.7927664,50.7487722" -start 20240801 -end 20240831 -max_cloud 20 -out_dir S:\images -work_dir S:\temp -user myuser -password mypass

Poznámky:

- pro použití modulu je nutná registrace na https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Registration.html, uživatelské jméno a heslo je nutné zadat jako parametr skriptu
- stahování dat může trvat v závislosti na parametrech dotazu a kvalitě síťového připojení i několik hodin, obvyklá velikost scény jsou vyšší stovky MB
- je nutné mít dostatek volného místa na disku, bez něj může skript spadnout
- je nutné respektovat politiku Copernicus Data Space Ecosystem týkající se množství stahovaných scén
- skript používá k vyhledávání a stahování scén OData API https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs/OData.html, původně zamýšlený modul sentinelsat (uvažovaný v zadání projektu) přestal být v 11/2023 podporovaný, viz https://scihub.copernicus.eu/ a https://github.com/sentinelsat/sentinelsat
- ve výsledném souboru (*_clip.tif) jsou všechna relevantní pásma převzorkována na nejvyšší rozlišení (tj. 10 m), a pojmenována Band + ('_B01_20m', '_B02_10m', '_B03_10m', '_B04_10m', '_B05_20m', '_B06_20m', '_B07_20m', '_B08_10m', '_B8A_20m', '_B09_60m', '_B11_20m', '_B12_20m')

5.2.2 Indexer

Pro zadaný rastr, který je (a musí být) výstupem procesu Downloader, spočítá jeden či více vegetačních indexů dle výběru uživatele a uloží je jako samostatné soubory do zadané složky.

Syntaxe volání:

02_indexer.py [-h] -i INPUT_FILE -idx_def INDEX_DEFINITION -idx
INDICES -out_dir OUTPUT_DIRECTORY

-h: vypíše nápovědu k syntaxi skriptu

-i: vstupní rastr

-idx_def: soubor s definicí indexů. Jeho syntaxi viz dále v poznámkách

-idx: seznam indexů oddělených čárkami bez mezer. Tyto indexy se spočítají. Jejich výpočet musí být definován v souboru zadaném jako argument -idx_def

-out_dir: složka, kam se uloží výstup. Výstupní soubory jsou pojmenovány stejně jako vstup s přidanou koncovkou _{název-indexu}.tif

Příklad použití:

02_indexer.py -
i s:\temp\S2A_MSIL2A_20230907T100031_N0509_R122_T33UWS_20230907T173654.SAFE_clip.tif -idx_def veg_index_sentinel2.txt -idx NDVI,EVI,GNDVI,NDRE -out_dir S:\indices

Poznámky:

- skript podporuje definování indexu uživatelem bez nutnosti programování
- součástí odevzdání je ukázkový soubor veg_index_sentinel2.txt, jehož součástí je definice 12 nejběžnějších indexů
- definice každého indexu se skládá z řádku, kde je:
  - název indexu
  - středník
  - vzorec pro výpočet
- vzorec pro výpočet může obsahovat libovolné výrazy používané v ArcGIS v rastrové algebře (viz https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/an-overview-of-the-map-algebra-operators.htm), s tím, že proměnná reprezentující každé pásmo je označena b01, b02, … b12 a navíc je k dispozici b8a
- prázdné řádky a řádky začínající # se v souboru s definicemi indexů ignorují, lze je použít pro přehlednější rozčlenění a komentáře
- k vyhodnocení se používá funkce eval s bezpečnostní omezením na proměnné b01, b02, … b12 a b8a

5.2.3 Classifier

Pro zadaný vstupní rastr a referenční data provede sérii řízených klasifikací, opraví jejich výsledek a tyto produkty zkombinuje a uloží do výsledného rastru. Zadáním celé řady parametrů má uživatel možnost podrobně ovlivnit průběh celého procesu.

Syntaxe volání:

03_classifier.py -i input_file -out output_file -work work_dir -tv training_validation_data [-ratio tv_ratio] [-aprob in_prob] [-special special_classes] [-repeat repeat_classification] [-min_patch pixels] [-simpl repeat_simpl] [-select select_for_result]

kde

- input_file je vstupní rastr,
- output_file je výstupní rastr s výsledkem klasifikace,
- work_dir je složka pro uložení dočasných souborů,
- training_validation_data jsou trénovací a validační data (shapefile),
- tv_ratio je poměr, jakým se training_validation_data dělí na trénovací a validační, trénovacích dat je tv_ratio * celkový počet záznamů pro danou třídu v training_validation_data; číslo z intervalu (0, 1), nepovinné, výchozí hodnota 0,33;
- in_prob je seznam apriorních pravděpodobností výskytu tříd v podobě pythonovského slovníku, kde klíč je název třídy a hodnota je pravděpodobnost, součet hodnot ve slovníku musí být 1, názvy tříd musí odpovídat atributu Classname v training_validation_data; nepovinné, v případě, že není zadáno, proces zjistí sám s využitím všech trénovacích a validačních dat metodou MLC,
- special_classes je seznam tříd, se kterými je při stratifikovaném výběru třeba zacházet speciálně, protože se vyskytují vzácně, jejich zastoupení v trénovacích datech bude tedy mírně nadhodnoceno, aby výsledky byly relevantnější,
- repeat_classification je počet klasifikací, které se mají provést, číslo, nepovinné, výchozí hodnota 15, střídají se po řadě metody MLC, SVM a RandomTrees (s ntrees=100), vždy s náhodně stratifikovaně vybranými daty podle parametrů training_validation_data a tv_ratio,
- pixels je minimální velikost výsledné plošky v pixelech, menší plošky jsou agregovány se sousedními, číslo, nepovinné, výchozí hodnota 5,
- repeat_simpl je maximální počet iterací, kterými se eliminují malé plošky, číslo, nepovinné, výchozí hodnota 4; zvýšení hodnot velmi prodlužuje výpočet,
- select_for_result je počet klasifikací, které se mají zkombinovat do finálního výsledku, vybírá se pro danou třídu vždy select_for_result klasifikací s nejlepším F1 skóre; nepovinné, výchozí hodnota 5, musí být menší než repeat_classification

