



CHARLES UNIVERSITY  
Faculty of Science



Ústav výzkumu globální  
změny AV ČR



Ústav pro hydrodynamiku  
AV ČR

Přírodovědecká fakulta UK

Project TAČR SS05010124

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

**Dokument prokazující dosažení výsledku**

Číslo výsledku dle ISTA: SS05010124-V8

Název výsledku: Soubor datových vrstev popisujících stav krajinného pokryvu ve sledovaných povodích v jednotlivých letech analýzy (výstup analýzy družicových dat)

Druh výstupu/výsledku: O - Ostatní výsledky

Termín dosažení výsledku: 12/2022

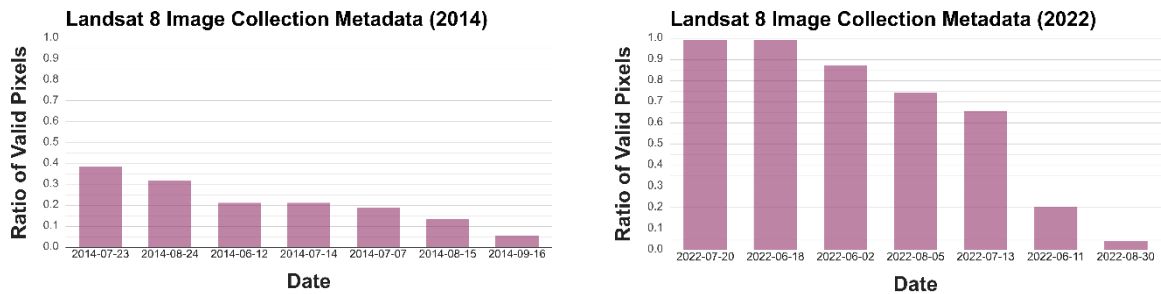
Autoři výsledku (jméno/organizace): Markéta Potůčková, Lucie Červená, Lucie Kupková, Jakub Lysák, Jonáš Hruška, Jakub Dvořák, Adéla Šedová, Alex Šrollerů/PřF UK, Petr Lukeš/ Ústav výzkumu globální změny AV ČR

**Cíl/účel vytváření výsledku**

Cílem výsledku bylo shromáždit a předzpracovat časovou řadu volně dostupných (bezoblačných) družicových dat Landsat (popř. Sentinel-2), na jejichž základě bude následně možné provést analýzu dlouhodobého vývoje krajinného pokryvu (od 80. let 20. století) s důrazem na změny lesních porostů a aktuální zdravotní stav lesa v povodí horní Úpy a horní Čistě. Výsledné datové vrstvy krajinného pokryvu budou využity jako vstup pro tvorbu dalších výsledků, zejména i) simulaci vlivu změn krajinného pokryvu na vývoj hydrologických charakteristik využitím modelu SWAT, ii) metodiku pro monitoring vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii s využitím dálkového průzkumu Země a hydrologického modelování, iii) specializovanou mapu „Vývoj krajinného pokryvu v povodí horní Úpy a horní Čistě od 80. let 20. století do současnosti“.



Obrázek 1. 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.



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 Tasseled Cap transformace (TCG, TCB, TCW). Pro výpočet TC byly použity snímky Landsat a Sentinel-2 obsahující odrazivost na povrchu atmosféry (TOA) 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 2.

Obrázek 2. Struktura vrstev výsledných bezoblačných kompozitů a rozsah jejich hodnot.

