

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



*Využití neoptických metod dálkového průzkumu Země pro
monitoring mikroklimatu v postdisturbanční lokalitě*

*Application of Non-Optical Remote Sensing Methods for
Monitoring Microclimate in Post-Disturbance Area*

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Tereza Hüttnerová, Ph.D.

Diplomant: Bc. Adéla Soukupová

2026

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Adéla Soukupová

Regionální environmentální správa

Název práce

Využití neoptických metod dálkového průzkumu Země pro monitoring mikroklimatu v postdisturbanční lokalitě

Název anglicky

Application of Non-Optical Remote Sensing Methods for Monitoring Microclimate in Post-Disturbance Area

Cíle práce

Cílem práce je ověřit vybrané metody dálkového průzkumu Země (DPZ) pro monitoring mikroklimatu v postdisturbanční lokalitě na území České republiky. Ověření bude provedeno minimálně jednou metodou založenou na UAV platformě se snímkováním nad korunami porostu a jednou neoptickou metodou typu close-range.

Mezi dílčí cíle práce patří:

1. Nalezení, výběr a aplikace vhodných metod pro mapování mikroklimatu pomocí bezpilotního snímkování a close-range sběru dat.
2. Zhodnocení, ve kterých metrikách či datových sadách je patrná obnova mikroklimatických podmínek ve vztahu ke struktuře lesního porostu.
3. Ověření přesnosti, správnosti a časové náročnosti použitých metod sběru dat vybraných v rámci podcíle 1.

Metodika

Praktická část práce bude realizována na území lesního ekosystému zasaženého přírodními disturbancemi, který se nachází ve fázi přirozené regenerace. Pro sběr a zpracování dat budou využity moderní metody dálkového průzkumu Země a geografických informačních systémů (DPZ, GIS).

LS 2025

Výběr vhodného zájmového území, analýza možných materiálů pro sběr dat, příprava literární rešerše, získání materiálů DPZ.

ZS 2025

Zpracování získaných dat, jejich interpretace. Popis metodické části a dokončení literární rešerše.

LS 2026

Statistické vyhodnocení dat, tvorba mapových výstupů, vyhodnocení přesnosti a zhodnocení použité metody pro praxi a výzkum. Odevzdání práce.



Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

dálkový průzkum Země, přírodní disturbance, geografické informační systémy, neoptický monitoring

Doporučené zdroje informací

- Bárta, V., Hanuš, J., Dobrovolný, L., and Homolová, L. (2022). Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees. *Forest Ecology and Management* 506, 119984. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119984
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., and Matese, A. (2021). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests* 12, 397. doi: 10.3390/f12040397
- Davis KT, Dobrowski SZ, Holden ZA et al. Microclimatic buffering in forests of the future: the role of local water balance. *Ecography* 2019;42:1–11.
- Jaakkola, E., Gärtner, A., Jönsson, A. M., Ljung, K., Olsson, P.-O., and Holst, T. (2022). Spruce bark beetle (*Ips typographus*) infestation cause up to 700 times higher bark BVOC emission rates from Norway spruce (*Picea abies*). *Biodiversity and Ecosystem Function: Terrestrial*. doi: 10.5194/bg-2022-125
- Kašpar V, Hederová L, Macek M et al. Temperature buffering in temperate forests: Comparing microclimate models based on ground measurements with active and passive remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 2021;263:112522.
- KUŽELKA, Karel; SUROVÝ, Peter; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. Statistika v R : zpracování dat závěrečných prací pro lesnické obory. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2018. ISBN 978-80-213-2921-8.
- Lanta V, Adámek M, Chlumská Z et al. Plant colonisation, soil nutrient patterns and microclimate after a large forest fire in temperate Central Europe. *Forest Ecology and Management* 2025;585:122643.
- Minařík, R., Langhammer, J., and Lendziach, T. (2021). Detection of Bark Beetle Disturbance at Tree Level Using UAS Multispectral Imagery and Deep Learning. *Remote Sensing* 13, 4768. doi: 10.3390/rs13234768
- SUROVÝ, Peter, Karel KUŽELKA, Azadeh ABDOLAHNEJAD, Kateřina SIROTKOVÁ, Zlatica MELICHOVÁ a Martin SLAVÍK, 2019. Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví. B.m.: ČZU v Praze, Fakulta Lesnická a Dřevařská. ISBN 8001015971.
- Von Arx G, Dobbertin M, Rebetez M. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology* 2012;166–167:144–55.

Předběžný termín obhajoby

2025/26 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tereza Hüttnerová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů a DPZ

Elektronicky schváleno dne 13. 02. 2026

doc. Ing. Peter Surový, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 02. 03. 2026

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 06. 03. 2026



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma:

Využití neoptických metod dálkového průzkumu Země pro monitoring mikroklimatu v postdisturbanční lokalitě vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Prohlašuji, že jsem nástroje AI využila v souladu s vnitřními předpisy univerzity a principy akademické integrity a etiky.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Karlových Varech dne 29. 3. 2026

.....

Bc. Adéla Soukupová

Poděkování

Zde bych ráda vyjádřila své upřímné díky vedoucí práce, Ing. Tereze Hüttnerové, Ph.D., za její profesionalitu, trpělivost a odbornost při vedení této diplomové práce. Dále mé poděkování patří doc. Ing. Petrovi Surovému, PhD., díky jeho podpoře, lidskosti a profesionalitě tato diplomová práce mohla vzniknout pod záštitou Katedry hospodářské úpravy lesů a DPZ.

Abstrakt

Monitoring zdravotního stavu vegetace je důležitý pro včasnou identifikaci změn způsobených disturbancemi, jako jsou požáry, sucho nebo napadení škůdci. Metody dálkového průzkumu Země založené na optických datech umožňují tyto změny sledovat prostřednictvím spektrální odezvy vegetace. Tyto projevy se však často objevují až ve chvíli, kdy je vegetace již výrazně ovlivněna stresem. Oproti tomu neoptické metody mohou indikovat změny ve stavu vegetace v ranějších fázích, například prostřednictvím mikroklimatických nebo chemických projevů.

Tato práce je zaměřena na neoptický výzkum realizovaný v Národním parku České Švýcarsko. Výzkum se věnuje sledování procesů probíhajících v post-požárové krajině. Praktická část práce kombinuje neoptický monitoring prostředí s analýzou struktury vegetace pomocí metod dálkového průzkumu Země. Pomocí elektronického nosu Sniffer4D byly sledovány mikroklimatické projevy stresu a současně byl pomocí bezpilotního prostředku proveden LiDARový sběr dat, který umožnil detailně zachytit prostorovou strukturu vegetace a odvodit vybrané strukturální charakteristiky porostu.

Výsledky ukazují, že i v raných fázích po požáru začíná obnovující se vegetace ovlivňovat mikroklimatické podmínky prostředí. Přestože porost není kompletně zapojený a jeho struktura ještě není plně vyvinutá, dochází již k měřitelným změnám teploty v rámci obnovujícího se ekosystému. Přínosem práce jsou informace o procesech probíhajících během rané obnovy vegetace za pomoci neoptických metod. Jejich využití tak může přispět k lepšímu pochopení průběhu mikroklimatických procesů během regenerace. Tato práce přináší zásadní poznatek, že i takto raný regenerující se porost vykazuje opětovně známky schopnosti regulovat mikroklima.

Klíčová slova: obnova lesa, mikroklima, bezpilotní prostředky LIDAR, elektrický nos, Sniffer 4D, regulace teploty a vlhkosti, vegetační stres, disturbance

Abstract

Monitoring the health status of vegetation is important for the early identification of changes caused by disturbances such as fires, drought, or pest infestations. Remote sensing methods based on optical data allow these changes to be monitored through the spectral response of vegetation. However, these manifestations often appear only when the vegetation is already significantly affected by stress. In contrast, non-optical methods can indicate changes in vegetation condition at earlier stages, for example through microclimatic or chemical manifestations.

This work is focused on non-optical research carried out in the Bohemian Switzerland National Park. The research deals with monitoring processes occurring in a post-fire landscape. The practical part of the work combines non-optical environmental monitoring with the analysis of vegetation structure using remote sensing methods. Using the Sniffer4D electronic nose, microclimatic manifestations of stress were monitored, and at the same time, LiDAR data acquisition was carried out using an unmanned aerial vehicle, which made it possible to capture the spatial structure of vegetation in detail and to derive selected structural characteristics of the stand.

The results show that even in the early stages after a fire, regenerating vegetation begins to influence the microclimatic conditions of the environment. Although the vegetation is not fully closed and structure is not yet fully developed, measurable changes in temperature occur within the regenerating ecosystem. The contribution of this work lies in providing information about processes occurring during early vegetation recovery using non-optical methods. Their use can thus contribute to a better understanding of microclimatic processes during regeneration. This work brings a fundamental finding that even such an early regenerating vegetation shows signs of the ability to regulate microclimate.

Keywords: forest regeneration, microclimate, unmanned aerial vehicles, LiDAR, electronic nose, Sniffer4D, temperature and humidity regulation, vegetation stress, disturbance

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AIC = Akaikovo informační kritérium, *Akaike Information Criterion*

ALS = Letecké laserové skenování, *Airborne Laser Scanning*

CHKO = Chráněná krajinná oblast

CHM = Normalizovaný výškový model korun, *Canopy Height Model*

CSV = Hodnoty oddělené čárkou, *Comma-Separated Values*

DAP = Digitální letecká fotogrametrie, *Digital Aerial Photogrammetry*

DPZ = Dálkový průzkum Země, *Remote Sensing*

DSM = Digitální model povrchu, *Digital Surface Model*

DTM = Digitální model terénu, *Digital Terrain Model*

EVI = Zlepšený vegetační index, *Enhanced Vegetation Index*

GIS = Geografický informační systém, *Geographic Information System*

GNSS = Globální navigační satelitní systém, *Global Navigation Satellite System*

LAS = Formát souboru pro LiDAR data, *LAS LiDAR Data Format*

LiDAR = Detekce a měření vzdálenosti pomocí laseru, *Light Detection and Ranging*

LST = Teplota zemského povrchu, *Land Surface Temperature*

NDVI = Normalizovaný diferenční vegetační index, *Normalized Difference Vegetation Index*

NIR = Blízké infračervené záření, *Near Infrared*

PMF = Progresivní morfologický filtr, *Progressive Morphological Filter*

PPK = Postprocesní kinematické určování polohy, *Post-Processed Kinematic*

RGB = Červená, zelená a modrá barevná složka, *Red Green Blue*

SAVI = Vegetační index korigovaný o vliv půdy, *Soil Adjusted Vegetation Index*

TIR = Termální infračervené záření, *Thermal Infrared*

TMS = Systém monitorování teploty, *Temperature Monitoring System*

UAV = Bezpilotní vzdušný prostředek, *Unmanned Aerial Vehicle*

VIF = Variační inflační faktor, *Variance Inflation Factor*

VOC = Těkavé organické látky, *Volatile Organic Compounds*

Obsah

1	Úvod.....	14
2	Cíl práce	15
3	Dálkový průzkum země	16
3.1	Platformy DPZ	17
3.1.1	Družicová - globální.....	17
3.1.2	Letecká - regionální.....	19
3.1.3	Lokální úroveň (UAV / pozemní systémy)	20
3.2	Senzory DPZ	21
3.2.1	Aktivní	21
3.2.2	Pasivní.....	22
3.2.3	Neoptické senzory	24
3.2.4	Termální senzory	25
3.3	Mapování stresu lesních ekosystémů.....	26
3.3.1	Optické metody mapování	27
3.3.2	Neoptické indikátory stresu.....	30
4	Národní park České Švýcarsko	33
4.1	Historie.....	33
4.2	Podnebí.....	34
4.3	Biota	34
4.4	Geologie	35
4.5	Disturbance	36
4.5.1	Sucho.....	36
4.5.2	Kůrovec	37
4.5.3	Požár.....	38
5	Charakteristika studijního území.....	39
6	Metodika	41

6.1	UAV LiDar data	41
6.2	Sniffer4D data	41
6.3	Zpracování a normalizace LiDAR mračna bodů	43
6.4	Zpracování mikroklimatických dat Sniffer4D	43
6.5	Propojení strukturálních metrik LiDAR s mikroklimatickými daty 44	
6.6	Statistická analýza	46
7	Výsledky	48
8	Diskuse	51
8.1	LiDAR metriky a strukturální hodnocení lesa	52
8.2	Mikroklimatické proměnné a další neoptické faktory	53
8.3	Limity a příležitosti	54
9	Závěr a přínos práce	56
10	Seznam literatury a použitých zdrojů	57
11	Seznam tabulek a obrázků	72

1 Úvod

Lesy ve střední Evropě se v posledních letech výrazně mění. Dlouhodobé sucho, kůrovcové kalamity a rozsáhlé požáry vedly na mnoha místech k rozpadu původních porostů. Tyto změny se neprojevují pouze v tom, že ubývá stromů, ale také ovlivňují mikroklimatické podmínky. Mikroklima zahrnuje například teplotu a vlhkost vzduchu těsně nad povrchem půdy nebo pod vegetací (Zellweger et al. 2020).

Zapojený les obvykle funguje jako přirozená ochrana před extrémů. Koruny stromů stíní půdu, snižují přehřívání během dne a omezují prudké ochlazování v noci. Tento stabilizační efekt se označuje jako mikroklimatická schopnost regulace (teplotní buffering). Pokud však dojde k rozpadu lesa a otevření korunového zápoje, půda je více vystavena slunečnímu záření a dochází k větším výkyvům teplot i vlhkosti (Zahrt et al. 2019).

Výrazným příkladem takového vývoje je Národní park České Švýcarsko. Zde došlo nejprve k rozsáhlému odumření smrkových porostů v důsledku kůrovcové kalamity a následně k velkému požáru v roce 2022. Otevřená krajina po těchto kalamitách představuje odlišné mikroklimatické podmínky než původní zapojený les. Postupná obnova vegetace proto neznamená jen návrat stromů, ale také postupné zlepšování a stabilizaci místního prostředí (MŽP, 2022).

Sledování mikroklimatu v takto proměnlivém prostředí není jednoduché. Klasická terénní měření poskytují přesné údaje, ale pouze v jednotlivých bodech. Dálkový průzkum Země (DPZ) umožňuje získat přehled o větších plochách a lépe porozumět tomu, jak struktura vegetace ovlivňuje místní podmínky (Lillesand et al. 2015). Stále častěji se využívají neoptické přístupy, například laserové skenování, které dokáže detailně popsat prostorovou strukturu porostu.

Porozumění tomu, jak se mikroklima vyvíjí během obnovy lesa, je důležité pro mapování lesní dynamiky a lepší predikce růstu dřevin, ale i pro praktické hodnocení regenerace krajiny v podmínkách klimatické změny.

2 Cíl práce

Cílem práce je ověření metod DPZ pro mapování detailní struktury regenerujícího se lesního porostu a hodnot mikroklimatu na území Národního parku České Švýcarsko, kde došlo k výrazné proměně lesních porostů a mikroklimatických podmínek prostředí.

Práce se snaží ověřit, zda informace o struktuře obnovující se vegetace (hustota porostu či výšková členitost) mohou vysvětlit rozdíly v teplotě a vzdušné vlhkosti v přízemní oblasti. Práce tak usiluje o zhodnocení, zda mohou neoptické metody DPZ představovat vhodný nástroj pro sledování vývoje mikroklimatických podmínek v území, které se postupně obnovuje po sérii přírodních disturbancí a snaží se přispět k lepšímu porozumění obnovy.

V rámci výzkumu budou využity metody založené na bezpilotním snímkování i detailní měření prováděná přímo v terénu.

3 Dálkový průzkum země

Počátky dálkového průzkumu Země (DPZ) sahají k prvním fotografiím krajiny pořizovaným z balónů, draků a dalších primitivních platforem, přičemž zásadní roli v rozvoji hrály vojenské potřeby. Následný technologický pokrok urychlilo využití letadel a později také satelitů v období vesmírných závodů, kdy se začalo systematicky snímat zemský povrch z oběžné dráhy. Rozvoj výpočetní techniky, navigačních systémů a moderních senzorů umožnil široké uplatnění DPZ v mnoha oblastech, včetně zemědělství, lesnictví, urbanismu a krizového řízení (Žížala 2021).

DPZ představuje moderní a dynamicky se rozvíjející obor, který umožňuje získávání informací o objektech nebo jevech na zemském povrchu bez přímého kontaktu s nimi, pomocí měření elektromagnetického záření, které je od těchto objektů odraženo nebo vyzařováno. Získaná data jsou následně zpracovávána a interpretována za účelem odhalit prostorové, časové a spektrální vlastnosti sledovaných jevů. Tento přístup zahrnuje jak družicová, tak letecká měření, a spojuje fyzikální principy záření, optiky a sensoriky s geografickým zpracováním dat (Campbell 2011).

Základem DPZ je elektromagnetické záření a jeho interakce s různými typy povrchů. Každý povrch má svou specifickou spektrální odrazivost, tzv. *spektrální signaturu*, která umožňuje rozlišovat typy vegetace, půdy či vodních ploch (Lillesand et al. 2015). Z pohledu metodologie DPZ se rozlišují pasivní senzory (využívající přirozené sluneční záření, např. družice Landsat a Sentinel-2) a aktivní senzory, které si záření samy generují (např. LiDAR či RADAR).

Proces DPZ se odvíjí dle využitého typu senzoru a zahrnuje několik klíčových kroků: radiometrické a geometrické korekce, klasifikaci obrazů, analýzu spektrálních vegetačních indexů např. Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) či Zlepšený vegetační index (EVI) a validaci výsledků s daty z terénu. Kombinace DPZ a geografických informačních systémů (GIS) pak umožňuje komplexní prostorové analýzy a modelování krajinných procesů (Lillesand et al. 2015).