Příklad použití i se všemi nepovinnými parametry:

03_classifier.py -i S:\classification\2021_07_13_BL_MSSRGB_3cm_envi.tif -out S:\classification\2021_07_13_BL_MSSRGB_3cm_envi_classified.tif -work S:\classification -tv S:\classification\tv_data_pnt_aligned.shp -ratio 0.33 -aprob "{'afs': 0.09212, 'cv': 0.17971, 'cxbig': 0.02820, 'desch': 0.11637, 'mol': 0.17491, 'nard': 0.40632, 'smrk': 0.00238}" -special "cxbig,smrk,afs" -repeat 30 -min_patch 10 -simpl 4 -select 10

Poznámky:

- training_validation_data je shapefile minimálně s atributy classname a classvalue (není case sensitive). Pokud je vrstva polygonová, převede se na body zarovnané se středy pixelů vstupního rastru. Pokud je vrstva bodová, použije se tak, jak je a je zodpovědností uživatele si zarovnání zajistit.
- pro trénování se použije podíl určený tv_ratio pro každou třídu bez ohledu na apriorní pravděpodobnosti. Ty se uplatní až při tvorbě validačních dat, kde výběr dat pro validaci (a tím i celkový výsledek klasifikace ve smyslu OA) respektuje pravděpodobnost jejich výskytu. Nasbíraná data tedy nepřicházejí při trénování "na zmar" a zároveň jejich nasbírání v poměru výrazně jiném, než je relativní zastoupení jednotlivých tříd neovlivní celkový výsledek klasifikace.
- ve work_dir vzniknou jako mezivýsledek soubory result_*C*.tif pro každé C obsažené jako hodnota classname v training_validation_data. Hodnota v pixelech těchto rastrů pak představuje pravděpodobnosti výskytu jednotlivých tříd (zprůměrované f1 skóre). Výsledný rastr je tvořen třídou, která má největší hodnotu. Tyto rastry slouží jako zobecněná chybová matice, protože umožní uživateli pro každý pixel zjistit pravděpodobnosti výskytu každé třídy v něm.
- v závislosti na volbě parametrů (zejména počet opakování klasifikací a generalizace) může běh skriptu trvat i velmi dlouho (jednotky až desítky hodin).

5.2.4 TS Analyzer

Slouží k analýze vývoje dat v čase. Uvažují se následující scénáře použití:

- změna v ploše mezi n-časovými obdobími ➡ proces ts_analyzer_area
- změna v místě (bodě) mezi n-časovými obdobími ➡ proces ts_analyzer_pnt

Pro přehlednost je každý ze scénářů realizován samostatným procesem, popsaným samostatně dále.

5.2.5 ts_analyzer_area

Pomocí překrytí série vektorových dat vytvoří informace vhodné pro analýzu změn v pohodlné uživatelské podobě. Zahrnuje též možnost generalizace výsledku s inteligentní eliminací štěpin.

Syntaxe volání:

04_ts_analyzer_area.py [-h] -i INPUT_FILE -og OUTPUT_GEODATABASE -of

OUTPUT_FEATURE_CLASS [-size SIZE_LIMIT]

[-iters MAX_ITERS] [-sep SEPARATOR]

kde

- INPUT_FILE je existující soubor se zadáním vstupních vektorových vrstev. Textový soubor, na každém řádku název vektorové vrstvy včetně cesty, za ním znak středník, za ním název atributu, kde je v dané vrstvě uložena klasifikace jako číselná hodnota. Předpokládá se, že

číselník hodnot je pro všechna vektorová data stejný. Pokud ne, je potřeba před spuštěním procesu údaje sjednotit.

- OUTPUT_GEODATABASE je ESRI file geodatabáze pro uložení výsledku,
- OUTPUT_FEATURE_CLASS je feature class pro uložení výsledku. Data mohou být značně velká, proto se povinně ukládají do geodatbáze a pomocí dvojice parametrů je uživatel donuceni jí zadat.
- SIZE_LIMIT je minimální velikost mapovací jednotky (v jednotkách souřadnicového systému), číslo, nepovinné, výchozí hodnota 5,
- MAX_ITERS je maximální počet iterací pro eliminaci podměrečných objektů, číslo, nepovinné, výchozí hodnota 10, vyšší hodnoty mohou prodlužovat dobu běhu,
- SEPARATOR je oddělovač ve sloupci CHANGE ve výsledné feature class. Využití oddělovače umožňuje elegantním způsobem provádět (s využitím SQL) uživatelsky definované statistické a analytické dotazy, viz též poznámky. Znak, nepovinné, výchozí hodnota -.

Příklad použití:

```
04_ts_analyzer_area.py -i S:\changes\classification_list.txt -og S:\changes\result.gdb -of result -size 5 -iters 4 -sep :
```

Poznámky:

- pro smysluplné použití se musí všechny vektorové vrstvy překrývat, resp. výsledek je definovaný jen v místech, kde se překrývají všechny
- neslouží pro rastrová data; pro ta je určen následující nástroj. Chcete-li použít, převeďte nejprve rastrová data na polygon s využitím funkce Raster to Polygon
- příklad využití oddělovače. Předpokládejme 4 časové řezy, kódy tříd 1–9, oddělovač -. Ve sloupci CHANGE pak vzniknou záznamy typu 1-1-1-1. Pomocí SQL příkazů LIKE (ze zástupnými znaky % a ?) a IN lze pak velmi snadno vybrat například stabilní plochy či určitý typ změny a s výběrem pak dále pracovat.

5.2.6 ts_analyzer_pnt

Extrahuje ze série libovolných rastrů informace o vývoji v čase na zadaném místě a uloží výsledek jako data k dalšímu zpracování, volitelně též jako graf.

