

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky



Studijní program: **P1314 Geografie**

Studijní obor: **1302V011 Geoinformatika a kartografie**

**HODNOCENÍ VNĚJŠÍCH VLIVŮ
NA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVU POMOCÍ
GEOINFORMATICKÝCH METOD**

Doktorská disertační práce

Mgr. Michal KUČERA

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdena DOBEŠOVÁ, Ph.D.

Olomouc 2024

ANOTACE

V disertační práci byla navržena metodika pro detekci ohrožení železniční infrastruktury přilehlou stromovou vegetací. Pro vyhodnocení jsou využívány existující datové zdroje z lesnictví a dálkového průzkumu Země.

Zdrojem pro posouzení ohrožení jsou charakteristiky, jako je výška stromové vegetace, její druhová skladba a zdravotní stav zjištěný ze satelitních snímků. V této disertační práci byl navržen vzorec pro výpočet indexu IVTIR - Improved Vegetation Threat Index for Railway infrastructure. Výpočet ohrožení byl konstruován jako vážený součet výšky stromů, druhového složení a zdravotního stavu stromové vegetace. Váhy parametrů ve vzorci pro výpočet IVTIR byly stanoveny na základě dotazníkového šetření mezi odborníky a následně vyhodnoceny prostřednictvím metody AHP. Výsledné hodnoty indexu IVTIR byly rozděleny do pěti kategorií: bez ohrožení, velmi nízké ohrožení, nízké ohrožení, střední ohrožení a vysoké ohrožení stromovou vegetací.

Studie hodnotí ohrožení v ochranném pásmu železnice pro celé území České republiky. Vysoké a střední ohrožení bylo v roce 2020 identifikováno na 42,6 % jeho rozlohy. Na základě porovnání hodnot indexu IVTIR s předchozími mimořádnými událostmi, způsobenými pádem stromu nebo srážkou se stromem, byly identifikovány dvě kategorie (střední ohrožení a vysoké ohrožení) jako vysoce rizikové. Na zbývajících plošech se nachází vegetace, která představuje nízké nebo žádné riziko. Přesto je třeba její stav nadále sledovat, protože míra ohrožení se může zvýšit například v důsledku zhoršení jejího zdravotního stavu.

Na základě porovnání skutečného výskytu mimořádností a terénního šetření, lze metodiku vyvinutou za účelem stanovení míry ohrožení železnice stromovou vegetací hodnotit jako dobře navrženou.

Cílem metodiky bylo navrhnout postup zjišťování ohrožení, který by byl snadno udržitelný a použitelný, s důrazem na minimální možné náklady. Metodika by umožnila pravidelně provádět aktualizace stavu a reagovat tak na aktuální vývoj.

Navržená metodika a její výsledky mohou pomoci správci infrastruktury identifikovat ohrožená místa, kde by měla být přijata nápravná opatření. Aplikace metodiky by zvýšila bezpečnost a zajistila plynulost provozu i za extrémních povětrnostních podmínek. Kromě železnice lze metodiku použít i v dalších oblastech, jako je silniční doprava, energetika a další.

KLÍČOVÁ SLOVA

GIS; ohrožení; strom; dálkový průzkum Země; železnice

Počet stran práce: 97

ANNOTATION

The dissertation proposed a methodology for detecting the threat to railway infrastructure by adjacent tree vegetation in the railway protection buffer zone. The methodology uses existing data sources from forestry and remote sensing.

The source for the threat assessment is characteristics such as the height of the tree vegetation, its species composition, and its health, as determined from satellite imagery. This dissertation proposed a formula for calculating the IVTIR - Improved Vegetation Threat Index for Railway infrastructure. The threat calculation was constructed as a weighted sum of tree height, species composition and health status of tree vegetation. The weights of the parameters in the formula for calculating IVTRI were determined based on a questionnaire survey among experts and then evaluated using the AHP method. The final values of the IVTIR index were classified into five categories: without danger, very low threat, low threat, medium threat and high threat.

The study assesses the threat in the railway protection zone for the whole territory of the Czech Republic. High and medium threats in the forested railway buffer zone were identified in 42.6% of its area in 2020. Based on comparing the IVTIR index values with the previous incidents caused by a tree fall or collision, two categories (medium threat and high threat) were identified as high risk. The remaining area contains vegetation that poses low or no risk. Nevertheless, its condition must continue to be monitored, as the threat level may increase, for example, due to deterioration in its health. Based on a comparison of actual occurrences of outliers and field investigation, the methodology developed to determine the level of threat to railroads by tree vegetation can be judged as well-designed.

The methodology aimed to design a threat detection procedure that would be easily sustainable and applicable, emphasising minimum potential costs. The methodology would allow status updates to be carried out regularly to respond to current developments.

The proposed methodology and the results can help the infrastructure manager identify vulnerable sites where corrective action should be taken. The application of methodology would improve safety and ensure the continuity of traffic even in extreme weather conditions. In addition to railways, the methodology can also be applied to other areas such as road transport, energy, and others.

KEYWORDS

GIS; threat; tree; remote sensing; railway

Number of pages 97

Prohlašuji, že

- doktorskou disertační práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji doktorskou disertační práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 - školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, doktorskou disertační práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé doktorské disertační práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé doktorské disertační práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé doktorské disertační práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Poděkování

Děkuji zejména mé školitelce doc. Ing. Zdeně DOBEŠOVÉ, Ph.D. za odborné vedení během celého doktorského studia, které bylo završeno dokončením této disertační práce. Její nápady a připomínky byly velice hodnotné a přínosné.

Dále děkuji všem, kteří mě inspirovali a podněcovali k rozvíjení mých myšlenek, zejména kolektivu Katedry geoinformatiky v Olomouci, zaměstnancům ÚHÚL a Správy železnic.

Zároveň nesmím zapomenout poděkovat mé rodině za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	8
1 CÍLE PRÁCE	9
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
2.1 Druhov \acute{a} skladba stromov \acute{e} ho porostu.....	10
2.2 Zdravotn \acute{i} stav porostu.....	15
2.3 Využit \acute{i} d \acute{a} lkov \acute{e} ho pr \acute{u} zkumu Zem \acute{e} pro zjištění stavu vegetace.....	16
2.4 Ohrožení železniční infrastruktury.....	20
2.5 Uplatnění vícekriteriálního rozhodování při detekci ohrožení.....	21
3 ŘEŠENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	23
3.1 Metody řešení práce	23
4 PILOTNÍ STUDIE	25
4.1 Použitá data	25
4.2 Postup zpracování	27
4.3 Výsledky	32
5 STUDIE 2	42
5.1 Použitá data	42
5.2 Postup zpracování	46
6 VÝSLEDKY	58
6.1 Výsledky parametrů vegetace pro území ČR.....	58
6.2 Výsledné váhy parametrů získané metodou AHP	65
6.3 Výsledky indexu ohrožení stromovou vegetací pro ČR – Studie 2	70
6.3.1 Stanovení kategorií ohrožení	71
6.3.2 Vyhodnocení ohrožení v jednotlivých krajích ČR	75
6.3.3 Vyhodnocení vlivu vlhkostního režimu půd.....	78
6.3.4 Vyhodnocení vlivu sklonu terénu	80
6.3.5 Vyhodnocení vlivu větrných polomů	80
6.3.6 Porovnání se skutečným stavem.....	81
7 DISKUZE	85
8 ZÁVĚR	87
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	90
PŘEHLED ČINNOSTÍ STUDENTA V PRŮBĚHU STUDIA	95

Použité zkratky

AHP	Analytický hierarchický proces
BPEJ	bonitovaná půdně-ekologická jednotka
ČR	České republika
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
CHKO	Chráněná krajinná oblast
ESA	Evropská kosmická agentura (European Space Agency)
GIS	geografický informační systém
HKK	Královéhradecký kraj
IVTIR	Improved Vegetation Threat Index on the Railway infrastructure
JHČ	Jihočeský kraj
JHM	Jihomoravský kraj
KVK	Karlovarský kraj
LBK	Liberecký kraj
MENDELU	Mendelova univerzita v Brně
MNDWI	Modification of normalized difference water index
MSK	Moravskoslezský kraj
nDSM	Normalizovaný digitální model povrchu (Normalized digital surface model)
NDVI	Normalizovaný vegetační index (Normalized difference vegetation index)
OLK	Olomoucký kraj
OSAVI	Optimized soil adjusted vegetation index
PAK	Pardubický kraj
PHA	Hlavní město Praha
PLK	Plzeňský kraj
STČ	Středočeský kraj
SŽ	Správa železnic
TUDU	traťový a definiční úsek
ÚHÚL	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
ULK	Ústecký kraj
UPOL	Univerzita Palackého v Olomouci
VTIR	Vegetation Threat Index on the Railway infrastructure
VYS	Kraj Vysočina
ZLK	Zlínský kraj

ÚVOD

V současné době dochází k zaznamenávání a uchovávání velkého množství dat, včetně dat s prostorovou lokalizací. Většina z nich však nachází uplatnění pouze pro účely, ke kterým byla pořizována. Často se tak děje pro jejich nízkou povědomost či dokonce nepřístupnost. Tím ovšem nedochází k využití jejich plného možného potenciálu. Není zajištěna maximalizace přínosu již vynaložených prostředků a zdrojů nutných k jejich pořízení. Postupně však v této oblasti dochází k pozitivnímu vývoji, kdy zejména subjekty veřejné správy státu zřizují dostupné datové sklady. Již existující zdroje tak mohou sloužit dalším studiím a být přínosné pro rozvoj státu. Problematické může být sdílení dat soukromého sektoru, kdy náklady nese pořizovatel a musí zajistit jejich úhradu.

Hlavní myšlenka této disertační práce cílí na využití nejvyššího možného potenciálu již existujících datových sad pro hodnocení vlivů na železniční dopravu. Snahou je vhodně zkombinovat informace pocházející z různých zdrojů, tedy i těch, které nebyly primárně pořizovány za účelem využití v oblasti dopravy.

Tato práce využívá vybrané datové sady pro stanovení úrovně rizikovitosti stromové vegetace nacházející se v blízkosti železniční infrastruktury. V případě nepříznivých povětrnostních podmínek představují tyto porosty ohrožení pro drážní provoz. Cílem je vhodnou kombinací několika datových zdrojů o stromové vegetaci stanovit míru ohrožení jednotlivých traťových úseků a tím umožnit zajištění opatření. Stav porostu se může velice dynamicky měnit, proto je vhodné ho sledovat dlouhodobě a zajistit pravidelnou aktualizaci dat. Sběr dat s vysokou periodicitou aktualizace může být však značně nákladný. Vhodným řešením je využití družicových snímků, které poskytují aktuální informace v pravidelných cyklech. Tato data mohou najít uplatnění zejména při posouzení nejproměnlivějšího parametru stromů a to jejich zdravotního stavu. Tento stav především ovlivňuje odolnost proti působení vnějších vlivů. Nižší prostorové rozlišení dat je kompenzováno rozsahem pokrytého území. Je tak umožněno pravidelné vyhodnocení stavu porostu nacházejícího se v blízkosti železniční infrastruktury při minimálních nákladech.

Přínos této disertační práce spočívá především ve vytvoření metodiky, kombinující různé datové zdroje pro stanovení ohrožení drážní infrastruktury. Na základě získaných informací mohou být přijata opatření vedoucí k prevenci před mimořádnými událostmi. Rovněž dochází k získání aktuálního přehledu o stavu vegetace v blízkosti této infrastruktury, který může být přínosný především pro jejího správce.

1 CÍLE PRÁCE

Hlavní cíl této práce je zaměřen na návrh metodiky k vyhodnocení rizika pro železniční infrastrukturu, které vyplývá ze stromové vegetace nacházející se v její blízkosti. Hlavní výzkumnou otázkou disertační práce je:

- *Je možné na základě dostupných dat stanovit ohrožení železniční infrastruktury přilehlou vegetací?*

Úroveň ohrožení bude stanovena na základě parametrů vegetačního pokryvu: *druhov*á skladba, výška a zdravotní stav porostu. Vyhodnocení zdravotního stavu je žádoucí provádět opakovaně a v pravidelných periodách. Díky tomu by docházelo vždy k posouzení aktuálního stavu a současně ke sledování jeho vývoje. Z tohoto důvodu je vhodné proces založit na využití družicových snímků, které představují dostupný zdroj dat pokrývající rozsáhlé území s pravidelnou aktualizací. Kvůli jejich nižšímu prostorovému rozlišení by tato data sloužila především pro získání úplného přehledu o zdravotním stavu vegetace v blízkosti infrastruktury na celém území ČR. Zjištěné problematické oblasti by v případě potřeby byly následně vyhodnoceny ve větším detailu prostřednictvím přesnějších dat a pozemního šetření. Metodika bude kvůli charakteru použitých dat cílit zejména na stanovení rizik rozsáhlejších souvislých stromových porostů.

Na základě znalosti ohrožení jednotlivých železničních úseků bude možné zavádět opatření vedoucí ke zvýšení bezpečnosti provozu. Tím by došlo ke snížení počtu mimořádných událostí a zajištění plynulosti dopravy, především v období nepříznivých povětrnostních podmínek. Současně by byly sníženy ekonomické dopady způsobené pádem dřevin na železnici.

Proces vyhodnocení bude založen na geoinformatických metodách a bude snahou ho automatizovat a snížit tak potřebu lidského zásahu. Základem bude zpracování rastrových dat, na které bude aplikována mapová algebra. Vážený součet vstupních rastrů bude sloužit pro sestavení výsledného rastru s mírou ohrožení v ochranném pásmu kolem železniční infrastruktury. Toto pásmo bude vymezeno z vektorových dat. Úrovně ohrožení v jednotlivých úsecích tratě budou posuzovány prostřednictvím prostorových analýz v geografickém informačním systému (GIS).

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Existuje řada vnějších faktorů, které negativně ovlivňují železniční provoz. Mezi ně patří například sesuvy půdy na kolejiště či jeho podemletí vodou. Negativní důsledky mají také vysoké teploty, při kterých dochází ke vzniku trhlin v kolejnici. Zejména během zimních měsíců je problematická námraza vznikající na trakčním vedení. Jejím vlivem může dojít ke zkratu a přerušení elektrických kabelů. Určité negativní dopady vybraných faktorů je možné predikovat, zajistit opatření a předejít tak škodám. Mezi ty patří například ohrožení vycházející ze stromové vegetace nacházející se v bezprostřední blízkosti tratě. Ta zejména v období nepříznivých klimatických podmínek jako je vítr nebo námraza, vytváří nebezpečí vzniku pádu stromu do kolejiště. Znalost aktuálního stavu vegetace v okolí tratí poskytuje možnost pro zavádění opatření vedoucích k prevenci nehod a zabezpečení plynulosti provozu. Problematika detekce ohrožených míst drážní infrastruktury přilehlou stromovou vegetací je u nás i ve světě minoritně zpracovávané téma. Tuto skutečnost lze pravděpodobně přisuzovat v zahraničí běžnému udržování ochranných pásem bez vysoké vegetace. V těchto místech pak riziko pádu stromu neexistuje. Česká železnice je však specifická, a to především kvůli svému historickému vývoji, vedoucímu k nejvyšší hustotě tratí v Evropě (0,12 km/km²). Celková délka je 9 377 km (SŽ, 2023). Trať často prochází nepřístupným terénem a hustým lesním porostem. V těchto místech je pak velice obtížné ochranné pásmo vytvořit a dále udržovat. Hranice ochranného pásma je dle zákona o drahách č. 266/1994 Sb., stanovena u železnice regionálního významu ve vzdálenosti 60 m od osy krajní koleje, nejméně však 30 m od hranice obvodu dráhy. Problematické jsou rovněž vlastnické poměry přilehlých pozemků v blízkosti dráhy, které komplikují možnosti údržby. Avšak úpravou legislativy dochází k postupnému zlepšení situace.

2.1 Druhovú skladbu stromového porostu

Druhovú skladba lesního porostu výrazně ovlivňuje jeho odolnost vůči mimořádným atmosférickým jevům, jako je například silný vítr, námraza, či intenzivní sněžení. Stanovení ideální skladby je velice obtížný proces, který je navíc významně ovlivňován ekonomickým přínosem těžby dřeva. Především kvůli tomu docházelo v minulosti k intenzivní výsadbě smrčiny i v pro ni nevyhovujících podmínkách. Odolnost takových porostů lze hodnotit jako nízkou. Pokud však dojde k zajištění dobrých růstových podmínek, může dojít k jejímu výraznému nárůstu (Bednář, 2012). Analýzu smrkových porostů provedl Vicena během polomové kalamity na Šumavě v roce 1955 (Vicena, 2006). Ve stejnorodých smrčinách vznikl polom o objemu 42 m³/ha. Zatímco ve smíšeném lese v zastoupení buku, jedle a smrku byl polom vyšší

a to 48 m³/ha. Po zkoumání příčiny bylo zjištěno, že buk významně zvýšil úrodnost půdy, která ve výsledku zapříčinila větší porostní výšku a šířku smrků. Tyto stromy tak čelily většímu náporu větru a tomu neodolaly.

Další průzkum byl zaměřen na námrazové polomy v Českomoravské vrchovině a Orlických horách mezi lety 1995 a 1996. U smíšeného porostu smrku a jedle byl zaznamenán polom vyšší až o 79 % než u čisté smrčiny. Tuto skutečnost lze přisuzovat mechanicko-fyzikálním vlastnostem jedlového dřeva, které vykazuje nižší pevnost v tlaku a tahu o 7 %, ohybu 9 % a smyku dokonce o 24 % než u smrkového dřeva.

Specifickou porostní skupinou jsou borovice. Mladé stromy vykazují nižší odolnost než dospělé, avšak ty ve srovnání se smrčinou bývají poškozeny až o 70 % méně. Vyšší odolnost je charakteristická také pro modřín, který i v částečném zastoupení v lesním porostu vykazuje zpevňující vlastnosti a zvyšuje jeho celkovou odolnost. Při statistickém šetření po hurikánu v Brdech v roce 1990 byl zaznamenán vznik polomových škod v lesním porostu s výskytem modřínu až o 46 % nižší než v čisté smrčině. Na základě historických průzkumů bylo také doloženo, že se jedná o dřevinu na našem území původní. Dalším významným druhem je buk. Ten vykazuje zpevňující funkci při větrných, námrazových i sněhových polomech. Je však nutné, aby nebyl dřevinou podúrovňovou, a jeho zastoupení nesmí být nižší než 40 % (Vicena, 2006).

Při pravidelném pozorování lesa s převládající smrkovou kulturou na území Litvy bylo zjištěno, že mladší stromy s průměrem kmenu do 25 cm vykazují během 5letého období poškození větrem přibližně 5 %. U stromů s průměrem větším dochází k postupnému nárůstu rizika škod. To je možné přisuzovat snižující se pružnosti dřeva (Snepsts et al., 2020).

Proces identifikace lesní druhové skladby je možné založit na využití družicových snímků. Základem je posouzení spektrálních křivek odrazivosti v jednotlivých pásmech satelitních dat. Dřevinné druhy jsou charakteristické svým specifickým spektrálním projevem, prostřednictvím něhož je možné je vzájemně rozlišit. Pro klasifikaci existuje řada algoritmů, které však poskytují rozdílnou kvalitu vymezení jednotlivých dřevinných druhů. Proto je při jejich výběru nutné zohlednit zdroj dat a účel vyhodnocení.