Poradí spektrálních pasem ve výsledných 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. Klasifikace

Návrh tříd pro klasifikaci vycházel 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 rozšíření třídy jehličnatého lesa na les zapojený a nezapojený (prosvítající půdní pokryv alespoň z 25 %) a jehličnatý les silně poškozený/odumřelý. Ve třídě kleče byla vyčleněna kleč s příměsí smrku nebo jeřábu, která se jinak výrazně mísila se třídou přechodových stadií lesa. 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. Výsledná klasifikační legenda sestává z těchto tříd:

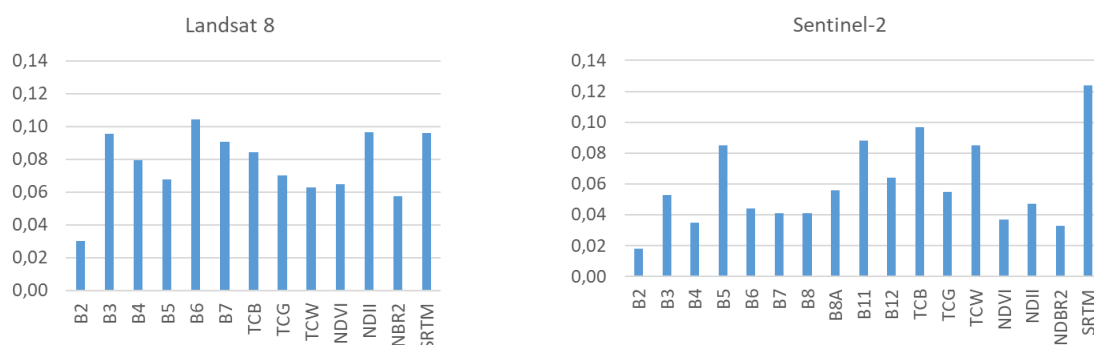
1. Zástavba a komunikace
2. Louky (včetně přírodních), pastviny

3. Lesy
  - 3.1. Listnaté lesy
  - 3.2. Jehličnaté lesy
    - 3.2.1. zapojené
    - 3.2.2. nezapojené
    - 3.2.3. odumřelé
  - 3.3. Smíšené lesy
  - 3.4. Přejíčovová stadia lesa a křoviny
  - 3.5. Holiny, oblasti s řídkou vegetací
4. Kosodřevina
  - 4.1. kosodřevina s příměsí smrku/jeřábu
5. Rašeliniště
6. Skály, kamenná more
7. Vodní plochy a toky

Trénovací data pro všechny třídy byla nejprve vytvořena nad ortofoty z let 2022 a 2018 dostupná přes WMS KRNAP. Jako doplňková data pro trénování byl použit normalizovaný digitální model povrchu nDSM pro odlišení mladého lesa (do 5 m, kategorie 3.4) a vrstva lesních dřevin webové mapové služby ÚHÚL (Tabulka 1). nDSM z roku 2018 byl poskytnut ÚHÚL a nDSM z roku 2022 pochází z leteckého laserového skenování provedeného v rámci projektu společně s leteckým hyperspektrálním snímáním.

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 3 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 3. 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 2 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 nepřesností v definici trénovacích ploch pouze nad daty Landsat, byl přenos klasifikátoru použit na roky, v nichž nebylo dostupné ortofoto (viz

Tabulka 1). Pro časové horizonty mezi lety 1985 až 1997 byly trénovací množiny upraveny nad daty Landsat v letech 1985, 1988, 1991 a 1994. V ostatních letech byl klasifikátor přenesen z nejbližšího roku. V časových horizontech mezi roky 1985 a 1997 nebyly rozlišovány podtřídy kategorie jehličnatý les a kosodřevina.

Tabulka 2. 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).

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

### 3. Hodnocení přesnosti klasifikace

Přesnost klasifikace byla hodnocena na 1500 bodech stratifikovaně rozdělených do jednotlivých tříd (viz Foody, 2009 pro oboustranný interval spolehlivosti  $\alpha = 5\%$ ,  $h=0,025$ ). Třída klasifikace byla validačním bodům přidělena na základě interpretace ortofot (dostupných přes WMS KRMAP 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 ve 4 časových horizontech, jak ukazuje Tabulka 3. Z tabulky vyplývá, že přesnost klasifikace byla konzistentní ve všech časových horizontech. Data Sentinel-2 díky vyššímu prostorovému a spektrálnímu rozlišení umožňují docílit vyšší přesnost klasifikace, v tomto případě o 5 %. Sloučením podtříd v rámci třídy kosodřevina (kosodřevina a kosodřevina s příměsí smrku/jeřábu) a v rámci třídy jehličnatý les (zapojený a nezapojený) se přesnost klasifikace zvýšila o dalších 5 %.