Technologie DPZ se neustále vyvíjí a zahrnuje moderní široké spektrum platforem od klasických družicových systémů přes bezpilotní prostředky (UAV) a miniaturizované senzory umístěné na malých družicích typu CubeSattech (Toth a Józków 2016).

Metody DPZ lze využívat i pro identifikaci druhů dřevin. (Fassnacht et al. 2016) poukazují na to, že přesnost identifikace dřevin je ovlivněna spektrem senzorů, fenologií, strukturou porostu a kvalitou terénních dat.

3.1 Platformy DPZ

DPZ využívá široké spektrum platforem, které se liší především výškou snímání, prostorovým a časovým rozlišením, typem použitých senzorů a rozsahem sledovaných spektrálních pásem. Volba konkrétní platformy představuje klíčové metodické rozhodnutí, neboť přímo ovlivňuje charakter získaných dat, jejich interpretační možnosti i vhodnost pro analýzu specifických ekologických procesů a disturbancí (Jensen 2007).

Z hlediska nosiče senzorů lze platformy DPZ obecně rozdělit na pozemní, letecké a družicové. Každá z těchto kategorií má své specifické výhody i omezení. Pozemní platformy (close-range) umožňují detailní, lokální měření s vysokou přesností, avšak s omezeným prostorovým rozsahem. Letecké platformy, včetně pilotovaných letadel a bezpilotních prostředků, představují kompromis mezi prostorovým rozlišením a plošným pokrytím. Družicové platformy naopak umožňují systematické a dlouhodobé sledování rozsáhlých území s vysokou časovou kontinuitou, i když obvykle za cenu nižšího prostorového rozlišení.

V kontextu environmentálních a lesnických aplikací hrají platformy DPZ zásadní roli při monitoringu zdravotního stavu vegetace, detekci disturbancí, hodnocení stresových faktorů a sledování dynamiky regenerace porostů. Kombinace různých platforem a senzorů navíc umožňuje propojit detailní lokální informace s regionálním až globálním pohledem, což je zvláště důležité při studiu procesů probíhajících v různých prostorových a časových měřítkách.

3.1.1 Družicová - globální

Družicová neboli globální úroveň DPZ, představuje nejrozsáhleji využívaný způsob získávání informací o stavu zemského povrchu díky schopnosti satelitních systémů pokrývat velká území a poskytovat dlouhodobé časové řady pro analýzu globálních jevů, jako jsou změny klimatu, urbanizace, desertifikace či odlesňování (Lulla et al. 2012).

Satelity jako jsou Landsat, Sentinel-2 či MODIS, umožňují pravidelné multispektrální snímání, které je klíčové pro trendové analýzy krajinného pokryvu a monitorování dynamiky ekosystémů (Svatoňová a Lauer mann 2015). Sentinel-2, vyvinutý v rámci programu Copernicus, pracuje s 13-ti spektrálními pásmy s prostorovým rozlišením 10 - 60 metrů a dobou opakování zhruba 5 dní, což výrazně zvyšuje možnosti detailního sledování vegetačních a krajinných procesů (Drusch et al. 2012).

Tato data jsou široce využívána pro výpočet vegetačních indexů, jako jsou NDVI a EVI, které umožňují hodnotit vitalitu vegetace, stresové faktory i sezónní dynamiku porostů (Lillesand et al. 2015; Campbell 2011). NDVI, využívající kontrast mezi odrazem v červeném a blízkém infračerveném pásmu, patří k nejpoužívanějším indexům, avšak trpí saturací při vysoké vegetační biomase, což omezuje jeho citlivost zejména v tropických nebo produkčně intenzivních ekosystémech (Huete et al. 2002).

Satelitní systémy mohou být umístěny buď na geostacionární dráze ve výšce kolem 36 000 km, kde poskytují velmi časté snímání stejné oblasti a jsou využívány především v meteorologii nebo na heliosynchronních drahách ve výšce 700 - 1000 km, které zajišťují konzistentní snímání v totožný denní čas a jsou proto nejběžnější v aplikacích DPZ (Surový et al. 2019).

Tyto systémy umožňují opakovaný sběr vzájemně porovnatelných dat a přinášejí široké spektrum prostorových, spektrálních i časových parametrů, které rozšiřují možnosti environmentálního monitoringu (Pavelka 2010). K hlavním výhodám družicových systémů patří komplexnost a rychlost sběru dat z rozsáhlých ploch, široká variabilita senzorů a vysoká časová stabilita, zatímco mezi hlavní limity se řadí menší prostorové rozlišení, atmosférické zkreslení, sezónní dostupnost snímků a u některých dat také vyšší cena (Žížala 2021). Navzdory těmto omezením představují družicové systémy klíčový zdroj informací o globálních i regionálních procesech, který je nenahraditelný pro dlouhodobý monitoring změn krajiny a environmentální řízení.

3.1.2 Letecká - regionální

Letecké platformy představují tradiční a dlouhodobě využívanou součást DPZ, neboť umožňují nést robustnější měřicí přístroje a pořizovat data z nižších letových výšek, což vede k získání snímků s vysokým prostorovým rozlišením a nižším atmosférickým zkreslením (Žížala 2021).

Tyto systémy tvoří základ regionální úrovně DPZ, která představuje měřítko pozorování mezi globálními družicovými systémy a lokálními UAV či pozemními metodami, obvykle v rozsahu desítek až stovek kilometrů čtverečních. Hlavní předností regionální úrovně je vysoká geometrická přesnost, kvalitní prostorové rozlišení a logisticky realizovatelný sběr dat, ačkoliv její nevýhodou zůstává vyšší finanční a organizační náročnost snímkovacích kampaní a nutnost odborného zpracování velkého množství dat (Hartley et al. 2022).

Současně je regionální úroveň charakteristická potřebou vyvážit náklady, přesnost a rozsah pokrytí, přičemž klíčovou roli hraje vhodná volba technologie snímkování (Goodbody et al. 2019). Moderní letecké snímkové systémy proto stále častěji využívají kombinaci digitální fotogrammetrie a leteckého laserového skenování (ALS), která umožňuje přesné modelování terénu, vegetační struktury a produkci kvalitních ortofot (Gwenzi a Lefsky 2014).

DAP představuje metodu DPZ, která se zabývá zpracováním překryvných leteckých snímků za účelem vytvoření trojrozměrné reprezentace krajiny. Moderní DAP využívá principů stereoskopie a algoritmů struktury z pohybu (Goodbody et al. 2019).

ALS je metodou DPZ, která je založena na technologii LiDAR (Light Detection and Ranging), kdy je laserový skener umístěn na letecké platformě, nejčastěji na letadle, vrtulníku či dronu. Technologie LiDAR je založena na principu vysílání krátkých laserových impulsů směrem k zemskému povrchu a vzápětí měří dobu jejich návratu po odrazu od terénu či vegetace (Michałowska a Rapiński 2021).

Zásadním rozdílem mezi oběma metodami je schopnost zachytit strukturu pod vegetačním krytem. Metoda DAP je nákladově výhodnější, avšak omezená v detekci pod korunových oblastí, zatímco ALS dokáže pronikat vegetačním porostem a poskytuje přesné odhady výšky, hustoty a prostorové struktury lesních porostů (Goodbody et al. 2019).

Digitální letecká fotogrammetrie přitom umožňuje vytváření 3D mračen bodů a ortofot s rozlišením typicky 5 - 30 cm, což je vhodné pro detailní mapování krajinných prvků, sledování změn a aktualizaci inventarizačních vrstev (Michałowska a Rapiński 2021).

Z hlediska strukturální analýzy vegetace poskytuje ALS komplexnější datové produkty, zejména digitální model terénu (DTM) a model vegetačního baldachýnu (CHM), které jsou klíčové pro modelování porostní výšky a prostorové heterogenity (Fassnacht et al. 2016).

Metoda	Rozlišení / Hustota dat	Typ výstupu	Výhody	Omezení
Digitální letecká fotogrammetrie (DAP)	5–30 cm GSD (velikost pixelu na zemském povrchu)	Ortofoto, 3D mračno bodů, DSM (digitální model povrchu)	Vysoké rozlišení, nízké náklady, RGB informace	Omezená penetrace vegetace, závislost na osvětlení
Letecký laserový skener (ALS / LiDAR)	1–30 bodů/m ² (běžně)	Digitální model terénu (DTM), Normalizovaný výškový model korun (CHM)	Zachycuje strukturu vegetace, přesné výšky, nezávislý na světle	Vyšší náklady na pořízení a technologicky náročnější zpracování dat

Tabulka 1: Srovnání hlavních metod dálkového průzkumu Země na regionální úrovni. Digitální letecká fotogrammetrie (DAP) se využívá pro rychlé a levné mapování s vysokým rozlišením, zatímco letecký laserový skener (ALS) poskytuje přesná 3D data o struktuře terénu a vegetace.

3.1.3 Lokální úroveň (UAV / pozemní systémy)

UAV technologie představují důležitý nástroj pro získávání vysoce detailních dat o lesních ekosystémech díky rychlému nasazení, relativně nízkým nákladům a možnosti opakovaného snímání menších území. Umožňují vytvářet 3D mračna bodů, digitální modely povrchu, ortofotomapy s velmi vysokým rozlišením a odvozovat klíčové strukturální a spektrální charakteristiky porostů. Bezpilotní systémy také vhodně doplňují tradiční metody inventarizace tím, že poskytují flexibilní a aktuální informace, využitelné například po kalamitních událostech. Oproti družicovým či pilotovaným systémům však mají omezený rozsah pokrytí, doba letu je limitována kapacitou baterie a vyžadují vyšší časové nároky při zpracování dat, přesto ale zůstávají nepostradatelným nástrojem pro detailní monitoring na lokální úrovni (Kuželka a Surový 2017).

Bezpilotní letecké prostředky (UAV) a bezpilotní systémy (UAS) jednoduše označované jako drony, představují rychle se rozvíjející segment DPZ. Tyto platformy umožňují flexibilní, rychlé a relativně levné pořizování dat s velmi vysokým prostorovým rozlišením, které může při nízkých letových výškách dosahovat až centimetrů. Díky široké škále dostupných konfigurací je možné UAV vybavit různými typy senzorů, od běžných RGB kamer určených pro základní monitoring krajiny a zemědělských ploch až po multispektrální či termální senzory vhodné pro detailnější analýzy vegetace, půdních vlastností nebo porostního stresu. Provoz dronů je však spojen s určitými omezeními, zejména legislativními požadavky a meteorologickými podmínkami. Letová doba je limitována kapacitou baterií a konstrukcí stroje; multikoptéry mají obvykle kratší výdrž, menší pokrytí, ale dosahují lepšího prostorového rozlišení. Zatímco stroje typu „křídlo“ umožňují snímání větších území. Nasazení UAV je vhodné zejména tam, kde je potřeba získat detailní informace o stavu porostu či pozemku v krátkém čase a s požadavkem na velmi vysoké prostorové rozlišení. Přestože provoz a zpracování dat z UAV vyžaduje specializovaný software, tyto systémy dnes představují dostupný, operativní a efektivní nástroj pro celou řadu aplikací v zemědělství, lesnictví, ekologii i krajinném plánování (Žížala 2021).

3.2 Senzory DPZ

Data DPZ jsou pořizována senzory umístěnými na různých typech nosičů, přičemž jejich vlastnosti i trajektorie ovlivňují kvalitu a přesnost výsledných dat. Senzory mohou být instalovány na statických či mobilních pozemních platformách, včetně specializované techniky využívané přímo v terénu. Nejčastěji jsou však nesený leteckými nebo kosmickými prostředky, jako jsou letadla, bezpilotní systémy či družice, které umožňují získávat data z různých výškových úrovní a pokrývat rozsáhlá území (Žížala 2021).

3.2.1 Aktivní

Mezi aktivní senzory se řadí nejnovější LiDARové a starší radarové technologie (Surový et al. 2022). Tyto senzory vysílají vlastní záření a následně měří jeho odraženou část od zemského povrchu (např. radar).

Laserové skenování (LiDAR)

Laserové skenování LiDAR umožňuje vysoce přesné 3D zachycení vegetace a terénu, proniknout vegetačním krytem a rozlišovat jednotlivé vrstvy porostu.

Konkrétně jde o přesné modelování výšky stromů, vertikální heterogenity, zásoby biomasy či prostorového uspořádání lesních porostů (Krzystek et al. 2020).

V současnosti jsou LiDARová zařízení využívána na všech platformách DPZ, pozemní technologie, UAV, letecké i satelitní nosiče, což výrazně rozšiřuje jejich aplikační možnosti v různých měřítkách prostorové analýzy.

První generace LiDARových senzorů byly schopny zaznamenat pouze první nebo poslední odraz paprsku, který zpravidla odpovídal vrcholu vegetace nebo povrchu terénu. Takové zjednodušené zaznamenání signálu však neposkytovalo detailní informaci o vnitřní vertikální struktuře porostu. Modernější senzory jsou schopny detekovat a zaznamenat celou dráhu paprsku, současně mohou poskytovat doplňující atributy odrazu, jako je amplituda nebo intenzita, které jsou přínosem při klasifikaci povrchů a zpřesňují výslednou interpretaci dat (Lausch et al. 2017).

Radar (SAR)

Radar (Radio Detection and Ranging) je detekční systém pro měření vzdáleností, úhlů a rychlostí. Pro měření radar využívá především mikrovlnné záření. Jsou využívány v sektoru vojenském i civilním v neposlední řadě i v DPZ. Vlny elektromagnetického záření jsou vytvářeny a přijímány pomocí antén. Jejich délka v kontextu použité vlnové délky pak určuje, s jakou přesností dokáže takový systém pracovat. Jelikož pro dosažení dostatečného rozlišení by bylo potřeba měřit anténou o velkých rozměrech a to by bylo nepraktické, vyvinuli radary se syntetickou aperturou, které vytvoří délku antény uměle. Pro tyto radary se používá zkratka SAR (Synthetic Aperture Radar) (Žížala 2021).

3.2.2 Pasivní

Pracují s přirozeným zářením, které odráží nebo vyzařuje zemský povrch a atmosféra, nejčastěji se jedná o sluneční záření. Jedná se o technologii založenou na snímání prostoru pomocí obyčejných fotoaparátů nebo kamer (Toth a Józków 2016). Pasivní senzory lze rozdělit na RGB senzory, multispektrální a hyperspektrální senzory (Surový et. al. 2022).

Senzory RGB

Zkratka RGB představuje kódování barev v jednotlivých pixelech v kombinaci R (red), G (green), B (blue). Tyto senzory představují klasické fotoaparáty nebo

kamery a poskytují vysoké prostorové rozlišení a snadnou interpretovatelnost dat. Využívají se především pro lokální monitoring, lesnické aplikace a tvorbu 3D digitálních modelů (Svatoňová a Lauer mann 2010).

Například Hüttnerová (2023) využila k mapování stresu v lesních ekosystémech RGB senzory jako doplňkový nástroj k optickému měření.

Multispektrální senzory

Multispektrální senzory patří k systémům DPZ, které zaznamenávají elektromagnetické záření v úzkých spektrálních pásmech v rozsahu viditelné, blízké a střední infračervené oblasti. Tím získávají informace o fyzikálních a chemických vlastnostech povrchů, které nejsou pro lidské oko viditelné (Campbell 2011).

Základním principem multispektrálního snímání je měření odrazivosti povrchu v různých pásmech, ze kterých lze následně vypočítávat vegetační indexy (např. NDVI, EVI, SAVI) sloužící k hodnocení stavu vegetace, vlhkosti půdy nebo změn v krajině (Jensen 2007). Oproti jednoduchým RGB sensorům, multispektrální snímání přináší vyšší informační hodnotu a je základem mnoha aplikací environmentálního monitoringu.

Multispektrální senzory mohou nosit platformy družicových systémů (Landsat, Sentinel-2, MODIS), letecké nosiče i UAV technologie (Toth a Józkó w 2016). Každé pásmo je zaznamenáváno samostatným detektorem, kterým je možné určit spektrální charakteristiky objektů s vysokou přesností.

Družicové systémy, jako je Sentinel-2, nabízejí dvanáct pásem o rozlišení 10 - 60 m a časové opakování přibližně 5 dní, což umožňuje sledování fenologických změn, dynamiky porostů a trendů krajinného pokryvu (Drusch et al. 2012). V kombinaci s daty Landsat poskytují dlouhé časové řady díky nim lze analyzovat změny ve využití území, degradaci půdy či sledování dopadů na klimatické změny (Lillesand et al. 2015).

Multispektrální senzory se v praxi využívají pro monitoring vegetačního stresu, detekci kůrovcových kalamit, klasifikaci půdního krytu a vyhodnocování dopadů disturbancí. Vegetační indexy, jako NDVI nebo EVI, odrážejí fotosyntetickou aktivitu a pomáhají určit úroveň vitality rostlin. Podle Svatoňové a Lauer manna (2015) se DPZ stal nepostradatelným zdrojem geografických informací, který umožňuje

spojovat časová a prostorová data o krajině s biogeografickými procesy. Konkrétně v lesnických aplikacích je multispektrální snímání používáno k hodnocení zdravotního stavu lesů, detekci sucha a sledování dynamiky lesních požárů. Kombinace multispektrálních dat se strojovým učením přináší možnosti automatizované klasifikace porostů a zdravotních stavů, čímž se zvyšuje přesnost environmentálních analýz (Surový et al. 2019).

Hyperspektrální senzory

Hyperspektrální senzory představují pokročilý typ optických senzorů, které zaznamenávají elektromagnetické záření ve stovkách úzkých, na sebe navazujících spektrálních pásem. To umožňuje velmi detailní rekonstrukci spektrální charakteristiky jednotlivých objektů (Im a Jensen 2008).

Díky vysokému spektrálnímu rozlišení jsou tyto senzory schopné rozlišovat detailní rozdíly ve vegetaci, půdách či horninách, které by multispektrální systémy nezachytily, a proto se uplatňují zejména při klasifikaci druhů, odhadu biochemických parametrů nebo podrobné detekci stresu vegetace (Fassnacht et al. 2016).