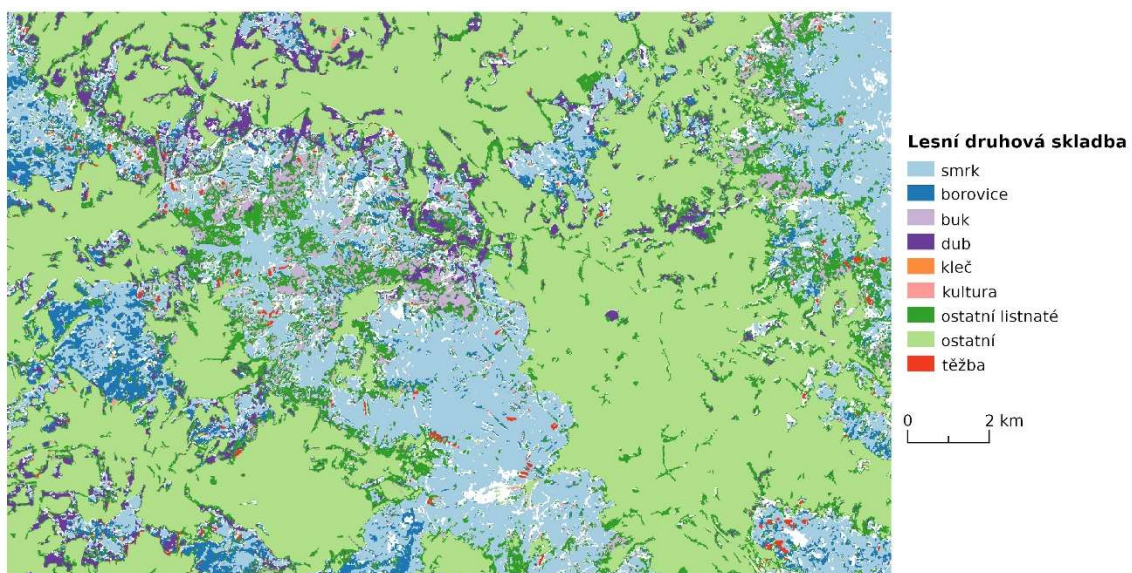
Příkladem je studie porostu na území Polska, kterou provedla Glowienka a Zembol (Glowienka & Zembol, 2022). Jako zdroj dat byly využity satelitní snímky CHRIS/PROBA a Sentinel-2. Cílem bylo rozlišit kultury borovice (*BO*), břízy (*BŘ*) a olše (*OL*). První zmíněný zdroj dat dosáhl nejlepšího výsledku s algoritmem Support Vector Machine s celkovou přesností 72 % (*BO* 96 %, *BŘ* 54 %, *OL* 48 %). Cohenův koeficient kappa, který vypovídá o míře shody kategorizovaných proměnných s identickými kategoriemi, nabyl hodnoty 0,6. K dokonalé shodě dochází při dosažení

hodnoty 1 (Warrens, 2011). U dat Sentinel-2 došlo k nejlepším výsledkům při využití metody Mixture Tuned Matched Filtering, kdy celková přesnost byla 82 % (BO 93 %, BŘ 85 %, OL 60 %) a koeficient kappa 0,7. Na základě výsledků je zřejmé, že přesnější lokalizaci než zbývající dvě listnaté dřeviny vykazovala borovice. Příčinou mohlo být podobné spektrální chování břízy a olše.

Výhodou využití družicových snímků je možnost vyhodnotit rozsáhlá území, včetně míst obtížně dostupných či dokonce nepřístupných. Mapováním lesních druhů na území Norska z dat Sentinel-2 se zabýval Breidenbach a kol. (Breidenbach et al., 2021). Došlo k analýze více než 122 tis. km² lesních ploch, na kterých byly rozlišeny dominantní dřevinné typy. Pro zvýšení přesnosti bylo použito větší množství trénovacích ploch (22 tis.), ze kterých bylo odvozeno spektrální chování jednotlivých dřevin. Celková přesnost jejich vymezení dosáhla úrovně 90 %.

Pro posouzení správnosti vymezení dřevinných typů je možné výsledky porovnat s informacemi získanými z pozemního šetření. Například při klasifikaci lesních segmentů v Belgii (Bolgen et al., 2022) bylo provedeno srovnání s evidencí více než 4 tis. ploch, na kterých probíhala výsadba nových dřevin a byla tak známa jejich skladba. Dle zjištění je pak možné upravit proces klasifikace a dosáhnout přesnějších výsledků.

Data o lesní druhové skladbě na území ČR vytváří a spravuje Ústav pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL). Kategorie lesní druhové skladby a ukázka zobrazení těchto dat je na obrázku 1.



Obr. 1 Ukázka dat druhové skladby (ÚHÚL, 2018a)

Míru rizika vzniku polomů však není možné určit pouze na základě druhové skladby porostu. Je nutné provést posouzení dalších porostních charakteristik, kterými jsou například výška, tloušťka, věk, rozloha a další. Současně musí dojít k analýze parametrů terénu, zejména jeho expozice a orografie.

Tavankar a kol. (Tavankar et al., 2019) provedl analýzu míry poškození horského lesa sněhovou pokrývkou na území 140 ha v jižním Iránu. Toto území bylo rozděleno na menší celky o rozloze 100 m² a v nich následně došlo k vyhodnocení vybraného reprezentativního vzorku porostu. Míra poškození byla klasifikována do kategorií: *strom ohnutý*, *strom zlomený*, *strom vyvrácený* a *poškozená koruna*. Výsledky práce identifikují vyšší zaznamenanou míru poškození korelující se vzrůstající nadmořskou výškou, kdy poškození v úrovni 1250 m n. m. dosahuje hodnoty o více než 30 % vyšší než v 800 m n. m. Rovněž vyšší je ve strmějších svazích a v oblastech s nižší hloubkou půdy. Orientace svahu se projevila v severovýchodním a jihovýchodním směru téměř polovičními škodami ve srovnání s jihozápadním a severozápadním. Významným kritériem je i výška stromu, kdy od hodnoty 15 m dochází k významnému nárůstu identifikovaných škod. U porostu vyššího než 20 m je poškození více než trojnásobné ve srovnání s vegetací do 10 m. Na vyhodnocovaném území převládala listnatá porostní kultura. Mezi dominantní patřil buk východní (celkové poškození 14,3 %), habr obecný (17,4 %), javor sametový (18,7 %), javor kapadocký (23,6 %), olše kavkazská (36 %) a dub kaštanolistý (29,5 %).

Za další významné kritérium je možné považovat celistvost porostu. Bylo zjištěno, že mezery zapříčiňují významný nárůst ohrožení z důvodu narušení větrného proudění. U mezer rozsáhlejších než 0,2 ha dochází až k 2,5násobnému nárůstu ohrožení (Vicena, 2006).

Analýza této problematiky byla předmětem práce Cheng a kol. (Cheng et al., 2020). Primární cíl nebyl kladen na hodnocení odolnosti vegetace, ale na její potenciál pro zpomalení větrného proudění. Kromě vzdálenosti mezi stromy bylo posouzeno i jejich prostorové rozmístění. Jako méně efektivní bylo identifikováno pravidelné umístění v řádcích a jako vhodnější shledáno náhodné. To vede k eliminaci dlouhých areálů, v nichž vítr nemá bariéry a nedochází tak k jeho narušování a zpomalování. Při posouzení vlivu vzdálenosti mezi stromy bylo zjištěno, že je vhodné zajistit hustější skladbu porostu. Rozestup 0,4 m mezi stromy vykazoval téměř trojnásobnou schopnost zpomalení větru vůči 1,2 m. Podobný dopad vykazoval i parametr počtu řad v porostním segmentu, kdy 5 řad zajistilo trojnásobné zpomalení větru ve srovnání s jednou linií.

Pro detekci přilehlé stromové vegetace k dopravní infrastruktuře se jeví jako velice vhodná metoda analýzy lidarových dat, která jsou pořízena zařízením připevněným na dopravním prostředku. Tímto postupem je možné provádět pravidelné aktualizace

stavu jejího okolí, včetně vyhodnocení rizikovosti porostu. Novo a kol. (Novo et al., 2019) tuto metodu aplikoval na území Španělska s cílem identifikace ohrožených komunikací při vzniku požáru blízké vegetace. Porostní segmenty byly rozděleny do skupin na základě jejich výšky a vzdálenosti od infrastruktury. Ve výsledku byly vizualizovány a barevně rozlišeny podle úrovně představovaného rizika.

Kromě snadné identifikace oblastí s výskytem vzrostlých stromů v blízkosti infrastruktury nabízejí lidarová data vysoký potenciál pro další využití v detailnějších geoinformatických analýzách. Velkou výhodou oproti družicovým snímkům je možnost detekce i samostatně rostoucích stromů, které mohou díky své nechráněné poloze představovat vyšší riziko než hustý les.

Na základě leteckých měřičských snímků vytváří ÚHÚL prostorovou vrstvu s informací o výšce lesního porostu na území ČR. Vizualizace dat s vymezenými kategoriemi je na obrázku 2.



Obr. 2 Ukázka dat výšky vegetace (ÚHÚL, 2018d)

Na přilehlou vegetaci však není možné nahlížet pouze jako na negativní prvek. Její přítomnost může mít pozitivní vliv na omezení míry eroze půdy, kdy svah s 50% pokryvem vegetací může vykazovat až dvojnásobnou odolnost proti sesuvu půdy (McEachran et al., 2018). Tato skutečnost může být výhodná především v oblastech s velkým sklonem svahu. Rovněž vzrostlé stromy zajišťují zastínění vlakových jednotek a zvyšují tak komfort cestování. S postupnou modernizací vozového parku a nasazováním klimatizovaných jednotek však tento přínos částečně pozbývá na významu.

Vegetace může také poskytovat ochranu okolí vůči exhalacím a především hlukovému znečištění z vlakové dopravy. Tento projev může být důležitý zejména v místech, ve kterých trať prochází sídelními strukturami. Stromová bariéra může zajistit významný útlum hluku, jehož míra je závislá na množství, vzrůstu a uspořádání dřevin. Pozitivní vliv má i větší velikost listů a hustota olistění, kterou je možné vyhodnotit například prostřednictvím NDVI indexu (Schäffer et al., 2020). Důležitým faktorem je také druh vegetace, například měkké dřeviny vykazují vyšší útlum hluku než tvrdé (Hosseini et al., 2016).

2.2 Zdravotní stav porostu

Dobrý zdravotní stav lesního porostu výrazně zvyšuje jeho odolnost proti intenzivním větrům. Zdravé dřevo je schopno odolávat rychlosti větru až do úrovně orkánu 30 m/s. Pokud však dochází k jeho hnilobě, tak zároveň klesá i jeho pevnost. U tvrdé hniloby se pohybuje oslabení na úrovni 20 %, měkká hniloba může zapříčinit pokles pevnosti o 40 až 100 %. Zdravotní stav je v současnosti ovlivňován především nízkým úhrnem srážek, který vede ke snížení odolnosti proti napadení škodlivými organismy. Zdraví vegetace je výsledkem několika fyzických faktorů. Mezi nejvýznamnější lze zařadit množství slunečního záření, které je potřebné pro fotosyntézu. Množství dopadajícího světla pak přímo působí na množství vytvořené biomasy. Tento parametr je současně ovlivněn i hustotou vegetace, kdy může docházet k vzájemnému zastínění.

Dalším faktorem je množství srážek, jejichž nedostatek způsobuje tzv. vodní stres. Na tento negativní jev významně působí také kvalita zeminy, která může absorbovat a zadržet velké množství srážek. Ty následně mohou v období sucha potřebnou vláhu rostlinám dodávat a zajistit tak jejich přežití (Chase et al., 2016).

Dle odborného názoru Ing. Pavla SAMCE Ph.D. může vést vysoká vlhkost půdy a pravidelný přísun srážek ke snížení odolnosti stromového porostu. Snížená odolnost je způsobena jejich mělkým kořenovým systémem, kdy dostatek vláhy nenutí stromy kořenit tak hluboko. Také nadbytek vody v půdě ztěžuje pronikání vzduchu ke kořenům stromů a to způsobuje jejich odumírání (ÚKZÚZ, 2024).

Na základě významných fyzikálních a chemických vlastností půdy lesních stanovišť, dochází k vymezení tzv. edafických kategorií. Prostřednictvím nich je možné identifikovat pro vybranou lokalitu vhodný stromový druh, u kterého je předpoklad, že v ní bude prospívat. Umístění do neodpovídající edafické kategorie může být příčinou chřadnutí až úhynu porostu (Viewegh, 2012).

Zmíněné kategorie jsou součástí hlavní disciplíny pro hospodářskou úpravu lesů, která se označuje jako lesnická typologie. Jejím cílem je popis vztahu vegetace k fyzikálně-geografickým, geologicko-pedologickým a klimatickým prvkům. Získané

informace mohou následně sloužit pro zajištění hospodářských opatření nebo provozních a produkčních cílů. Na základě výstupů z lesnické typologie dochází ke zhodnocení funkcí lesních ekosystémů a vytváření plánů péče (Zouhar & Holuša, 2012).

Důležitým atributem je také teplota, protože každá rostlina vyžaduje pro optimální růst její specifický rozsah. V současnosti dochází ke zvyšování průměrných teplot, které vedou ke chřadnutí rostlinných druhů v místech, kde dříve měly ideální podmínky. Některé druhy vegetace se tomuto vývoji přizpůsobují a přesouvají se do vyšších nadmořských výšek.

Klimatické změny však nemusí mít pouze negativní dopady. Na základě studií bylo zjištěno, že vyšší koncentrace CO₂ v ovzduší, současně s teplými zimami, mají pro některé druhy rostlin kladný efekt. Nicméně se zvyšující se teplotou zároveň dochází k nárůstu množství možných škůdců, ti pak mohou zdraví rostlin ohrozit (Loehle et al., 2016).

Významně ovlivněná lidskou činností je kvalita ovzduší, jež především v průmyslových oblastech obsahuje sloučeniny poškozující floru. Mezi nejvýznamnější znečišťovatele patří zejména síra, která způsobuje kyselé deště (Chase et al., 2016).

2.3 Využití dálkového průzkumu Země pro zjištění stavu vegetace

Pro stanovení zdravotního stavu porostu lze využít družicových snímků zemského povrchu. Ty slouží jako vstupní data pro výpočet vegetačních indexů. Indexy jsou založeny na spektrálním chování vegetace, pro kterou je typický výrazný pokles odrazivosti ve vlnových délkách blízkých infračervenému záření. Tento projev je způsoben především chlorofylem. Kromě toho dochází k ovlivnění buněčnou strukturou rostlin, která je u jednotlivých druhových skupin odlišná. Díky tomu je možné jejich vzájemné rozlišení. Spektrální chování se v průběhu vegetačního období mění a může být výrazně ovlivněno zdravotním stavem.

Mezi nejpoužívanější indexy patří *normalizovaný diferenční vegetační index* (NDVI - *Normalized difference vegetation index*), který stanovuje normalizovaný poměr odrazivosti povrchu v červené části spektra-RED (600-700 nm) a blízké infračervené-NIR (700-900 nm) (vzorec 1). Na základě této informace je možné určit množství biomasy nacházející se v jednotlivých pixelech snímku.

Při dlouhodobém sledování území umožňuje vegetační index identifikovat procesy v porostu, které odráží dopady klimatických změn a proměnlivosti srážkového úhrnu. Hodnoty indexu mohou nabývat rozsahu <-1:1>, vegetace se nachází v intervalu <0,1:1>. Území blízké 0, plochy bez vegetace, mají obdobnou odrazivost v červené části spektra a blízké infračervené. Naopak oblasti blízké hodnotě 1 se vyznačují

vysokým množstvím biomasy. Mnoho vědeckých prací se zaměřuje na využití NDVI indexu pro vyhodnocení dopadu změn ve srážkovém úhrnu, který přímo ovlivňuje kondici rostlin. Kromě jeho meziročního srovnání je možné sledovat i sezónní výkyvy. Ty mohou mít prediktivní charakter pro budoucí vývoj.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NDVI – normalizovaný vegetační index

NIR – hodnota odrazivosti v oblasti blízkého infračerveného záření

RED – hodnota odrazivosti v oblasti červeného záření

Vzorec 1 Vzorec pro výpočet NDVI indexu

Při analýze míry korelace mezi indexem NDVI a srážkovým úhrnem byla zjištěna průměrná hodnota 0,6. Ta byla stanovena na základě sledování množství srážek na území Číny v časovém horizontu 16 let. Nejnižší podobnost byla zaznamenána v letech podprůměrných srážek. To lze přisuzovat schopnosti rostlin se na takové období adaptovat a díky tomu ho překlenout (Kundu et al., 2018).

Mírou vhodnosti využití NDVI indexu ve srovnání s jinými vegetačními indexy se zabývali ve své práci Aklilu a Gessesse (Aklilu Tesfaye & Gessesse Awoke, 2021). Ti provedli jejich výpočet na datech družice Sentinel-2. Následně porovnávali jejich vývoj během roku s indexem listové plochy. Ve své práci zmiňují nevýhodu indexu NDVI, který při maximálních hodnotách vykazuje mírné kolísání. Tento projev přisuzují skutečnosti, kdy listy absorbují maximální množství červeného záření, ale jejich struktura částečně rozptyluje do okolí blízké infračervené záření. To může ve výsledku vést k podhodnocení vegetace. V závěru práce však konstatují, že determinanční koeficient dosahuje hodnoty 0,98 a vyjadřuje tedy velmi silnou závislost mezi NDVI a indexem listové plochy.

Goodarzi a kol. (Goodarzi et al., 2019) provedl vyhodnocení 11 vegetačních indexů vybraného lesního území v období 2005 až 2016. Cílem bylo identifikovat korelaci na základě Cohenova kappa koeficientu mezi hodnotami indexů, vývojem průměrného srážkového úhrnu a teploty. Nejvyšší podobnost se změnami srážek byla zaznamenána u OSAVI (*Optimized soil adjusted vegetation index*) indexu, kdy korelace dosahovala 80 %. Teplota pak měla nejvyšší podobnost s indexem MNDWI (*Modification of normalized difference water index*) s korelací 75 %.

Pro objektivnější vyhodnocení stavu vegetace je nutné pracovat s daty za delší časové období. To umožňuje identifikovat proces chřadnutí, stagnace či příznivého vývoje porostu.

Pro zajištění korektního výsledku je vhodné v každém roce využít několik období, ve kterých bylo území nasnímováno. Pokud by došlo k vyhodnocení dat pouze z jedné časové periody, mohlo by dojít k ovlivnění výsledku působením abnormálního stavu podnebí. To může vést k urychlení či zpomalení vegetačních fází (Wittke et al., 2019).

V případě výpočtu vegetačního indexu s použitím družicových snímků, je možné stanovit zdravotní stav i v obtížně dostupných či dokonce nepřístupných oblastech. Nevýhodou těchto dat může být jejich nižší prostorové rozlišení. V takovém případě je lze použít pro obecné posouzení rozsáhlého území a problematické oblasti následně nasnímovat detailněji prostřednictvím dronu či letadla (Dobrovolný et al., 2001).

Ukázka vyhodnocení meziročního vývoje indexu NDVI na základě satelitních dat Sentinel-2 (ESA, 2022) je na obrázku 3.



Obr. 3 Ukázka vyhodnocení meziroční změny NDVI indexu pro stanovení zdravotního stavu vegetace (vlastní zpracování)

Vegetační index je možné rovněž využít pro detekci polomů způsobených mimořádnými událostmi prostřednictvím vyhodnocení dvou blízkých období. Na základě jejich srovnání lze identifikovat významné odlišnosti, které mohou vypovídat o rozsahu poškození. Tento zdroj tak může rychle poskytnout data pro analýzu rozsáhlých území (Cortés-Ramos et al., 2020). Vegetační index může být také uplatněn pro monitorování změny rozlohy lesních segmentů a detekci těžby (Bid, 2016).

Pro stanovení vegetačního indexu je možné využívat data, jež zachycují odrazivost v červeném a infračerveném spektru. Pro rozsáhlá území se nabízí jako nejvhodnější

nosič umístěný na družici, který je schopen v pravidelných intervalech snímat rozsáhlá území. Nevýhodou takto pořízených dat je nižší prostorové rozlišení a kvalita snímků závisající na stavu oblačnosti.

V současnosti volně dostupný zdroj kvalitních dat pochází z programu Evropské kosmické agentury Sentinel-2. Ten byl zahájen v roce 2015 a v současnosti zahrnuje dvě družice, které snímají zemský povrch v periodicitě 5 dní, ve 13 částech spektrálního pásma. Prostorové rozlišení nasnímaného území je 10 m, respektive 20 m, dle kanálu. Při použití těchto dat je nutné provádět korekce oblačnosti a stínů, které se na zemském povrchu vytváří. Pokud by nebyly odstraněny, došlo by k významné degradaci výsledků (Nazarova et al., 2020).

Nedostatek bezoblačných dat pro vyhodnocované území lze řešit kombinací více různých zdrojů. Je však nutné mezi nimi stanovit převodní vztah pomocí transformačních rovnic. To je potřebné především z důvodu odlišného nastavení a přesnosti senzorů. Například snímky družice Landsat vykazovaly s čínským systémem Huang-Jing 1 korelaci 0,9 (Hengkai et al., 2020).

Analýzou časových řad vegetačních indexů je možné identifikovat také devastaci porostu. Může docházet k posouzení dopadů lidské činnosti na krajinu, například povrchovým dolováním nerostů, těžbou dřeva, výstavbou sídel a dalších. Pro tyto potřeby je možné uplatnit řízenou klasifikaci, při které se vytvoří trénovací plochy v oblastech zdravé vegetace a devastované. Je možné odhalit rozsah poškození a po ukončení destruktivních procesů lze využít tyto metody i pro sledování pozvolné obnovy vegetace (Hengkai et al., 2020).