Tabula 3. Hodnocení přesnosti klasifikace dat Landsat 8 a 5 a Sentinel-2 pro 1 500 validačních bodů získaných interpretací ortofot pro podrobnou legendu a legendu se sloučením podtříd i) kosodřevina a kosodřevina s příměsí smrku/jeřábu a ii) zapojený a nezapojený jehličnatý les. Třídy zástavba a vodní plochy nevznikly na základě klasifikace a nebyly tudíž hodnoceny. AO – celková přesnost, UA – uživatelská přesnost, PA – zpracovatelská přesnost.

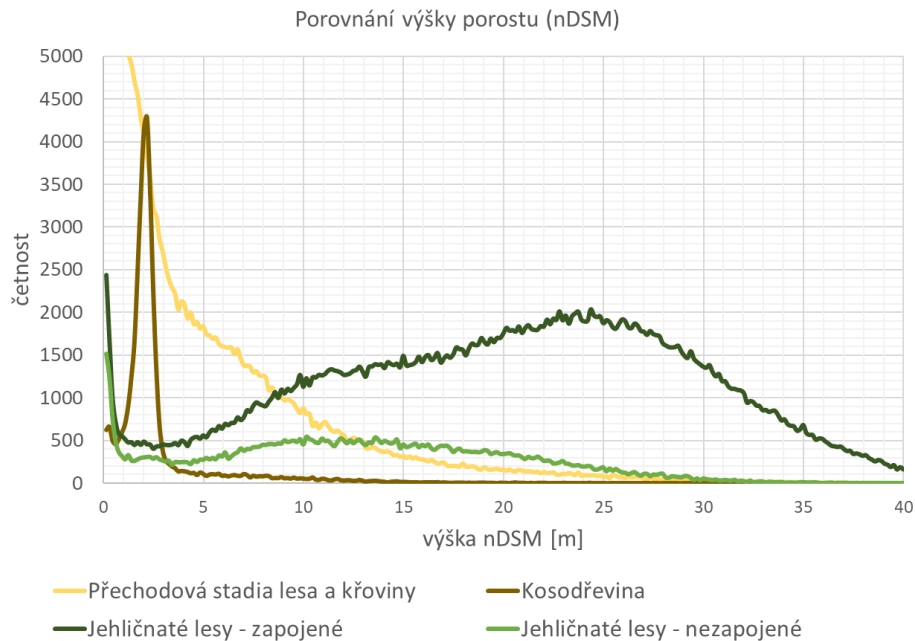
AO	Landsat 8						Landsat 5	
	2022		2018		2016		2010	
	0,75		0,72		0,75		0,67	
	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA
Louky, pastviny	0,90	0,91	0,93	0,74	0,89	0,88	0,86	0,86
Listnaté lesy	0,53	0,53	0,52	0,62	0,79	0,67	0,54	0,67
Jehličnaté lesy zapojené	0,83	0,89	0,79	0,89	0,88	0,90	0,92	0,79
Jehličnaté lesy nezapojené	0,49	0,35	0,57	0,36	0,56	0,40	0,52	0,53
Jehličnaté lesy odumřelé	0,78	0,72	0,91	0,41	0,84	0,62	-	-
Směšené lesy	0,60	0,54	0,55	0,50	0,57	0,67	0,52	0,35
Přechodová stadia lesa a křoviny	0,74	0,80	0,74	0,76	0,72	0,80	0,56	0,75
Holiny, oblasti s řídkou vegetací	0,78	0,7	0,44	0,73	0,67	0,76	0,31	0,53
Kosodřevina	0,51	0,82	0,45	0,88	0,49	0,80	0,51	0,80
Kosodřevina se smrkem/jeřábem	0,88	0,26	0,73	0,21	0,47	0,17	0,45	0,17
Rašeliniště	0,98	0,90	0,98	0,90	1,00	0,74	1,00	0,52
Skály, kamenná moře, půda bez vegetace	0,97	0,74	0,93	0,74	0,97	0,66	0,94	0,88
<b>AO po sloučení podtříd</b>	<b>0,82</b>		<b>0,78</b>		<b>0,81</b>		<b>0,70</b>	