S rozvojem miniaturizace vznikají také hyperspektrální senzory pro UAV, které umožňují sběr dat s centimetrovým prostorovým rozlišením a velmi vysokou spektrometrickou přesností, tím vznikají další možnosti lokálního monitoringu vegetace a zemědělských plodin (Adão et al. 2017).

Významným omezením hyperspektrálních dat je však jejich vysoký objem a dimenzionalita, což vyžaduje pokročilé metody zpracování (Bhargava et al. 2024). I přes tato omezení hyperspektrální senzory zůstávají jednou z klíčových technologií moderního DPZ, a to především v diagnostice vegetace a precizním zemědělství (Yu et al. 2022).

3.2.3 Neoptické senzory

Neoptické senzory jsou specifickou skupinou měřicích technologií, které jsou zaměřeny na možnost mapování mimo viditelné spektrum, zaměřují se tedy na zachycení vývoje mikroklimatu a chemických látek v prostředí. Tato skupina senzorů pracuje s principy detekce koncentrace plynů, chemického složení ovzduší, teplotních a vlhkostních změn. Tím se rozšiřují možnosti pro prostorový monitoring

kvality ovzduší, zachycení emisí těkavých organických látek nebo dalších environmentálních parametrů (Burgués a Marco 2020).

Senzor Sniffer4D V2 (Soarability Technologies, 2022, Shenzhen, Čína) představuje víceplynový mapový systém, který se používá při dronovém i pozemním měření. Zařízení je kombinací hardwaru sloužící pro detekci plynů a analytického softwaru. Systém senzoru Sniffer4D V2 je schopen real-time detekce a vizualizace koncentrací zájmových plynů ve sledovaném prostředí. Systém senzoru je založen na procesorové jednotce ARM s frekvencí 1 GHz a operační paměti 512 MB a umožňuje měření teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku (Hüttnerová et al. 2023).

Dalším neoptickým senzorem je bodový měřič TOMST vyvinutý českou společností TOMST, s.r.o., který je určen k dlouhodobému měření mikroklimatických podmínek v půdě a přízemní oblasti. Nejčastěji používaný typ měřičů TOMST, jsou zařízení řady TMS (Temperature Monitoring System), která umožňují kontinuální měření teploty v několika výškových úrovních půdního profilu a blízkosti zemského povrchu. Data ukládají v pravidelných časových intervalech i po dobu několika let.

Bodové měřiče TOMST měří teplotu a vlhkost půdy v několika hloubkách z jednoho místa, kdežto Sniffer 4D V2 (elektronický nos) je přenosné zařízení a lze pomocí něj získat kontinuální data z daného území (Hu et al. 2018).

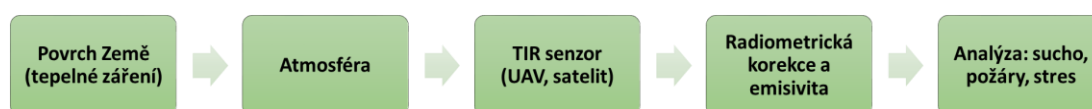
3.2.4 Termální senzory

Významnou výhodou termálních senzorů v technologiích DPZ je, že umožňují měření vyzařovaného tepelného záření povrchů, čímž lze sledovat teplotní anomálie vegetace či půdního povrchu nezávisle na slunečním osvětlení nebo denní době (Dong et al. 2024). Tepelné senzory jsou technologií, která zaznamenává vlastní vyzařované záření povrchů v dlouhovlnné infračervené oblasti. V porovnání s optickými senzory poskytují informace nezávisle na slunečním osvětlení, což umožňuje snímkování ve dne i v noci. Tepelné senzory jsou klíčové při odvozování teploty povrchu Země (LST), která je důležitým ukazatelem energetické bilance, vodního stresu vegetace i klimatických změn (Li et al. 2023).

Termální data získaná pomocí UAV senzorů umožňují identifikovat jemné teplotní anomálie na úrovni stromů či plodin, což výrazně zvyšuje potenciál pro precizní zemědělství a včasné reakce v lesnickém managementu. Souběžně se rozvíjejí metody detekce disturbancí, například požárů, kde termální snímkování umožňuje

přesné mapování intenzity hoření a následného post-fire stresu vegetace (Ndlovu et al. 2024).

Nevýhodou termálních systémů představuje zejména nižší prostorové rozlišení satelitních TIR senzorů, proměnlivá emisivita povrchu a citlivost na atmosférické podmínky. Proto se aktuálně více prosazuje multisenzorová fúze, která je kombinací termálních dat a multispektrálních snímků či dat LiDARu pro zvýšení přesnosti analýz. Díky tomu tepelné senzory nacházejí nové aplikace nejen v ekologii, ale i v urbanismu, hydrologii a monitoringu teplotních ostrovů měst (Han et al. 2021).



Obrázek 1: Schéma tepelného snímání v DPZ

3.3 Mapování stresu lesních ekosystémů

Zdravotní stav lesních ekosystémů je ovlivňován biotickými či abiotickými faktory, což může vést ke stresu vegetace a následným změnám ve struktuře a fungování vegetace. Pro identifikaci těchto změn a hodnocení zdravotního stavu vegetace se využívají různé metody. Jednou z metod, která se využívá pro hodnocení zdravotního stavu vegetace jsou vegetační indexy, které se mohou rozdělit na optické (NDVI, EVI, red-edge) a neoptické. Pomocí těchto metod lze získat data nejen o projevu stresu vegetace, ale i o změně v mikroklimatických nebo chemických parametrech prostředí.

Optické indexy jsou odvozeny z odrazivosti vegetačního krytu v různých spektrálních pásmech elektromagnetického spektra. Nevýhodou těchto indexů, je zachycení stresu až ve chvíli, kdy se projeví změnami na fyziologii vegetace a ve spektrální odezvě vegetačního krytu například změnou obsahu chlorofylu, nebo ve struktuře listů (Jensen 2007).

Neoptické indikátory stresu, mohou signalizovat probíhající změny v dřívější fázi, tedy ještě, než se projeví spektrální změna vegetace. Například při napadení smrkového porostu lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*) dochází k produkci a uvolňování specifického agregačního feromonu těkavých látek a zvýšené koncentraci organických látek vylučovaných ze stromů (VOC), které slouží jako chemické signály při komunikaci a mohou být detekovány neoptickými senzory (např. elektronický nos). Zároveň se stres stromů projevuje fyziologickými změnami, například omezení

transpirace, změnou vodního režimu, a to může vést ke zvýšení teploty povrchu vegetace a změnám v lokálním mikroklimatu (Bonan 2008).

3.3.1 Optické metody mapování

Vegetační indexy

Vegetační indexy představují klíčový nástroj DPZ, který umožňuje efektivně vyhodnocovat fyzikální a chemické vlastnosti objektů na základě jejich spektrální odezvy. Využívají matematické kombinace hodnot odrazivosti ve vybraných spektrálních pásmech, čímž zvýrazňují specifické jevy například vitalitu vegetace, obsah vody, stres či změny způsobené přírodními disturbancemi a zároveň potlačují rušivé vlivy půdy, atmosféry nebo stínu. Rozvoj moderních multispektrálních a hyperspektrálních senzorů rozšířil možnosti analýzy o detailnější indexy, včetně těch založených na pásmu red-edge, které umožňují citlivěji zachycovat změny obsahu chlorofylu. Vegetační indexy tak dnes tvoří základ environmentálního monitoringu, zemědělských aplikací, lesnictví i dlouhodobého sledování vývoje krajiny (Ahady et al. 2025).

NDVI

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) patří mezi nejpoužívanější spektrální indexy v DPZ díky své schopnosti charakterizovat vitalitu a hustotu vegetace. Index vychází z kontrastu mezi absorpcí záření v červené části spektra a vysokou odrazivostí v blízkém infračerveném pásmu, čímž umožňuje sledovat míru fotosyntetické aktivity a celkový stav vegetačního krytu. NDVI se běžně využívá pro monitorování sezonní dynamiky vegetace, hodnocení fenologických změn, identifikaci vodního stresu rostlin či pro odhad produkce zemědělských plodin. Na globální úrovni je pak významným ukazatelem dlouhodobých klimatických trendů.

Díky více než dvacetiletým časovým řadám satelitních dat vznikají globální mapy NDVI, které umožňují sledovat vývoj vegetace v různých klimatických pásmech. Analýzy těchto dat ukazují, že v oblastech severně od 40° s. š. dochází k postupnému zvyšování hodnot NDVI a k prodlužování vegetační sezóny. Od počátku 80. let 20. století byla délka vegetačního období prodloužena o několik dní, což je spojováno zejména s nárůstem hustoty vegetační biomasy a zesilováním skleníkového efektu. Tyto změny se na mapách severní polokoule projevují zvýšeným množstvím zelené biomasy zejména v pásmu nad 30° s. š. (Dobrovolný et al. 2025).

EVI

Index EVI (Enhanced Vegetation Index) je normalizovaný vegetační index, který je vylepšenou variantou indexu NDVI. EVI je navržen tak, aby snížil vliv atmosférických vlivů a zvýšil citlivost na hustotu vegetace. Jeho výhoda oproti indexu NDVI spočívá v menší citlivosti na atmosférické vlivy a větší citlivosti na hustotu vegetace. Často se používá pro oblasti s vysokou hustotou vegetace, jako jsou tropické deštné lesy a oblasti s vysokou zemědělskou produkcí.

Hlavními výhodami EVI oproti NDVI jsou vyšší citlivost v oblastech s vysokou biomasou či hustým porostem, vysoké rozlišení a dobré prostorové pokrytí všech terénů. Je schopný částečně problém podkladu (např. půdního podrostu), který v některých úlohách zkresluje NDVI.

Do záporných stránek může spadat fakt, že rostlinám může úbytek vegetace způsobit i jiný vliv, než je sucho a pouze dle indexu EVI je to složité rozpoznat (Huete et al. 2002).

Red-edge pásma

Indexy využívající pásmo red-edge se zaměřují na změny v přechodu mezi červenou a blízkou infračervenou oblastí, kde dochází k výraznému nárůstu odrazivosti vegetace. Toto pásmo je extrémně citlivé na změny v listové ploše, tloušťce listů, obsahu chlorofylu a strukturální kompaktnosti koruny. Red-edge indexy umožňují detailnější sledování zdravotního stavu porostu než tradiční NDVI a jsou zvláště cenné pro lesní ekosystémy nebo husté porosty (Yan et al. 2025).

Charakteristiky red-edge křivky, zejména její poloha a tvar, jsou přímo ovlivněny obsahem chlorofylu, strukturou listů a celkovou fyziologickou kondicí vegetace, což z této spektrální oblasti činí citlivý indikátor vegetačního stresu, vitality a primární produkce porostů (Lillesand et al. 2015).

Red-edge indexy jsou nástroje, které hrají důležitou roli zejména při sledování stresu způsobeného biotickými disturbancemi, jako je okus, napadení škůdci či rané fáze infekcí, protože dokážou rozeznat změny chlorofylu dříve, než dojde k viditelnému poškození koruny (Parizzi et al. 2020).

Z tohoto důvodu je spektrální oblast red-edge široce využívána jak v hyperspektrálních systémech, tak v moderních multispektrálních sensorových

platformách. Typickým příkladem jsou snímací senzory družice Sentinel-2, které zahrnují několik úzkopásmových red-edge kanálů optimalizovaných pro sledování jemných fyziologických změn vegetace, včetně změn obsahu chlorofylu a stresových reakcí (Drusch et al. 2012).

Rané spektrální indikátory stresu

Stresové stavy vegetace vyvolané abiotickými faktory jako je sucho, nedostatek živin nebo teplotní extrémy, nebo biotickými činiteli, kam spadají choroby či škůdci nutí rostliny k fyziologickým změnám, které se nemusí ihned projevit vizuálně, ale mohou být detekovány pomocí spektrálního měření. Tyto brzké změny často zahrnují změny obsahu a poměrů pigmentů (chlorofylu, karotenoidů, antokyaninů), což se následně projevuje v odrazivosti ve viditelné a blízké infračervené části spektra. Zpozorování těchto signálů je důležité pro včasný monitoring zdravotního stavu rostlin, efektivní management v zemědělství a lesnictví a pro včasný zásah (Wong 2023).

Pigmentové změny jako indikátory stresu

Pigmenty v listech, kam řadíme především chlorofyl, karotenoidy a antokyaniny, mají zásadní roli v pohlcování světla a ochraně fotosyntetického aparátu. Změny jejich koncentrací či poměrů často dokáží indikovat rostlinný stres. V kontextu stresu je proto změna obsahu pigmentů (např. výrazné snížení chlorofylu nebo zvýšení karotenoidů jako ochranných pigmentů) považována za jeden z nejranějších detekovatelných jevů (Huang et al. 2015).

Chlorofyly, karotenoidy a antokyaniny sehrávají zásadní roli ve fotosyntéze a fotoprotekci. Jejich koncentrace a vzájemné poměry se mění velmi citlivě v reakci na fyziologické narušení rostliny. Právě díky těmto raným změnám mohou pigmenty sloužit jako indikátory stresu, které lze detekovat dříve, než se projeví viditelné příznaky jako je žloutnutí, vadnutí nebo zasychání.

Pigmenty přímo ovlivňují absorpci světla. Chlorofyl silně absorbuje v modré (~430 - 470 nm) a červené oblasti (~660 - 680 nm), karotenoidy absorbují v zeleno-modré oblasti (~450 - 550 nm) a antokyaniny absorbují především v zelené části (~500 - 600 nm).

V momentě, kdy rostlina začne ztrácet chlorofyl (např. během sucha, při nedostatku dusíku či napadení škůdcem), změní se absorpce ve viditelné části spektra. Tyto změny jsou jednoznačně detekovatelné pomocí multispektrálních či hyperspektrálních senzorů (Lichtenthaler 1987).

Strukturální indikátory

Strukturální indikátory představují skupinu spektrálních indexů a odvozených parametrů, které nesledují pouze „zelenost“ vegetace tedy chlorofyl a vitalitu, ale především sledují prostorovou a fyziologickou strukturu vegetačního porostu. Na rozdíl od běžných vegetačních indexů, jež jsou uvedeny výše, a které popisují množství aktivně fotosyntetizující biomasy.

Strukturální indikátory odrážejí:

- hustotu porostu,
- členitost a vertikální uspořádání vegetace,
- plošnou listovou plochu,
- typ vegetační struktury (např. les vs. křoviny vs. trávy),
- fyzikální vlastnosti listů, dřeva a koruny,
- architekturu porostu.

Uplatnění najdou především v lesnictví, krajinářské ekologii, monitoringu disturbancí. Využijeme je tam, kde je potřeba pochopit stav a vývoj vegetační struktury, nejen její barvu a vitalitu (Yan et al. 2025).

3.3.2 Neoptické indikátory stresu

Opakem optických metod, které jsou založeny na analýze spektrálních vlastností vegetace, jsou metody neoptické, které sledují změny ve fyziologických procesech vegetace, mikroklimatických podmínkách nebo v produkci chemických látek uvolňovaných do okolního prostředí. Tyto změny mohou mít vliv na transpiraci či vodní režim vegetace, teplotu vegetačního povrchu, mikroklima vegetace i blízkého prostředí nebo produkci těkavých organických látek (Bonan 2008).

Fyziologické projevy

Stres vegetace projevový změnami ve fyziologických procesech vegetace souvisí především s vodním režimem, fotosyntézou a energetickou bilancí. Významným projevem stresu je omezení transpirace, což je proces, při kterém rostliny

uvolňují vodní páru prostřednictvím průduchů, které na nacházejí na povrchu listů. Proces transpirace je důležitý při regulaci teploty rostlin a při transportu vody a živin z půdy do nadzemních částí. Ve stresové situaci rostliny například při nedostatku vody nebo poškození rostliny biotickými činiteli, dochází k uzavírání průduchů, a to způsobuje omezení transpirace a změnu vodního režimu rostliny (Farquhar a Sharkey 1982).

Omezení transpirace má za následek také ovlivnění energetické bilance rostliny, protože při transpiraci dochází ke snížení ochlazovacího efektu evapotranspirace. Důsledkem toho dochází ke zvýšení teploty listů a vegetačního povrchu, ke změnám mikroklimatických podmínek v porostu a vlhkosti vzduchu v bezprostředním okolí vegetace. Toto jsou fyziologické změny, které představují jeden z důležitých indikátorů stresu vegetace a v některých případech mohou být detekovány dříve, než se projeví ve spektrálních vlastnostech vegetačního krytu (Jones 2013).

Mikroklimatické projevy

Stres vegetace rostlin se také projevuje změnami mikroklimatických podmínek uvnitř vegetačního porostu. Vegetační kryt má funkci regulace výměny energie a vody mezi povrchem země a atmosférou. Díky této funkci má významný vliv na lokální mikroklima. Právě hustota porostu, struktura korun a intenzita transpirace ovlivňují mikroklimatické prostředí jako je teplota vzduchu, relativní vlhkost či radiální bilance a v případě stresových podmínek může docházet k jeho změnám (Jones 2013).

Mikroklimatické změny mohou signalizovat stres dříve než se projeví viditelnými změnami ve struktuře vegetace, a proto mohou být mikroklimatická měření využívána jako doplňková k monitoringu zdravotního stavu vegetace v kombinaci s metodami DPZ a pozemními senzory, které zaznamenávají teplotu a vlhkost prostředí (Bonan 2008).

Chemická komunikace a VOC

Stres vegetace se může projevovat změnami v produkci chemických látek uvolňovaných rostlinami do okolního prostředí. Rostliny jsou schopny produkovat spektrum těkavých organických látek (VOC), které plní různé ekologické funkce. Tyto látky slouží například jako obranná reakce rostlin proti herbivorům nebo jako

komunikační prostředek mezi rostlinami a dalšími organismy v ekosystému (Holopainen a Gershenzon 2010).