Data ze systému Sentinel-2 využívá v současnosti pro hodnocení stavu vegetace i Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, který je národní správce lesnictví a myslivosti. Metodika je založena na porovnání družicových dat s pozemním šetřením, které zahrnuje stanovení indexu listové plochy prostřednictvím hemisférických fotografií. Prostorové rozlišení snímků satelitu 20 m na pixel (pixel pokrývá plochu 0,04 ha) je pro sledování stavu lesního porostu vhodné z důvodu průměrné plochy lesní jednotky na území ČR 0,5 ha. Je však nutné provádět vyhodnocení stavu v odpovídajících fenologických fázích. Rovněž spektrální rozlišení ve viditelném a infračerveném spektru odráží stav klíčových atributů vegetace, kterými jsou listová biomasa, množství chlorofylu a vody v pletivech (Lukeš et al., 2018).

Detailní nasnímkování území Šumavy pomocí dronu s cílem posouzení zdraví dřevin provedl Minařík a Langhammer (Minařík & Langhammer, 2016). Dron byl osazen multispektrálními senzory, které zachytily reflektanci povrchu v jednotlivých pásmech. Pro stanovení zdraví porostu bylo využito několika vegetačních indexů. Jejich hodnoty pak byly rozděleny do intervalů, které reflektovaly zdravou, mrtvou a regenerující se vegetaci. Výsledky pak byly porovnány se skutečným stavem.

Nejoptimálnější charakteristiku pro identifikaci jednotlivých tříd vykazoval index NDVI.

Automatickou analýzou snímků s cílem odhalení změn se zabýval Chen a kol. (Chen et al., 2020). Jejich systém využívá pokročilé metody neuronové sítě a sémantickou segmentaci. Pomocí těchto metod zjišťuje významné změny ve využití krajiny. Mezi příklady lze zařadit odhalení černých staveb, kontrolu vodních ploch či identifikaci přírodních katastrof. Mechanismus neporovnává pouze změny jednotlivých pixelů, ale snaží se posoudit také jejich vztahy se sousedy. Díky tomu dochází ke zpřesnění výsledků a snížení chybovosti.

2.4 Ohrožení železniční infrastruktury

Železniční infrastruktura a provoz na ní jsou ohroženy mnoha vnějšími vlivy (např. stromy, zvěř, skálami, sesuvy půdy atd.). Ochranu před nimi může poskytnout kvalitně udržované ochranné pásmo. Zároveň je možné identifikovat rizikové úseky a na nich provést opatření, která sníží míru ohrožení jednotlivými vlivy.

Lokalizací traťových úseků české železnice, na kterých dochází k častým kolizím s divokou zvěří, se zabýval Nezval a Bíl (Nezval & Bíl, 2020). Výskyt mimořádných událostí na železnici byl hodnocen v kontextu využití daného území (les, louka, pole, sídlo). Na základě toho bylo zjištěno, že nehodovost významně narůstá v blízkosti lesa, naopak nejnižší je v místech sídelních jednotek. Tento fakt vypovídá o tom, že tratě procházející lesy jsou potenciálně ohroženy pády stromů a rovněž střety s divokou zvěří.

Obdobným způsobem došlo k posouzení rizikovosti stromové vegetace v blízkosti traťových úseků. To bylo provedeno na základě záznamů o mimořádných událostech způsobených pádem stromu z let 2012 až 2015 a využití daného území (les, louka, pole, sídlo). Na základě četnosti mimořádností byla určena míra ohrožení na jednotlivých úsecích železniční sítě. Vysoké riziko bylo zjištěno na 2 % traťových úseků v ČR (Bíl et al., 2017).

Rizikovost vegetace je nutné vyhodnocovat pravidelně, aby došlo vždy k posouzení aktuálního stavu, který může být v čase výrazně proměnlivý. Hoerbinger a kol. (Hoerbinger et al., 2020) analyzoval ohrožení vegetací na vybraném úseku železniční trati v Rakousku mezi roky 2012 a 2017. Jeho úroveň byla stanovena na základě výšky porostu a sklonu svahu. Změna míry ohrožení během sledovaného období byla na některých místech i o více než 20 %, z důvodu proměny struktury a složení porostních segmentů.

2.5 Uplatnění vícekriteriálního rozhodování při detekci ohrožení

Vliv jednotlivých příčin a posouzení jejich dopadů je možné vyhodnotit dvěma způsoby. První je založen na využití deduktivní logiky, kdy na základě předpokladů dochází k vyvození závěru. Ke korektnímu posouzení je nutné využít představitosti a nabyté zkušenosti. Lze také čerpat poznatky z literatury a vědeckých zpráv. Při uplatnění této hodnotící varianty může dojít k získání více závěrů, které je pak nutné spojit koherentním způsobem do jediného výsledku. Další způsob vyžaduje spojení zvažovaných faktorů do síťového či hierarchického systému, ve kterém je nutné posoudit jejich vzájemné závislosti. Stanovení jednotlivých vlivů v těchto strukturách je provedeno na základě úsudků a logiky. Na jejich základě pak dochází k vyvození konečného výsledku. Obě metody v sobě zahrnují riziko chybného vyhodnocení, protože předpoklady a odůvodnění mohou být nesprávná.

Rozhodovací proces nachází uplatnění zejména v problémech, kdy existuje více možných metod řešení. Cílem vícekriteriálního vyhodnocení je nalezení optimálního stavu vůči více uvažovaným kritériím. Samotný proces zahrnuje několik kroků:

- 1) formulace a stanovení cílů vyhodnocení problému
- 2) stanovení rozhodovacích kritérií
- 3) sestavení možných řešení problému
- 4) posouzení dopadů jednotlivých řešení s využitím rozhodovacích kritérií
- 5) identifikace změny dopadů při působení odlišných vnějších podmínek
- 6) výběr nejvhodnějšího řešení problému

Vícekriteriální rozhodovací proces obsahuje několik prvků, mezi ty patří:

- *cíl rozhodování* – měl by být dosažen při využití stanovené varianty řešení. Ve složitých procesech je možné ho rozdělit na několik dílčích řešení, které mohou zjednodušit proces porozumění dané problematice a přispět tak ke správnosti výsledku.
- *subjekt rozhodování* – zahrnuje jednotlivce nebo skupinu, která rozhoduje.
- *objekt rozhodování* – zahrnuje systém, v němž je formulován řešený problém, cíl, kritéria a varianty rozhodování.
- *kritéria* – může se jednat o měřitelné veličiny (fyzikální, technické či jiné vlastnosti) nebo zcela subjektivní vlastnosti (vzhled, vůně a jiné). V případě, že závisí na vůli jednotlivce, je možné je označovat jako charakteristiku, v opačném případě se jedná o atributy. Obecně je možné kritérium specifikovat jako hodnotící hledisko, které je bráno v potaz během procesu rozhodování. Pro vyřešení komplexního problému je vhodné sestavit celý soubor dílčích

kritérií, která jsou vyhodnoceny samostatně. Na základě získaných informací je následně možné vyvodit konečné řešení celého problému (Ramík, 1999).

Dopady sestavených variant řešení problému mohou být jednoznačné nebo závislé na stavech okolního prostředí. Rovněž je možné zahrnout do vyhodnocení nahodilé faktory, které mají dopad na posuzovanou situaci.

Způsobem, jak analyzovat složité komplexní systémy a lépe jim porozumět je analytický hierarchický model (AHP). Jedná se o rozšíření či zobecnění vícekritériálního rozhodovacího systému. AHP pomáhá při rozhodování tím, že poskytuje organizovaný rámec, který umožňuje identifikaci vzájemných interakcí mezi faktory. Zároveň však zachovává možnost jednoduchých úvah. Lze ho tedy charakterizovat jako způsob rozkladu nestrukturovaných situací na jednotlivé komponenty do hierarchického systému. V tomto systému je jednotlivým komponentům přiřazena číselná hodnota, která odpovídá jejich relativní významnosti. Ve výsledku dojde ke stanovení nejdůležitějšího komponentu, který je posuzován s cílem získání řešení problému.

V procesu hledání výsledku kombinuje jak induktivní přístup, který chápe funkci systému jako jeden celek, tak současně deduktivní, který je specifický rozkladem na prvky a definováním vztahů mezi nimi. Dochází tak k posouzení fungování jednotlivých částí a dílčí zjištění se dále syntetizují na řešení celého systému. Nevýhodou tohoto postupu je ignorace zpětných vazeb mezi obsaženými prvky.

Kombinací obou těchto přístupů se naskýtá možnost lepšího pochopení složitých problémů. Nejprve dochází k uspořádání systému a jeho okolí do provázaných vazeb, na které pak navazuje proces měření. Ze získaných výsledků je pak odvozen vliv komponentů na fungování celého systému.

Uplatnění metody AHP pro identifikaci ohrožení železnice přilehlým porostem spočívá zejména ve stanovení míry vlivu jeho jednotlivých parametrů, na jejichž základě dochází ke stanovení celkového rizika. Úroveň jejich významnosti je možné upravit na základě šetření mezi subjekty s odbornými znalostmi v oboru lesnictví, dendrologie a dálkového průzkumu Země. Ve výsledném ohrožení, které porostní segmenty pro železnici představují, tak dojde k zakomponování odborného názoru, který může významně přispět ke zpřesnění výsledku.

3 ŘEŠENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce analyzuje ohrožení železniční tratě stromovou vegetací pomocí geoinformatických metod a metod dálkového průzkumu Země. Pro zpracování jsou použity metody vícedimenzionální analýzy dat.

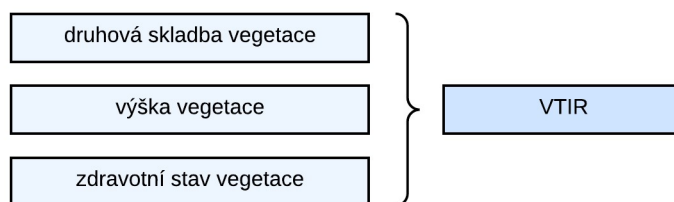
3.1 Metody řešení práce

Hlavní úkol spočívá ve vytvoření metodiky pro stanovení míry ohrožení železnice přilehlou stromovou vegetací. Na základě posouzení několika vybraných parametrů porostu, bude stanoveno riziko, které představuje. Výběr parametrů bude proveden na základě odborné literatury a názorů odborníků. Budou vybrány ty, které mají významný vliv na vznik nebezpečí. Mezi ně se řadí *zdravotní stav vegetace*. Jeho určení bude založeno na vyhodnocení vegetačního indexu z družicových snímků Sentinel-2. Tento zdroj dat byl vybrán pro častou periodicitu snímkování a dostupnost. Nižší prostorové rozlišení se nejeví jako problematické, protože cílem je pravidelné hodnocení zdravotního stavu vegetace na území České republiky. Metodika primárně necílí na identifikaci rizik samostatně stojících stromů, pro kterou by muselo být užito prostorově detailnějších datových zdrojů.

Snímky byly nejprve předzpracovány ve smyslu aplikace atmosférických korekcí a zároveň došlo k odstranění pixelů zasažených vysokou oblačností. V dalším kroku byly použity pro výpočet vegetačního indexu NDVI (*Normalized difference vegetation index*). Ten byl stanoven pro vybraná období (květen, červen, září) po sobě následujících roků. Volba byla přizpůsobena počtu dostupných bezoblačných expozic. Následně došlo k porovnání shodných období v jednotlivých letech a byla tak zjištěna meziroční změna hodnoty indexu. Hodnota indexu závisí na množství chlorofylu ve vegetaci, tato znalost může být následně využita k určení zdravotního stavu. V případě, že dochází k výraznému poklesu hodnoty indexu, je možné předpokládat negativní vývoj zdravotního stavu porostu. Během vyhodnocení je nutné zohlednit vegetační dobu porostu, ve které se nachází v době pořízení snímků.

Zdravotní stav stromové vegetace byl doplněn o další zdroje, které porost charakterizují. Konkrétně se jednalo o *výšku porostu a typ druhové skladby*. Cílem bylo stanovit objektivnější rizikovost porostu založenou na více jeho parametrech. Data o výšce porostu a druhové skladbě byla zapůjčena pro účely disertační práce z Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL). Hodnoty jednotlivých vstupních rastrových dat byly převedeny do formy vážených hodnot. Stanovené váhy odpovídají předpokládané míře ohrožení vyplývající z dané vlastnosti a její úrovně. Vhodnou kombinací všech vstupních parametrů došlo k výpočtu indexu VTIR (*Vegetation Threat Index on the Railway infrastructure*), který vyjadřuje předpokládanou míru ohrožení

železnice přilehlou vegetací (obr. 4). Způsob výpočtu indexu VTIR je vlastním návrhem autora disertační práce M. KUČERY.



Obr. 4 Použitá data pro výpočet míry ohrožení železnice přilehlou vegetací (VTIR)

Metodika byla aplikována jako pilotní studie na území Libereckého kraje, kde se nachází větší počet železničních úseků procházejících lesním porostem. Celé území České republiky nebylo v první fázi vyhodnoceno z důvodu vysoké výpočetní náročnosti. Důležité je zejména ověření správnosti navrženého postupu a zvolených hodnot vah vstupních parametrů na vybraném testovacím území. Metodika by v případě potřeby mohla být rozšířena o další datové zdroje pro zpřesnění výsledku, např. sklon reliéfu, orientace terénu, srážkový úhrn a další.

Využití metodiky na území Liberecké kraje bylo publikováno v článku:

KUČERA, M., DOBEŠOVÁ, Z. *Analysis of the Degree of Threat to Railway Infrastructure by Falling Tree Vegetation*, MDPI-Basel, ISPRS Int. J. Geo-Inf. Switzerland, 2021, 10 (292), 24 p. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050292>, Special Issue GIS in Sustainable Transportation, SCOPUS, WoS, IF 2,239

Metodika byla prezentována také na dvou konferencích:

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z., *Využití QGIS pro zpracování dat míry ohrožení železnice*, Žilina: OSSCONF 2019.

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z., *Železniční trať a hodnocení lesní vegetace*, Praha: GIS Esri 2019.

Výsledkem pilotní části byl především návrh prvotní metodiky pro stanovení míry ohrožení železnice přilehlou stromovou vegetací.

Následně byla metodika upravena zejména ve smyslu změny hodnot vstupních vah parametrů, podle názoru expertů prostřednictvím aplikace metody AHP. Podle upraveného postupu byla následně spočítána míra ohrožení v ochranném pásmu železnice na celém území České republiky. Vypočítaná velikost ohrožení byla vyjádřena indexem IVTIR (*Improved Vegetation Threat Index on the Railway infrastructure*). Mírná úprava názvu indexu slouží především k jednoznačnému odlišení výsledků stanovených první pilotní studií a druhou studií pro celé území ČR.

4 PILOTNÍ STUDIE

Pilotní studie identifikuje rizikovost vegetace nacházející se v ochranném pásmu železnice na území Libereckého kraje. Primární cíl této části spočívá především v sestavení metodiky využívající existující postupy a datové sady vhodné pro tento účel. Důraz byl kladen zejména na nalezení řešení založeném na volně dostupných softwarech a datech. To umožní široké uplatnění navrženého postupu. Menší rozsah posuzovaného území byl zvolen záměrně, pro dosažení vyšší rychlosti zpracování, které dovolilo porovnání více variant výpočtu s různými vstupními hodnotami atributů. Rovněž bylo umožněno srovnání zjištěných skutečností se skutečným stavem.

4.1 Použitá data

Studie využívá data s informací o lesní druhové skladbě a průměrné výšce lesního porostu. Jejich pořizovatelem a správcem je Ústav pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL, 2016, 2017). Lokalizace železniční infrastruktury byla provedena na základě dat Správy železnic, státní organizace (SŽ, 2019 a). Vyhodnocení zdravotního stavu vegetace prostřednictvím indexu NDVI je založeno na snímcích družic Sentinel-2 Evropské kosmické agentury (ESA).

Lesní druhová skladba

Rasterová data vymezují jednotlivé typy lesních dřevin na území České republiky. Jsou založena na syntéze více datových zdrojů, mezi které patří zejména družicové snímky satelitů Landsat a Sentinel-2, CIR ortofoto (letecké měřičské snímky v nepravých barvách) a normalizovaný digitální model povrchu (nDSM). Pro identifikaci dominantních dřevinných typů je využíván jejich rozdílný spektrální projev v jednotlivých částech barevného spektra. V datech dochází k rozlišení následujících kategorií lesní druhové skladby: *smrk*, *borovice*, *buk*, *dub*, *ostatní listnaté*, *těžba*, *kultura*, *kleč* a *ostatní*. Kategorie ostatní zahrnují lokality, v nichž nebylo možné jednoznačně určit typ převládající dřeviny. Tato skutečnost je dána způsobem zaznamenávání dat. Prostorové rozlišení rasteru je 10 m.

Železniční infrastruktura

Jedná se o vektorová data železniční infrastruktury ve správě Správy železnic, s. o. (SŽ). V této studii dochází k využití liniové vrstvy průběhu kolejí a polygonové s vymezením jejich ochranného pásma (tab. 1). Hlavním účelem těchto dat je zejména lokalizace zájmového území v blízkosti železnice, v němž bude vyhodnocena rizikovost vegetace.

Hodnocení provozu infrastruktury

Tato data poskytují informace o mimořádných událostech na železnici ve správě SŽ. Struktura dat obsahuje popis příčiny, důsledků a řešení mimořádnosti, její prostorovou lokalizaci a další. Polohová informace je vyjádřena ve formě údaje o přilehlých stanicích k mimořádnosti a hektometru. Ten je možné převést do lépe zpracovatelného formátu drážní lokalizace, založeném na traťovém a definičním úseku (TUDU) a hektometru. Všechny záznamy však neuvádí přesný hektometr a kvůli rozsáhlosti TUDU (jednotky až desítky km) je přesná lokalizace mimořádnosti zcela vyloučena. Jedná se však o jedinou evidenci mimořádných událostí na železnici dostupnou pro vyhodnocované období roků 2016 až 2018. Použitím této evidence je možné provést pouze hrubé srovnání ohrožených míst identifikovaných touto studií a skutečným výskytem nehod.

Družicové snímky Sentinel-2

Vyhodnocení zdravotního stavu vegetace v okolí železniční infrastruktury na území Libereckého kraje je založeno na družicových snímcích Sentinel-2. Jedná se o družice Evropské kosmické agentury s periodicitou oběhu 5 dnů. Díky tomu umožňují sledování dynamických jevů. Prostorové rozlišení snímků je 10 a 20 m, v závislosti na zvoleném spektru vlnových délek.

Snahou byl výběr snímků s nejnižším výskytem oblačnosti pro shodné části roku 2017 a 2018. Studie využívá data již s aplikovanými atmosférickými korekcemi jejich poskytovatelem – varianta L2A. Datová sada zahrnuje rovněž informace o výskytu nízké oblačnosti, kterou je tak možné prostřednictvím odebrání zasažených pixelů ze snímku odstranit. Kvůli zvýšení objektivnosti výsledku bylo provedeno srovnání tří různých období roku (květen, červen/červenec, září/říjen). Tím bylo zajištěno snížení vlivu mimořádných klimatických výkyvů, které mohou mít dopad na vegetační cyklus rostlin a tím i na hodnoty indexu NDVI.

Lesy ČR

Vektorová datová vrstva Lesy ČR obsahuje informace o lesních plochách nacházejících se na území ČR. Je distribuována v měřítku 1 : 50 000 a spadá do digitálního geografického modelu území ČR – Data 50. Je odvozena ze Základní mapy ČR. Jejím garantem je ČÚZK, který zajišťuje její pravidelnou aktualizaci. Data byla použita pro vymezení ploch lesů v ochranném pásmu železnice.

Výška lesních dřevin

Rasterová data obsahují informaci o výšce porostů na území ČR. K jejich vytvoření je využito analýzy leteckých měřičských snímků, kdy dochází k získání normalizovaného digitálního modelu povrchu (nDSM). Prostorové rozlišení dat je 1 m. Pořizovatelem a správcem dat je ÚHÚL.

4.2 Postup zpracování

Prvním krokem této pilotní studie byla příprava dat. Konkrétně se jednalo o převod rasterů do jednotného souřadnicového systému a to WGS-84 (EPSG 4326). K výběru došlo na základě jeho nejčastějšího výskytu u zpracovávaných dat. Dále byla vybrána zájmová lokalita, ve které bylo provedeno vyhodnocení rizik. Nejednalo se o plochu celé České republiky, ale pouze jednoho kraje. K redukci rozlohy analyzovaného území bylo přistoupeno z důvodu výpočetní náročnosti stanovení míry ohrožení železnice, kdy bylo snahou doladit samotný proces vyhodnocení, který bude možné následně aplikovat na libovolné lokality i většího rozsahu.