Syntaxe volání:

```
04_ts_analyzer_pnt.py [-h] -i INPUT_FILE -c COORDS -o OUTPUT_DATA
                      [-g OUTPUT_CHART]
```

kde

- INPUT_FILE je soubor se zadáním vstupních rastrů. Textový soubor, na každém řádku název rastru včetně cesty, za ním znak hvězdička, a číslo pásma (číslováno od 1)

- COORDS jsou zeměpisné souřadnice zadané jako lat,lon, tedy oddělené čárkou, bez mezery mezi souřadnicemi
- OUTPUT_DATA je výsledný csv soubor s hodnotami rastrů, který se vytvoří. Výsledná data lze dále zpracovávat v libovolném softwaru
- OUTPUT_CHART je výsledný soubor ve formátu PDF, kam bude uložen graf ukazující vývoj v daném místě. Parametr je nepovinný a graf je potřeba chápat jako rychlý a potenciálně vizuálně nedokonalý náhled vývoje v daném místě. Pro tvorbu vizuálně zdařilejšího grafu slouží primárně data v OUTPUT_DATA

Příklad použití:

04_ts_analyzer_pnt.py -i S:\change\list.txt -c 15.7073686,50.7200598 -o S:\change\output_data.csv -g S:\change\output_chart.pdf

Poznámky:

- předpokládá se, že se všechny rastry v zadaném bodě prostorově překrývají
- lze použít mimo jiné pro stažená data sentinelu, z nich spočítané indexy či výsledky klasifikací (tedy výstupy z předchozích procesů)
- neslouží pro vektorová data; pro ta je určen předchozí nástroj. Chcete-li použít, převeďte vektorová data na rastr s využitím funkce Polygon to Raster

5.2.7 LC2hydro

Pro danou klasifikaci krajiného pokryvu určí dlouhodobou vodní bilanci území. Klasifikace krajinného pokryvu je založena na výše prezentovaných skriptech a vodní bilance je odvozena pomocí hydrologického modelu SWAT. Model SWAT rozděluje modelované území na tzv. hydrotopy, tj. území se stejnou kombinací krajinného pokryvu, půdy a sklonu svahu. Následně je vypočten průměr jednotlivých složek vodní bilance vážený plochou daných hydrotopů za definované dílčí povodí (na povodí horní Úpy bylo celkem 490 hydrotopů a v povodí Čisté 147 hydrotopů), které vždy ústí do určitého segmentu koryta vodního toku. V korytě je odtok hydrologicky transformován na výsledný odtok v uzávěrovém profilu.

Dlouhodobá simulace vychází z kalibrace modelu v letech 1993–1997 a celková délka simulace zahrnuje roky 1991–2021. Za toto období byla stanovena vodní bilance pro všechny hydrotopy v povodí Horní Úpy a Černé.

Pro každý typ klasifikovaného krajinného pokryvu byla vyčísleno množství výparu (AET) a odtoku (Q) , kdy odtok byl rozdělen na přímý (SURQ), laterální odtok půdou (LATQ) a podzemní odtok (GWQ). Analyzované kategorie krajinného pokryvu zahrnovaly louky (PAST), listnaté (FRSD), jehličnaté (FRSE) a smíšené lesy (FRST), křoviny (SHRB), kombinaci holé půdy s roztroušenou vegetací (BSVG) a území s holou půdou úplně bez vegetace (BARR). Pro tyto kategorie byly stanoveny dlouhodobé průměry vodní bilance tak, aby mohlo následně dojít k odhadu změn ve vodní bilanci při změně zastoupení jednotlivých kategorií land cover.

Změna ve vodní bilanci celého území je odhadnuta ze změny plošného zastoupení jednotlivých kategorií krajinného pokryvu pomocí změny jejich podílu na celkové ploše území, která je získána z jejich klasifikace. Hodnoty jednotlivých složek vodní bilance území jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18. Průměrné hodnoty jednotlivých složek vodní bilance získané simulací modelu SWAT v období 1991–2021 (mm.rok^{-1})

	AET	SURQ	LATQ	GWQ	Q
BARR	314	632	138	179	949
BSVG	327	350	316	289	955
FRSD	335	295	477	241	1013
FRSE	321	252	438	260	950
FRST	327	221	554	197	972
PAST	329	413	299	246	958
SHRB	327	327	358	259	943

Poznámky:

- vyčíslení vodní bilance neobsahuje informaci o rozložení odtoku v čase, protože není známé budoucí rozložení ani výše srážkových úhrnů
- výsledky lze využít zejména pro odhad rozdělení odtoku na jednotlivé komponenty – rychlý přímý odtok (SURQ), zpomalený laterální odtok (LATQ) a dotaci podzemní vody, která následně tvoří podzemní odtok (GWQ)
- velmi podobné hodnoty výparu (AET) jsou dány vysokou nadmořskou výškou zkoumaného území, a tudíž velmi nízkou potenciální evapotranspiraci, která neumožňuje projevení výraznějších rozdílů mezi krajinnými pokryvy

5.3 Manuál

V této kapitole je na konkrétních datech ilustrováno použití aplikace krok za krokem. Všechny dostupné možnosti při volání skriptů jsou pak popsány v Uživatelské dokumentaci.

1. Stáhneme data z družice Sentinel-2 z oblasti Krkonoš ze srpna 2018 a ze srpna 2024 s pokrytím oblačnosti do 20 %. Spustíme z příkazového řádku následující dva příkazy:

01_downloader.py -area "15.6247100,50.6852986,15.7927664,50.7487722" -start 20180801 -end 20180831 -max_cloud 20 -out_dir S:\images -work_dir S:\temp -user myuser -password mypass

a

01_downloader.py -area "15.6247100,50.6852986,15.7927664,50.7487722" -start 20240801 -end 20240831 -max_cloud 20 -out_dir S:\images -work_dir S:\temp -user myuser -password mypass

Před spuštěním skriptu je potřeba vytvořit příslušné složky pro uložení výsledků (v uvedeném příkladu S:\images a pro pro práci s dočasnými soubory S:\temp. Dále je nutné mít účet nebo se zaregistrovat a aktivovat si účet pro Copernicus Data Space Ecosystem na https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Registration.html. Uživatelské jméno a heslo se zadává jako parametr skriptu místo řetězců myuser a mypass.