V lesním ekosystému je nejznámějším příkladem chemické komunikace, interakce mezi smrkovými porosty a lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*). Při napadení stromů kůrovcem, dochází ke zvýšené produkci a uvolňování látek VOC jako obranné reakci hostitelských stromů a zároveň k feromonové komunikaci mezi jedinci kůrovce (Byers 2007).

Změny v emisích látek VOC mohou být prvotním signálem stresu vegetace, protože vznikají již v průběhu fyziologické reakce stromu na poškození nebo napadení (Holopainen a Gershenzon 2010). A právě pro detekci těchto VOC látek se využívají chemické senzory nebo tzv. elektronické nosy pro včasné odhalení stresu vegetace (Burgués a Marco 2020). Kromě chemických změn je možné sledovat i mikroklimatické projevy, stresované stromy mají sníženou schopnost transpirace vody a v důsledku toho dochází k radikálnímu ovlivnění mikroklimatu. Změny nastanou ve zvýšení teploty a snížení vzdušné vlhkosti v okolí stresovaných stromů (Jones 2013).

4 Národní park České Švýcarsko

Národní park České Švýcarsko je geomorfologicky a ekologicky mimořádně hodnotné území severních Čech, které je charakteristické rozsáhlými pískovcovými skalními městy, hlubokými kaňonovitými údolími a výrazně členitým reliéfem. Vegetační pokryv je tvořen převážně lesními ekosystémy s významným zastoupením jehličnatých porostů, jejichž struktura a druhové složení jsou citlivé na disturbance i klimatické extrémů. Reliéfní členitost území zároveň podmiňuje vznik lokálních mikroklimatických gradientů, které ovlivňují regeneraci porostů, šíření disturbance i prostorovou variabilitu ekosystémových procesů.

4.1 Historie

Národní park České Švýcarsko představuje unikátní pískovcovou krajinu, jejíž historie ochrany sahá hluboko do 20. století. První snahy o systematickou ochranu území se objevují ve 20. letech, přičemž již roku 1933 byla vyhlášena první maloplošná chráněná území Edmundova soutěska, Pravčická brána a Tiské stěny. K zásadnímu posunu došlo v roce 1953, kdy Jan Čeřovský ve své diplomové práci poprvé navrhl vznik většího chráněného území v oblasti Děčínských stěn. Inspirací byl také vývoj u německých sousedů, kteří roku 1956 vyhlásili chráněnou krajinnou oblast LSG Sächsische Schweiz, a následně i návrh Reimara Gilsenbacha na bilaterální přírodní park publikovaný v roce 1963. Tyto impulzy vedly k vyhlášení CHKO Labské pískovce v roce 1972 o rozloze 300 km², na jejímž území vznikala další chráněná území, například Čabel, Nad Dolským mlýnem, Růžák či Babylon.

Významný mezník nastal po vyhlášení Národního parku Saské Švýcarsko v roce 1990, které otevřelo cestu k posílení ochrany i na české straně. V roce 1991 byly zahájeny přípravy na vyhlášení národního parku, které vyústily v přijetí zákona č. 161/1999 Sb., jenž s účinností od 1. 1. 2000 ustanovil Národní park České Švýcarsko o rozloze 80 km² (Správa NP České Švýcarsko, 2026). Následná zonace schválená Ministerstvem životního prostředí v roce 2002 rozdělila území do tří pásem ochrany, přičemž první zóna zaujímá 1 736 ha. Zbytek původní CHKO nadále existuje v rozsahu 245 km² a je členěn do čtyř zón ochrany, v nichž vznikají nová chráněná území.

Historický kontext je rovněž spojen s rozvojem turismu, který se začal dynamicky rozvíjet již v 18. a 19. století, kdy malíři Adrian Zingg a Anton Graff

popularizovali krajinu pod názvem „České Švýcarsko“ (Adamovič et al. 2020). Území se však v posledních letech potýká s výraznými environmentálními výzvami, zejména s dopady kůrovcové kalamity a extrémním požárem v roce 2022, který zasáhl více než 1 000 ha a významně ovlivnil další směřování péče o krajinu (Správa NP České Švýcarsko, 2026).

4.2 Podnebí

Podnebí je zde mírné, až mírně suché léto a rovněž mírná, až mírně chladná zima. Sníh se zde drží jen velice krátce. Typické pro toto prostředí je skutečnost, že zde dokážou prosperovat horské druhy rostlin a živočichů vedle teplomilných. Slunné plochy a náhorní plošiny poskytují stanoviště teplomilným druhům, zatímco studený a vlhký vzduch hromadící se v hlubokých roklích a soutěškách vytváří ideální podmínky pro některé druhy rostlin a živočichů, které se běžně vyskytující jen v horských podmínkách (Region České Švýcarsko, 2025).

Teplotní rozdíly jsou pro oblast Labských pískovců dost typické a mohou být mezi jednotlivými oblastmi velice výrazné. Toto může být zapříčiněno převýšením, které v této oblasti přesahuje 600 m, ale i výše uvedeným rozdílem mezi stanovišti na sluncem vyhřívaných plošinách a hlubokých roklích. Průměrná roční teplota v Děčíně dosahuje 9°C a v srdci národního parku se pohybuje okolo 7°C. Ještě výraznější jsou rozdíly v úhrnu srážek (Děčín 673 mm, Jílové 736 mm, Vysoký (Děčínský) Sněžník a Jetřichovické stěny 800 mm, sousední Lužické hory přes 1000 mm). Toto je ovlivněno s přechodem vzdušných mas přes hřeben Lužických hor. V případě déletrvajících srážek a přivalových dešťů je místní skalnatá oblast, zejména povodí říčky Kamenice, velmi náchylná ke vzniku bleskových povodní (Správa NP České Švýcarsko, 2026).

4.3 Biota

Národní park Českosaské Švýcarsko je složen z parků Českého a Saského Švýcarska a chráněnými krajinnými oblastmi Labské pískovce a Saské Švýcarsko. Chráněná oblast čítá rozlohu cca 700 km². Díky své rozloze, míře zalesnění a velmi malým osídlením, je velice ojedinělým územím, které je v Evropě jedinečné.

Rozmanitý terén poskytuje útočiště druhům, které už z našeho území postupně vymizely. Z letců je typický je pro České Švýcarsko čáp černý, který zde pravidelně

hnízdí. Můžeme tu zahlédnout sokola stěhovavého, jeřába popelavého, orla mořského, volavku bílou, kulíka říčního, ale i pestrobarevného ledňáčka.

Vyskytují se zde i někteří zástupci vzácného chladnomilného blanokřídleho hmyzu, či uměle introdukovaní lososi, kteří byli téměř vyhubeni, kvůli znečištění vod a překážkám v řekách. Nyní se je však daří vrátit zpět do řeky Kamenice. V čisté vodě je možné taky spatřit pstruhy. V okolí řeky nacházejí domov i vydry a je zde možné spatřit i rysa ostrovida (Region České Švýcarsko, 2025).

4.4 Geologie

Oblast je kombinací pískovcových skal s oblými tvary čedičových a znělcových kup tak vytváří typický ráz zdejší krajiny, díky tomu je zde vysoká pestrost žijících druhů organismů i rostlin. Území se rozprostírá podél horního toku řeky Kamenice a východního okraje Labského kaňonu. Vegetace zahrnuje především kyselé bučiny, hojné borové porosty, suťové lesy a mokřadní společenstva v zastíněných roklích. V oblasti se nacházejí výjimečné pískovcové útvary, které poskytují stanoviště specifickým druhům rostlin i zvířat a obecně je toto území díky podmínkám, které nabízí, velmi bohaté na biodiverzitu. Nejznámější jsou věžovité skalní útvary, rokle a soutěsky. Mezi turisty hojně navštěvovanou patří například, Edmundova a Divoká soutěska, typickou je také Pravčická brána, nebo pískovcové plošiny s borovými doubravami. Současný ráz krajiny byl určen především erozí, zvětráváním a tektonickými pohyby, které rozčlenily původní pískovcová souvrství do extrémně bohaté palety tvarů. Působením tektonických poruch vznikly pukliny a zlomy, které byly nakonec ještě ovlivněny probíhající erozí. Což mělo za následek vytvoření hlubokých kaňonů (např. Labe, Kamenice), izolovaných skalních věží a stolové hory. Pro pískovec je typická jeho vysoká poréznost a schopnost nasáknout vodu. Voda pak spolu s mrazem a následným táním vytváří převisy, skalní římsy. Pískovcové útvary jsou doplněné bazaltovými a znělcovými výlevy a žíly třetihorního stáří. Tyto vulkanické horniny jsou stabilnější a odolnější vůči zvětrávání než okolní pískovce, proto často vytvářejí výrazné tvary reliéfu, například čedičové vrchy v širším okolí (Růžovský vrch). Členění terénu je také způsobeno tektonickou aktivitou pozdních třetihor a čtvrtohor, která způsobila mírné zvedání a nestejněměrný pokles jednotlivých bloků (Správa NP České Švýcarsko, 2026).

4.5 Disturbance

Mechanismus disturbance popisuje Marini a spol. ve čtyřech fázích:

1. predispoziční stres, typicky sucho nebo vítr,
2. nárůst populací kůrovce, který využívá oslabené stromy,
3. gradace, kdy se kůrovec šíří i na zdravé stromy,

4. kolaps porostu, často v plošném měřítku. Tento proces je doložen v řadě vědeckých studií, které popisují synergii mezi klimatickými extrémami a dynamikou kůrovcových populací (Marini et al. 2017). Pojem disturbance značí tzv. náhlé nebo rozsáhlé narušení ekosystému přírodními živly (vítr, hmyz, sucho, požár). Území České Švýcarsko je charakteristické členitým reliéfem, pískovcovým podložím a specifickou mikroklimatickou variabilitou. Vzhledem k historickému lesnímu hospodaření v oblasti Českého Švýcarska, kde přebývá monokultura smrku, je tento ekosystém k disturbancím relativně náchylný (Beetz et al. 2025). Od roku 2017, kdy v regionu byl zaznamenán extrémně suchý rok, výrazně vzrostla intenzita disturbančních událostí. Konkrétně lze zmínit, že právě sucho v kombinaci s kůrovcem a větrem v oblasti vytvořily řadu polomů a napadených porostů (Vébrová a Handrij 2025).

4.5.1 Sucho

V kontextu klimatických změn je jedna z hlavních hrozeb pro lesní biodiverzitu považováno oteplování a vysychání což vede k častějším a intenzivnějším obdobím sucha. Tato období právě mohou vést k ohrožení ekosystémů a společenstev na hranici ekologických gradientů. Sucho tedy není pouze meteorologickou záležitostí, ale významnou disturbancí, která může ovlivnit či změnit strukturu i funkci ekosystémů (Vítková et al. 2018).

Sucho v NP České Švýcarsko působí jako významná disturbanční síla. Jedná se o komplexní proces, který zahrnuje několik faktorů.

Literatura rozlišuje několik typů sucha a to konkrétně:

- Meteorologické, kde významnou roli hraje deficit srážek,
- Zemědělské, zde se opíráme o nedostatek půdní vody pro plodiny,

- Hydrologické, tady měříme pokles průtoků vodních toků, hladin podzemních vod,
- Ekologické neboli lesní sucho, které zahrnuje reakci vegetace, především dřevin, na dlouhodobý nedostatek vody v půdě a atmosféře.

V lesích střední Evropy je klíčové výhradně půdní a ekologické sucho, které ovlivňuje vodní bilanci stromů. Sucho v oblasti mírného pásma často působí v synergii s dalšími disturbancemi. Zejména kůrovcové kalamity, kdy lesy oslabené vodním stresem mají sníženou schopnost pryskyřičné obrany a stávají se obětí lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) a jiných škůdců. Tyto kůrovcové degradace vedou k rozpadu porostů, ke zvýšenému množství mrtvé biomasy a hrubého dřeva, což vytváří poměrné množství dostupného paliva pro případné lesní požáry (Černý et al. 2024).

V NP České Švýcarsko sucho představuje významnou disturbanci. Opakované sucho za poslední roky výrazně ovlivnilo stav a vývoj lesních ekosystémů. Suché epizody po roce 2015 a zejména extrémně suchý rok 2017, oslabily smrkové porosty, které byly vysazeny mimo své přirozené ekologické optimum. Tyto stromy zeslábly a ztratily schopnost obrany vůči škůdcům konkrétně lýkožroutu smrkovému, to vedlo ke kůrovcovým kalamitám a rozpadu smrkových kultur (Härtel et al. 2023).

4.5.2 Kůrovec

Kůrovcová kalamita představuje jednu z nejvýznamnějších biotických disturbancí lesních ekosystémů ve střední Evropě. Dlouhodobý problém spočívá v druhové a prostorové skladbě střeoevropských lesů. Významná část lesních porostů byla v průběhu 19. a 20. století v rámci racionalizace lesního hospodaření přeměněna na rozsáhlé, převážně stejnověké smrkové monokultury, často založené mimo přirozený ekologický areál optimálního výskytu smrku ztepilého. Tyto porosty se vyznačují sníženou strukturální i druhovou diverzitou, omezenou ekologickou stabilitou a zvýšenou náchylností vůči disturbancím, a to jak biotickým (např. gradace lýkožrouta smrkového), tak abiotickým (sucho, větrné polomy).

Homogenní charakter smrkových monokultur vytváří vhodné podmínky pro rychlé šíření podkorního hmyzu, protože prostorově souvislé porosty stejnověkých hostitelských stromů poskytují lýkožroutu smrkovému (*Ips typographus*) nepřetržitou dostupnost vhodného reprodukčního materiálu a umožňují efektivní hromadné

napadení stromů prostřednictvím feromonové komunikace. Oslabení porostů v důsledku dlouhodobého sucha a zvýšené teplotní zátěže zároveň snižuje obrannou schopnost stromů, zejména produkci pryskyřice, čímž se zvyšuje úspěšnost kolonizace i napadení dosud vitálních jedinců (Hlásny et al. 2021). Kombinace těchto faktorů může vést k populační gradaci lýkožrouta smrkového a následné plošné mortalitě smrkových porostů, což je typický průběh kůrovcových kalamit ve střední Evropě.

Z pohledu ekologie disturbancí tak kůrovcová kalamita nepředstavuje izolovaný jev, ale důsledek dlouhodobé strukturální nestability lesních ekosystémů vyplývající z historického hospodaření, kumulace stresových faktorů a probíhající klimatické změny (Seidl et al. 2014).

4.5.3 Požár

V noci z 23. na 24. 7. 2022 zasáhl Národní park České Švýcarsko největší lesní požár, jehož ohnisko se zjistilo v oblasti Malinového dolu u Hřenska. Požár se postupně rozšířil na plochu přibližně 1060 ha na české straně parku a následující den se oheň rozšířil také na území Saského Švýcarska (Správa NP České Švýcarsko, 2026). K požáru přispělo více faktorů, jejichž souhra měla za následek poškození odumřelých smrkových porostů a sekundárně pak byly poškozeny i přilehlé bučiny a borové porosty, čímž se zásadně změnila struktura vegetace.

Hlavním důvodem takto rozsáhlého požáru byly nepříznivé meteorologické podmínky (dlouhodobé sucho, vysoké teploty, nízká relativní vlhkost vzduchu a silný vítr), a vysoká zásoba suchého paliva v důsledku předchozí kůrovcové kalamity (Vlach 2022).

Rozsáhlý požár měl za následek plošný zásah do ekosystému, který sice krátkodobě vyvolal výrazné negativní dopady (emise, ztráty biotopů, ohrožení infrastruktury), ale na druhou stranu byl nastartován proces přirozené obnovy (Blahůt a Racek 2023).

5 Charakteristika studijního území

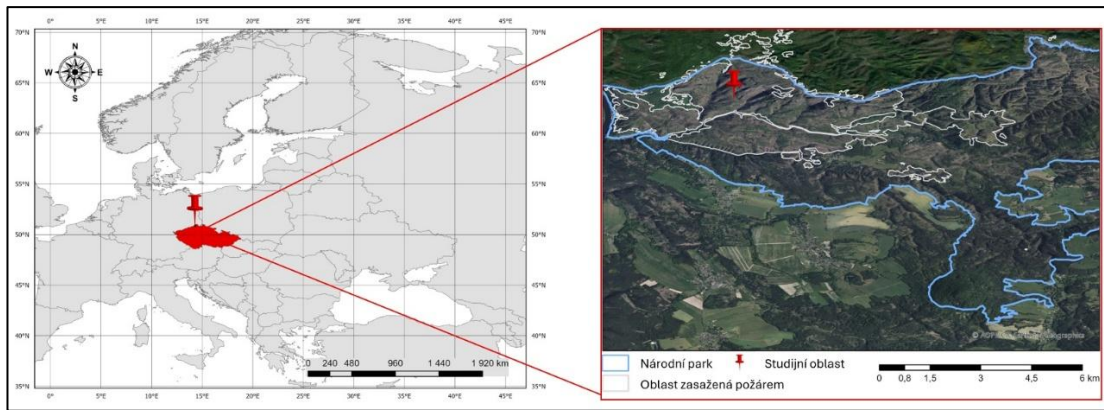
Národní park České Švýcarsko se nachází v severozápadní části České republiky v oblasti Labských pískovců. Území je charakteristické rozsáhlým zastoupením lesních ekosystémů, které pokrývají více než 95 % rozlohy parku, což z něj činí jedno z nejvíce zalesněných chráněných území ve střední Evropě. Reliéf oblasti je tvořen členitou pískovcovou plošinou s hlubokými kaňony, izolovanými stolovými horami a strmými skalními svahy, což vytváří výrazně heterogenní mikroklimatické a půdní podmínky ovlivňující prostorové rozložení vegetace.