Jako vhodné bylo vybráno území Libereckého kraje, a to především kvůli jeho poloze v hornaté části České republiky s významným výskytem lesního porostu v blízkosti železniční infrastruktury. Ve sledovaném období zde bylo zaznamenáno také vysoké množství mimořádných událostí způsobených právě pádem stromu na železniční infrastrukturu. Díky tomu je možné v závěru této pilotní studie provést srovnání teoreticky stanovené míry ohrožení se skutečným výskytem mimořádností.

Tab. 1 Specifika Libereckého kraje (ČSÚ 2019, SŽ 2019 b)

Rozloha kraje	3 163 km ²
- z toho lesních ploch	(44,5 %) 1 409 km ²
Délka železnice ve správě SŽ	457 km
Rozloha ochranného pásma dráhy	52 km ²

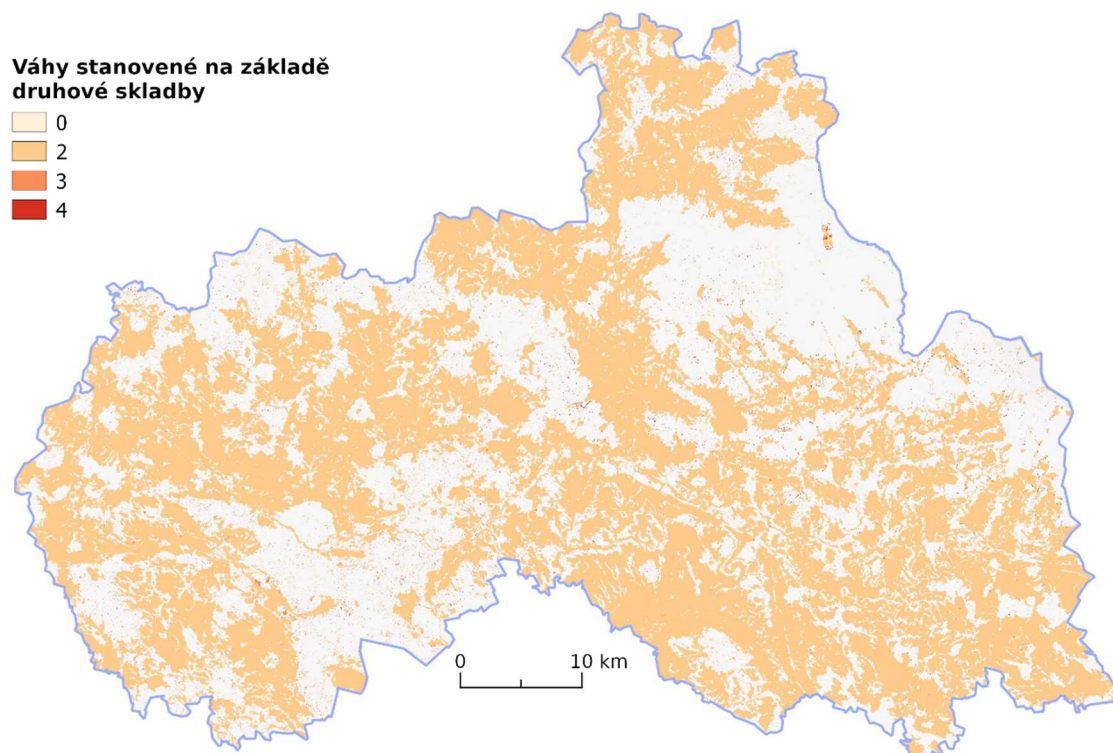
Druhová skladba

V dalším fázi studie bylo nutné provést reklasifikaci vrstvy druhové skladby lesa. Jednotlivým druhům byly přiřazeny váhy dle předpokládané úrovně jejich ohrožení intenzivním větrem a sněhem. Hodnoty byly stanoveny na základě již provedených studií v oblasti lesnictví zabývajících se touto problematikou (viz kapitola 2). Vyššími váhami byly ohodnoceny jehličnaté druhy, u kterých se kvůli mělkému kořenovému systému předpokládá vyšší míra ohrožení. Žádné riziko je pak možné předpokládat u kultury (zahrnující mladé porosty ve výškovém rozmezí 0,6 až 1,3 m), u kleče a holin

(těžba) (Bednář, 2012). Proto byla zmíněným kategoriím přiřazena váha 0. Druhové typy s přiřazenými váhami jsou uvedeny v tabulce 2. Jejich prostorové rozmístění je pak znázorněno na obrázku 5.

Tab. 2 *Váhy přiřazené jednotlivým druhovým typům*

Druh	Váha	Druh	Váha	Druh	Váha
smrk	4	borovice	3	buk	2
dub	2	ostatní jehličnaté	2	ostatní listnaté	2
kleč	0	kultura	0	těžba	0



Obr. 5 *Váhy stanovené na základě druhové skladby stromové vegetace na území Libereckého kraje*

Hodnocení zdravotního stavu lesní vegetace

Chřadnutí porostu může významně ovlivnit jeho odolnost vůči vnějším vlivům, a to především kvůli degradaci kmene a kořenového systému.

Vyhodnocení zdravotního stavu bylo sestaveno pro celé území Libereckého kraje. Avšak pro detailní popis byla zvolena jen menší oblast, kde převážná část trati vede lesním porostem. Pro ověření, zda se vegetace skutečně v oblasti nachází, byla využita

aktuální ortofotomapa (obr. 6) a také vektorová vrstva kolejí z Digitálního geografického modelu území ČR – Data 50 (ČÚZK, 2019).



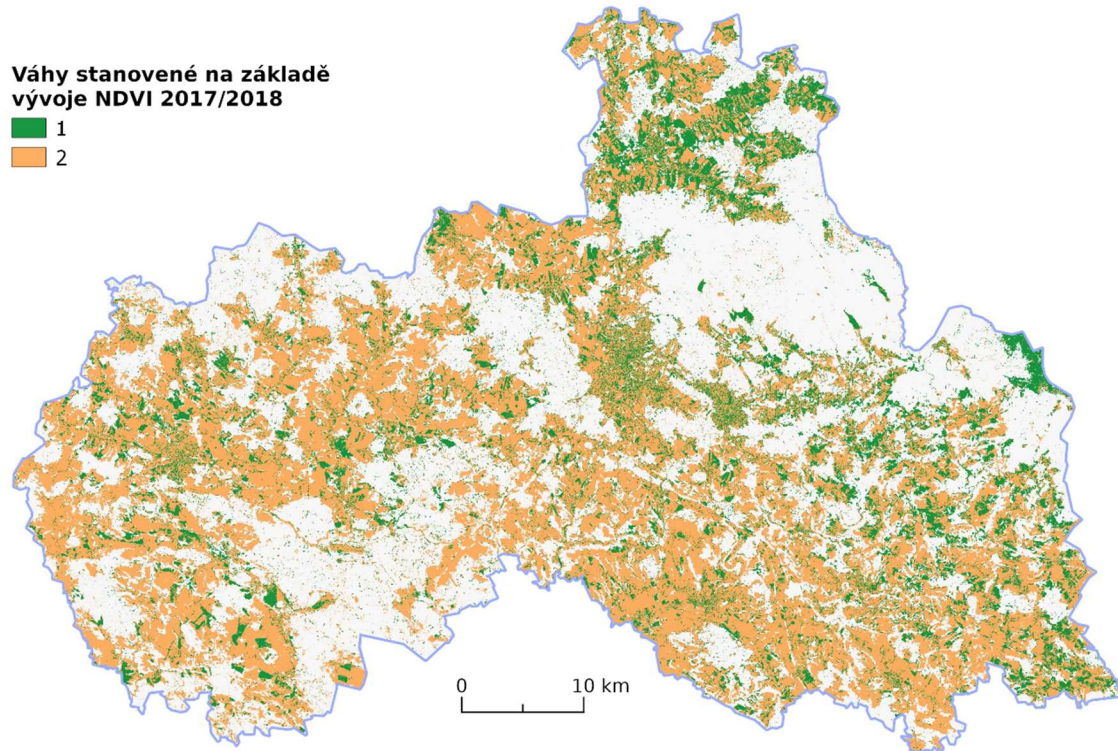
Obr. 6 Železniční trať na družicovém snímku v pravých barvách

Nejprve bylo provedeno stažení družicových dat pokrývajících Liberecký kraj. Jednalo se o dlaždice T33UVS a T33UWS. Snímky pocházely ze tří vymezených časových úseků, které nebyly zatíženy vysokou oblačností. Její projev byl dále omezen vymaskováním pomocí vektorových vrstev, které ji detekují, distribuovaných společně se snímky. Následně z nich byly sestaveny mozaiky v červeném (Sentinel-2A 664,6 nm, Sentinel-2B 664,9 nm) a blízkém infračerveném spektru (Sentinel-2A 704,1 nm, Sentinel-2B 703,8 nm) pokrývající území celého kraje. Jejich výsledné prostorové rozlišení je 20 m (ESA, 2019).

Z těchto mozaiek byly v dalším kroku vypočítány NDVI indexy, které odpovídají normalizovanému poměru odrazivosti povrchu v červené části spektra – RED (600-700 nm) a blízké infračervené - NIR (700-900 nm). Na základě hodnoty indexu je pak možné stanovit množství biomasy v jednotlivých pixelech snímku.

Zároveň byla zaznamenána vymaskovaná místa (oblačnost), která do výpočtu nevstupovala. Prostřednictvím rasterové algebry byla získána informace o meziročním vývoji vegetačního indexu pro jednotlivá tři období a to tak, že od hodnoty pixelu z roku 2018 byla odečtena hodnota odpovídajícího pixelu z roku 2017. Pro objektivní posouzení meziroční změny, byl z hodnot jednotlivých období získán medián. Tím došlo k zajištění odstranění možného vlivu extrémní hodnoty na výsledek.

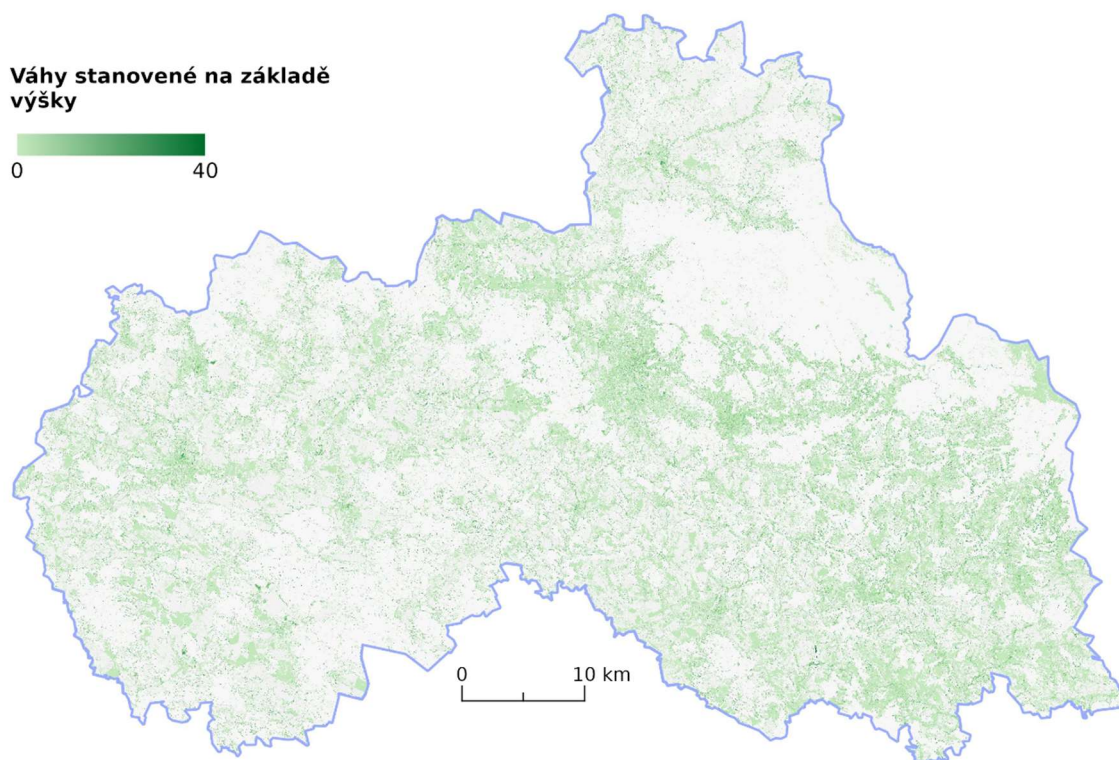
V dalším kroku došlo k přiřazení vah jednotlivým pixelům na základě zjištěné celkové meziroční změny indexu NDVI. V případě záporného vývoje byla přiřazena hodnota 2, v ostatních případech zahrnujících stagnaci či pozitivní vývoj pak hodnota 1. Takto zvolené hodnoty zvýší celkovou míru ohrožení železnice v místech chřadnoucí vegetace. Prostorové vymezení vah na území kraje je znázorněno na obrázku 7.



Obr. 7 Váhy stanovené na základě vývoje NDVI indexu mezi roky 2017 a 2018 na území Libereckého kraje

Průměrná výška vegetace

Data průměrné výšky vegetace zahrnují dva rastery, z nichž každý pokrývá polovinu území České republiky. K úpravám těchto dat nebylo přikročeno. Výška porostu, vyskytujícího se v okolí železniční infrastruktury, vstupovala do výpočtu přímo. Takto zvolený postup zohledňuje předpokládaný velmi silný vliv výšky na úroveň rizikovitosti porostu pro přilehlou železnici. Prostorové rozložení těchto dat je zobrazeno na obrázku 8.



Obr. 8 Váhy stanovené na základě výšky stromové vegetace na území Libereckého kraje

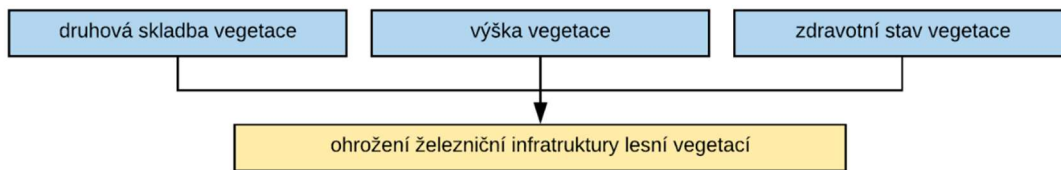
Mimořádné události na železnici způsobené pádem stromu

Jako vstupní data byla použita evidence mimořádných událostí, kterou spravuje SŽ. Z těchto dat došlo k vyfiltrování pouze těch záznamů, které souvisely s pádem stromu. Jejich prostorová lokalizace je ve formě vydefinování mezistaničního úseku okrajovými stanicemi. Tato forma se jevila jako nedostatečná, proto došlo k přiřazení k nejbližšímu traťově definičnímu úseku (TUDU). Bohužel tento postup přesnost dat nezvyšuje, protože dochází k výběru nejbližšího k uvedené stanici. Zda se jedná o správný, není možné ověřit. Vhodnější metoda však kvůli způsobu evidence není možná. Lokalizace mimořádné události tak připadá na úsek řádově dlouhý až desítky kilometrů.

Takto upravená data byla následně připojena k vektorové vrstvě TUDU a z ní pomocí funkce *Průnik* v softwaru QGIS přenesena na vrstvu kolejí.

Ohrožení železniční infrastruktury stromovou vegetací

Index ohrožení železniční infrastruktury vegetací byl vytvořen z dat sestavených v předchozích krocích. Konkrétně se jednalo o vrstvy s váhami určenými na základě *druhové skladby vegetace, její výšky a zdravotního stavu* (obr. 9).



Obr. 9 Vstupn data pro stanoven ohrožení železniční infrastruktury lesní vegetací

$$VTIR = V_D \times V_V \times V_Z$$

VTIR – index ohrožení vegetací (Vegetation Threat Index for Railway infrastructure)

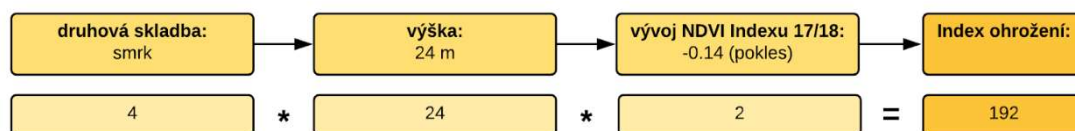
V_D – váha dle druhu stromu

V_V – váha dle výšky stromu

V_Z – váha dle zdravotního stavu

Vzorec 2 Vzorec pro výpočet rizika ohrožení železniční infrastruktury stromovou vegetací

Tyto vrstvy byly mezi sebou násobeny (obr. 10). Tím došlo k syntéze jednotlivých dlch vah a získání výsledného indexu, ktery odpovd celkov mr ohrožení. Jeho vzrůstající hodnota koresponduje s nárůstem hrozby.



Obr. 10 Prklad výpočtu pro jeden konkrtn pixel

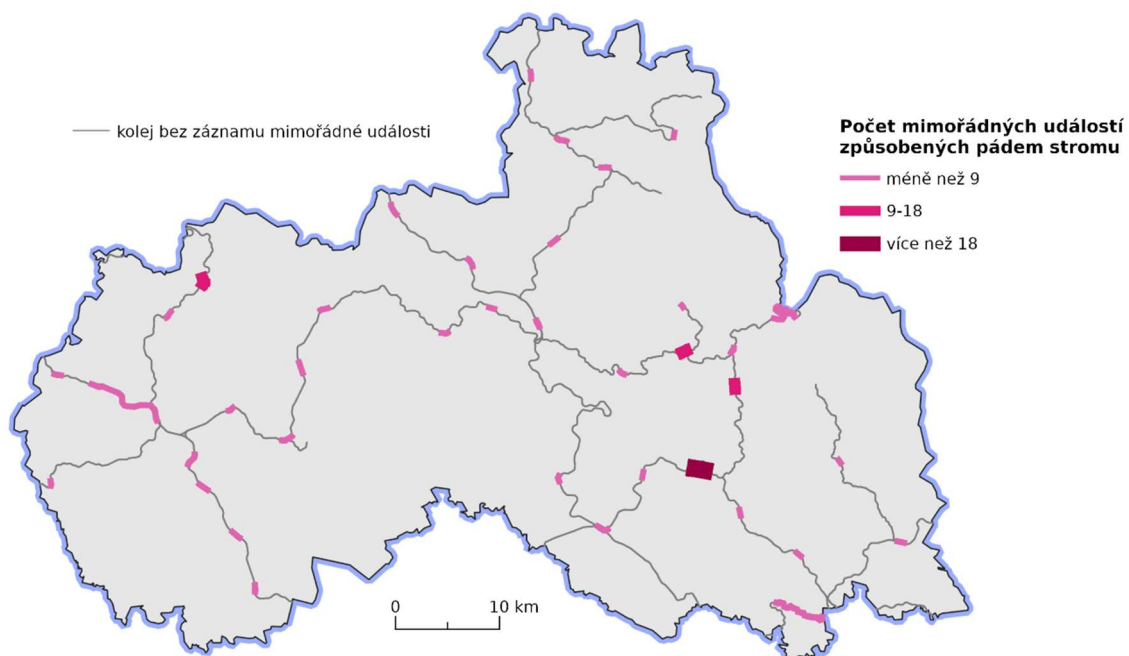
4.3 Výsledky

Vyhodnocení míry ohrožení je stanoveno pouze pro plehl plochy ochranného pásma železnice s výskytem lesa. To pedevším kvuli nedostatečnému rozlišení družícovch snímků s pixelem odpovídajícím uzem 20 x 20 m. Z tohoto důvodu není možné stanovit riziko pro samostatně stojící stromy. Lze vsak předpokládat, že trat procházející hustm lesním porostem jsou v současnosti vznamn zatíženy rizikem padu stromu. Identifikace nejohroženších míst pak může sloužit k nasměrování udrby a snížení budoucích škod na majetku.

Mimořádné události na železnici způsobené pádem stromu

Vyhodnocení správnosti stanovení míry ohrožení vegetací v této pilotní studii bylo provedeno porovnáním výsledků indexu VTIR s databází mimořádných událostí způsobených pádem stromu z let 2016 až 2018. Bohužel prostorová lokalizace mimořádností je značně omezená a nedošlo k nalezení významných korelací. Příčinu tohoto nesouladu je možné přisuzovat právě jejich nepřesné evidenci. Správce infrastruktury však již přijal opatření pro nápravu této situace a v následujících letech by srovnání mělo být již realizovatelné.