V závislosti na rychlosti připojení skript po několika minutách až desítkách minut stáhne snímky z dané oblasti, uloží je do zadané složky a ořízne je na zájmovou oblast definovanou zeměpisnými souřadnicemi.

Po doběhnutí skriptu nalezneme ve složce S:\images celkem šest stažených snímků, čtyři ze srpna 2018 a dva ze srpna 2024. Výsledné soubory, se kterými budeme dále pracovat, mají konec názvu zakončený na _clip. Začátek názvu odpovídá konvencím pro pojmenování dat na Copernicus Data Space Ecosystem. Příklad názvu výsledného souboru (snímek byl pořízen 30. 8. 2024 10:05:59):

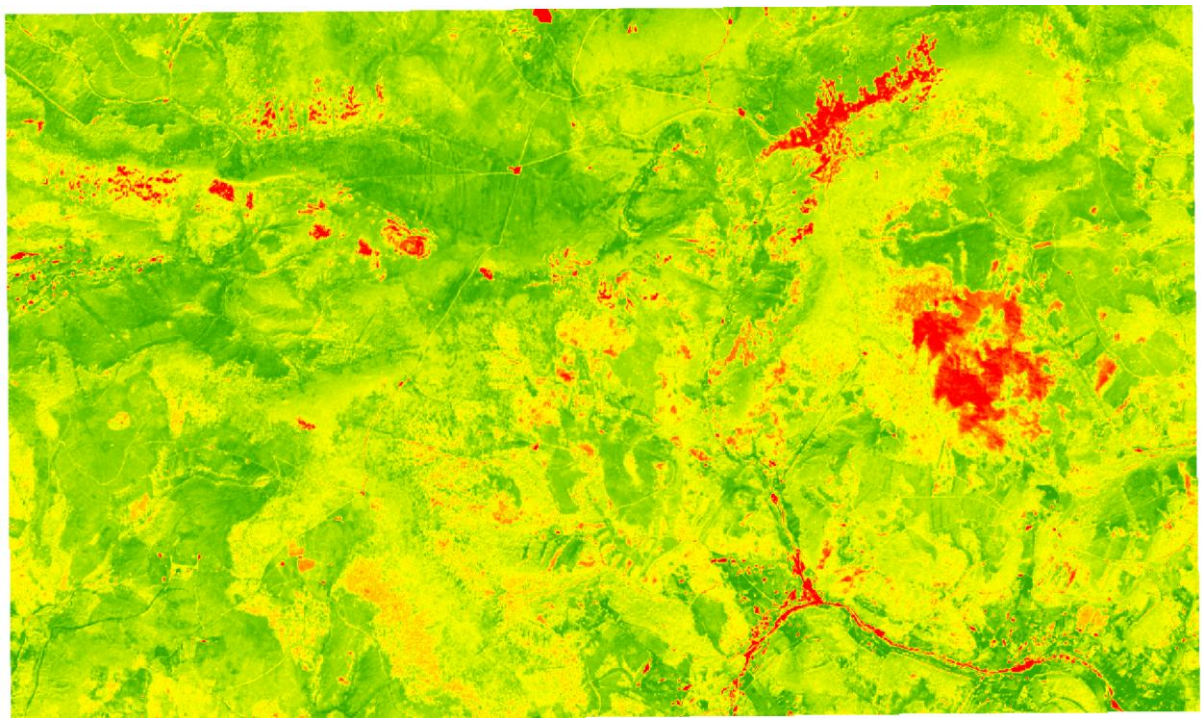
S2B_MSIL2A_20240830T100559_N0511_R022_T33UWS_20240830T134009.SAFE_clip.tif

Ostatní soubory se jmenují analogicky. Po zobrazení v libovolném GIS software (např. ArcGIS Pro) při nastavení RGB kompozitu po řadě B04, B03, B02 dostaneme následující výsledek:

2. Vypočítáme vegetační indexy, které mohou být užitečné z hlediska klasifikace. Pro studium vegetace je často používaný index NDVI. Pro snímek z 30. 8. 2024 vypočítáme hodnotu NDVI:

```
02_indexer.py -
i s:\images\S2A_MSIL2A_20240812T100031_N0511_R122_T33UWS_20240812T140649.SAFE_clip.tif -idx_def
veg_index_sentinel2.txt -idx NDVI -out_dir S:\indices
```

Výsledek nalezneme ve složce S:\indices jako soubor s:\indices\S2A_MSIL2A_20240812T100031_N0511_R122_T33UWS_20240812T140649.SAFE_clip_NDVI.tif. Vypadá následovně:



Pro výpočet je důležitá existence souboru s definicí indexů veg_index_sentinel2.txt, ke kterému se zadává cesta při volání skriptu. Vybrané indexy jsou předdefinované a uložené spolu se zdrojovým kódem skriptu. Seznam všech dostupných indexů využívaných pro Sentinel-2 je zde: https://www.indexdatabase.de/db/is.php?sensor_id=96. Pokud by bylo potřeba definici nějakého indexu přidat, otevřeme soubor v libovolném textovém editoru a doplníme do souboru vzorec následovně:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

ndvi;(b08 - b04) / (b08 + b04)