AO	Sentinel-2			
	2022		2018	
	0,81		0,80	
	UA	PA	UA	PA
Louky, pastviny	0,93	0,92	0,92	0,87
Listnaté lesy	0,68	0,77	0,72	0,77
Jehličnaté lesy zapojené	0,89	0,89	0,90	0,89
Jehličnaté lesy nezapojené	0,72	0,63	0,66	0,62
Jehličnaté lesy odumřelé	0,88	0,86	0,94	0,66
Směšené lesy	0,60	0,70	0,65	0,74
Přechodová stadia lesa a křoviny	0,84	0,85	0,85	0,83
Holiny, oblasti s řídkou vegetací	0,70	0,82	0,60	0,88
Kosodřevina	0,64	0,67	0,49	0,90
Kosodřevina se smrkem/jeřábem	0,60	0,51	0,73	0,21
Rašeliniště	1,00	0,82	0,98	0,86
Skály, kamenná moře, půda bez vegetace	1,00	0,82	0,98	0,86
<b>AO po sloučení podtříd</b>	<b>0,86</b>		<b>0,86</b>	

#### 4. Analýza družicových dat ve vztahu k třídě přechodová stádia lesa z dat Sentinel-2

Při tvorbě trénovacích dat tříd listnatého, smíšeného a jehličnatého lesa a přechodových stádií lesa byla v letech 2018 a 2022 brána v úvahu výška vegetace z nDSM, kdy do přechodových stádií lesa byl zahrnut porost pouze do 5 m výšky. V jiných letech nebyla data nDSM k dispozici. Obrázek 4 ukazuje četnosti výšek porostu (nDSM) ve vybraných třídách klasifikace z dat Sentinel-2 v roce 2022. Z grafu je patrné, že třídy klasifikované pouze na základě spektrálních vlastností vegetace a nadmořské (nikoliv relativní) výšky do značné míry odpovídají výškové struktuře porostu. Data nDSM byly odvozena z leteckého laserového skenování s hustotou cca 1 bod/m<sup>2</sup> uskutečněného v rámci projektu.

Obrázek 4. Četnost výšky vegetace/nDSM z dat ve čtyřech vybraných třídách krajinného pokryvu.