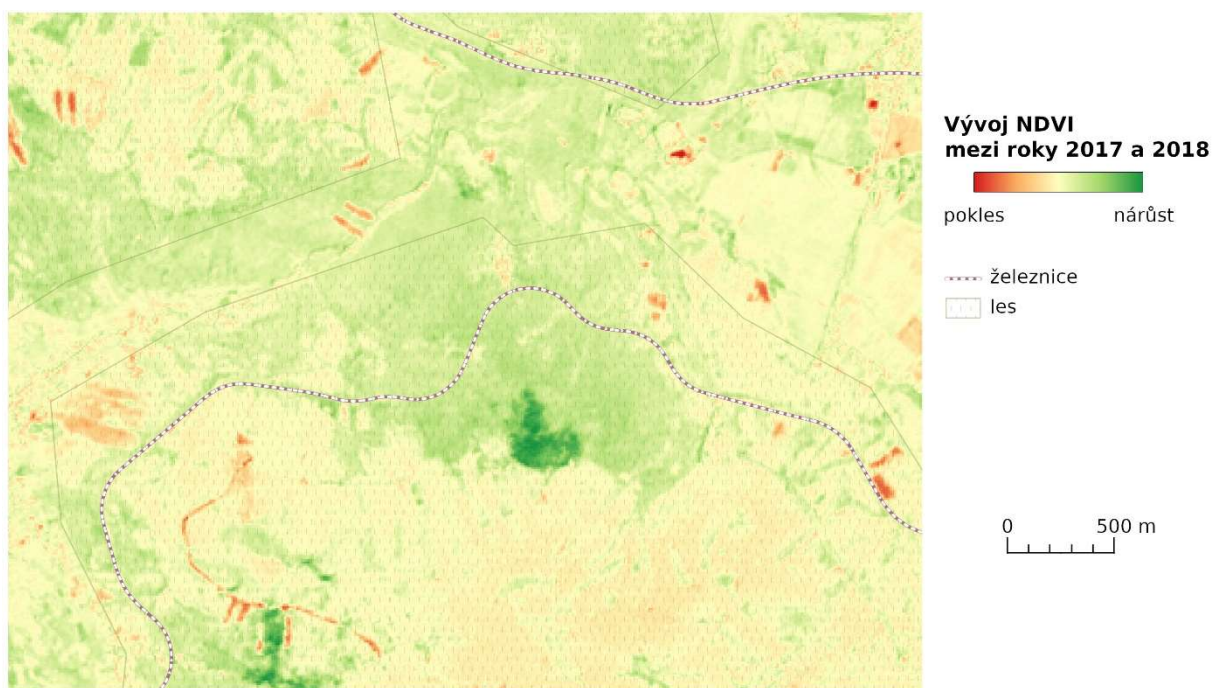
Z přehledové mapy na obrázku 11 je zřetelné, že mimořádnosti se nerozkládají po území kraje rovnoměrně, ale koncentrují se do několika odloučených lokalit. Některé vykazují během tříletého období i více než 10 událostí. To vypovídá o vysoké úrovni ohrožení v těchto oblastech, které by mělo vést k zavedení opatření a nápravě stavu.



Obr. 11 Mimořádné události na železnici způsobené pádem stromu během let 2016-2018 v Libereckém kraji

Hodnocení zdravotního stavu lesní vegetace

V meziročním srovnání květnového období let 2017 a 2018 vykazuje NDVI index na území Libereckého kraje v ochranném pásmu železniční trati vznik několika významných propadů (obr. 12). To vypovídá o skutečnosti, že v těchto oblastech dochází ke chřadnutí porostu. Tento vývoj zasáhl více než 78 % zalesněné plochy (tab. 3).



Obr. 12 Rozdíl vegetačního indexu NDVI mezi 11. 5. 2017 a 6. 5. 2018 na vybraném území Libereckého kraje

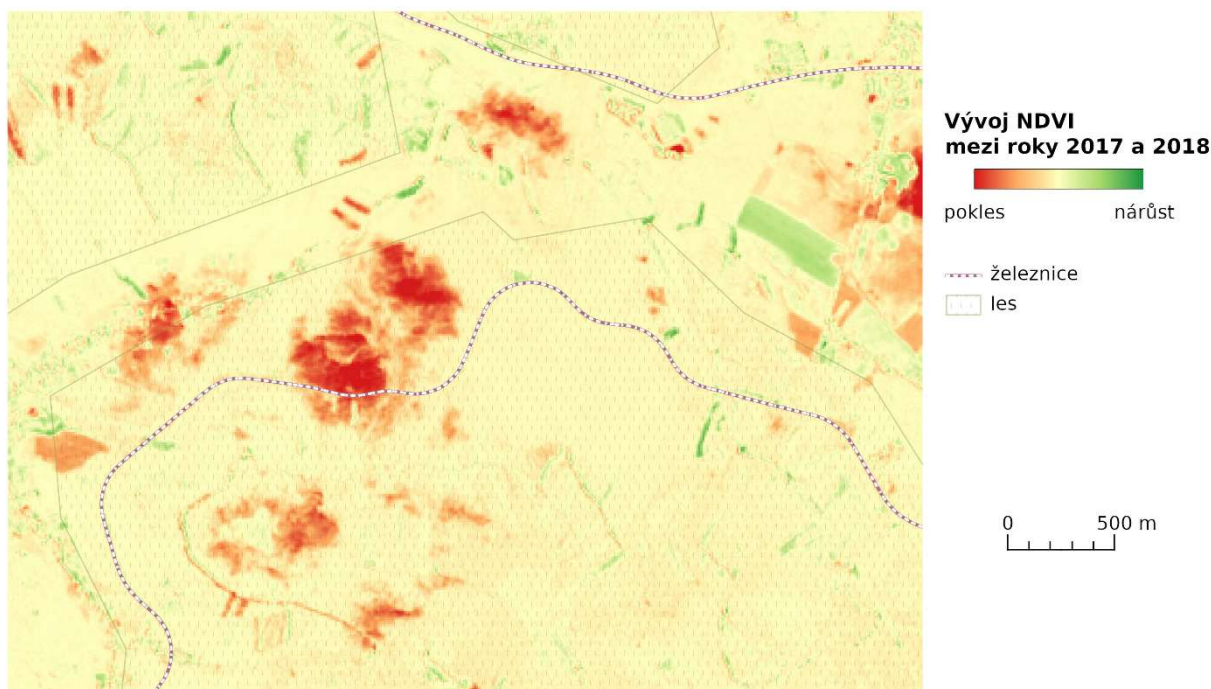
Tab. 3 Vývoj NDVI indexu v ochranném pásmu železnice pokrytém lesy mezi 11. 5. 2017 a 6. 5. 2018

Vývoj indexu NDVI	pokles	stagnace	nárůst
Zastoupení v ochranném pásmu dráhy [%]	78,4	0	21,6

Výrazný negativní vývoj je patrný v následujícím vyhodnocovaném období z přelomu června a července (obr. 13), kdy na většině území dochází k poklesu NDVI indexu. Tento vývoj zasáhl 83 % zalesněného ochranného pásma železnice (tab. 4).

Tab. 4 Vývoj NDVI indexu v ochranném pásmu železnice pokrytém lesy mezi 20. 6. 2017 a 3. 7. 2018

Vývoj indexu NDVI	pokles	stagnace	nárůst
Zastoupení v ochranném pásmu dráhy [%]	83,0	0	17,0



Obr. 13 Rozdíl vegetačního indexu NDVI mezi 20. 6. 2017 a 3. 7. 2018 na vybraném území Libereckého kraje

Tento negativní vývoj může být způsoben výrazně nižším srážkovým úhrnem v roce 2018, kdy od začátku roku do července dosahoval pouze 267 mm, zatímco v roce 2017 dosáhl 390 mm (viz tab. 5).

Dlouhodobý srážkový úhrn na území Libereckého kraje mezi roky 1981 a 2010 je 890 mm (ČHMÚ, 2019). V roce 2017 bylo dosaženo hodnoty 945 mm (ČHMÚ, 2019), jednalo se tedy o srážkově mírně nadprůměrný rok. Následující rok 2018 byl naopak výrazně vláhově deficitní. Konkrétně byl zaznamenán úhrn 560 mm (ČHMÚ, 2019), tedy 63 % dlouhodobého srážkového průměru.

Tab. 5 Srážkový úhrn na území Liberecké kraje v roce 2017 a 2018 (ČHMÚ, 2019)

		Měsíc											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Srážkový úhrn [mm]	2017	70	48	60	65	48	99	115	83	70	144	68	75
	2018	75	4	48	37	36	67	33	34	40	48	11	127
	N	74	60	68	50	70	83	100	99	71	60	74	81

*N – dlouhodobý srážkový normál 1981-2010

Negativní vývoj vykazuje i poslední zvolené období z přelomu srpna a září (obr. 14). Příčinou je pokračující období nízkých srážkových úhrnů, které prohloubilo negativní vláhovou bilanci v krajině. Propad hodnoty vykazuje přes 89 % plochy ochranného pásma pokrytého lesní vegetací (tab. 6).



Obr. 14 Rozdíl vegetačního indexu NDVI mezi 29. 8. 2017 a 18. 9. 2018 na vybraném území Libereckého kraje

Tab. 6 Vývoj NDVI indexu v ochranném pásmu železnice pokrytém lesy mezi 29. 8. 2017 a 18. 9. 2018

Vývoj indexu NDVI	pokles	stagnace	nárůst
Zastoupení v ochranném pásmu dráhy [%]	89,8	0	10,2

Celkový vývoj vegetačního indexu byl stanoven jako medián změn indexu NDVI z jednotlivých tří období pro každý pixel (obr. 15). Bylo tak dosaženo objektivnějšího výsledku vývoje zdravotního stavu vegetace, a to především díky odstranění mimořádných krátkodobých vlivů. Je patrné, že na většině území došlo k jeho zápornému vývoji, které vypovídá o zhoršení zdravotního stavu porostu. Tento proces je možné přisuzovat především výrazně nižšímu srážkovému úhrnu v roce 2018 než v roce předchozím. Vegetace je schopna tato negativní období překlenout, a pokud se tento trend nestane standardem, lze očekávat zlepšení jeho stavu. Je tedy vhodné sledovat vývoj indexu v delším časovém období.

Průměrná hodnota NDVI indexu celého posuzovaného období vykazuje pokles na 57,3 % ochranného pásma pokrytého lesní vegetací (tab. 7). Zbývající plocha (42,7 %) pak vykazovala jeho nárůst. Z toho je zřejmé, že u většiny stromů došlo během roku 2018 ke zhoršení zdravotního stavu.



Obr. 15 Výsledná hodnota vegetačního indexu NDVI stanovená jako medián jeho hodnot z jednotlivých období na vybraném území Libereckého kraje

Tab. 7 Vývoj NDVI indexu v ochranném pásmu železnice pokrytém lesy

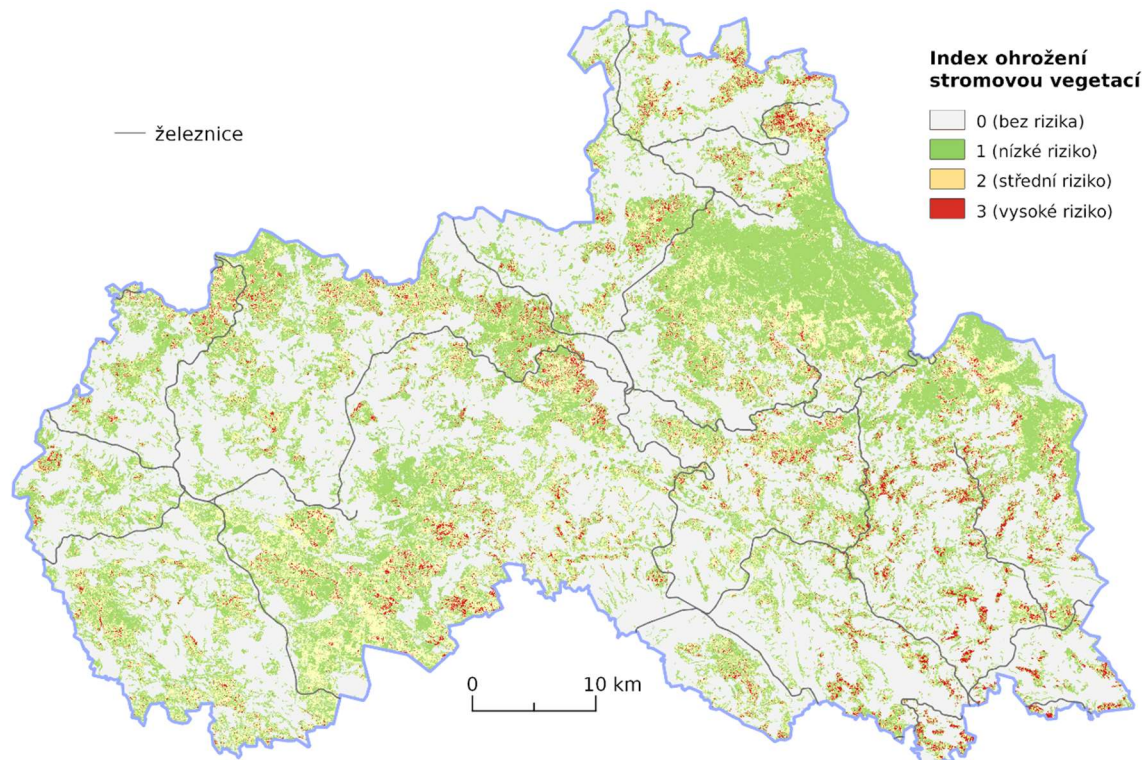
Vývoj indexu NDVI	pokles	stagnace	nárůst
Zastoupení v ochranném pásmu dráhy [%]	57,3	0	42,7

Stanovení zdravotního stavu vegetace na základě vyhodnocení změn indexu NDVI je vhodné provádět dlouhodobě a získat tak informaci o trendu jeho vývoje. Zejména z důvodu, že po období s nízkým srážkovým úhrnem může následovat vláhově příznivější, které povede k regeneraci a obnově vegetace. Avšak dlouhodobé trvání sucha může vést k poškození porostu. To vede k nárůstu jeho ohrožení pro železnici, kvůli nižší schopnosti odolávat škůdcům, silnému větrnému proudění, námraze nebo silné sněhové pokrývce.

Index ohrožení železniční infrastruktury

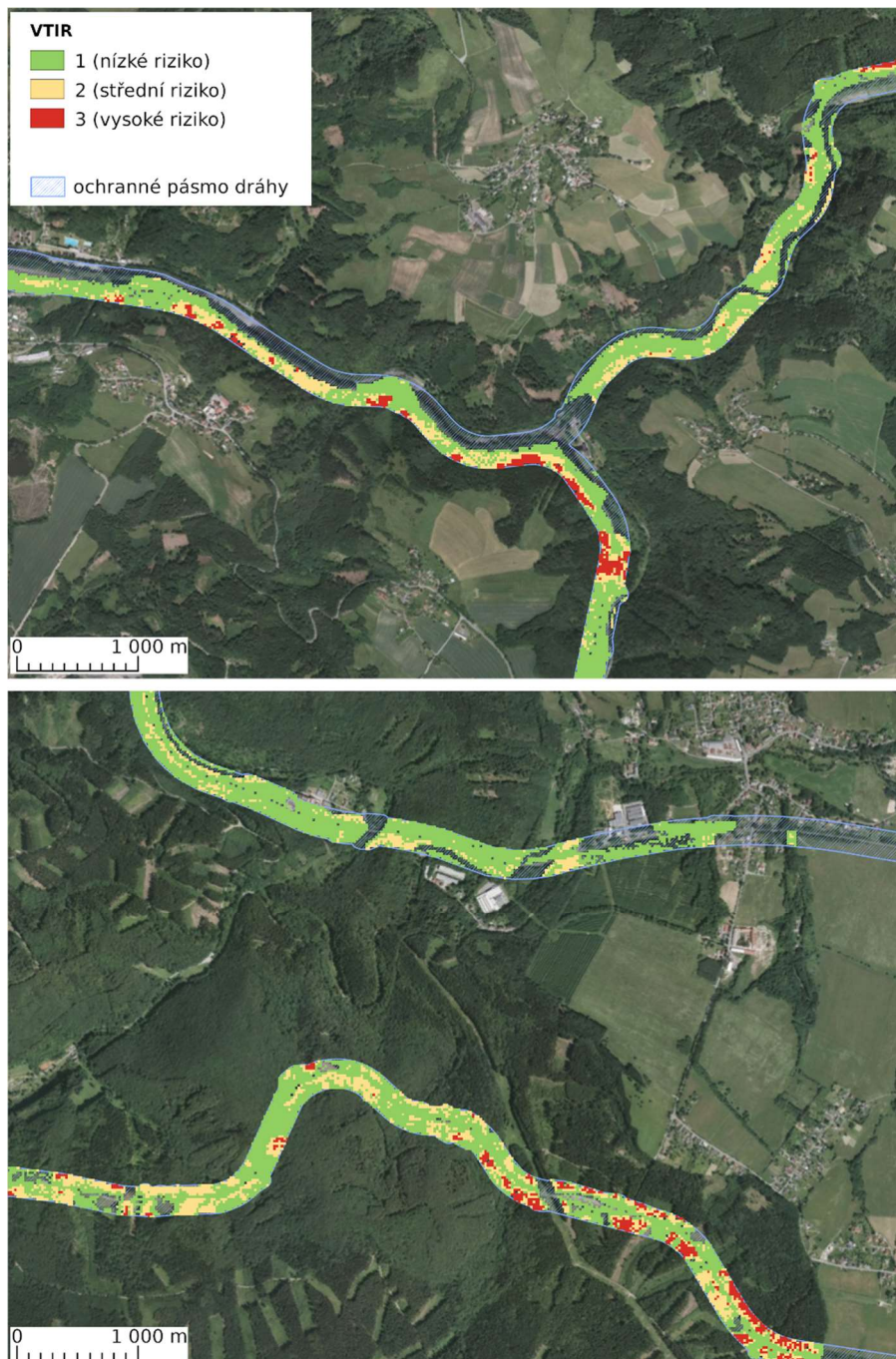
Celková míra ohrožení železnice blízkou stromovou vegetací byla sestavena kombinací hodnot vybraných porostních atributů (*zdravotní stav, výška, druh*). Jejich původní hodnoty byly upraveny do podoby vážených hodnot, a to dle předpokládané hrozby vybraného parametru a jeho úrovně. Tyto váhy byly následně mezi sebou násobeny a byla získána hodnota korespondující s úrovní vykazovaného nebezpečí. Pro zřehlednění byly dále rozděleny do tří kategorií vymezených rozsahy 1-99, 100-199 a 200-360.

Index ohrožení železnice stromovou vegetací (VTIR) byl vypočítán pro všechny lesní plochy nacházející se na území Libereckého kraje. V této formě je výsledek nutné označovat jako index ohrožení stromovou vegetací (obr. 16). Pokud dojde k výběru pouze těch ploch, které se nachází v blízkosti železnice, pak dochází k jeho zkonkretizování na index ohrožení železnice stromovou vegetací.



Obr. 16 Index ohrožení stromovou vegetací na území Libereckého kraje

Při detailním pohledu na snímky s hodnotami indexu ohrožení vegetací v ochranném pásmu železnice je patrné, že nejohroženější místa netvoří rozsáhlé souvislé oblasti (obr. 17). Jedná se vždy o malé plochy nacházející se na okrajích lokalit nižšího rizika. Tento fakt může vypovídat o postupně zhoršujícím se stavu porostu, který povede k rozšiřování ploch ohrožení.



Obr. 17 Index ohrožení stromovou vegetací (VTIR) v ochranném pásmu železnice na vybraném území Libereckého kraje

Kategorie s nejnižší mírou ohrožení pokrývá 21,8 % ochranného pásma železnice. Její rozloha je 1 183 ha z celkové rozlohy pásma 5 411 ha. Tato oblast nevykazuje zvýšené riziko ohrožení, a proto není nutné věnovat jí zvýšenou pozornost.

Na rozloze 291 ha (5,3 %) se nachází druhá kategorie se střední mírou ohrožení (tab. 8). Zde je již vhodné zajistit pravidelný dohled nad stavem stromových porostů. Na tomto území také vzrůstá význam případných přijímaných opatření, zejména provádění pravidelného prořezu dřevin. Nejvyšší míra ohrožení se nachází

v oblasti 49 ha (0,9 %). V případě pokračujícího chřadnutí způsobeného suchem, je zde předpoklad vysokého rizika vzniku mimořádných událostí. V těchto oblastech se jeví jako žádoucí vymýcení ochranného pásma železnice, které by bylo následně obnoveno mladým porostem či nejlépe keři.