Historická druhová skladba lesů se výrazně lišila od porostů převládajících ve 20. století. Přirozeně byly dominantní smíšené a listnaté lesy, zejména s převahou buku lesního (*Fagus sylvatica*), dubu zimního (*Quercus petraea*), dubu letního (*Quercus robur*), jedle bělokoré (*Abies alba*) a borovice lesní (*Pinus sylvestris*) na exponovaných pískovcových stanovištích. Reliktní borové porosty a přirozené smrčiny se vyskytovaly pouze na nepřístupných pískovcových věžích a v chladných, hluboce zaříznutých údolích.

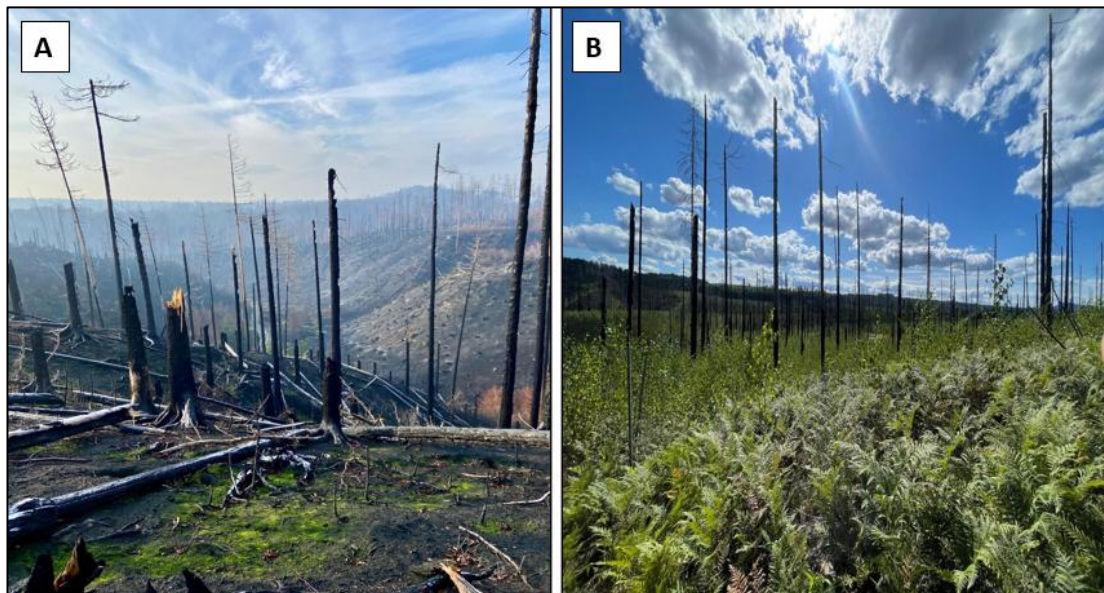
Vlivem intenzivního lesnického hospodaření v minulých staletích však došlo k přeměně většiny přirozených porostů na produkční lesy s dominancí jehličnanů, zejména smrku ztepilého (*Picea abies*) a borovice lesní. Tato přeměna vedla k výrazné odchylce od přirozeného druhového složení lesů v regionu.

V posledním desetiletí bylo území Národního parku České Švýcarsko zasaženo sérií rozsáhlých přírodních disturbancí. Prodloužená období sucha v kombinaci s masivním přemnožením lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) způsobila rozsáhlý rozpad smrkových porostů. Tyto stresory byly následně umocněny rozsáhlým lesním požárem v červenci 2022, který představoval největší zaznamenaný požár v moderní historii České republiky a zasáhl jak hospodářské, tak bezzásahové lesní porosty.

Po požáru a kůrovcové kalamitě se území nachází ve fázi rané postdisturbanční obnovy. Regenerující vegetace je charakterizována dominancí pionýrských druhů, především břízy bělokoré (*Betula pendula*), doplněné hustým keřovým patrem maliníku (*Rubus idaeus*) a dalších raně sukcesních druhů typických pro otevřená post-požárová stanoviště. Tyto procesy postupně mění druhovou skladbu porostů směrem od historických jehličnatých monokultur k druhově i strukturálně rozmanitějším, přirozeně se obnovujícím lesům.



Obrázek 2: Lokalizace studijní oblasti v Národním parku České Švýcarsko: Levá část mapy zobrazuje polohu České republiky v rámci Evropy s vyznačením studované oblasti. Pravá část detailně znázorňuje území Národní park České Švýcarsko, kde modrá linie vymezuje hranici národního parku a šedá plocha představuje oblast zasaženou lesním požárem v roce 2022. Červený symbol označuje konkrétní studijní lokalitu, ve které probíhal sběr dat a terénní měření. Podkladová ortofotomapa poskytuje přehled o charakteru krajiny v okolí studované oblasti.



Obrázek 3: Změna krajiny po požáru v Národním parku České Švýcarsko: (A) Spálené území krátce po požáru v roce 2022, s patrnou rozsáhlou ztrátou korunového patra, odkrytým minerálním půdním horizontem a minimálním množstvím přežívající vegetace. (B) Stejná lokalita o tři roky později (léto 2025), která ukazuje přirozenou regeneraci porostu, převážně tvořenou pionýrskou břízou (*Betula* spp.). V některých částech spáleniště již bříza dosahuje výšky přes 3 m, což naznačuje rychlou obnovu vegetační struktury.

6 Metodika

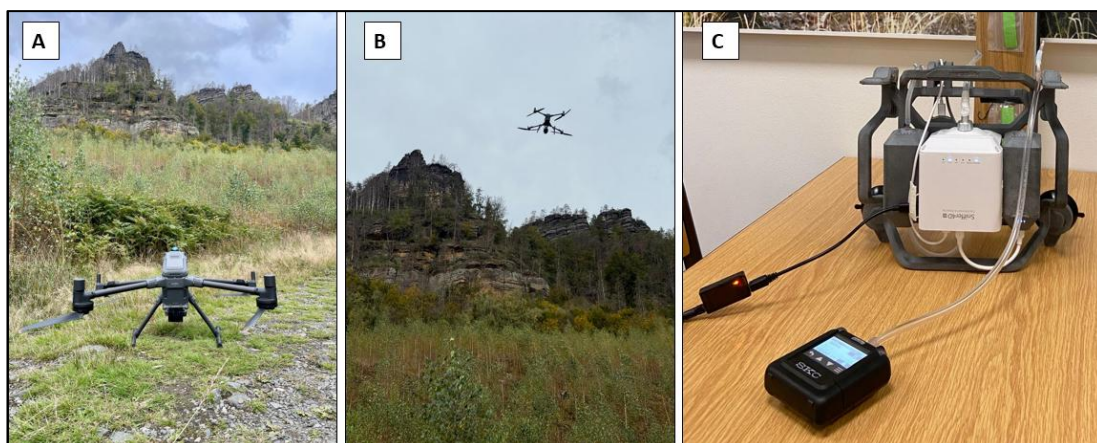
6.1 UAV LiDar data

Pro mapování struktury regenerujícího lesa byla získána vysoce detailní trojrozměrná data pomocí bezpilotního prostředku typu DJI Matrice 400 RTK vybaveného LiDAR senzorem Zenmuse L2 a integrovanou RGB kamerou. Senzor Zenmuse L2 umožňuje sběr dat s hustotou až 240 000 bodů za sekundu a s horizontální a vertikální přesností přibližně ± 5 cm, resp. ± 4 cm, což umožňuje detailní rekonstrukci struktury vegetace.

LiDAR data byla prvně zpracována v softwaru DJI Terra s využitím metody PPK (Post-Processing Kinematics). Korekce trajektorií letů vedly ke zvýšení polohové přesnosti a konzistence mezi jednotlivými letovými liniemi. Po korekci trajektorie byla provedena generace a klasifikace mračna bodů. Výsledným produktem bylo obarvené (RGB) mračno bodů exportované ve formátu LAS, obsahující prostorové souřadnice (XYZ), intenzitu odrazu a barevnou informaci odvozenou z RGB kamery.

6.2 Sniffer4D data

Pro zachycení prostorové variability mikroklimatických podmínek v regenerujícím se prostředí byla provedena terénní měření pomocí elektronického nosu Sniffer4D, mobilního multisenzorového systému určeného pro vysoce detailní monitorování neoptických podmínek. Přístroj je vybaven vlastním GNSS modulem, který umožňuje automatickou georeferenci jednotlivých měření bez nutnosti použití externích polohových zařízení.



Obrázek 4: Přehled nástrojů pro sběr dat a studijní oblasti: (A) Dron DJI Matrice 400 RTK vybavený LiDAR senzorem Zenmuse L2, použitý pro získání vysoce detailních trojrozměrných dat o struktuře regenerujícího lesa. (B) Část Národního parku České Švýcarsko zobrazující ranou fázi obnovy vegetace tři roky po požáru v roce 2022. (C) Elektronický nos Sniffer4D, využívaný pro pozemní měření mikroklimatických podmínek.

Před zahájením vlastního terénního průzkumu byla provedena aklimatizace a stabilizace senzorů. Za tímto účelem byl přístroj zapnut a ponechán v provozu po dobu 15 minut, během nichž byly senzory vystaveny místním podmínkám ovzduší a mikroklimatu. Tento postup minimalizoval přechodové odchylky v odezvě senzorů a zajistil vyšší stabilitu naměřených hodnot. Po stabilizaci sensorových kanálů byl zahájen sběr dat.

Mikroklimatická měření byla realizována na základě dvou trajektorií:

Měření 1 - členitý terén

První průzkum byl veden územím s výraznou topografickou členitostí, zahrnující strmější svahy, s celkovým převýšením přibližně 30 m. Trasa procházela oblastmi s různou intenzitou poškození požárem, odlišnou strukturou vegetace a rozdílnými mikroreliefními podmínkami. Získaný datový soubor byl ovlivněn nadmořskou výškou a topografickým gradientem.

Měření 2 - rovinatý terén

Druhý průzkum byl proveden na topograficky homogenní plošině s minimálními výškovými rozdíly. Tato trasa umožnila izolovat vliv měnicí se nadmořské výšky na hodnoty mikroklimatu.

Během obou měření se operátor pohyboval konstantní pomalou rychlostí přibližně $2,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, čímž byla zajištěna rovnoměrná hustota vzorkování a minimalizován vliv pohybu na naměřené hodnoty. V průběhu terénní kampaně

system Sniffer4D kontinuálně zaznamenával teplotu vzduchu (°C) a relativní vlhkost vzduchu (%). Veškerá měření byla pořizována s vysokým časovým rozlišením a automaticky opatřena prostorovou informací získanou z vestavěného GNSS modulu.

6.3 Zpracování a normalizace LiDAR mračna bodů

Další zpracování dronových LiDAR dat bylo provedeno v prostředí R s využitím balíčků lidR (Roussel et al. 2020; 2026), terra (Hijmans et al. 2026; 2020), sf (Pebesma 2018; 2016), gstat (Gräler et al. 2016; Pebesma 2004), geometry (Habel et al. 2005) a dplyr (Wickham et al. 2014). Jako vstupní data bylo použito kolorované mračno bodů exportované ze softwaru DJI Terra ve formátu LAS. Nejprve byla na surové bodové mračno aplikována klasifikace terénních bodů pomocí progresivního morfologického filtru, implementovaného ve funkci `lidR::classify_ground()`. Parametrizace PMF byla provedena s postupně se zvětšujícími velikostmi okna 3, 6, 9 a 12 m v kombinaci s výškovými prahovými hodnotami 0,2; 0,4; 0,6 a 1,0 m. Toto nastavení umožnilo efektivní oddělení terénních a neterénních bodů. Veškeré statistické analýzy byly provedeny v prostředí R 4.5.1 (R Core Team. R 2025).

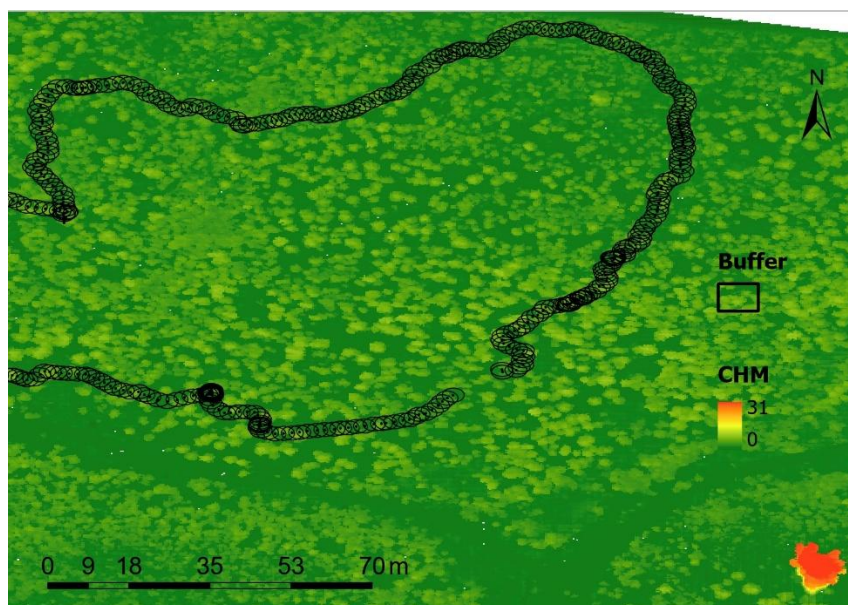
Na základě takto klasifikovaných terénních bodů byl vytvořen digitální model terénu (DTM) s prostorovým rozlišením 0,1 m pomocí *metodes of inverse distance weighting with k-nearest neighbors* (`rasterize_terrain()` s metodou *knnidw*, parametry $k = 10$, $p = 2$). Tento vysoce detailní DTM sloužil jako referenční povrch pro následnou výškovou normalizaci. Následně bylo bodové mračno normalizováno pomocí funkce `lidR::normalize_height()`, která od výšky každého LiDAR odrazu odečítá interpolovanou výšku terénu. Tímto postupem vzniklo výškově normalizované mračno bodů (*nlas*), v němž souřadnice „Z“ reprezentuje výšku nad terénem, nikoli absolutní nadmořskou výšku. Normalizovanému datovému souboru byl přiřazen souřadnicový referenční systém EPSG:3065 a následně byl znovu exportován ve formátu LAS pro další analýzy.

6.4 Zpracování mikroklimatických dat Sniffer4D

Veškerá surová mikroklimatická měření byla nejprve vizualizována v softwaru Sniffer4D Mapper (AIRNIS 2023) a následně exportována ve formátu CSV pro další analýzu. Exportovaný datový soubor byl poté importován do prostředí ArcGIS Pro 3.5.0 (esri 2024), kde byl převeden na bodovou vrstvu (shapefile),

což umožnilo prostorovou analýzu a následnou integraci s LiDAR-odvozenými strukturálními metrikami.

Aby bylo možné porovnat každé mikroklimatické měření s okolní strukturou vegetace, byl kolem každého bodu měření Sniffer4D vytvořen buffer o poloměru 3 m pomocí nástroje *Buffer* v ArcGIS Pro. Tento krok umožnil reprezentovat jednotlivá měření jako malé prostorové okolí namísto jediného bodu. Použití bufferů snížilo vliv lokálních anomálií, například situací, kdy se v bezprostřední blízkosti bodu měření nachází jediný izolovaný vysoký strom v jinak otevřeném prostředí. Využitím bufferových zón bylo zajištěno, že extrahované LiDAR metriky lépe vystihují lokální strukturální kontext každého měření



Obrázek 5: Integrace strukturálních dat z LiDARu a mikroklimatických měření: (A) Model výšky korunového patra (CHM – Canopy Height Model) odvozený z mračka bodů získaného pomocí LiDARu z dronu, zobrazený společně s částí trajektorie měření přístroje Sniffer4D (bodová vrstva). Okolo každého bodu mikroklimatického měření byla vytvořena 3m bufferová zóna, která umožňuje prostorově konzistentní porovnání s LiDARem odvozenými strukturálními metrikami.

6.5 Propojení strukturálních metrik LiDAR s mikroklimatickými daty

Výpočet strukturálních metrik LiDAR byl proveden v prostředí R s využitím balíčků *lidR* a *dplyr*. Jako vstupní data bylo použito výškově normalizované mračno bodů (LAS) a polygonová vrstva představující třímetrové bufferové zóny kolem jednotlivých měření Sniffer4D, importovaná do R pomocí balíčku *sf*.

Pro každý buffer bylo nejprve pomocí funkce `clip_roi()` vyříznuto bodové mračno obsahující všechny LiDAR odrazy nacházející se uvnitř daného polygonu. Následně

byly extrahovány hodnoty souřadnice „Z“ (výška nad terénem) a vypočteny strukturální lidarové metriky. Pro každý buffer byly vypočteny následující skupiny metrik:

Základní statistiky bodového mračna

- počet LiDAR odrazů (n),
- minimální výška (z_{min}),
- průměrná výška (z_{mean}),
- maximální výška (z_{max}),
- 95th percentil výšky (z_{p95}).

Vertikální pokryvnost vegetace byla definována jako podíl bodů nacházejících se nad zadanými výškovými prahy:

- *pokryvnost_0_5m* ($z > 0,5$ m),
- *pokryvnost_1m* ($z > 1,0$ m),
- *pokryvnost_1_5m* ($z > 1,5$ m),
- *pokryvnost_2m* ($z > 2,0$ m),
- *pokryvnost_2_5m* ($z > 2,5$ m),
- *pokryvnost_3m* ($z > 3,0$ m),
- *pokryvnost_3_5m* ($z > 3,5$ m),
- *pokryvnost_4m* ($z > 4,0$ m).

Doplňkové souhrnné metriky

- součet výšek bodů (z_{sum})
- směrodatná odchylka výšek (z_{sd}).

V případech, kdy se uvnitř bufferu nenacházely žádné LiDAR odrazy byla vrácena hodnota $n = 0$ a ostatní metriky byly nastaveny jako NA, což zajistilo konzistentní zacházení s chybějícími daty v dalším zpracování.