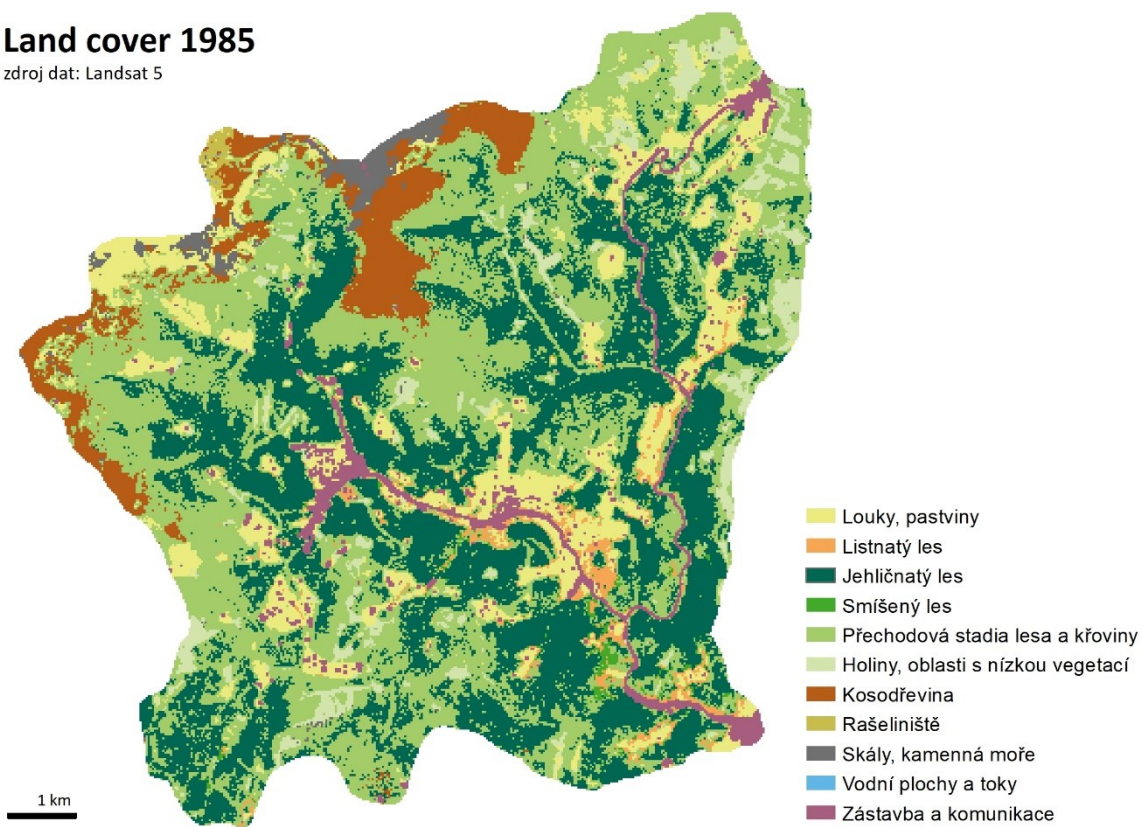
#### 5. Ukázky výsledků

Výsledky byly vyhotoveny ve formě rastrů (formát tif, souřadnicový systém WGS 84/UTM 33N, kód EPSG 32633, prostorové rozlišení 30 m pro Landsat, 10 m pro Sentinel-2) a souboru map krajinného pokryvu dostupných ze stránek projektu. Ukázky mapových výstupů pro data Landsat i Sentinel-2 jsou na Obrázku 5.

Obrázek 5. Krajinový pokryv povodí horní Úpy a horní Čisté v letech 1985 a 2022 vyhotovený klasifikací dat Landsat 5 a Sentinel -2.