Ve zbývajícím prostoru ochranného pásma se nenachází lesní vegetace, nebo ji tvoří porosty, jež získaly v druhovém ohodnocení váhu 0, tedy nepředstavují ohrožení.

Tab. 8 Rozloha zalesněného ochranného pásma železnice podle úrovně ohrožení na území Libereckého kraje mezi roky 2017 a 2018

	Kategorie ohrožení	Rozloha [ha]	Zastoupení na území ochranného pásma [%]
nízké	1 (Index 1-99)	1183	21,8
střední	2 (Index 100-199)	291	5,3
vysoké	3 (Index 200-360)	49	0,9

Porovnání výsledků se skutečným stavem vegetace

Na obrázku 18 je zachycen úsek trati nacházející se v oblasti s vysokou mírou ohrožení. Je patrné, že vegetace se nachází v bezprostřední blízkosti tratě a dosahuje výrazného vzrůstu. Výhodné je, že porost vytváří poměrně hustou stěnu a je tvořen převážně listnatými dřevinami. Díky tomu lze předpokládat poměrně vysokou odolnost vůči silnému větru. Přesto je možné výskyt dřevin v tomto případě považovat za rizikový a při silných povětrnostních situacích lze očekávat pády větví, případně celých stromů.



Obr. 18 Trať v úseku vykazujícím vyšší ohrožení přilehlou vegetací (převzato SŽ, 2020)

Traťový úsek obklopený vegetací střední rizikovosti se nachází na obrázku 19. Je patrné, že v nejtěsnější blízkosti železnice došlo k vymýcení vzrostlého porostu a ten byl postupně nahrazen náletovými dřevinami. Ve srovnání s předchozí situací je zde riziko ohrožení nižší, ale přesto není nebezpečí pádu stromu na infrastrukturu odstraněno zcela, zejména kvůli nedostatečné šířce zajištěného okolí. Rovněž bude míra rizikovosti mladého porostu narůstat, pokud nebude docházet k periodické údržbě.



Obr. 19 Trať v úseku vykazujícím střední ohrožení přilehlou vegetací (převzato SŽ, 2020)

5 STUDIE 2

Pilotní studie definuje metodiku určenou pro stanovení úrovně ohrožení přilehlou stromovou vegetací kolem železnice na základě existujících publikovaných odborných studií. Jejím hlavním úkolem bylo zejména sestavit postup a realizovat jej. Z tohoto důvodu bylo vyhodnoceno pouze území Libereckého kraje, pro který je charakteristické vedení železnice hustými lesy a hornatými oblastmi.

V této navazující Studii 2 je do výpočtu ohrožení zakomponován odborný názor získaný od specialistů z oboru lesnictví a dálkového průzkumu Země. Ten byl získán prostřednictvím dotazníkového šetření s využitím metody AHP. Takto upravená metodika byla aplikována na celé území České republiky pro získání kompletního obrazu stavu vegetace nacházející se v blízkosti železniční infrastruktury.

Hlavním cílem však zůstává především rozvinutí a ověření správnosti metodiky pro stanovení úrovně ohrožení vegetací, která by se mohla stát standardem pro zjištění aktuálního stavu a vývoje porostu. Na základě zjištěných informací by bylo možné zavádět opatření a eliminovat mimořádné situace vzniklé pády stromu na infrastrukturu. Tím by celkově vzrostla bezpečnost a plynulost provozu, především za mimořádných povětrnostních podmínek.

5.1 Použitá data

Lesní druhová skladba

Datová sada ve formě rasteru, produkovaná Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL), obsahuje informace o dominantním výskytu jednotlivých stromových kultur na území ČR. Pro jejich identifikaci byla využita řízená klasifikace družicových snímků Sentinel-2 a Landsat, která byla provedena na základě spektrální odezvy dřevin v průběhu fenologických fází. Pro správné vymezení druhových skupin bylo využito trénovacích ploch, které ÚHÚL získal pozemním šetřením. Jednalo se o plochy, na nichž docházelo k dominantnímu nebo majoritnímu výskytu jednotlivých lesních druhů. Mezi další použité zdroje pro vytvoření této vrstvy patří letecké měřičské snímky.

V datech došlo konkrétně k vymezení ploch s převládajícím výskytem smrku, borovice, dubu a buku. Dále je zahrnuta kategorie ostatní listnaté, ostatní jehličnaté, kleč, kultura a plochy, na kterých byla zaznamenána těžba. Tematická přesnost vymezení smrku je 96 %, buku 91 %, dubu 81 % a borovice 90 %.

Na základě studií popsaných v kapitole 2.1 bylo zjištěno, že některé stromové druhy jsou více odolné vůči negativním vlivům počasí než jiné. Proto je v práci zakomponována tato datová sada. Zejména listnaté porosty představují nižší riziko

než jehličnaté porosty, které jsou charakteristické kořenovým systémem dosahujícího menších hloubek.

Výška lesních porostů

Výška lesních porostů ve Studii 2 byla použita z jiné datové sady než v pilotní studii. Informace o výšce lesního porostu byla získána z datové sady kombinující družicové snímky Sentinel-2 a výšková lidarová data GEDI, které spravuje americká agentura NASA.

Lidarová data GEDI vznikají prostřednictvím 3 lidarových kamer umístěných na Mezinárodní vesmírné stanici. Hlavním úkolem tohoto projektu je identifikace výšky porostu pro stanovení množství v něm uloženého uhlíku. Problémem je však nízké rozlišení dat, dosahujícího 60 m na pixel. Z tohoto důvodu byla doplněna data Sentinel, která obsahují informace o spektrálním projevu povrchu v jednotlivých snímaných pásmech, ale nikoliv údaji o výšce. Spojením těchto datových sad bylo dosaženo prostorového rozlišení 10 m na pixel (Lang et al., 2023).

Tato datová sada je do výpočtu začleněna kvůli přímému vlivu výšky porostu na velikost ohrožení, kdy vzrostlejší porosty představují vyšší ohrožení pro železniční infrastrukturu. A to zejména z nutnosti odolávat větším silám během intenzivních větrných poryvů. Rovněž vyšší strom může zasáhnout infrastrukturu z větší vzdálenosti, to vede k potřebě udržovat širší ochranná pásma. Nicméně v některých lokalitách může být tento požadavek obtížné zajistit, především na tratích procházejících chráněnými přírodními oblastmi či obklopenými skalami. Takto vedené tratě mají svůj původ ještě v dobách provozu parních lokomotiv, kdy udržování bezpečného prostoru kolem infrastruktury bylo zajišťováno pravidelným vypalováním porostu. Také nebyly dostupné nástroje, pro vhodnější výstavbu bez vysokých investičních nákladů (tunely atd.).

Družicové snímky Sentinel-2

Evropská kosmická agentura v současnosti provozuje dvě družice v programu Sentinel-2. Ty poskytují snímky zemského povrchu ve 13 spektrálních pásmech od 443 nm po 2190 nm. Prostorové rozlišení viditelné části spektra a části blízkého infračerveného je 10 m/pixel. Další části spektra pak dosahují rozlišení od 20 m po 60 m. Po vynesení druhé družice došlo ke zkrácení doby opakovaného snímání stejného území (revisit time) z 10 na 5 dní. V budoucnu dojde k vynesení dalších dvou družic, čímž bude dosaženo poloviční doby. Vysoká periodičita snímání území umožňuje sledovat dynamické procesy v krajině a rovněž poskytuje větší šanci na získání dat nezasazených oblačností. Šířka snímaného pásu dosahuje 290 km. Data jsou distribuovaná ve formě dlaždic, které mají standardizovaný rozměr

110 km² x 110 km². Data jsou volně dostupná ke stažení ze stránek ESA ve dvou verzích. Varianta L1A obsahuje surová data, bez aplikovaných atmosférických korekcí, tedy nedochází k odstranění vlivu atmosféry v době snímkování. Uživatel je však schopen odstranit tyto nepřesnosti na základě metadatových souborů, které jsou v datovém balíku zahrnuty. Druhá varianta L2A má již tyto korekce na snímcích aplikované.

Uplatnění této datové sady v dané studii spočívá ve vyhodnocení zdravotního stavu vegetace, a to prostřednictvím meziročního porovnání hodnot normalizovaného diferenčního vegetačního indexu (NDVI) pro stejná vegetační období let 2019 a 2020. Problematika byla popsána v kapitole 2.3.

Železniční infrastruktura

Pro lokalizaci železničních tratí zahrnující i přilehlé ochranné pásmo, byla využita data získaná od jejich správce, tedy Správy železnic, státní organizace. Jedná se o vektorová data, kde jsou jednotlivé tratě znázorněny ve formě linií. Každé jsou přiřazena atributová data, která ji umožňují jednoznačně identifikovat. Konkrétně se jedná o drážní lokalizaci ve formě čísla koleje, traťového definičního úseku (TUDU) a hektometru. Pomocí těchto údajů je možné připojit jakékoliv další informace jejich pořizovatele. Ochranné pásmo je vyjádřeno prostřednictvím polygonů o vzdálenosti převážně 60 m od osy krajní koleje. Rozsah tohoto území je definován zákonem a je popsán v úvodní části (kap. 2).

Půdní typy

Datová sada obsahuje informace o bonitním rozdělení zemědělské půdy v ČR (Státní pozemkový úřad, 2024b). Jejím zpracovatelem je Státní pozemkový úřad. Informace o jednotlivých pozemcích jsou definovány prostřednictvím bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ). Jejich stanovení probíhá na základě mapových či jiných podkladů a průzkumu v terénu. Zde dochází k posouzení ekologických, geologických, geomorfologických, klimatických a pedologických poměrů. Díky tomu data obsahují detailní charakteristiku půdy vyskytující se v dané lokalitě (Státní pozemkový úřad, 2024).

Kód BPEJ se skládá z 5 číslic (X.XX.XX). První obsahuje informaci o klimatickém regionu, který vymezuje území s téměř shodnými klimatickými podmínkami pro růst rostlin (např. teplý, suchý, chladný, vlhký), Následující dvojice hodnot vymezuje hlavní půdní jednotku (celkem 78 jednotek). Ty se následně spojují do 13 skupin půd vykazujících podobné vlastnosti (např. černozemě, hnědozemě, černice). Čtvrtá číslice v kódu odpovídá sklonitosti a expozici pozemku ke světovým stranám. Na jejím základě je možné identifikovat riziko zvýšené eroze, vhodnost k zemědělskému

obhospodařování a další. Na základě informace o expozici může dojít k posouzení vegetačních podmínek lokality, ve smyslu délky osvit, teploty a srážek. Poslední hodnota v kódu BPEJ vypovídá o hloubce půdního profilu a skeletovosti. Údaj o skeletovosti vyjadřuje komplexní stanovení šterkovitosti a kamenitosti, podle výskytu částic větších než 2 mm v ornici a podornici.

Uplatnění této datové sady v procesu stanovení úrovně ohrožení železnice přilehlým lesním porostem spočívá v možnosti posouzení vlastnosti půdy (hydrická řada) a parametru terénu (sklon). Za významnou informaci je rovněž pokládán údaj o sklonitosti terénu. Porosty rostoucí ve svahu, který přesahuje 10° až 15° patří mezi nejvíce ohrožené (Lubojacký, 2013). Vymezené kategorie v datové sadě jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Kategorie sklonu vymezené dle BPEJ

Hodnota v kódu BPEJ	Sklon	Charakteristika
0	0-1°	úplná rovina
0	1-3°	rovina
1, 2, 3	3-7°	mírný sklon
4, 5	7-12°	střední sklon
6, 7	12-17°	výrazný sklon
8, 9	17-25°	příkrý sklon
8, 9	>25°	sráz

Další získanou informací z této vrstvy je typ půdy, konkrétně její hydrická řada. Na základě množství disponibilní vody během vegetačního období dochází k vymezení následujících hydrických řad: suchá, omezená, normální, podmáčená, vlhká a rašelinná (Divíšek et al., 2010). K plochám vektorové vrstvy byly tyto údaje přiřazeny prostřednictvím střední hodnoty v kódu BPEJ s využitím převodní tabulky (Kučera, 2004). Negativní vliv nadbytečné vlhkosti v půdě na růst stromové vegetace byl popsán v kapitole 2.2. Využitím těchto informací je možné vymežit lokality, na kterých kvůli mělkým kořenovým systémům může docházet k nárůstu úrovně ohrožení ve srovnání s méně zamokřenými oblastmi.

Větrné polomy

Datová vektorová sada obsahuje informace o výskytech větrných polomů na území ČR. Její správu a aktualizaci provádí ÚHÚL. V této studii nachází vrstva využití ve formě identifikace lokalit, které jsou v případě intenzivních povětrnostních podmínek ohroženější než jiné. Lesní porosty nacházející se na těchto plochách a současně v blízkosti železniční infrastruktury by měly být udržovány v nízkém

vzrůstu a pro novou výsadbu je nutné vhodně volit takové stromové druhy, které jsou za mimořádných podmínek odolnější. Pravidelně by měl být také posouzen vývoj zdravotního stavu. V případě identifikace chřadnutí je žádoucí neprodleně zajistit opatření.

5.2 Postup zpracování

Postup zpracování vychází z navržené metodiky v pilotní studii. Došlo však k úpravě přístupu pro přiřazení vah vyhodnocovaných atributů porostu, na jejichž základě dochází ke stanovení rizikovosti vegetace pro železniční infrastrukturu. Jejich hodnota vychází z odborných názorů respondentů z oblasti lesnictví a dálkového průzkumu Země. Pro jejich získání bylo provedeno dotazníkové šetření, které bylo následně vyhodnoceno prostřednictvím metody AHP. V pilotní studii byly váhy stanoveny na základě odborných vědeckých článků, jež se danou problematikou zabývaly. Rovněž došlo k rozšíření posuzovaného území z Libereckého kraje na celé území České republiky. Aplikací navržené metodiky na celou železniční trať dojde k získání informací o skutečném stavu porostu nacházejícím se v jejím ochranném pásmu.

Dotazníkové šetření

Hlavním úkolem tohoto dílčího kroku bylo získání odborného názoru od odborníků působících v oblasti lesnictví a dálkové průzkumu Země pro stanovení vah jednotlivých atributů porostu do výpočtu ohrožení vegetací. Dotazník byl sestaven v prostředí Google Online Form. Díky tomu byl respondentům snadno dostupný prostřednictvím internetu. Kvůli přehlednosti byl dotazník rozdělen do tří částí. První byla zaměřena na obecné vzájemné posouzení hlavních atributů dřevin vyhodnocovaných v této studii (*druhovú skladbu, výška a zdravotní stav*). Další dvě části byly zaměřeny na detailnější posouzení druhové skladby a výšky porostu. Součástí úvodní části bylo i vysvětlení řešené problematiky, popis již provedené pilotní studie a cíl dotazníkového šetření. Znalost těchto informací usnadňuje respondentům pochopení řešené problematiky a zároveň tak zvyšuje objektivitu získaných odpovědí. Na kladené otázky neexistují jednoznačně správné odpovědi, ale odráží subjektivní expertní názor dotazovaných. Ten se však opírá o jejich odborné znalosti a zkušenosti. První část byla zaměřena na posouzení všech 3 hlavních parametrů porostu zahrnutých do této studie (obr. 20). Otázka byla formulována následujícím způsobem: „*Který parametr z uvedené dvojice je pro výpočet ohrožení významnější?*“. Následuje dvojice parametrů s možností jejich výběru a stupnice s hodnotami od 1 do 9. Prostřednictvím ní je umožněno vyjádřit rozdílnost v úrovni významnosti vybraného parametru nad druhým, kdy hodnota 1 odpovídá shodné významnosti a 9 pak nejvyšší diferenci

ve prospěch vybraného parametru z uvedené dvojice. Otázky obsahují všechny možné kombinace parametrů.

Který parametr z uvedené dvojice je pro výpočet ohrožení významnější?

Druhovú skladba vegetace

Zdravotní stav vegetace

Jak moc je zvolený atribut významnější než druhý?

1 2 3 4 5 6 7 8 9

méně více

Obr. 20 Ukázka struktury otázky zaměřené na hlavní parametry porostu

Který druh z uvedené dvojice představuje vyšší ohrožení pro železnici?

smrk

borovice

Jak výrazně vyšší riziko představuje vybraný druh vůči druhému?

1 2 3 4 5 6 7 8 9

méně více

Obr. 21 Ukázka struktury otázky zaměřené na druhovou skladbu porostu

Druhá část se dotýkala druhové skladby, kdy došlo k výběru nejrozšířenějších lesních druhů v okolí železnice (borovice, buk, dub, a smrk). Ty byly následně rozděleny do párů a respondent z nich vybíral vždy ten, který dle jeho názoru představuje vyšší riziko ohrožení a v jaké úrovni. Ta byla opět volena prostřednictvím stupnice s možností výběru z hodnot 1 až 9, kdy 1 odpovídá totožnému riziku obou druhů a 9 pak nejvyšší rozdílnosti ve prospěch vybraného druhu. Došlo k vytvoření všech kombinací druhových dvojic. Nižší počet zahrnutých dřevin předpokládá dosažení lepšího výsledku šetření, protože jejich vyšší počet by mohl dotazovaného zmást a učinit tuto část nepřehlednou. Došlo však k výběru druhů stromů na území ČR převládajících a tedy nejvýznamnějších. Ve srovnání s daty o druhové skladbě

z ÚHÚL nebyla dotazována kategorie kleč, ostatní listnaté, ostatní jehličnaté a kultura. Otázka byla položena takto: „Který druh z uvedené dvojice představuje vyšší ohrožení pro železnici?“ (obr. 21).

Tématem poslední části dotazníku byla výška porostu. Respondentům byly nabídnuty výškové rozsahy, u kterých je předpoklad významné změny jimi představovaného ohrožení. Jejich vymezení bylo provedeno na základě odborné literatury, jež se danou problematikou zabývala. Úkolem dotazovaných bylo rozhodnout, která úroveň z uvedené dvojice představuje vyšší ohrožení pro železnici a stejně jako v předchozích částech určit, jak významně. Otázka byla formulována v této formě: „Která výšková skupina stromů představuje vyšší riziko ohrožení pro železnici?“ (obr. 22). Zahrnutí přímé možnosti zápisu výškových rozsahů by bylo problematické vyhodnotit prostřednictvím metody AHP, proto byla zvolena tato forma. Případnou nepřesnost ve vymezení kategorií však respondenti mohli formulovat v doplňkovém poli, které umožňovalo sestavit vlastní rozsahy.

Která výšková skupina stromů představuje vyšší riziko ohrožení pro železnici?

méně 5 m

5 až 10 m

Jak výrazně vyšší riziko představuje vybraná skupina vůči druhé?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
méně	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	více

Obr. 22 Ukázka struktury otázky zaměřené na výšku porostu

Dotazníkem byli osloveni odborníci jak ze státních organizací (např. Akademie věd ČR, Flora Olomouc, Magistrát města Olomouce, Mendelova univerzita v Brně, Správa železnic, Univerzita Palackého v Olomouci, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů a další), tak i ze soukromého sektoru (Conbios s.r.o., LT EkoLesServis s.r.o., ZHRADA Olomouc s.r.o.). Bylo jim umožněno do dotazníku vložit své jméno a vyjádřit souhlas s jeho případným uveřejněním v této studii. Část dotazovaných se však vyslovila proti tomu. Z tohoto důvodu nebylo možné do práce zahrnout úplný seznam respondentů, od kterých byl získán odborný názor. Celkem bylo osloveno 30 osob, ze kterých dotazník vyplnilo 15. Jelikož se jedná o fundované odborníky v oborech dotýkajících se problematiky

dendrologie a lesnictví, je možné považovat získané výsledky za vyhovující. Je nutné zohlednit skutečnost, že položené otázky nemají jednoznačnou správnou odpověď a získané poznatky odráží subjektivní názory dotazovaných zakládajících se na jejich zkušenostech a odborných znalostech. Vyšší počet respondentů by tak nemusel vést k získání přesnějšího výsledku, ale mohl by naopak přispět k jeho zkreslení, vlivem pokrytí širšího názorového spektra. Pro nejlepší výsledek je tak důležité zejména oslovit osoby skutečně orientující se v dané problematice, a to bylo zajištěno.