Vypočtené strukturální metriky byly následně sloučeny do jedné tabulky a propojeny s mikroklimatickými měřeními pomocí společného bufferového identifikátoru (ID).

6.6 Statistická analýza

Za účelem kvantifikace vlivu strukturálních charakteristik regenerujícího se porostu byly použity lineární regresní modely, ve kterých vystupovaly strukturální LiDARové metriky jako vysvětlující proměnné a mikroklimatické měření (teplota a relativní vlhkost vzduchu) jako závislé proměnné. Během první měřicí kampaně procházel průzkum územím s výraznou výškovou variabilitou, přesahující 30 m převýšení. Aby se zabránilo záměně vlivu struktury vegetace s vlivem topografického gradientu, byl datový soubor rozdělen do dvou výškových skupin o stejném počtu pozorování (*height_group* = 1, 2). Pro každou skupinu byly následně sestaveny samostatné statistické modely, označené jako nižší výšková úroveň (h1) a vyšší výšková úroveň (h2).

Druhá měřicí kampaň probíhala na topograficky rovném území, kde byly výškové rozdíly zanedbatelné. V tomto případě nebylo rozdělení podle nadmořské výšky nutné a data byla analyzována jako jeden celek. Pro každý datový soubor (*h1*, *h2*, rovinný terén) byl nejprve sestaven plný model, obsahující všechny strukturální metriky a nadmořskou výšku jako prediktory.

Následně byl proveden *forward stepwise selection* na základě Akaikova informačního kritéria (AIC) pomocí funkce `step()` v prostředí R. Do výsledného modelu byly zahrnuty pouze ty prediktory, jejichž zařazení vedlo ke zlepšení kvality modelu.

Tento postup byl aplikován samostatně pro:

- teplotu vzduchu – nižší výšková úroveň (*h1*, měření 1),
- teplotu vzduchu – vyšší výšková úroveň (*h2*, měření 1),
- teplotu vzduchu – rovinný terén (měření 2),
- relativní vlhkost vzduchu.

U všech finálních modelů byla posuzována:

- statistická významnost jednotlivých prediktorů,
- kvalita modelu pomocí koeficientů determinace (R^2),
- hodnota AIC.

Prediktory, které nebyly statisticky významné a současně nevedly ke zlepšení hodnoty AIC, byly z modelů odstraněny, čímž byly získány jednodušší a lépe interpretovatelné finální modely.

7 Výsledky

Napříč všemi měřicími kampaněmi vykazovala teplota vzduchu jasné a interpretovatelné vztahy ke strukturálním LiDARovým proměnným. Tabulka 2 shrnuje klíčové výsledky teplotních modelů, které jsou podrobně popsány níže. Naproti tomu relativní vlhkost vzduchu nevykazovala konzistentní ani významné vazby na žádnou z LiDARových strukturálních metrik. Vzhledem k nestabilitě výsledků pro vlhkost jsou dále prezentovány pouze modely teploty, zatímco omezení týkající se analýzy vlhkosti jsou podrobněji rozvedena v kapitole Diskuse.

Současně se ukázalo, že kombinace metod využívajících bezpilotní LiDARové snímkování a close-range měření pomocí systému Sniffer4D představuje vhodný přístup pro mapování mikroklimatických podmínek v raně postdisturbančním prostředí. Propojení těchto dat prostřednictvím prostorového přiřazení dat na základě vytvořených 3 m zón (bufferů) umožnilo detailně analyzovat vztahy mezi strukturou vegetace a mikroklimatem na jemné prostorové škále.

Výškové úrovně	Prediktory ve finálním modelu	Směr efektu	Statistická významnost	R ²
Členitý terén – nižší výšková úroveň (h1)	nadmořská výška, <i>pokryvnost_0_5m</i>	nadmořská výška (+) <i>pokryvnost_0_5m</i> (-)	oba prediktory významné	0,642
Členitý terén – vyšší výšková úroveň (h2)	nadmořská výška, <i>z_sd</i> , <i>z_mean</i> , <i>pokryvnost_0_5m</i>	nadmořská výška (+) <i>z_sd</i> (-) <i>z_mean</i> (+) <i>pokryvnost_0_5m</i> (nevýznamný)	významné: nadmořská výška, <i>z_sd</i>	0,216
Rovinatý terén (měření 2)	<i>z_max</i> , nadmořská výška	<i>z_max</i> (-) nadmořská výška (+)	oba prediktory významné	0,326

Tabulka 2: Shrnutí výsledků teplotních modelů napříč všemi výškovými úrovněmi

Členitý terén (měření 1)

S ohledem na výrazný výškový gradient podél transektu byl datový soubor rozdělen do dvou výškových skupin (h1 a h2) a pro každou z nich byl sestaven samostatný teplotní model. V obou skupinách byla nadmořská výška významným prediktorem teploty, avšak vliv struktury vegetace se mezi nižšími a vyššími polohami lišil.

Variabilita teploty v nižší části členitého terénu (h1) byla výrazně ovlivněna nadmořskou výškou a pokryvností nízké vegetace. *Forward stepwise selection* na základě Akaikova informačního kritéria (AIC) vedl k výběru modelu se dvěma prediktory model (1):

$$\text{Teplota} \sim \text{nadmořská výška} + \text{pokryvnost}_{0_5m} \quad (1)$$

Nadmořská výška měla výrazný pozitivní vliv na teplotu vzduchu, zatímco pokryvnost vegetace v blízkosti zemského povrchu (*pokryvnost_0_5m*) vykazovala statisticky významný ochlazující efekt. Výsledný model vysvětloval 64 % variability teploty. Tento výsledek naznačuje, že v nižších polohách již rané obnova vegetace přispívá měřitelným způsobem ke snižování teploty v lokálním mikroklimatu.

Ve vyšších, expozicí více zatížených polohách (h2) byla teplota vzduchu ovlivněna nejen nadmořskou výškou, ale také strukturální heterogenitou porostu. Vybraný model zahrnoval čtyři prediktory model (2):

$$\text{Teplota} \sim \text{nadmořská výška} + \text{pokryvnost}_{0_{5m}} + z_{sd} + z_{mean} \quad (2)$$

Kromě nadmořské výšky se jako významný prediktor projevil rozptýl výšek vegetace (*z_sd*), který měl negativní (ochlazující) efekt. Pokryvnost nízké vegetace (*pokryvnost_0_5m*) byla v modelu zachována, avšak nebyla statisticky významná. Model vysvětloval 22 % variability teploty. Tento výsledek ukazuje, že ve vyšších polohách hraje významnější roli strukturální heterogenita porostu než samotná pokryvnost nízké vegetace.

Rovinatý terén (měření 2)

Na topograficky homogenním povrchu byly strukturální vlivy na teplotu vzduchu zřetelnější, jelikož rozdíly v nadmořské výšce byly minimální. Nejlépe hodnocený model zahrnoval dva prediktory model (3):

$$\text{Teplota} \sim z_{max} + \text{nadmořská výška} \quad (3)$$

Maximální výška vegetace (*z_max*) vykazovala statisticky významný ochlazující efekt. Nadmořská výška přispívala k sekundární variabilitě teploty, a to i přes podstatně užší rozsah výškových rozdílů ve srovnání s členitým terénem. Výsledný model vysvětloval 34 % variability teploty. Tyto výsledky ukazují, že i nízká, raně sukcesní regenerující vegetace je schopna měřitelně snižovat teplotu v blízkosti zemského povrchu, pokud jsou topografické vlivy omezené.

Zhodnocení výsledků ve vztahu ke struktuře lesního porostu

Napříč všemi měřicími kampaněmi se nadmořská výška ukázala jako dominantní faktor ovlivňující teplotu v členitém terénu. Raná fáze vegetační obnovy však rovněž přispívala k lokální mikroklimatické variabilitě. Pokryvnost vegetace v blízkosti zemského povrchu (0 - 0,5 m) vykazovala nejvýraznější ochlazující efekt, vertikální strukturální variabilita (z_{sd}) přispívala ke snižování teploty ve výše položených částech území. Na rovinném terénu se jako významný faktor regulace teploty uplatnila maximální výška vegetace (z_{max}). Tyto výsledky jednoznačně ukazují, že obnova mikroklimatických podmínek je již v rané fázi regenerace detekovatelná a je úzce spjata se strukturou vegetace, přičemž význam jednotlivých metrik se liší v závislosti na terénním kontextu.

Zhodnocení použité metodiky

Použité metody sběru dat se ukázaly jako dostatečně vhodné pro analýzu vztahů mezi strukturou vegetace a mikroklimatem. LiDAR poskytl detailní informace o struktuře porostu, zatímco close-range měření pomocí systému Sniffer4D umožnilo zachytit mikroklimatické charakteristiky s vysokým časovým rozlišením.

Závěrečné shrnutí výsledků

Relativní vlhkost vzduchu nevykazovala žádné významné ani konzistentní vztahy ke struktuře vegetace. Celkově teplotní modely naznačují, že první projevy mikroklimatické obnovy se začínají obnovovat již v nejranějších fázích post-požárové regenerace, přičemž síla i projevy tohoto efektu se liší v závislosti na terénním kontextu a prostorové struktuře vegetace.

8 Diskuse

Výsledky ukazují, že mikroklimatické podmínky v rané fázi obnovy lesa po disturbanci jsou formovány především nadmořskou výškou, přičemž teplota vzduchu se zvyšuje podél výškového gradientu. Přestože je celkový rozdíl nadmořské výšky v rámci studovaného území relativně malý (přibližně 30 m), jeho vliv byl silný a konzistentní. To naznačuje, že i nepatrné topografické gradienty mohou v nejranějších stádiích regenerace lesa převážit nad vlivem strukturálních charakteristik porostu. Tento poznatek zdůrazňuje význam zohlednění lokální topografie při hodnocení mikroklimatických podmínek.

Nad rámec tohoto dominantního topografického signálu výsledky ukazují na časné projevy mikroklimatické obnovy související se strukturální obnovou porostu. Nejvýraznější ochlazující efekt byl spojen se zvýšenou pokryvností vegetace v bezprostřední blízkosti zemského povrchu (0 - 0,5 m), což naznačuje, že nízká, hustá post-požárová obnova poskytuje již v rané fázi alespoň částečné stínění ve vyšších, expozicích více zatížených polohách se navíc projevil vliv vertikální strukturální variability porostu, vyjádřené směrodatnou odchylkou výšek (z_{sd}). Tento výsledek naznačuje, že i malé a prostorově nerovnoměrné shluky regenerující vegetace mohou přispět k obnově lokálního mikroklima, přestože celková struktura porostu zůstává otevřená a nízká.

Zároveň je nutné zdůraznit, že schopnost mladých porostů regulovat mikroklima zůstává v této fázi obnovy omezená. Ve srovnání s dospělými lesními porosty, u nichž je mikroklima výsledkem kombinace stínění, transpirace, se u tříletých post-požárových porostů jedná spíše o počáteční a lokálně podmíněné efekty. Nízká výška vegetace, menší korunový zápoj pravděpodobně nedokážou zatím plně tlumit denní extrémní teploty a udržovat stabilnější mikroklimatické podmínky. Tyto výsledky však přesto naznačují, že proces obnovy mikroklimatické regulace začíná dříve, než se obvykle předpokládá, a že strukturální heterogenita rané regenerace může hrát klíčovou roli již v prvních letech.

Důležitým zjištěním této studie je, že schopnost obnovy lokálního mikroklimatu lesních porostů je možné zaznamenat již v rané fázi regenerace a tento fakt nebyl dosud (nebo jen zřídka) popsán ve vědeckých studiích. Většina dosavadních studií se zaměřuje především na dospělé porosty nebo středně sukcesní stádia,

zatímco nejranější období porostů po disturbanci zůstává v odborné literatuře nedostatečně zastoupeno (Davis et al. 2019; Zellweger et al. 2019; Kašpar et al. 2021). Tato experimentální studie poskytuje cenný referenční rámec pro pochopení prvních znaků znovu obnovené schopnosti mikroklimatu a může sloužit jako výchozí rámec pro sledování časové dynamiky mikroklimatu v průběhu dalšího vývoje lesní struktury.

8.1 LiDAR metriky a strukturální hodnocení lesa

Získané výsledky dále zdůrazňují schopnosti LiDARu zachytit detailní informace o struktuře lesa již v nejranějších fázích regenerace. LiDAR umožňuje rychlé a přesné měření jemnoškálových trojrozměrných strukturálních charakteristik, jako je výška porostu, vertikální heterogenita, přítomnost mezer v porostu či počáteční fáze zapojování korun, které jsou obtížně nebo zcela nemožné detekovat pomocí optických metod (Koukoulas a Blackburn 2004; Vepakomma et al. 2008; Jaakkola et al. 2010; Puliti et al. 2020; Slavík et al. 2023). Takto detailní strukturální informace představují cenný vstup nejen pro ekologické analýzy a modelování růstu lesa, ale také pro zpřesnění odhadu a interpretace mikroklimatických parametrů, u nichž hrají jemné prostorové rozdíly ve struktuře korunového patra klíčovou roli.

Ve srovnání s fotogrammetrickými metodami, které jsou závislé na textuře povrchu, světelných podmínkách a výrazném vizuálním kontrastu, poskytuje LiDAR přímá trojrozměrná měření, která zůstávají spolehlivá i v prostředí nízké, homogenní a řídké vegetace, typické pro mladé postdisturbanční porosty (Dietmaier et al. 2019; Filippelli et al. 2019; McNicol et al. 2021). Díky tomu LiDAR zachovává strukturální detaily, které by byly metodami *Structure from Motion* vyhlazeny nebo podhodnoceny, zejména vertikální porozitu porostu, ranou výškovou stratifikaci a částečné zapojení korun, jež byly v této studii identifikovány jako významné faktory mikroklimatického tlumení.

Z těchto důvodů se LiDAR (resp. jiné vysokohustotní LiDAR systémy) jeví jako zvláště vhodný nástroj pro studium interakcí mezi strukturou porostu a mikroklimatem v regenerujících lesích. Možnost odvozovat LiDAR metriky i z velmi mladých porostů umožňuje kvantifikovat strukturální vývoj ve fázi, kdy se ekologické procesy, jako je obnova mikroklimatické regulace nebo raná konkurenční dynamika se teprve začínají projevovat a nejsou dosud vizuálně patrné v optických datech.

Tato výhoda poskytuje pevný základ pro dlouhodobý monitoring obnovy lesa a zejména pro integraci detailních strukturálních informací do modelů, jejichž cílem je vysvětlit nebo predikovat mikroklimatické podmínky, fungování ekosystémů a odolnost vyvíjejících se lesních porostů. Zároveň lze očekávat, že takto časné získané strukturální informace budou hrát klíčovou roli i v budoucích analýzách růstu. Monitoring raných fází obnovy může přinášet cenné predikční poznatky dlouho předtím, než se rozdíly projeví prostřednictvím tradičních terénních metod nebo optických pozorování.

8.2 Mikroklimatické proměnné a další neoptické faktory

Celkově byl zaznamenán významný trend snížení teploty v raně regenerujícím se lese, kde se začala objevovat vyšší horizontální strukturální komplexita a nebo větší míra zapojení prvního korunového patra. Tento výsledek naznačuje, že i mladý, tříletý porost již vykazuje časné projevy obnovy mikroklimatu. Vyspělé lesní porosty jsou dlouhodobě známé svou vysokou schopností mikroklimatické regulace, kdy udržují nižší teploty a vyšší relativní vlhkost ve srovnání s otevřenými či narušenými stanovišti (Zellweger et al. 2020; Kašpar et al. 2021). Tento tlumicí efekt je výsledkem kombinace stínění, sníženého přístupu slunečního záření a transpirace. Jakmile je les narušen, ať už požárem, větrnou kalamitou, gradací hmyzích škůdců nebo změnami strukturální diverzity, dochází k narušení mikroklimatické regulace. Snížení zapojení korunového zápoje, ztráta strukturální heterogenity, vznik porostních mezer nebo homogenizace raně sukcesních stádií obvykle vedou k teplejším a sušším podmínkám v blízkosti zemského povrchu, které mohou přetrvávat několik let, dokud se strukturální komplexita porostu nezačne obnovovat (Von Arx et al. 2012; Zellweger et al. 2019; Horváth et al. 2023).

Na rozdíl od teploty se však nepodařilo prozatím identifikovat žádné vazby raně obnovené vegetace s trendem relativní vlhkosti. To může být spojeno s prozatímní velmi ranou fází vývoje porostu. Regenerující porosty mají navíc výrazně nižší transpirační kapacitu než dospělé lesy, u nichž hraje evapotranspirační ochlazování a uvolňování vodní páry klíčovou roli při udržování vyšší vlhkosti. V podmínkách studovaného území se obnova jeví jako zatím nedostatečná k potlačení vlivu širších meteorologických podmínek, v důsledku čehož zůstává relativní vlhko nevýznamným faktorem. To naznačuje, že schopnost obnovujících se porostů ovlivňovat vlhkost vzduchu v přízemní oblasti se pravděpodobně vyskytne až v pozdějších sukcesních

fázích, kdy dochází k většímu zapojení korun, nárůstu listové plochy a zvýšení transpirace.

Kromě spektrálních a strukturálních metrik tradičně využívaných v DPZ lze lesní ekosystémy charakterizovat také pomocí neoptických měření, která poskytují dodatečné informace pro lepší predikci růstů či dřívější detekce stresu. Například přítomnost agregačních feromonů může indikovat probíhající aktivitu kůrovců (Vošvrková et al. 2023; Birgersson et al. 1984), zatímco změny lokálního mikroklimatu pod korunovým patrem mohou signalizovat fyziologický stres dříve, než se projeví viditelné spektrální symptomy (Hüttnerová a Surový 2024). Jehličnaté dřeviny vystavené fyziologickému stresu rovněž emitují výrazně vyšší množství těkavých organických látek (VOC) ve srovnání s běžnou úrovní pozadí (Ghimire et al. 2016; Stříbrská et al. 2023; Netherer et al. 2024). Tyto chemické emise se často zesilují v průběhu sucha, teplotního stresu nebo v raných fázích napadení hmyzím škůdcem a představují tak citlivé indikátory zhoršujícího se zdravotního stavu stromů. Spektrum procesů probíhajících mimo dosah optického DPZ je přitom velmi široké a zahrnuje chemickou komunikaci, výměnu plynů a mikroklimatické projevy, které předcházejí viditelným strukturálním či spektrálním změnám. Integrace těchto měření se strukturálními LiDAR metrikami proto představuje slibnou cestu ke zlepšení včasné detekce, monitoringu lesních disturbancí a modelování přírůstů.