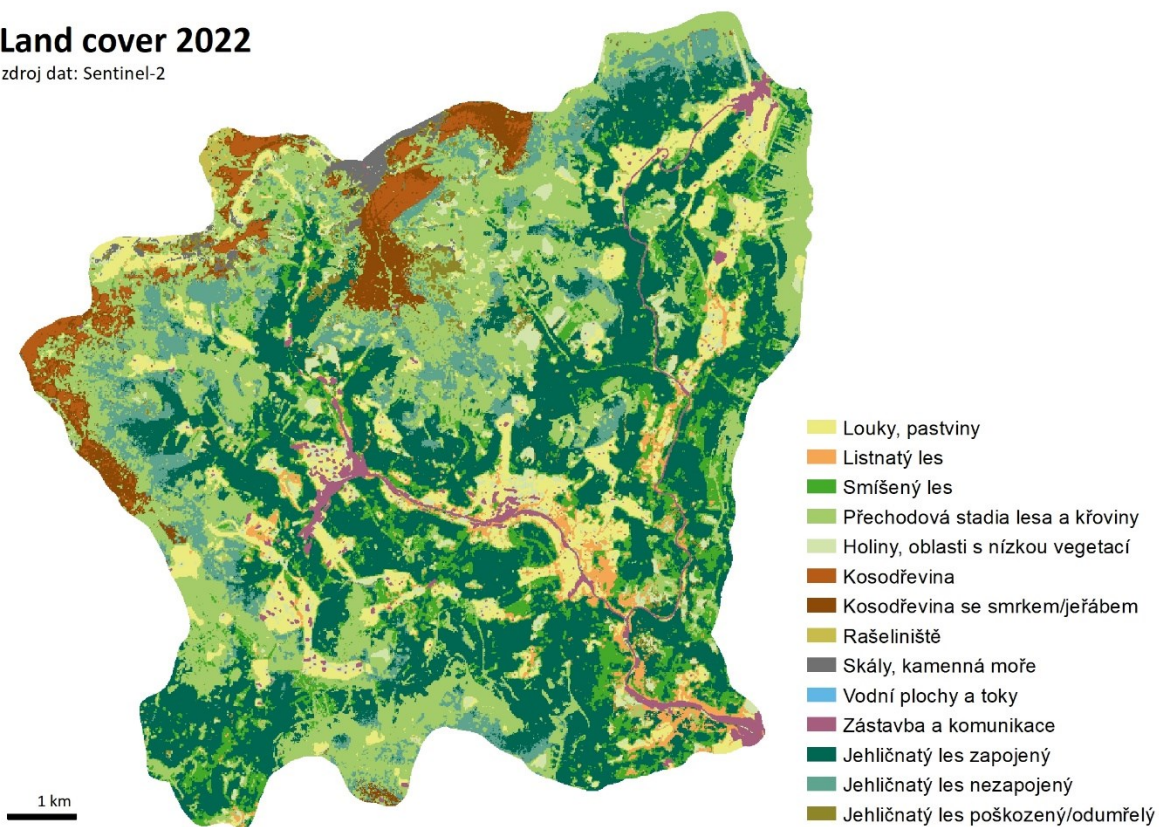
### Land cover 1985

zdroj dat: Landsat 5



### Land cover 2022

zdroj dat: Sentinel-2





## 6. Literatura a zdroje

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

Copernicus (2022): Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

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.

Foody, G. M. (2009): Sample size determination for image classification accuracy assessment and comparison *Int. J. Remote Sens.*, 30, 5273–5291.

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.

### Vyhodnocení výsledku (základní zjištění, přínos, případně využití)

Časová řada krajinného pokryvu postihuje období 1985 až 2022 ve 27 časových horizontech. Vznikla řízenou klasifikací dat Landsat. Výstupem předzpracování jsou bezoblačné kompozity vzniklé kombinací dat pořízených během vegetační sezóny daného roku, pokud bylo možné takový kompozit vytvořit. V případě většího než ročního odstupe v časové řadě byly použity dvou, resp. tříleté bezoblačné kompozity. V testovaných obdobích celková přesnost klasifikace dosáhla 75 % v případě podrobnější a 80 % v případě zjednodušené, ale pro další využití stále dostačující legendy. Data Sentinel-2 díky vyššímu prostorovému a spektrálnímu rozlišení přinášejí vyšší úspěšnost klasifikace (80 % pro podrobnější legendu). Potenciál radarových dat Sentinel-1 pro klasifikaci zejména růstových stadií lesa bude vyhodnocen při podrobné analýze časových řad v dalším roce projektu.

Vytvořená časová řada krajinného pokryvu z dat Landsat bude sloužit jako vstup do hydrologického modelu SWAT. Na jejím základě bude vytvořena mapa vývoje a změn krajinného pokryvu v dotčených povodích. Vytvořený repozitář časové řady bezoblačných družicových dat bude využit k detailní analýze vývoje lesních porostů (využití vegetačních indexů, které jsou součástí datové sady). Poznatky ze zpracování a analýzy dat Landsat a Sentinel-2 budou využity pro tvorbu metodiky pro monitoring vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii s využitím dálkového průzkumu Země a hydrologického modelování a při tvorbě aplikace pro automatizované zpracování dat DPZ a vyhodnocení hydrologických poměrů.

Výsledek je volně dostupný zde\*: <https://www.lucc4hydro.cz/outputs/>

---

\* V případě, že je možné výsledek volně zpřístupnit.

Pokud nelze originální výsledek volně zpřístupnit, prokazuje jeho dosažení pouze tento dokument.