Údaje z tohoto dotazníku byly vyhodnoceny metodou AHP prostřednictvím nástroje AHP online (Goepel, 2018). Ten provede vytvoření hierarchie řešeného problému, ve kterém dojde k posouzení jeho dílčích prvků. Na základě toho je možné stanovit váhy jednotlivých parametrů uplatněných ve výpočtu ohrožení vegetací.

Zdravotní stav porostu

Vývoj zdravotního stavu porostu byl vyhodnocen na základě družicových snímků Sentinel-2. Data byla stažena z veřejného datového skladu Evropské kosmické agentury (dataspace.copernicus.eu). Byla využita jejich varianta označovaná jako L2A, která již obsahuje zapracované korekce stavu atmosféry v době snímkování. Díky tomu je odstraněno atmosférou způsobené ovlivnění naměřených dat a zároveň je umožněno srovnání snímků z různých období.

Pro objektivní posouzení meziročního vývoje stavu vegetace bylo sestaveno šest mozaikových kompozic pokrývajících celé území ČR. Snímky zachycují tři fenologická období let 2019 a 2020. První obsahuje snímky z měsíce května a června, druhé z července a srpna a poslední pak z měsíce září a října. Snahou bylo zvolit co nejbližší časová období v obou posuzovaných letech. Výběr byl však ovlivněn dostupností dat s nízkou úrovní výskytu oblačnosti. Její hranice byla stanovena na 20 %. U většiny snímků je však její hodnota výrazně nižší úrovně, a to do 10 %. Proces výběru dat zohlednil i prostorový výskyt mračen na snímcích a to tak, aby v zájmovém území byla jejich četnost nejnižší, nejlépe nulová. Vysoká oblačnost by znemožnila získání informace o odrazivosti povrchu a nebylo by tak možné stanovit zdravotní stav vegetace. Rovněž celé území ČR není družicemi Sentinel-2 zachyceno v jednom okamžiku a je tedy nutné kombinovat data pocházející z více dní.

Pro oba roky tak došlo k sestavení tří mozaik ze shodných časových období. Na odpovídajících dvojicích byl následně stanoven meziroční vývoj vegetačního indexu NDVI. Pro odstranění ovlivnění vyplývajících z různého srážkového a teplotního průběhu v jednotlivých letech byl celkový zdravotní stav vegetace vyhodnocen z mediánové hodnoty těchto tří období.

Prvním krokem bylo odstranění pixelů zasažených oblačností pomocí rasteru, který detekuje pravděpodobnostní výskyt mračen a je součástí distribuovaného

datového balíčku (*MSK_CLDPRB_20m.jp2*). Jeho prostorové rozlišení je 20 m na pixel. Pro toto vyhodnocení se jeví jako dostačující, protože výpočet indexu probíhá s využitím souboru B8A. Ten obsahuje informaci o blízkém infračerveném záření a dosahuje totožného rozlišení. Pokud by nebylo provedeno vyfiltrování oblačnosti, tak by došlo k významnému zkreslení výsledku, kvůli vysoké pohltivosti infračerveného a červeného záření částicemi vody. Pixelům zasažených oblačností byla nastavena hodnota 0. Rovněž bylo nutné zajistit jejich odstranění z konečného rasteru s meziročním vývojem vegetačního indexu, protože by zjištěné změny neodpovídaly skutečnému stavu. Ke zpracování byl využit program QGIS ve verzi 3.36.2 obsahující knihovny GDAL a OGR pro práci s rasterovými a vektorovými daty. Výhodou zvoleného softwaru je možnost volání jeho funkcí s parametry prostřednictvím skriptovacího jazyka Python.

Pro výpočet vegetačního indexu NDVI (vzorec 1) je potřebné pásmo červeného záření (vrstva B4), jehož střední vlnová délka je 664,6 nm pro nosič Sentinel-2A, respektive 664,9 nm pro nosič Sentinel-2B. Šířka pásma je pro oba shodná a to 31 nm. Druhá potřebná vrstva obsahuje informace o odrazivosti v blízkém infračerveném spektru záření. Sentinel pro jeho snímání využívá dva senzory, přičemž první zaznamenává celé toto spektrum (B8) a druhý pouze jeho užší část (B8A). Na základě existujících studií dosahuje při analýze vegetace lepších výsledků využití právě tohoto užšího pásma, proto bylo pro výpočet zvoleno (Li et al., 2017; H. K. Zhang et al., 2018; T. Zhang et al., 2017). Jeho střední vlnová délka dosahuje u Sentinelu-2A hodnoty 864,7 nm a šířka 21 nm, u Sentinelu-2B pak 864,0 nm a šířka 22 nm (ESA, 2024).

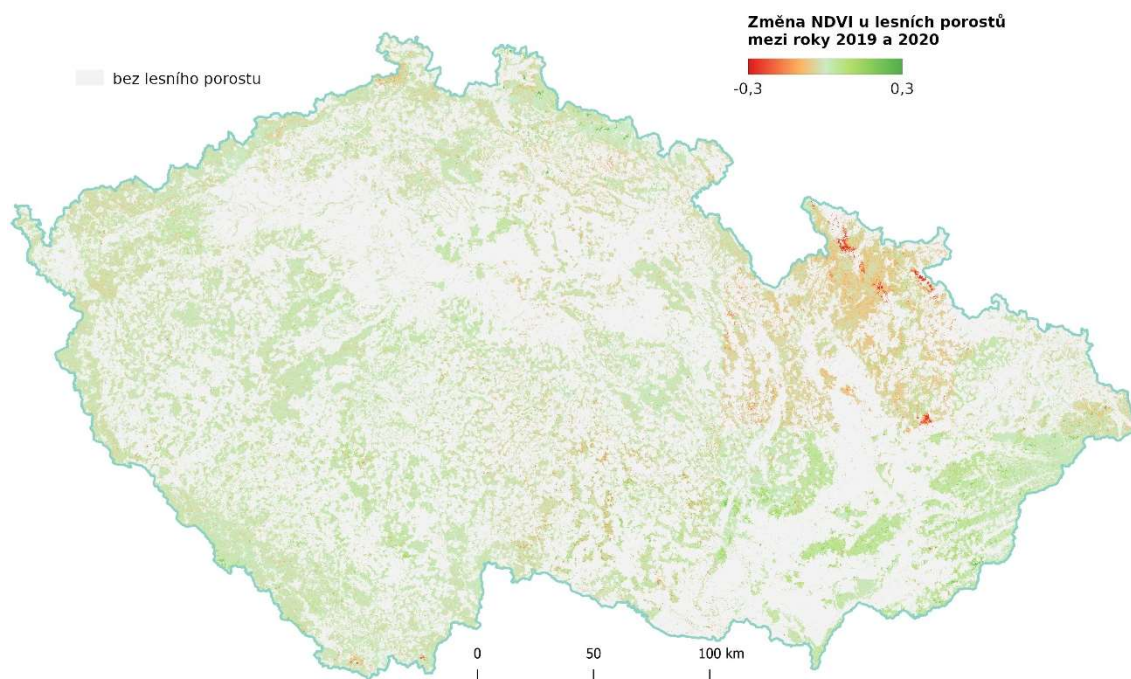
Z jednotlivých dlaždic, na kterých došlo k odstranění pixelů zasažených oblačností, byla sestavena mozaika pokrývající celé území ČR a to v červeném a v blízkém infračerveném spektru záření. Tento krok byl proveden pro data roku 2019 a 2020 samostatně. Nově vytvořené rastery byly následně použity pro výpočet vegetačního indexu NDVI v softwaru QGIS. Došlo tak k získání informace o jeho úrovni pro oba roky, kdy v každém roce je index spočítán ze tří časových období. V dalším kroku byl proveden rozdíl vrstev z odpovídajících si částí obou roků (NDVI 2019 - NDVI 2020) a došlo tak ke zjištění meziročního vývoje indexu v těchto ročních obdobích. Pixely vykazující záporné hodnoty odpovídají negativnímu směřování vegetace, tedy chřadnutí. Naopak body s kladnými hodnotami vypovídají o pozitivním vývoji, ve smyslu prospívání porostu. Stagnace pak odpovídá hodnotě 0.

Pro získání informace o celkové meziroční změně indexu NDVI bylo přistoupeno k výpočtu mediánu ze všech tří vybraných období. Díky tomu dochází k potlačení růstových výkyvů porostu, vyplývajících z odlišných panujících podmínek podnebí v jednotlivých letech (rozdílné teploty, srážkový úhrn a jiné). Rovněž dochází

k eliminaci pixelů zasažených oblačností, které by mohly významně ovlivnit výsledek. Pro tento krok byl uplatněn implementovaný rasterový kalkulátor softwaru Grass do programu QGIS a to *r.mapcalc*. Jeho výhodou je možnost výpočtu mediánu pro jednotlivé pixely bez zahrnutí nulových hodnot (parametr *nmedian*). Jejich výskyt je způsoben pokrytím daného území v době snímkování oblačností. Tyto hodnoty jsou tedy nežádoucí.

Výsledkem této části je raster, který obsahuje hodnoty meziroční změny vegetačního indexu NDVI (obr. 23). Ten vychází ze tří vybraných období v obou letech a zvyšuje tak objektivitu výsledku. Na základě zjištěné změny je pak možné identifikovat porosty, které prospívají a ty, jež chřadnou. Zjištěné hodnoty vstupují do indexu IVTIR přímo a není tedy nutné provádět jejich reklasifikaci.

Z důvodu rozsáhlosti posuzovaného území bylo nutné proces zpracování částečně automatizovat. Pro tento účel byly sestaveny skripty v jazyce Python, které využívaly funkce QGIS. Jejich zdrojové kódy jsou umístěny na webové adrese <https://github.com/kuceraIVTIR>.



Obr. 23 Meziroční změna vegetačního indexu NDVI na území ČR mezi roky 2019 a 2020

Výška porostu

Rasterová data obsahující informace o výšce stromové vegetace. Jedná se o soubor jedinečných výšek vztahujících se k jednotlivým pixelům (obr. 24). Pro účely vyhodnocení tohoto parametru došlo k sestavení rozsahů, u kterých je předpoklad postupného nárůstu vegetačního ohrožení. To vyplývá zejména ze skutečnosti,

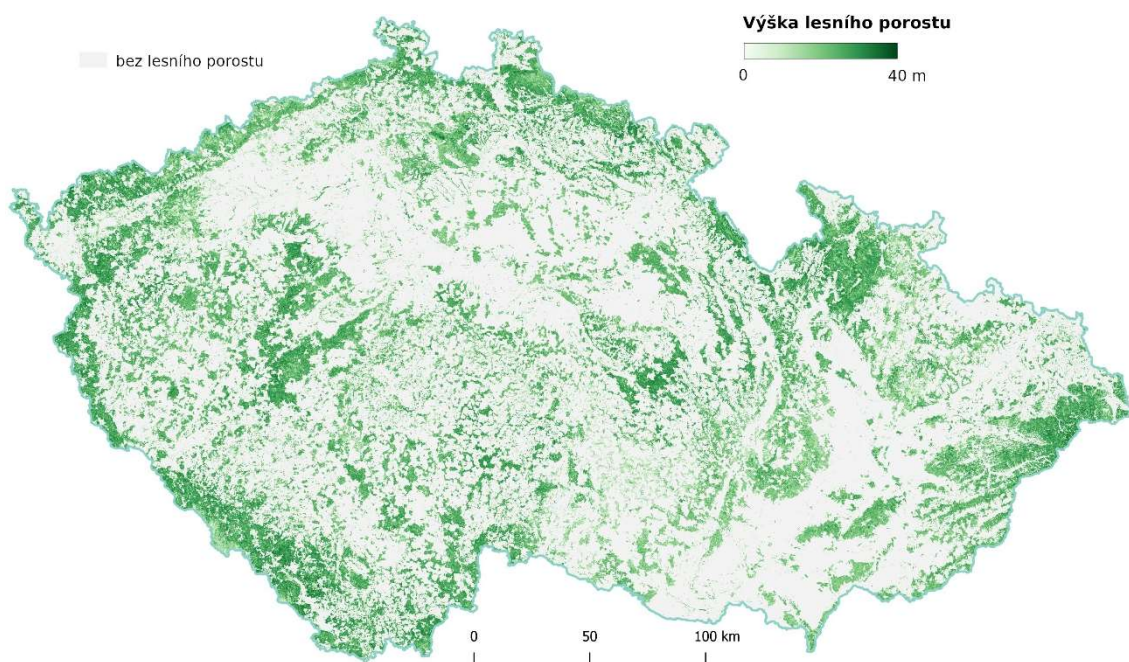
že vzrostlejší stromy mohou zasáhnout infrastrukturu z větší vzdálenosti. Také na základě již existujících studií je zřejmé, že vzrostlejší porosty musejí odolávat větším náporům povětrnostních vlivů.

Pixely tak byly zařazeny do kategorií, jejichž rozsahy jsou následující:

- méně než 5 m
- 5,1 m až 10 m
- 10,1 až 15 m
- 15,1 až 20 m
- více než 20 m

Pro identifikaci lesů na těchto výškových datech byla využita rasterová vrstva druhové skladby, jež je použita v této studii. Tímto krokem došlo k odstranění nelesních pixelů, protože cílem je identifikace ohrožení vznikajícího ze souvislých lesních porostů. Samotné odstranění bylo realizováno prostřednictvím rasterové masky v softwaru QGIS. Konkrétně byla využita implementovaná funkce z programu Grass a to *r.mask*. Ta je schopna z rasteru vyselektovat pixely, na kterých dochází k překryvu s maskovací vrstvou, tedy vrstvou s lokalizací lesních porostů. Současně došlo k odstranění pixelů se zaznamenanou těžbou. K tomuto kroku bylo přistoupeno, protože v těchto oblastech není předpoklad vzniku ohrožení.

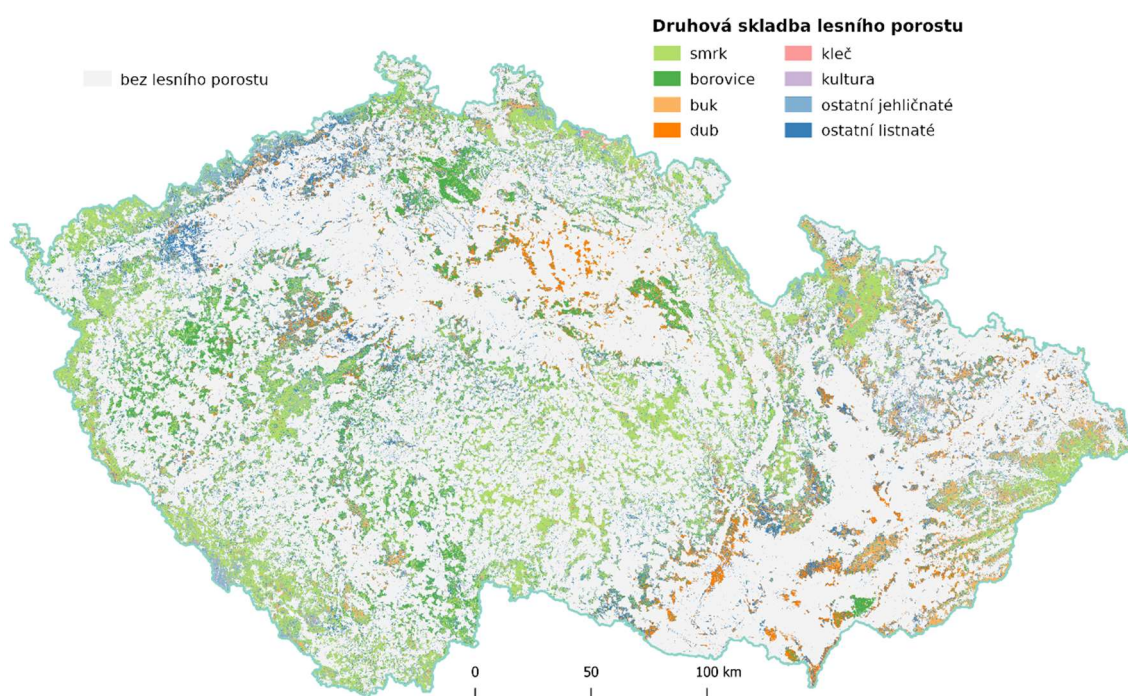
Takto upravená data byla následně reklasifikována na hodnoty stanovených vah jednotlivých výškových kategorií. Ty byly stanoveny na základě dotazníkového šetření.



Obr. 24 Výška lesního porostu na území ČR v roce 2020

Druhová skladba vegetace

Jednotlivé pixely v této datové sadě nesou informaci o dominantním výskytu dřevinných typů na území České republiky (obr. 25). Pro zjednodušení procesu vyhodnocení a zvýšení důrazu na identifikaci skutečně ohrožených lokalit byl snížen počet druhů, které vrstva obsahuje. Byly vybrány pouze ty, které mohou riziko pro železnici skutečně představovat a také se v jejím okolí nachází. Došlo tedy například k odstranění nízkých porostů tvořených borovicí kleč, u kterých je nebezpečí narušení železničního provozu nízké až zanedbatelné. Naopak důraz byl kladen zejména na smrkové, borovicové, dubové a bukové porosty. Problematické je vyhodnocení pixelů s výskytem dřevin spadajících do kategorie *ostatní listnaté* a *ostatní jehličnaté*. Na těchto místech není možné jednoznačně identifikovat zde vyskytující se stromy. Jelikož smíšené lesní porosty se dle odborné literatury vyznačují vyšší odolností než monokultury, byla jim přiřazena nižší váha, kterou získal druh stejné třídy.



Obr. 25 Druhová skladba lesního porostu na území ČR v roce 2020

Data lesních dřevin byla vytvořena v roce 2017. Pro získání stavu roku 2020 bylo nutné zajistit odstranění ploch, na kterých došlo k těžbě. To je vhodné, protože tato místa již nepředstavují riziko pro přilehlou železnici. V případě, že by zůstala zachována, došlo by ke stanovení ohrožení i na místech již bez porostu. Tím by byl výsledek negativně ovlivněn. Vzhledem k rychlosti růstu dřevin a zákonných pravidel pro obnovu lesa, je možné tato data pro vyhodnocení stavu roku 2020 použít. Lhůta

obnovy lesa v době porážení použitých dat byla 2 roky (v současnosti byla již na základě zjištění příznivých dopadů dočasného zachování holin prodloužena na 5 let), proto je možné vymýcená místa považovat za plochy, které riziko ohrožení nepředstavují. Tento předpoklad rovněž potvrzuje fakt, že rychle rostoucí dřevina smrk dosáhne výšky 2 m přibližně až po 10 letech.

Pro odstranění vytěžených ploch byla použita data, která vytváří ÚHUL na základě družicových dat. K tomuto účelu byla využita funkce GIS *Oříznout raster podle vrstvy masky*. Dále byly na základě dotazníkového šetření vybraným dřevinným typům přiřazeny váhy, dle očekávané míry představovaného ohrožení, a to prostřednictvím rasterové kalkulačky.

Stanovení rizika ohrožení železnice přilehlou stromovou vegetací

Celkové riziko ohrožení železnice přilehlou stromovou vegetací bylo stanoveno na základě kombinace výsledků z předchozích kroků. Konkrétně se jednalo o vrstvu druhové skladby lesů, výšky porostu a zdravotního stavu odvozeného z meziročního vývoje vegetačního indexu NDVI. Původní hodnoty rasterů byly nahrazeny vahami získanými z dotazníkového šetření vyhodnoceného metodou AHP.

Použité datové zdroje pochází od různých organizací, a proto mají rozdílné parametry. Jednalo se zejména o souřadnicový systém, prostorové rozlišení a rozmístění pixelů. Pro umožnění jejich zkombinování bylo tyto parametry nejprve nutné harmonizovat. K tomuto kroku byl využit software QGIS a jeho funkce *Zarovnat raster*. Ta je schopna všechny výše zmíněné parametry sjednotit. Jako souřadnicový systém byl vybrán S-JTSK (EPSG 5514), který se jeví pro posuzované území České republiky jako nejvhodnější. Buňka rasterů byla sjednocena na velikost 10 m x 10 m. Protože dochází k posouzení souvislých stromových porostů v okolí železnice, tak se tento rozměr jeví jako dostačující. Rovněž nedochází ke snížení prostorové informace výsledku, jelikož využívá pro stanovení zdravotního stavu porostu snímky družice Sentinel-2, které dosahují velikosti pixelu 20 m. Rozmístění jednotlivých pixelů bylo vyrovnáno na základě převzorkování metodou nejbližšího souseda. Během těchto úprav byl kladen důraz na nesnížení informační hodnoty jednotlivých rasterů.