8.3 Limity a příležitosti

Z aplikačního hlediska výsledky naznačují, že i relativně malé strukturální změny porostu, jako je částečné zapojení korunového patra nebo vznikající výšková variabilita vegetace, mohou významně přispět k časné obnově mikroklimatických podmínek. Tyto poznatky jsou zvláště relevantní pro lesní hospodáře a správce území, kteří usilují o podporu podmínek příznivých pro biodiverzitu, přežívání semenáčků a dlouhodobou odolnost lesních ekosystémů v podmínkách probíhající klimatické změny. Práce poskytuje cenný základ nové oblasti DPZ a přispívá tak k možnosti začlenění takového mapování do produkce lesa.

Z hlediska praktického využití se však ukázalo, že integrace těchto dat je časově náročná, zejména ve fázi jejich zpracování, prostorového propojení a následné analýzy. Přesto se tento kombinovaný přístup ukazuje jako perspektivní

nástroj pro studium raných fází obnovy ekosystémů, neboť umožňuje zachytit procesy, které nejsou detekovatelné pomocí optických metod.

Je však třeba zdůraznit, že tato práce představuje pilotní studii realizovanou v rámci jediného národního parku, a její výsledky je proto nutné interpretovat s opatrností při zobecňování na jiné typy lesů nebo disturbance. Výškový gradient studovaného území je sice významný, avšak relativně úzký, a studie zachycuje pouze jednorázový časový snímek rané fáze obnovy. Struktura lesa i mikroklimatické podmínky se přitom v prvních letech po disturbance rychle vyvíjejí, a k ověření zde pozorovaných jevů je nezbytný dlouhodobý monitoring napříč různými studijními oblastmi a typy porostů.

9 Závěr a přínos práce

Tato studie ukazuje, že první projevy schopnosti obnovy mikroklimatu se znovu objevují již v tří letém regenerujícím se porostu, přičemž jejich intenzita se výrazně liší v závislosti na terénním kontextu a strukturálních charakteristikách rané regenerace. V členité post-požárové oblasti zůstávala nadmořská výška dominantním faktorem ovlivňujícím teplotu v pozemní oblasti, zatímco pokrývnost vegetace v bezprostřední a vertikální strukturální variabilita přispívaly k lokálním ochlazujícím efektům. Na rovinném terénu byla teplota vzduchu ovlivněna nízkou mladou regenerující vegetací, což poukazuje na interakci mezi strukturou porostu a mikroklimatem.

Tyto výsledky ukazují, že raná post-požárová obnova vegetace, přestože je stále řídká a strukturálně částečně vyvinutá, začíná ovlivňovat mikroklimatické podmínky dříve, než se běžně předpokládá. Začlenění neoptického mapování obnovy tak může významně přispět k lepšímu pochopení regenerační dynamiky lesních porostů a pomoci zpřesnit predikce týkající se obnovy lesních ekosystémů.

10 Seznam literatury a použitých zdrojů

Literární zdroje

ABDULLAH, Haidi; Andrew K. SKIDMORE; Roshanak DARVISHZADEH a Marco HEURICH, 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*. Online. **5**(1), 87–106 [vid. 2025-11-17]. ISSN 2056-3485, 2056-3485. Dostupné z: doi:10.1002/rse2.93

ADAMOVIČ, Jiří; Natalie BELISOVÁ; Miroslav COUBAL; Petr HAVRÁNEK; Jaroslav KUKLA; Jakub LYSÁK a Radek MIKULÁŠ, 2020. *Geologie Českosaského Švýcarska*. Vydání první. Ústí nad Labem: Správa Národního parku České Švýcarsko; Muzeum města Ústí nad Labem; Ústecký kraj. ISBN 978-80-88140-31-3.

ADÃO, Telmo; Jonáš HRUŠKA; Luís PÁDUA; José BESSA; Emanuel PERES; Raul MORAIS a Joaquim SOUSA, 2017. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing*. Online. **9**(11), 1110 [vid. 2025-11-13]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9111110

AHADY, Abdul Baqi; Elena-Maria KLOPRIES; Holger SCHÜTTRUMPF a Stefanie WOLF, 2025. Drought Analysis Methods: A Multidisciplinary Review with Insights on Key Decision-Making Factors in Method Selection. *Water*. Online. **17**(15), 2248 [vid. 2025-11-16]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w17152248

BEETZ, Kristina; Christopher MARRS; Annika BUSSE; Markéta PODĚBRADSKÁ; Daniel KINALCZYK; Johanna KRANZ a Matthias FORKEL, 2025. Effects of bark beetle disturbance and fuel types on fire radiative power and burn severity in the Bohemian-Saxon Switzerland. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. Online. **98**(1), 59–70 [vid. 2025-11-17]. ISSN 0015-752X, 1464-3626. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/cpae024

BHARGAVA, Anuja; Ashish SACHDEVA; Kulbhushan SHARMA; Mohammed H. ALSHARIF; Peerapong UTHANSAKUL a Monthippa UTHANSAKUL, 2024. Hyperspectral imaging and its applications: A review.

Heliyon. Online. **10**(12), e33208 [vid. 2025-11-13]. ISSN 24058440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2024.e33208

BIRGERSSON, Góran; Fredrik SCHLYTER; Jan LóFQVIST a Gunnar BERGSTRóM, 1984. Quantitative variation of pheromone components in the spruce bark beetle *Ips typographus* from different attack phases. *Journal of Chemical Ecology*. Online. **10**(7), 1029–1055 [vid. 2026-03-15]. ISSN 0098-0331, 1573-1561. Dostupné z: doi:10.1007/BF00987511

BLAHÚT, Jan a Ondřej RACEK, 2023. *Posouzení vlivu požáru a bezpečnostních zásahů na stabilitu skal a svahů*. říjen 2023. No publisher: Ústav struktury a mechaniky hornin, Akademie věd ČR, v.v.i.

BONAN, Gordon B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*. Online. **320**(5882), 1444–1449 [vid. 2026-03-05]. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Dostupné z: doi:10.1126/science.1155121

BURGUÉS, Javier a Santiago MARCO, 2020. Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Science of The Total Environment*. Online. **748**, 141172 [vid. 2026-03-03]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141172

BYERS, J.A., 2007. Chemical Ecology of Bark Beetles in a Complex Olfactory Landscape. In: François LIEUTIER; Keith R. DAY; Andrea BATTISTI; Jean-Claude GRÉGOIRE a Hugh F. EVANS, ed. *Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis*. Online. Dordrecht: Springer Netherlands, s. 89–134 [vid. 2026-03-06]. ISBN 978-1-4020-2240-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4020-2241-8_8

CAMPBELL, James B., 2011. *Introduction to remote sensing*. Fifth edition. New York London: The Guilford Press. ISBN 978-1-60918-176-5.

CIMBÁLNÍK, Miloš a Leoš MERVART, 1997. *Vyšší geodézie 1*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Stavební fakulta. ISBN 978-80-01-01597-1.

ČERNÝ, Jakub; Ondřej ŠPULÁK; Petr SÝKORA; Kateřina NOVOSADOVÁ; Jiří KADLEC a Martin KOMÁNEK, 2024. Význam buku lesního ve střední Evropě v období klimatické změny: přehled současných poznatků. *Zprávy lesnického výzkumu*.

Online. **69**(1) [vid. 2025-11-24]. ISSN 0322-9688, 1805-9872. Dostupné z: doi:10.59269/zlv/2024/1/721

DAVIS, Kimberley T.; Solomon Z. DOBROWSKI; Zachary A. HOLDEN; Philip E. HIGUERA a John T. ABATZOGLOU, 2019. Microclimatic buffering in forests of the future: the role of local water balance. *Ecography*. Online. **42**(1), 1–11 [vid. 2026-03-06]. ISSN 0906-7590, 1600-0587. Dostupné z: doi:10.1111/ecog.03836

DIETMAIER, Annette; Gregory J. MCDERMID; Mir Mustafizur RAHMAN; Julia LINKE a Ralf LUDWIG, 2019. Comparison of LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry for Characterizing Canopy Openings in the Boreal Forest of Northern Alberta. *Remote Sensing*. Online. **11**(16), 1919 [vid. 2026-03-16]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11161919

DONG, Hao; Jiahui DONG; Shikun SUN; Ting BAI; Dongmei ZHAO; Yali YIN; Xin SHEN; Yakun WANG; Zhitao ZHANG a Yubao WANG, 2024. Crop water stress detection based on UAV remote sensing systems. *Agricultural Water Management*. Online. **303**, 109059 [vid. 2025-11-17]. ISSN 03783774. Dostupné z: doi:10.1016/j.agwat.2024.109059

DRUSCH, M.; U. DEL BELLO; S. CARLIER; O. COLIN; V. FERNANDEZ; F. GASCON; B. HOERSCH; C. ISOLA; P. LABERINTI; P. MARTIMORT; A. MEYGRET; F. SPOTO; O. SY; F. MARCHESE a P. BARGELLINI, 2012b. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. Online. **120**, 25–36 [vid. 2025-10-28]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2011.11.026

FARQUHAR, G D a T D SHARKEY, 1982. Stomatal Conductance and Photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*. Online. **33**(1), 317–345 [vid. 2026-03-05]. ISSN 0066-4294. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.pp.33.060182.001533

FASSNACHT, Fabian Ewald; Hooman LATIFI; Krzysztof STEREŃCZAK; Aneta MODZELEWSKA; Michael LEFSKY; Lars T. WASER; Christoph STRAUB a Aniruddha GHOSH, 2016. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. Online. **186**, 64–87 [vid. 2025-10-28]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2016.08.013

FILIPPELLI, Steven K.; Michael A. LEFSKY a Monique E. ROCCA, 2019. Comparison and integration of lidar and photogrammetric point clouds for mapping pre-fire forest structure. *Remote Sensing of Environment*. Online. **224**, 154–166 [vid. 2026-03-16]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2019.01.029

FRAZIER, Amy E. a Benjamin L. HEMINGWAY, 2021. A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*. Online. **13**(19), 3930 [vid. 2025-10-28]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13193930

GHIMIRE, Rajendra P.; Minna KIVIMÄENPÄÄ; Minna BLOMQVIST; Toini HOLOPAINEN; Päivi LYYTIKÄINEN-SAARENMAA a Jarmo K. HOLOPAINEN, 2016. Effect of bark beetle (*Ips typographus* L.) attack on bark VOC emissions of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) trees. *Atmospheric Environment*. Online. **126**, 145–152 [vid. 2026-03-15]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.049

GOODBODY, Tristan R. H.; Nicholas C. COOPS a Joanne C. WHITE, 2019. Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*. Online. **5**(2), 55–75 [vid. 2025-10-29]. ISSN 2198-6436. Dostupné z: doi:10.1007/s40725-019-00087-2

GWENZI, D. a M. A. LEFSKY, 2014. Prospects of photon counting lidar for savanna ecosystem structural studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Online. **XL-1**, 141–147 [vid. 2025-10-29]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-141-2014

HAN, Yunhyeok; Barnabas Abraham TARAKEY; Suk-Ju HONG; Sang-Yeon KIM; Eungchan KIM; Chang-Hyup LEE a Ghiseok KIM, 2021. Calibration and Image Processing of Aerial Thermal Image for UAV Application in Crop Water Stress Estimation. *Journal of Sensors*. Online. **2021**(1), 5537795 [vid. 2025-11-17]. ISSN 1687-725X, 1687-7268. Dostupné z: doi:10.1155/2021/5537795

HÄRTEL, Handrij; Dana VÉBROVÁ; Jakub ŠAFRÁNEK; Václav SOJKA a Lukáš BLAŽEJ, 2023. Vývoj plochy po požáru v Národním parku České Švýcarsko rok poté. *Ochrana přírody*. **6/2023**.

HARTLEY, Robin J. L.; Sadeepa JAYATHUNGA; Peter D. MASSAM; Dilshan DE SILVA; Honey Jane ESTARIJA; Sam J. DAVIDSON; Adedamola WURAOLA a Grant D. PEARSE, 2022. Assessing the Potential of Backpack-Mounted Mobile Laser Scanning Systems for Tree Phenotyping. *Remote Sensing*. Online. **14**(14), 3344 [vid. 2025-10-29]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14143344

HLÁSNY, T.; S. ZIMOVÁ a B. BENTZ, 2021. Scientific response to intensifying bark beetle outbreaks in Europe and North America. *Forest Ecology and Management*. Online. **499**, 119599 [vid. 2026-02-01]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2021.119599

HOLOPAINEN, Jarmo K. a Jonathan GERSHENZON, 2010. Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends in Plant Science*. Online. **15**(3), 176–184 [vid. 2026-03-06]. ISSN 13601385. Dostupné z: doi:10.1016/j.tplants.2010.01.006

HORVÁTH, Csenge Veronika; Bence KOVÁCS; Flóra TINYA; Julia SCHADECK LOCATELLI; Csaba NÉMETH; Lorenzo CRECCO; Gábor ILLÉS; Péter CSÉPÁNYI a Péter ÓDOR, 2023. A matter of size and shape: Microclimatic changes induced by experimental gap openings in a sessile oak–hornbeam forest. *Science of The Total Environment*. Online. **873**, 162302 [vid. 2026-03-15]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2023.162302

HU, Xiaolong; Liangsheng SHI; Lin LIN; Baozhong ZHANG a Yuanyuan ZHA, 2018. Optical-based and thermal-based surface conductance and actual evapotranspiration estimation, an evaluation study in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*. Online. **263**, 449–464 [vid. 2026-03-04]. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2018.09.015

HUANG, Jingfeng; Chen WEI; Yao ZHANG; George Alan BLACKBURN; Xiuzhen WANG; Chuanwen WEI a Jing WANG, 2015. Meta-Analysis of the Detection of Plant Pigment Concentrations Using Hyperspectral Remotely Sensed Data. *PLOS ONE*. Online. **10**(9), e0137029 [vid. 2025-11-16]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0137029

HUETE, A; K DIDAN; T MIURA; E.P RODRIGUEZ; X GAO a L.G FERREIRA, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the

MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. Online. **83**(1–2), 195–213 [vid. 2025-11-03]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2

HÜTTNEROVÁ, Tereza; Sebastian PACZKOWSKI; Tarek NEUBERT; Anna JIROŠOVÁ a Peter SUROVÝ, 2023. Comparison of Individual Sensors in the Electronic Nose for Stress Detection in Forest Stands. *Sensors*. Online. **23**(4), 2001 [vid. 2025-11-04]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s23042001

HÜTTNEROVÁ, Tereza a Peter SUROVÝ, 2024. Bark beetle detection method using electronic nose sensors. A possible improvement of early forest disturbance detection? *Frontiers in Forests and Global Change*. Online. **7**, 1445094 [vid. 2026-03-15]. ISSN 2624-893X. Dostupné z: doi:10.3389/ffgc.2024.1445094

IM, Jungho a John R. JENSEN, 2008. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. *Geography Compass*. Online. **2**(6), 1943–1961 [vid. 2025-11-13]. ISSN 1749-8198, 1749-8198. Dostupné z: doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00182.x

JAAKKOLA, Anttoni; Juha HYYPPÄ; Antero KUKKO; Xiaowei YU; Harri KAARTINEN; Matti LEHTOMÄKI a Yi LIN, 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Online. **65**(6), 514–522 [vid. 2026-03-15]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002

JENSEN, John R., 2007. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. Prentice Hall series in geographic information science. ISBN 978-0-13-188950-7.

JONES, Hamlyn G., 2013. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Online. 3. vyd. No publisher: Cambridge University Press [vid. 2026-03-05]. ISBN 978-0-511-84572-7. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511845727

KAŠPAR, Vít; Lucia HEDEROVÁ; Martin MACEK; Jana MÜLLEROVÁ; Jiří PROŠEK; Peter SUROVÝ; Jan WILD a Martin KOPECKÝ, 2021. Temperature buffering in temperate forests: Comparing microclimate models based on ground measurements with active and passive remote sensing. *Remote Sensing of*

Environment. Online. **263**, 112522 [vid. 2026-03-06]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2021.112522

KORPELA, Ilkka; Lauri MEHTÄTALO; Lauri MARKELIN; Anne SEPPÄNEN a Annika KANGAS, 2014. Tree species identification in aerial image data using directional reflectance signatures. *Silva Fennica*. Online. **48**(3) [vid. 2025-11-03]. ISSN 22424075. Dostupné z: doi:10.14214/sf.1087

KOUKOULAS, S. a G. A. BLACKBURN, 2004. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. *International Journal of Remote Sensing*. Online. **25**(15), 3049–3072 [vid. 2026-03-15]. ISSN 0143-1161, 1366-5901. Dostupné z: doi:10.1080/01431160310001657786

KRZYSZEK, Peter; Alla SEREBRYANYK; Claudius SCHNÖRR; Jaroslav ČERVENKA a Marco HEURICH, 2020. Large-Scale Mapping of Tree Species and Dead Trees in Šumava National Park and Bavarian Forest National Park Using Lidar and Multispectral Imagery. *Remote Sensing*. Online. **12**(4), 661 [vid. 2025-11-16]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12040661

KUŽELKA, Karel a Peter SUROVÝ, [nedatováno]. Systém operativního leteckého snímání pro doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách. **2017**.