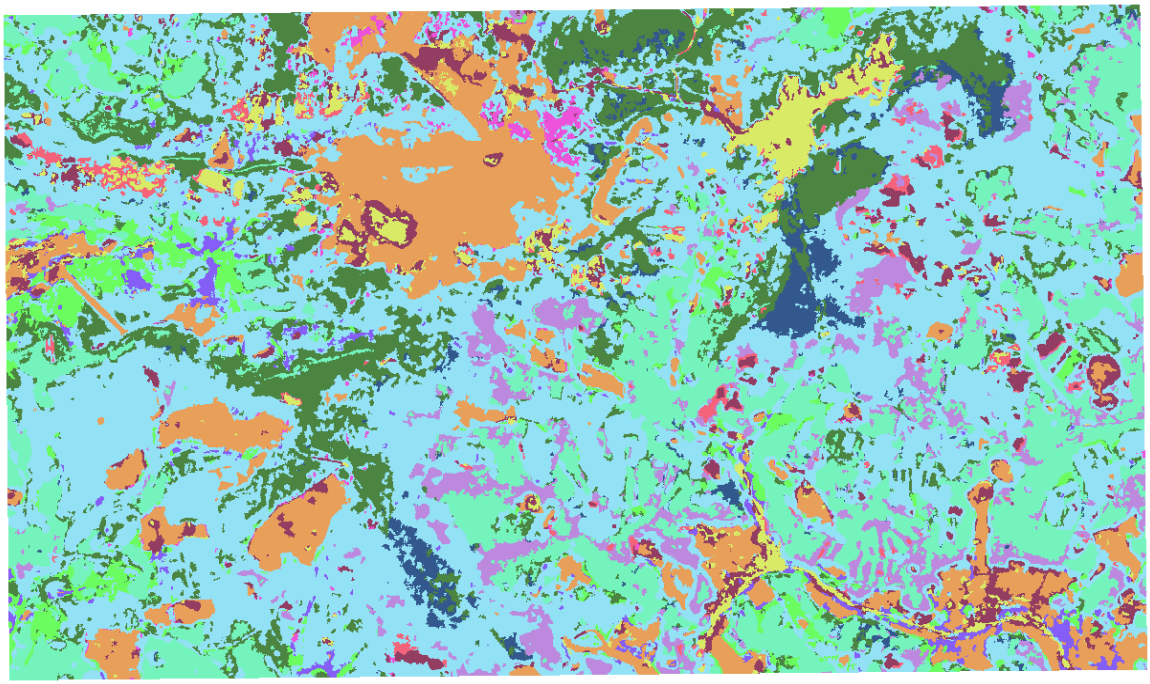
Na řádku začínajícím znakem # je jen komentář, můžeme ho tedy vynechat, ale pro přehlednost je vhodné ho uvést. Důležitější je druhý řádek, kde je název indexu (na který se pak odkazuje při volání skriptu v parametru idx), středník, a vzorec pro jeho výpočet. Vzorec je libovolný výraz v Pythonu. Může obsahovat libovolné výrazy používané v ArcGIS v rastrové algebře (viz https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/an-overview-of-the-map-algebra-operators.htm), s tím, že proměnná reprezentující každé pásmo je označena b01, b02, … b12 a navíc je k dispozici b8a.

Při výpočtu můžeme v parametru -ixd zadat více indexů najednou. Oddělujeme je čárkami bez mezer (tedy např. -idx NDVI,EVI,GNDVI,NDRE). Skript pak vytvoří více souborů, jejichž název na konci vždy obsahuje text _ a název daného indexu.

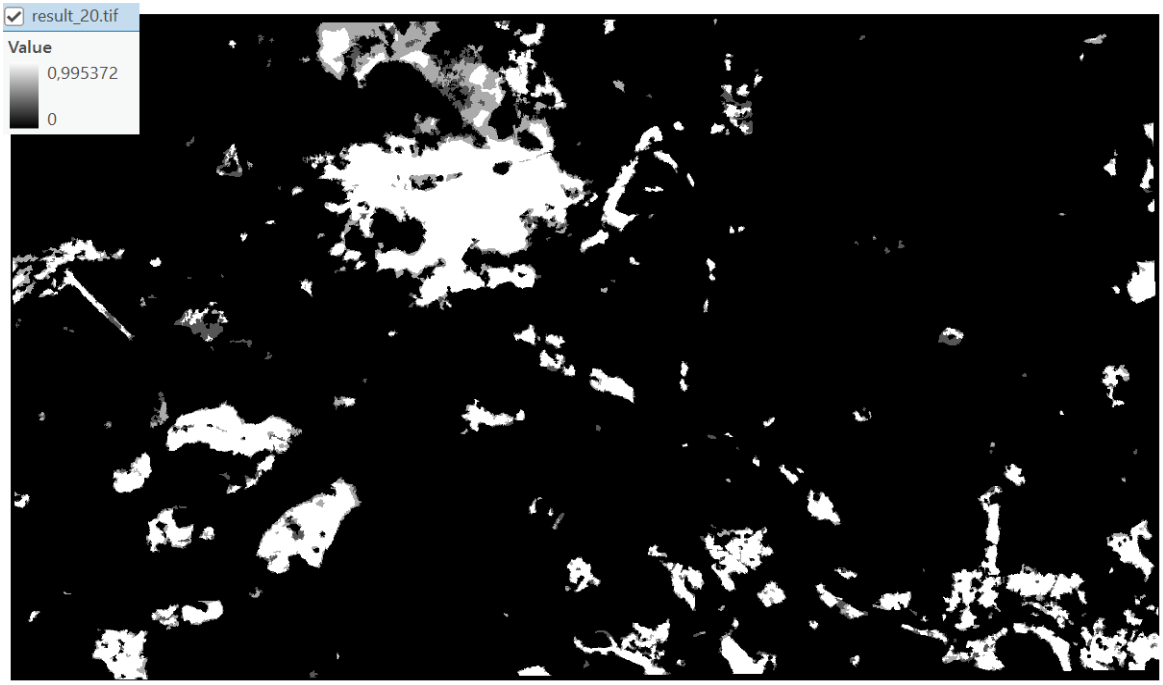
3. Provedeme klasifikaci snímku z 27. 8. 2018. Spustíme následující příkaz:

03_classifier.py -
i S:\classification2\S2A_MSIL2A_20180807T101021_N0500_R022_T33UWS_20230803T010219.SAFE_clip.tif -out
S:\classification2\S2A_MSIL2A_20180807T101021_N0500_R022_T33UWS_20230803T010219.SAFE_clip_classified.tif -work S:\classification2 -tv S:\classification2\tv_data.shp -ratio 0.33 -repeat 10 -min_patch 10 -simpl 4 -select 5