LAUSCH, Angela; Stefan ERASMI; Douglas KING; Paul MAGDON a Marco HEURICH, 2017. Understanding Forest Health with Remote Sensing-Part II—A Review of Approaches and Data Models. *Remote Sensing*. Online. **9**(2), 129 [vid. 2026-03-03]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9020129

LI, Zhao-Liang; Hua WU; Si-Bo DUAN; Wei ZHAO; Huazhong REN; Xiangyang LIU; Pei LENG; Ronglin TANG; Xin YE; Jinshun ZHU; Yingwei SUN; Menglin SI; Meng LIU; Jiahao LI; Xia ZHANG; Guofei SHANG; Bo-Hui TANG; Guangjian YAN a Chenghu ZHOU, 2023. Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics*. Online. **61**(1), e2022RG000777 [vid. 2025-11-17]. ISSN 8755-1209, 1944-9208. Dostupné z: doi:10.1029/2022RG000777

LI, Zhilin; Jun CHEN a Emmanuel BALTSAVIAS, 2008. *Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: 2008 ISPRS*

congress book. Boca Raton: CRC press. International society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS) book series, 7. ISBN 978-0-415-47805-2.

LICHTENTHALER, Hartmut K., 1987. [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In: *Methods in Enzymology*. Online. No publisher: Elsevier, s. 350–382 [vid. 2025-11-16]. ISBN 978-0-12-182048-0. Dostupné z: doi:10.1016/0076-6879(87)48036-1

LILLESAND, Thomas M.; Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN, 2015. *Remote sensing and image interpretation*. Seventh edition. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 978-1-118-34328-9.

LULLA, Kamlesh; M. Duane NELLIS a Bradley RUNDQUIST, 2012. Celebrating 40 years of Landsat program's Earth observation accomplishments. *Geocarto International*. Online. **27**(6), 459–459 [vid. 2025-10-28]. ISSN 1010-6049, 1752-0762. Dostupné z: doi:10.1080/10106049.2012.727604

MARINI, Lorenzo; Bjørn ØKLAND; Anna Maria JÖNSSON; Barbara BENTZ; Allan CARROLL; Beat FORSTER; Jean-Claude GRÉGOIRE; Rainer HURLING; Louis Michel NAGELEISEN; Sigrid NETHERER; Hans Peter RAVN; Aaron WEED a Martin SCHROEDER, 2017. Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*. Online. **40**(12), 1426–1435 [vid. 2026-01-25]. ISSN 0906-7590, 1600-0587. Dostupné z: doi:10.1111/ecog.02769

MARINONE, Maríca C. a Horacio E. ZAGARESE, 1991. A field and laboratory study on factors affecting polymorphism in the rotifer *Keratella tropica*. *Oecologia*. Online. **86**(3), 372–377 [vid. 2025-11-16]. ISSN 0029-8549, 1432-1939. Dostupné z: doi:10.1007/BF00317603

MCNICOL, Iain M.; Edward T. A. MITCHARD; Chiara AQUINO; Andrew BURT; Harry CARSTAIRS; Creck DASSI; Anaick MODINGA DIKONGO a Mathias I. DISNEY, 2021. To What Extent Can UAV Photogrammetry Replicate UAV LiDAR to Determine Forest Structure? A Test in Two Contrasting Tropical Forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. Online. **126**(12), e2021JG006586 [vid. 2026-03-16]. ISSN 2169-8953, 2169-8961. Dostupné z: doi:10.1029/2021JG006586

MICHAŁOWSKA, Maja a Jacek RAPIŃSKI, 2021. A Review of Tree Species Classification Based on Airborne LiDAR Data and Applied Classifiers. *Remote Sensing*. Online. **13**(3), 353 [vid. 2025-10-29]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13030353

NDLOVU, Helen S.; John ODINDI; Mbulisi SIBANDA a Onesimo MUTANGA, 2024. A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*. Online. **45**(15), 4923–4960 [vid. 2025-11-17]. ISSN 0143-1161, 1366-5901. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2024.2368933

NETHERER, Sigrid; Linda LEHMANSKI; Albert BACHLEHNER; Sabine ROSNER; Tadeja SAVI; Axel SCHMIDT; Jianbei HUANG; Maria Rosa PAIVA; Eduardo MATEUS; Henrik HARTMANN a Jonathan GERSHENZON, 2024. Drought increases Norway spruce susceptibility to the Eurasian spruce bark beetle and its associated fungi. *New Phytologist*. Online. **242**(3), 1000–1017 [vid. 2026-03-15]. ISSN 0028-646X, 1469-8137. Dostupné z: doi:10.1111/nph.19635

PARIZZI, Alessandro; Fernando RODRIGUEZ GONZALEZ a Ramon BRCIC, 2020. A Covariance-Based Approach to Merging InSAR and GNSS Displacement Rate Measurements. *Remote Sensing*. Online. **12**(2), 300 [vid. 2025-11-03]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12020300

PAVELKA, Karel, 2010. *Dálkový průzkum Země - družicové systémy*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04628-9.

PULITI, Stefano; Johannes BREIDENBACH a Rasmus ASTRUP, 2020. Estimation of Forest Growing Stock Volume with UAV Laser Scanning Data: Can It Be Done without Field Data? *Remote Sensing*. Online. **12**(8), 1245 [vid. 2026-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12081245

ROUSE, W a R H HAAS, [nedatováno]. MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS.

SEIDL, Rupert; Mart-Jan SCHELHAAS; Werner RAMMER a Pieter Johannes VERKERK, 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*. Online. **4**(9), 806–810 [vid. 2026-02-01]. ISSN 1758-678X, 1758-6798. Dostupné z: doi:10.1038/nclimate2318

SLAVÍK, Martin; Karel KUŽELKA; Roman MODLINGER a Peter SUROVÝ, 2023. Spatial Analysis of Dense LiDAR Point Clouds for Tree Species Group Classification Using Individual Tree Metrics. *Forests*. Online. **14**(8), 1581 [vid. 2026-03-15]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f14081581

STRÍBRSKÁ, Barbora; Jaromír HRADECKÝ; Jaroslav ČEPL; Ivana TOMÁŠKOVÁ; Rastislav JAKUŠ; Roman MODLINGER; Sigrid NETHERER a Anna JIROŠOVÁ, 2022. Forest margins provide favourable microclimatic niches to swarming bark beetles, but Norway spruce trees were not attacked by *Ips typographus* shortly after edge creation in a field experiment. *Forest Ecology and Management*. Online. **506**, 119950 [vid. 2025-11-04]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2021.119950

STRÍBRSKÁ, Barbora; Antonioni Acacio Campos MOLITERNO; Tereza HÜTTNEROVÁ; Martin LEINER; Peter SUROVÝ a Anna JIROŠOVÁ, 2023. Pilot Study of 3D Spatial Distribution of α -Pinene Emitted by Norway Spruce (L.) Karst Recently Infested by *Ips typographus* (L. 1758) (Coleoptera: Scolytinae). *Forests*. Online. **15**(1), 10 [vid. 2026-03-15]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f15010010

SUROVÝ, Peter; Karel KUŽELKA; Azadeh ABDOLAHNEJAD; Kateřina SIROTKOVÁ; Zlatica MELICHOVÁ a Martin SLAVÍK, 2019. *Aplikace dálkového průzkumu země v lesnictví*. V praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská. ISBN 978-80-213-3008-5.

SVATOŇOVÁ, Hana a Lubomír. LAUERMAN, 2010. *Dálkový průzkum Země - aktuální zdroj geografických informací*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita. ISBN 978-80-210-5162-1.

TOTH, Charles a Grzegorz JÓŹKÓW, 2016. Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Online. **115**, 22–36 [vid. 2025-10-28]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004

VÉBROVÁ, Dana a Härtel HANDRIJ, 2025. 25 let vývoje lesa v národním parku České Švýcarsko. *Ochrana přírody*. **4/2025**, Z naší přírody.

VEPAKOMMA, Udayalakshmi; Benoit ST-ONGE a Daniel KNEESHAW, 2008. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sensing of Environment*. Online. **112**(5), 2326–2340 [vid. 2026-03-15]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2007.10.001

VÍTKOVÁ, Lucie; Radek BAČE; Petr KJUČUKOV a Miroslav SVOBODA, 2018. Deadwood management in Central European forests: Key considerations for practical implementation. *Forest Ecology and Management*. Online. **429**, 394–405 [vid. 2025-11-24]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2018.07.034

VON ARX, Georg; Matthias DOBBERTIN a Martine REBETEZ, 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*. Online. **166–167**, 144–155 [vid. 2026-03-15]. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2012.07.018

VOŠVRDOVÁ, N.; A. JOHANSSON; M. TURČÁNI; R. JAKUŠ; D. TYŠER; F. SCHLYTER a R. MODLINGER, 2023. Dogs trained to recognise a bark beetle pheromone locate recently attacked spruces better than human experts. *Forest Ecology and Management*. Online. **528**, 120626 [vid. 2026-03-15]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2022.120626

WONG, Christopher Y S, 2023. Plant optics: underlying mechanisms in remotely sensed signals for phenotyping applications. *AoB PLANTS*. Online. **15**(4), plad039 [vid. 2025-11-16]. ISSN 2041-2851. Dostupné z: doi:10.1093/aobpla/plad039

YAN, Kai; Si GAO; Guangjian YAN; Xuanlong MA; Xiuzhi CHEN; Peng ZHU; Jinhua LI; Sicong GAO; Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY; Ranga B. MYNENI a Qiao WANG, 2025. A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Online. **139**, 104560 [vid. 2025-11-16]. ISSN 15698432. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2025.104560

YU, Huan; Bo KONG; Yuting HOU; Xiaoyu XU; Tao CHEN a Xiangmeng LIU, 2022. A critical review on applications of hyperspectral remote sensing in crop monitoring. *Experimental Agriculture*. Online. **58**, e26 [vid. 2025-11-13]. ISSN 0014-4797, 1469-4441. Dostupné z: doi:10.1017/S0014479722000278

ZAHRT, Andrew F.; Jeremy J. HENLE; Brennan T. ROSE; Yang WANG; William T. DARROW a Scott E. DENMARK, 2019. Prediction of higher-selectivity catalysts by computer-driven workflow and machine learning. *Science*. Online. **363**(6424), eaau5631 [vid. 2026-03-06]. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Dostupné z: doi:10.1126/science.aau5631

ZELLWEGER, Florian; David COOMES; Jonathan LENOIR; Leen DEPAUW; Sybryn L. MAES; Monika WULF; Keith J. KIRBY; Jörg BRUNET; Martin KOPECKÝ; František MÁLIŠ; Wolfgang SCHMIDT; Steffi HEINRICHS; Jan DEN OUDEN; Bogdan JAROSZEWICZ; Gauthier BUYSE; Fabien SPICHER; Kris VERHEYEN a Pieter DE FRENNE, 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography*. Online. **28**(12), 1774–1786 [vid. 2026-03-06]. ISSN 1466-822X, 1466-8238. Dostupné z: doi:10.1111/geb.12991

ZELLWEGER, Florian; Pieter DE FRENNE; Jonathan LENOIR; Pieter VANGANSBEKE; Kris VERHEYEN; Markus BERNHARDT-RÖMMERMANN; Lander BAETEN; Radim HÉDL; Imre BERKI; Jörg BRUNET; Hans VAN CALSTER; Markéta CHUDOMELOVÁ; Guillaume DECOCQ; Thomas DIRNBÖCK; Tomasz DURAK; Thilo HEINKEN; Bogdan JAROSZEWICZ; Martin KOPECKÝ; František MÁLIŠ; Martin MACEK; Marek MALICKI; Tobias NAAF; Thomas A. NAGEL; Adrienne ORTMANN-AJKAI; Petr PETŘÍK; Remigiusz PIELECH; Kamila RECZYŃSKA; Wolfgang SCHMIDT; Tibor STANDOVÁR; Krzysztof ŚWIERKOSZ; Balázs TELEKI; Ondřej VILD; Monika WULF a David COOMES, 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*. Online. **368**(6492), 772–775 [vid. 2026-03-06]. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Dostupné z: doi:10.1126/science.aba6880

ŽÍŽALA, Mgr Daniel, 2021. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ A PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ.

Internetové zdroje

DOBROVOLNÝ, Petr; Vladimír HERBER a Alois HYNEK, 2025. SCI.MUNI. *Výuka krajinné ekologie a DPZ*. Online [vid. 2025-11-28]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2026. *Jaké faktory ovlivnily vznik a šíření požáru v NP České Švýcarsko?* OnlineNo publisher: Ministerstvo životního prostředí [vid. 2026-03-06]. Dostupné z: <https://mzp.gov.cz/cz/agenda/priroda-a-krajina/zvlaste-chranena-uzemi/metodicke-materialy-a-ostatni-dokumenty/jake>

NÁRODNÍ PARK ČESKÉ ŠVÝCARSKO, [nedatováno]. *Podnebí | Oficiální webové stránky NP České Švýcarsko a CHKO Labské pískovce*. Online [vid. 2025-11-27]. Dostupné z: https://www.npcs.cz/podnebi?utm_source=chatgpt.com

REGION-TOUR, 2026. *Národní park České Švýcarsko*. Online [vid. 2026-03-06]. Dostupné z: https://www.region-ceskesvycarsko.cz/oblasti/ceske-svycarsko/?utm_source=chatgpt.com?utm_source=copy&utm_medium=paste&utm_campaign=copypaste&utm_content=https%3A%2F%2Fwww.regionceskesvycarsko.cz%2Foblasti%2Fceske-svycarsko%2F%3Futm_source%3Dchatgpt.com

Software

AIRNIS, 2023. *Air & Methane Insights*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.airins.com/>

ESRI, 2024. *ArcGIS Pro*. Online. 2024. Redlands, CA: esri. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

GRÄLER, Benedikt; Edzer PEBESMA a Gerard HEUVELINK, 2016. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal*. Online. 8(1), 204 [vid. 2026-03-15]. ISSN 2073-4859. Dostupné z: doi:10.32614/RJ-2016-014

HABEL, Kai; Raoul GRASMAN; Robert B. GRAMACY; Pavlo MOZHAROVSKYI a David C. STERRATT, 2005. *geometry: Mesh Generation and Surface Tessellation*. Online. 8. červen 2005. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: doi:10.32614/CRAN.package.geometry

HIJMANS, Robert J.; Márcia BARBOSA; Roger BIVAND; Andrew BROWN; Michael CHIRICO; Emanuele CORDANO; Krzysztof DYBA; Edzer PEBESMA;

Barry ROWLINGSON a Michael D. SUMNER, 2026. *terra: Spatial Data Analysis*. Online. 12. leden 2026. [vid. 2026-03-06]. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/terra/index.html>

HIJMANS, Robert J.; Andrew BROWN a Márcia BARBOSA, 2020. *terra: Spatial Data Analysis*. Online. 20. březen 2020. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: [doi:10.32614/CRAN.package.terra](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.terra)

PEBESMA, Edzer, 2016. *sf: Simple Features for R*. Online. 26. říjen 2016. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: [doi:10.32614/CRAN.package.sf](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.sf)

PEBESMA, Edzer, 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*. Online. **10**(1), 439–446 [vid. 2026-03-06]. ISSN 2073-4859. Dostupné z: [doi:10.32614/RJ-2018-009](https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009)

PEBESMA, Edzer J, 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*. Online. **30**(7), 683–691 [vid. 2026-03-15]. ISSN 00983004. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012)

R CORE TEAM. R, 2025. *A Language and Environment for Statistical Computing*. Online. 2025. No publisher: R Foundation for Statistical Computing. Dostupné z: [<https://www.R-project.org/>](https://www.R-project.org/).

ROUSSEL, Jean-Romain; David AUTY; Nicholas C. COOPS; Piotr TOMPALSKI; Tristan R.H. GOODBODY; Andrew Sánchez MEADOR; Jean-François BOURDON; Florian DE BOISSIEU a Alexis ACHIM, 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*. Online. **251**, 112061 [vid. 2026-03-14]. ISSN 00344257. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rse.2020.112061](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061)

ROUSSEL, Jean-Romain; David Auty (Reviews the DOCUMENTATION); Florian De Boissieu (Fixed bugs and improved catalog FEATURES); Andrew Sánchez Meador (Implemented wing2015() for SEGMENT_SNAGS()); Bourdon Jean-François (Contributed to Roussel2020() for TRACK_SENSOR()); Gatziolis Demetrios (Implemented Gatziolis2019() for TRACK_SENSOR()); Leon Steinmeier (Contributed to parallelization MANAGEMENT); Stanislaw Adaszewski (Author of the C++ concaveman CODE) a Benoît St-Onge (Author of the „chm_prep”FUNCTION), 2026. *lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and*

Visualization for Forestry Applications. Online. 8. leden 2026. [vid. 2026-03-06].
Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/index.html>

WICKHAM, Hadley; Romain FRANÇOIS; Lionel HENRY; Kirill MÜLLER
a Davis VAUGHAN, 2014. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. Online.
16. leden 2014. [vid. 2026-03-15]. Dostupné z: doi:10.32614/CRAN.package.dplyr

AI

OPENAI. ChatGPT [online]. San Francisco: OpenAI. Dostupné z:
<https://chat.openai.com> [cit. 2026-03-14].

11 Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 1: Srovnání hlavních metod dálkového průzkumu Země na regionální úrovni	20
Tabulka 2: Shrnutí výsledků teplotních modelů napříč všemi výškovými úrovněm... 48	
Obrázek 1: Schéma tepelného snímání v DPZ.....	26
Obrázek 2: Lokalizace studijní oblasti v Národním parku České Švýcarsko	40
Obrázek 3: Změna krajiny po požáru v Národním parku České Švýcarsko	40
Obrázek 4: Přehled nástrojů pro sběr dat a studijní oblasti.....	42
Obrázek 5: Integrace strukturálních dat z LiDARu a mikroklimatických měření	44