Je potřeba mít vytvořenou složku pro výpočet (v uvedeném příkladu S:\classification2) a připravená trénovací/validační data. V ukázce byla použity plochy použité pro trénování a validaci při tvorbě výsledku V7. Použili jsme třetinu dat pro trénování a dvě třetiny pro validaci (-ratio 0.33), klasifikaci chceme opakovat 10x s náhodnými trénovacími a validačními daty (-repeat 10) a pro výsledek použít kombinaci pěti nejlepších klasifikací (-select 5), generalizovat výsledek v max. 4 iteracích (-simpl 4) na minimální mapovací jednotku 1000 m^2 (-min_patch 10; s tím, že víme, že pixel rastru má 10x10 m^2). Pro provedení klasifikace výsledný soubor vypadá přibližně takto:



Součástí výstupu jsou i soubory result_<název_třídy>, obsahující rastr pravděpodobnosti výskytu dané dané třídy na daném místě. Například pro třídu 20 (Louky a pastviny) vypadá příslušný rastr takto:



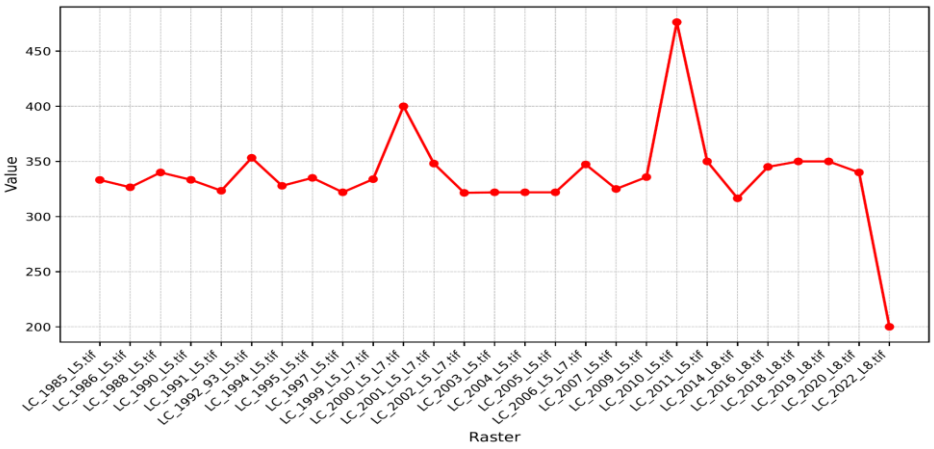
Tyto rastry nahrazují obvyklé statistiky (uživatelskou a zpracovatelskou přesnost), které jsou výsledkem provedení jedné klasifikace. Vznikají kombinací f1-skóre pro konkrétní třídu a výsledek klasifikace. Průměrná hodnota příslušného rastru pak představuje odhad f1-skóre pro příslušnou třídu na základě kombinace více metod klasifikace. Užitečnější je ale informace o hodnotě v konkrétním pixelu, kterou lze interpretovat jako spolehlivost klasifikace (resp. míru nejistoty) v daném místě pro každou třídu zvlášť.

4. porovnáme vývoj v čase, a to jak z jednotlivých rastrů (typicky indexů, výsledků klasifikace, případně i zdrojových dat), tak z vektorových vrstev odvozených z výsledků klasifikace.

Nejprve vyzkoušíme data pro vývoj na časové řadě klasifikovaných snímků z Landsatu 5 a 7 a Sentinelu 2, ze kterých vznikl výsledek 7 tohoto projektu. Z pohledu zpracování jde o výstupy kroku 3, spuštěné nad několika snímky z různých časových období. Spustíme příkaz:

04_ts_analyzer_pnt.py -i S:\change\seznam_klasifikaci.txt -c 15.7590942,50.7245099 -o S:\change\output_data.csv -g S:\change\output_chart.pdf

a krom dat v souboru csv dostaneme také graf zobrazující vývoj tříd v daném místě v čase:



V souboru seznam_klasifikaci.txt je seznam jednotlivých snímků a pásmo, z nějž chceme extrahovat výslednou hodnotu do datového souboru, resp. grafu. Soubor vypadá následovně:

```
S:\change\LC_1985_L5.tif*1
S:\change\LC_1986_L5.tif*1
S:\change\LC_1988_L5.tif*1
S:\change\LC_1990_L5.tif*1
S:\change\LC_1991_L5.tif*1
S:\change\LC_1992_93_L5.tif*1
S:\change\LC_1994_L5.tif*1
S:\change\LC_1995_L5.tif*1
S:\change\LC_1997_L5.tif*1
S:\change\LC_1999_L5_L7.tif*1
S:\change\LC_2000_L5_L7.tif*1
S:\change\LC_2001_L5_L7.tif*1
S:\change\LC_2002_L5_L7.tif*1
S:\change\LC_2003_L5.tif*1
S:\change\LC_2004_L5.tif*1
S:\change\LC_2005_L5.tif*1
S:\change\LC_2006_L5_L7.tif*1
S:\change\LC_2007_L5.tif*1
S:\change\LC_2009_L5.tif*1
S:\change\LC_2010_L5.tif*1
S:\change\LC_2011_L5.tif*1
S:\change\LC_2014_L8.tif*1
S:\change\LC_2016_L8.tif*1
S:\change\LC_2018_L8.tif*1
S:\change\LC_2019_L8.tif*1
S:\change\LC_2020_L8.tif*1
S:\change\LC_2022_L8.tif*1
```

Pásmo je všude 1, protože výsledek klasifikace je jednopásmový soubor.

Dále vyzkoušíme výpočet změn na vektorových datech, odvozených z časové řady výše uvedených snímků z let 1985, 1997, 2010 a 2022. Spustíme příkaz

04_ts_analyzer_area.py -i S:\change_v\seznam_lc_vektoru.txt -og S:\change_v\result.gdb -of result -size 3600 -iters 4 -sep :

Minimální požadovaná velikost objektu pro účely detekce změn je 3600 m^2 (-size 3600; plocha přibližně 4 pixelů dat Landsat) a mají se provést čtyři iterace generalizace (-iters 4). Výsledkem zpracování je databáze result.gdb, ve které nalezneme jedinou feature class result. Její atributová tabulka vypadá následovně:

OBJECTID *	Shape *	T_0	T_1	T_2	T_3	Shape_Length	Shape_Area	CHANGE
188	Polygon	200	200	200	200	720	18000	200:200:200:200
189	Polygon	200	200	200	200	960	23400	200:200:200:200
190	Polygon	200	200	200	200	7860	351900	200:200:200:200
191	Polygon	200	200	200	200	240	3600	200:200:200:200
192	Polygon	200	200	200	200	2220	84600	200:200:200:200
193	Polygon	200	200	200	200	2100	76500	200:200:200:200
194	Polygon	200	200	200	200	8460	349200	200:200:200:200
195	Polygon	200	200	200	200	1260	46800	200:200:200:200
196	Polygon	200	200	200	310	780	14400	200:200:200:310
197	Polygon	200	200	200	310	300	3600	200:200:200:310
198	Polygon	200	200	200	310	600	9000	200:200:200:310
199	Polygon	200	200	200	310	300	3600	200:200:200:310
200	Polygon	200	200	200	310	300	5400	200:200:200:310

Pro daný polygon jsou ve sloupcích T_0 až T_3 (obecně je sloupců T_x tolik, kolik je časových řezů v datech) hodnota z daného období, a ve sloupci CHANGE jsou pak tyto hodnoty agregované. Pomocí funkce Select By Attributes můžeme vybírat území podle charakteru změny, například (uveden vždy výraz, který se zadává do pole s dotazem):

- zjisti území, kde byly celou dobu louky a pastviny (mají kód 200):
  T_0=200 AND T_1=200 AND T_2=200 AND T_3=200
- zjisti území, kde nedošlo k žádné změně:
  T_0=T_1 AND T_1=T_2 AND T_2=T_3 AND T_3=T_0
- zjisti území, kde došlo k nějaké změně v posledním období:
  T_0=T_1 AND T_1=T_2 AND T_2=T_0 AND T_3=T_0
- zjisti území, kde byla v prvních dvou obdobích louka a pastvina:
  T_0=200 AND T_1=200
  případně
  CHANGE LIKE '200:200:%'
- …

Tímto způsobem lze položit v zásadě libovolná dotaz týkající se změny krajinného pokryvu. Výsledkem dotazuje výběr polygonů, se kterým lze dále pracovat. Typicky se výběr uloží a dále se

mohou počítat věci jako rozloha či počet takových ploch, případně se plochy mohou mocí Dissolve sloučit do výsledného polygonu například pro účely kartografického zpracování.

Soubor seznam_lc_vektoru.txt vypadá následovně:

```
S:\change_v\LC_1985.shp;gridcode
S:\change_v\LC_1997.shp;gridcode
S:\change_v\LC_2010.shp;gridcode
S:\change_v\LC_2022.shp;gridcode
```

Na každém řádku je uveden název souboru a atribut, ve kterém je kód třídy. Pro fungování celého procesu se předpokládá, že atributy jsou napříč jednotlivými obdobími shodné.

6. Závěr

Předložená metodika představuje ucelený nástroj pro hodnocení vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii a klima, s důrazem na lesní porosty v podmínkách horských chráněných území. Klíčovým přínosem je propojení technik dálkového průzkumu Země s hydrologickým modelováním, které umožňuje analyzovat nejen prostorové změny, ale také kvantifikovat jejich dopad na vodní režim krajiny. Výstupy jsou využitelné jak pro správu chráněných území, tak pro širší environmentální plánování a vědecký výzkum.

Metodika je postavena na využití volně dostupných dat DPZ (Landsat, Sentinel-2) a zahrnuje robustní postupy pro jejich zpracování a analýzu. Důraz je kladen na transparentnost zpracování, opakovatelnost a možnost automatizace jednotlivých kroků, což z ní činí efektivní nástroj pro dlouhodobý monitoring. Pro potřeby koncových uživatelů, zejména Správy KRNAP, byla navržena i softwarová implementace – aplikace, která umožňuje rutinní zpracování nových dat a vizualizaci výstupů.

Mezi hlavní výstupy metodiky patří časově konzistentní klasifikace krajinného pokryvu, přehledné mapové výstupy a modelové simulace hydrologických procesů. Součástí řešení je rovněž posouzení přesnosti klasifikací, metodika pro tvorbu bezoblačných mozaik a návrhy postklasifikačních úprav, které zajišťují konzistenci časových řad. Využité metody byly ověřeny v podmínkách povodí horní Úpy a horní Čisté, avšak byly navrženy tak, aby byly snadno aplikovatelné i v jiných územích s podobnou datovou základnou.

Přestože metodika přináší řadu výhod, je třeba zmínit i určitá omezení. Mezi ně patří především závislost na dostupnosti kvalitních snímků bez oblačnosti, potřeba trénovacích a validačních dat pro přesné klasifikace, či výpočetní náročnost některých analýz. Tyto nedostatky jsou však kompenzovány využitím robustních statistických a geoinformačních metod a možností dalšího rozvoje v budoucích aplikacích (např. integrace strojového učení, využití radarových dat či crowdsourcingu terénních dat).

Metodika představuje příspěvek k nástrojům pro environmentální monitoring a podporu rozhodování v chráněných územích i mimo ně. Její přenositelnost, kombinace různých zdrojů dat a využitelnost pro jak výzkumné, tak aplikační účely ji činí cenným výstupem nejen pro projekt TAČR SS05010124, ale i pro širší odbornou a správní komunitu. V budoucnu může sloužit jako základ pro tvorbu standardizovaných postupů monitoringu v chráněných územích v ČR i na evropské úrovni.

7. Literatura a zdroje

Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., Van Genuchten, M. T. (2004): Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Journal of Vadouse Zone*, 3(4), 1340–1352.

Abbaspour, K., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. (2007): Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333, 413–430.

Abbaspour, K. C. (2013): SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs – A User Manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf.

Abdullah, H., Skidmore, A. K., Darvishzadeh, R., Heurich, M. (2019): Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 5, 87–106. https://doi.org/10.1002/rse2.93

Arabi, M., Govindaraju, R. S., Hantush, M. M., Engel, B. A. (2006): Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 513–522.

Arnold, J. G., Fohrer, N. (2005): SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572.

Arnold, J. G., Kniry, J. R., Srinivasa, J. R., Williams, J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L. (2012): Soil and Water Assessment Tool, Input/Output Documentation, version 2021. Texas Water Resources Institute. Dostupné z: https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf [cit. 15. 12. 2021].

Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., Tong, Q. (2014): Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431.

Bárta, V., Lukeš, P., Homolová, L. (2021): Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 100, 102335. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102335

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., Latorre, B. (2014): Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023.

Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., Hostert, P. (2024): National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114069. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069

Brown, L. C., Barnwell, T. O. (1987): The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. Documentation and user manual, Athény.

CENIA (2023): CORINE Land Cover 2018 databáze České republiky (CLC18_CZ). https://gis.cenia.cz/id/dataset/clc18_cz [cit. 10. 1. 2023].

Cho, J., Lowrnce, R. R., Bosch, D. D., Strickland, T. C., Her, Y., Vellidis, G. (2010): Effect of watershed subdivision and filter width on SWAT simulation of a coastal plain watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 586–602.

Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J.-C., Skakun, S. V., Justice, C. (2018): The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145–161. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002

Cohen, W. B., Goward, S. N. (2004): Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54, 535–545.

Copernicus (2023): https://www.copernicus.eu/en [cit. 19. 12. 2023].

Crist, E. P., Cicone, R. C. (1984): A physically-based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (3), 256–263.

ČHMÚ (2023): Databáze CLIDATA. Český hydrometeorologický ústav.

ČÚZK (2023): https://geoportal.cuzk.cz/ [cit. 19. 12. 2023].

Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J. (2011): Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors*, 11, 7063–7081. https://doi.org/10.3390/s110707063

Foody, G. M. (2009): Sample size determination for image classification accuracy assessment and comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 5273–5291.

GEE_vizualizace (2023): Aplikace pro zobrazení bezoblačných scén Landsat 1985–2022. https://dvorakjakub.users.earthengine.app/view/kompozitykrkonose [cit. 19. 12. 2023].

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017): Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Green, W. H., Ampt, G. A. (1911): Studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 11–24.

Gustard, A., Demuth, S. (2009): Manual on low-flow estimation and prediction. *Operational Hydrology Report*, No. 50, WMO-No. 1029. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Hais, M., Jonášová, M., Langhammer, J., Kučera, T. (2009): Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM+ imagery and field vegetation data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 835–845. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.12.012

Hais, M., Wild, J., Berec, L., Brůna, J., Kennedy, R., Braaten, J., Brož, Z. (2016): Landsat Imagery Spectral Trajectories—Important Variables for Spatially Predicting the Risks of Bark Beetle Disturbance. *Remote Sensing*, 8, 687. https://doi.org/10.3390/rs8080687

Hansen, M. C., Loveland, T. R. (2012): A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66–74. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024

Hansen, M. C. et al. (2013): High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Healey, S. P., Cohen, W. B., Yang, Z., Krankina, O. N. (2005): Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97, 301–310. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009

Homolová, L. et al. (2013): Measurement methods and variability assessment of the Norway spruce total leaf area: Implications for remote sensing. *Trees – Structure and Function*, 27, 111–121.

Huete, A. et al. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195–213.

Jensen, J. R. (2005): *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (3rd ed.). Pearson Education, Upper Saddle River.

Kavalír, V. (2024): *Hydrologické extrémy a změny kvality vody na horním toku řeky Úpy*. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 145 s.

Kennedy, R. E., Yang, Z., Cohen, W. B. (2010): Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897–2910.

Kim, N. W. et al. (2008): Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 356, 1–16.

Knisel, W. G. (1980): CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. *Environmental Science*, 26, 643–659.

König, S. et al. (2023): Assessing Combinations of Landsat, Sentinel-2 and Sentinel-1 Time series for Detecting Bark Beetle Infestations. *GIScience & Remote Sensing*.

Kupková, L. et al. (2018): Forest cover and disturbance changes, and their driving forces: A case study in the Ore Mountains, Czechia. *Environmental Research Letters*, 13, 095008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadd2c

Kupková, L. et al. (2023): Towards reliable monitoring of grass species in nature conservation: Evaluation of the potential of UAV and PlanetScope multi-temporal data in the Central European tundra. *Remote Sensing of Environment*, 294, 113645.

Laaha, G., Blöschl, G. (2006): Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20(18), 3851–3878.

Landsat (2023): https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions [cit. 19. 12. 2023].

Landsat QA (2023): https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-quality-assessment-bands [cit. 19. 12. 2023].

Lukeš, P. et al. (2018): Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2 (Metodika). ÚHÚL Frýdek-Místek.

Mann, H. B. (1945): Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.

Masek, J. G. et al. (2020): Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111968. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111968

MZe (2023): *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2022*. Ministerstvo zemědělství, Praha.

Monteith, J. L. (1965): Evaporation and the environment. In *The State and Movement of Water in Living Organisms* (Proc. 19th Symp., Swansea, U.K.). Society of Experimental Biology, Cambridge University Press.

Moriani, D. N. et al. (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885–900.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2009): *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf [cit. 10. 1. 2023].

Němečková, S. (2008): *Mapa půdních subtypů v české části povodí Labe pro model SWIM*. ÚH AV ČR, v. v. i., CD-ROM.

Priestley, C. H. B., Taylor, J. R. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92.

Ritchie, J. (1972): A Model for Predicting Evaporation From a Low Crop With Incomplete Cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204–1212.

Senf, C., Pflugmacher, D., Hostert, P., Seidl, R. (2017): Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 453–463. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004

Sentinel-2 Level 2A (2023): https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm-overview [cit. 19. 12. 2023].

Shi, T., Xu, H. (2019): Derivation of tasseled cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(10), 4038–4048.

Shivhare, N., Dikshit, P. K. S., Dwivedi, S. B. (2018): A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. *Engineering*, 4, 643–652.

ÚHÚL (2023): https://www.uhul.cz/mapy-a-data/webove-mapove-sluzby/ [cit. 19. 12. 2023].

USDA SCS (1985): *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. Soil Conservation Service – USDA, Washington DC.

USGS (2023): https://earthexplorer.usgs.gov/ [cit. 19. 12. 2023].