Úroveň rizika ohrožení byla vypočítána prostřednictvím *Rasterové kalkulačky*. Vzhledem k novým expertně stanoveným vahám vstupních parametrů byl navržen upravený vzorec výpočtu, označovaný jako *Improved Vegetation Threat Index for Railway infrastructure* (vzorec 3).

$$IVTIR = -(V_{PZ} \times Z_{NDVI}) + V_{PD} \times V_{VD} + V_{PV} \times V_{VV}$$

IVTIR – vylepšený index ohrožení vegetací (*Improved Vegetation Threat Index for Railway infrastructure*)

V_{PZ} – váha parametru zdravotního stavu vegetace

Z_{NDVI} – meziroční změna vegetačního indexu NDVI

V_{PD} – váha parametru druhu stromu

V_{VD} – váha vedlejší dle druhu stromu

V_{PV} – váha parametru výšky stromu

V_{VV} – váha vedlejší dle výšky stromu

Vzorec 3 Vzorec pro výpočet indexu ohrožení železniční infrastruktury lesní vegetací

Výsledná váha odpovídající vývoji zdravotního stavu byla stanovena jako opačné číslo násobku meziroční změny vegetačního indexu NDVI ($NDVI_{20} - NDVI_{19}$) a váhy parametru zdravotního stavu vegetace. Takto zvolený postup zvyšuje úroveň rizika v případě, kdy v daném pixelu došlo k zaznamenání chřadnutí porostu, tedy poklesu indexu NDVI. Naopak ho snižuje při zjištění pozitivního vývoje, ve smyslu nárůstu meziroční hodnoty indexu NDVI.

Váha druhové skladby v sobě kombinuje dvě hodnoty. První zohledňuje důležitost tohoto parametru na stanovení rizikovosti porostu obecně a druhá pak konkrétního stromového druhu. Výsledná hodnota je vypočítána jako jejich součin. Posledním parametrem, který vstupuje do výpočtu, je váha výšky porostu. Její hodnota odpovídá příslušnosti daného pixelu do čtyř vymezených výškových rozsahů. Hodnoty vah jednotlivých parametrů jsou uvedeny v kapitole Výsledky (6.2).

Výsledek tohoto výpočtu pak charakterizuje úroveň ohrožení vegetací přilehlé železnice. Jeho vyšší hodnota je charakteristická pro místa s větší intenzitou možného nebezpečí.

Vyhodnoceno bylo celé zalesněné území České republiky. Cílem práce je však stanovení ohrožení železnice, proto došlo k ořezání nově získaného rasteru vektorovou vrstvou ochranného pásma železnice. K tomuto účelu byla využita funkce softwaru GRASS implementovaná do programu QGIS *r.mask.vect*.

Železniční infrastruktura

Ohrožení železnice přilehlou vegetací bylo posuzováno pouze v jejím ochranném pásmu. Pro výběr zájmového území na nově vytvořených rastrech v předchozích krocích byla využita vektorová data získaná od Správy železnic. Ta obsahují kromě průběhu samotných tratí i prostorové vymezení ochranného pásma dráhy ve formě

polygonů. Ořez byl proveden v softwaru QGIS funkcí *Oříznout raster podle vrstvy masky*.

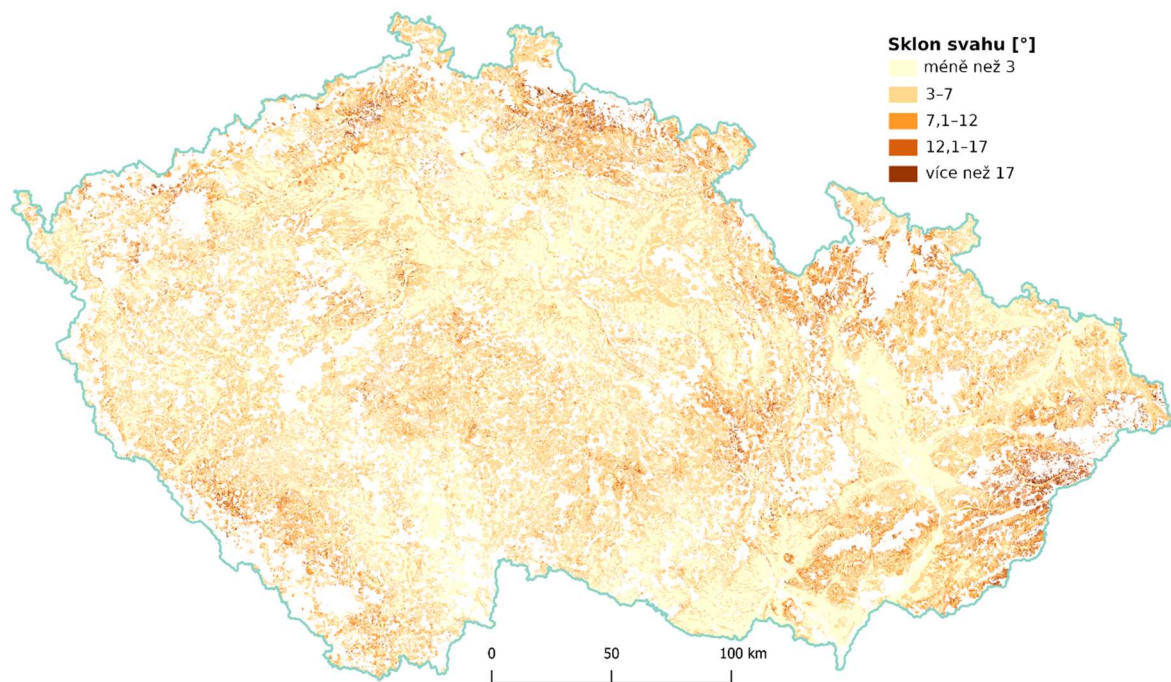
Porovnání výsledku se skutečným výskytem mimořádných událostí

Vypočítané hodnoty indexu IVTIR byly porovnány se skutečným výskytem mimořádných událostí způsobených srážkou vlaku se stromem. Data pořizuje pro svoji interní potřebu správce infrastruktury Správa železnic. Při srovnání způsobu jejich evidence během zpracovávání pilotní studie (pouze lokalizace mezi přilehlé stanice) byl zjištěn pozitivní vývoj. Prostorová lokalizace je již vedena ve formátu souřadnic GPS a díky tomu je možné identifikovat přesné místo výskytu mimořádné události. Datová sada obsahuje informace o 360 nehodách nastalých v období let 2021 až 2024.

Ke zjištění souvislostí mezi úrovní vypočítaného indexu IVTIR a výskytem skutečných mimořádností, byla přiřazena každé události hodnota IVTIR bodů nacházejících se v jejím 20m okolí. Tím došlo k zohlednění úrovně ohrožení zaznamenaného v dané lokalitě. V případě, že by byla brána pouze hodnota konkrétního pixelu nacházejícího se v místě výskytu mimořádnosti, mohlo by dojít ke zkreslení výsledku vlivem nepřesné prostorové lokalizace či vymykající se hodnotě ohrožení konkrétního pixelu vůči jeho okolí. Použitý postup tyto dopady minimalizuje. Zájmové okolí bodů bylo vymezeno funkcí softwaru QGIS *Obalová zóna*. Těmto zónám pak byly přiřazeny výsledné IVTIR hodnoty prostřednictvím funkce *Zonální statistiky*. Pro každou 20m obalovou zónu mimořádné události byl spočítán průměr a medián okolních hodnot. Hodnoty indexu v okolí mimořádností vykazují různou variabilitu, od nízkých hodnot až po vysoké. Většinou však převažují střední a vyšší hodnoty indexu. Mediánová hodnota indexu ukazuje prostřední hodnotu seřazených hodnot indexu v okolí a vystihuje tak lépe charakteristickou hodnotu indexu než průměrná hodnota, která je citlivá na odchylky hodnot.

Půdní typy

V této části došlo k identifikaci zalesněných ploch nacházejících se v ochranném pásmu železnice, které vykazují nebezpečný sklon svahu o více než 12°. Tato hraniční hodnota byla stanovena na základě odborné lesnické literatury a je popsána v kapitole 5.1. Sklon svahu byl jednotlivým plochám přiřazen dle hodnoty v kódu BPEJ (obr. 26), který je rovněž popsán ve zmíněné části práce.



Obr. 26 Sklon svahu sestavený na základě kódu BPEJ

Z této vrstvy došlo dále k výběru pouze rizikových ploch, u kterých sklon přesahuje již zmíněných 12° . Následně pomocí funkce softwaru QGIS *r.mask.vect* došlo ke stanovení jejich průniku s vrstvou obsahující vypočítaný index IVTIR v zalesněném ochranném pásmu železnice. Index IVTIR tak byl rozšířen o informaci sklonu terénu, která může pomoci identifikovat extrémně ohrožené lokality. Statistické údaje o nově sestavené vrstvě byly vypočítány funkcí *Zpráva o jedinečných hodnotách rasterové vrstvy*. Dalším získaným parametrem z vrstvy BPEJ je hydrická řada půdy, která vypovídá o množství vody v ní nacházející se během vegetačního období. Její nadbytek může vést k mělkému kořenovému systému stromů. Tyto stromy představují vyšší úroveň ohrožení během mimořádných povětrnostních podmínek. Bez posouzení této vlastnosti půdy nemusí být možná vyšší úroveň ohrožení odhalitelná. Připojení této informace bylo provedeno prostřednictvím střední hodnoty kódu BPEJ a převodní tabulky uvedené v kapitole 5.1. Z ploch této vrstvy byly vybrány pouze ty, jež spadají do hydrické řady zamokřená, mokrá a rašelinná. Dále byl proveden jejich průnik s vrstvou obsahující hodnoty indexu IVTIR a to prostřednictvím funkce *r.mask.vect* softwaru QGIS. Tím došlo k výběru části zalesněného ochranného pásma železnice nacházejících se na půdách vybraných hydrických řad. Pro tyto plochy byly následně získány statistické hodnoty funkcí *Zpráva o jedinečných hodnotách rasterové vrstvy*.

6 VÝSLEDKY

Výsledky druhé studie zahrnují analýzy tří vybraných atributů stromové vegetace nacházející se v ochranném pásmu železnice na území České republiky. Ty jsou následně syntetizovány do výsledné hodnoty indexu ohrožení železnice, který zároveň vypovídá o rizikovosti porostu. Dochází tak k popisu stavu vegetace v okolí dráhy a současně k identifikaci míst, které se jeví jako nebezpečné, zejména za intenzivních povětrnostních podmínek.

Celková rozloha ochranného pásma železniční dráhy v České republice je 1 140 km². Více než pětinu pak pokrývají lesy, téměř 250 km². Z tohoto důvodu je sledování stavu dřevin pro zajištění bezpečného a plynulého provozu vysoce žádoucí.

Sestavené rastery budou dostupné ke stažení na webové adrese <https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/phd/kucera24>.

6.1 Výsledky parametrů vegetace pro území ČR

Výška porostu

Vyhodnocení výškového stavu vegetace v roce 2020 bylo provedeno pro ochranné pásmo železnice (obr. 27). Plochy bez vegetace nebo se zaznamenanou těžbou byly z analýzy odstraněny, protože nepředstavují pro přilehlou infrastrukturu ohrožení. V rasterových datech je každému pixelu přiřazena hodnota výšky v metrech, pro zpřehlednění výsledků však byly v tab. 10 kategorizovány po 5 m.



Obr. 27 Ukázka dat výšky porostu v ochranném pásmu železnice na podkladu leteckých snímků v roce 2020

V zalesněných oblastech ochranného pásma železnice mají nejčetnější zastoupení stromy ve výškovém rozsahu 20 až 24 m. Konkrétně zaujímají 31,2 % posuzovaného území, což odpovídá rozloze 77 km². Do této kategorie spadají tři nejpočetnější výšky datového souboru a to 20, 21 a 22 m. Každá pokrývá území o rozloze mírně přes 16 km².

Z výsledků je patrné, že téměř 80 % stromů spadá do rozmezí výšek 15 až 29 m. Menších než 15 m je necelých 14 % a vyšších než 29 m pak 7,5 %. Nejvyšší stromy přesahující 40 m pokrývají 0,02 % zájmového území, které odpovídá ploše 0,05 km². Tyto nejvyšší stromy představují největší hrozbu.

Tab. 10 Výška dřevin nacházejících se v ochranném pásmu železnice

Výška [m]	méně než 5	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-40	více než 40
Plocha [km ²]	0,14	4,13	29,95	70,81	76,99	46,07	16,28	2,29	0,05
Zastoupení [%]	0,06	1,67	12,14	28,69	31,20	18,67	6,60	0,93	0,02

Pro výpočet výsledného ohrožení železnice byly vytvořeny čtyři kategorie s různým výškovým rozsahem:

- méně než 5 m
- 5-10 m
- 10-20 m
- více než 20 m

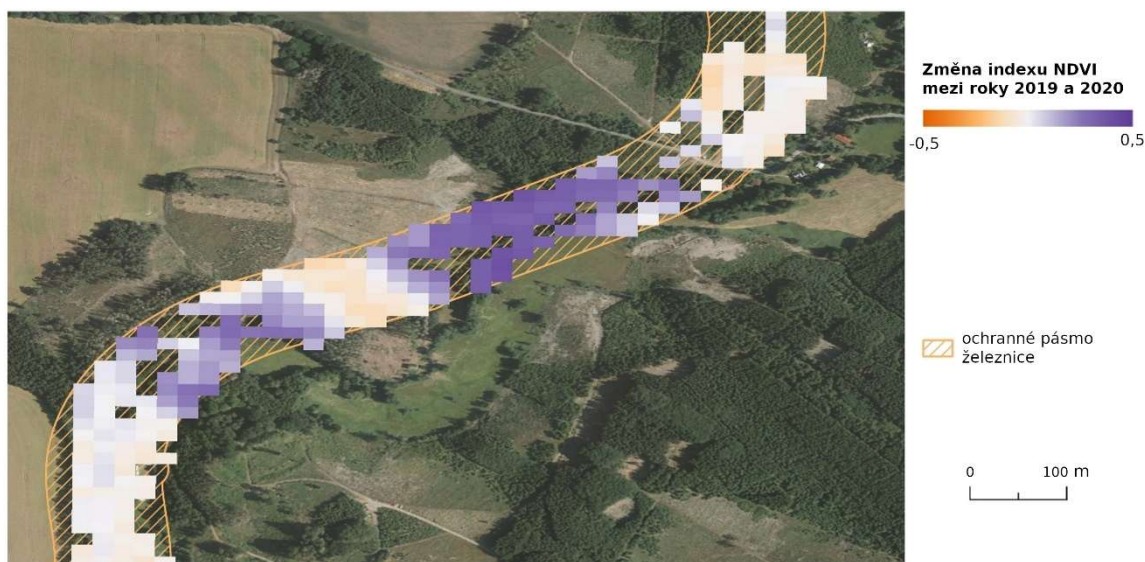
Toto zjednodušení bylo nutné zejména kvůli zvolenému postupu pro stanovení vah jednotlivých atributů, tedy pomocí dotazníkového šetření. Větší množství kategorií by mohlo být pro respondenty matoucí a negativně ovlivnit jejich rozhodování. Sestavené 4 skupiny vhodně pokrývají úroveň ohrožení vyplývající z výšky porostu, a proto se jeví jejich počet jako dostačující. Zastoupení dřevin v jednotlivých kategoriích je uvedeno v tabulce 11.

Tab. 11 Zastoupení dřevin v ochranném pásmu železnice podle kategorií výšky

Výška [m]	méně než 5	5-10	10-20	více než 20
Plocha [km ²]	4,27	2,25	102,63	157,97
Zastoupení [%]	1,60	0,84	38,42	59,14

Zdravotní stav porostu

Dílčí výsledek obsahuje informace o změně hodnoty vegetačního indexu NDVI mezi roky 2019 a 2020 (obr. 28). Zjištěná hodnota vypovídá o vývoji zdravotního stavu v dané lokalitě. V případě zaznamenání jeho poklesu, dochází k úbytku biomasy, který je charakteristický pro chřadnutí. Opačný vývoj pak značí prospívání a rozrůstání vegetace. Při vyhodnocení je nutné zohlednit rozdílné růstové podmínky rostlin během dvou srovnávaných let, především rozložení srážkového úhrnu a teplotního ročního průběhu. Vyhodnocením tří vybraných období v každém roce a stanovení výsledné roční hodnoty prostřednictvím mediánu dílčích změn, byl však tento dopad významně snížen. Zjištěné záporné změny není možné přímo označit za místa s výskytem vegetace ve špatném zdravotním stavu, ale za lokality, na kterých dochází k jeho zhoršování. Hodnota změny pak odpovídá jeho intenzitě. Negativní vývoj vede ke snížení odolnosti dřevin a tím k narůstání rizika pro přilehlou železniční infrastrukturu.



Obr. 28 Ukázka dat změny zdravotního stavu porostu v ochranném pásmu železnice na podkladu leteckých snímků v roce 2020

Hodnocení bylo provedeno pouze pro území v ochranném pásmu železnice, pokryté lesním porostem. Rovněž došlo k vyloučení míst, na kterých byla zaznamenána těžba. Ta případné riziko eliminuje. Jednotlivé pixely byly kategorizovány dle úrovně zjištěné změny indexu do 7 kategorií:

- | | | | |
|------------|--------------------|----------|----------------------|
| - nárůst | vysoký (0,5; ∞) | - pokles | nízký <-0,3; -0,1) |
| | střední (0,3; 0,5> | | střední <-0,5; -0,3) |
| | nízký (0,1; 0,3> | | vysoký (- ∞; -0,5) |
| - stagnace | <-0,1; 0,1> | | |

Při meziročním srovnání stavu lesní vegetace v ochranném pásmu železnice za období měsíce května a června (tab. 12) vykazuje téměř 59 % plochy stagnaci. Do této kategorie spadá území, na němž byla identifikovaná změna v intervalu -0,1 až 0,1. Volba tohoto rozsahu má za cíl potlačit méně významné změny, které mohou být způsobené rozdílnou dobou snímkování a naopak zdůraznit ty s intenzivnějším vývojem. Pozitivní nárůst hodnoty vegetačního indexu NDVI byl zaznamenán na 22 % této plochy. Největší zastoupení v něm tvoří nízký nárůst v rozmezí 0,1 až 0,3. Degradace vegetace byla zjištěna na 19 % plochy. Opět největší zastoupení tvoří mírné snížení hodnoty o 0,1 až 0,3, a to přes 13 %. Jako problematické oblasti, kterým by se měla věnovat zvýšená pozornost, je možné označit ty, na kterých hodnota indexu meziročně poklesla o více než 0,3 hodnoty. Jejich podíl na celkové ploše tvoří více než 5 %. V celkovém srovnání byl však na většině ploch zjištěn nárůst hodnoty indexu či jeho stagnace.

Tab. 12 Lesní plochy v ochranném pásmu železnice dle meziroční změny vegetačního indexu NDVI – květen/červen

Kategorie		Změna NDVI indexu [-]	Zastoupení v zalesněném ochranném pásmu dráhy [%]
nárůst	vysoký	více než 0,5	0,00
	střední	0,3 – 0,5	0,91
	nízký	0,1 – 0,3	21,52
stagnace		-0,1 – 0,1	58,56
pokles	nízký	-0,1 – -0,3	13,59
	střední	-0,3 – -0,5	5,40
	vysoký	méně než -0,5	0,01

V následujícím vyhodnoceném období nacházejícím se v měsících červenci a srpnu byla stagnace hodnoty indexu zjištěna na více než 83 % plochy (tab. 13). Rozlohy ploch s poklesem či nárůstem hodnoty se vůči předchozímu období snížily, a to v obou případech na hodnotu mírně přesahující 8 %. Příčinou je možné dosažení shodných růstových podmínek, které mohly být v předcházejících měsících významně odlišné. Rozsah vysoce ohrožených lokalit, na kterých došlo k poklesu vegetačního indexu o více než 0,3 se snížil na 1,61 procenta.

Tab. 13 Lesní plochy v ochranném pásmu železnice dle meziroční změny vegetačního indexu NDVI – červenec/srpen

Kategorie		Změna NDVI indexu [-]	Zastoupení v zalesněném ochranném pásmu železnice [%]
nárůst	vysoký	více než 0,5	0,02
	střední	0,3 – 0,5	1,05
	nízký	0,1 – 0,3	7,30
stagnace		-0,1 – 0,1	83,42
pokles	nízký	-0,1 – -0,3	6,61
	střední	-0,3 – -0,5	1,60
	vysoký	méně než -0,5	0,01

V posledním vyhodnoceném období založeném na datech z měsíce září a října bylo zaznamenáno opět zlepšení stavu porostu (tab. 14). Více než 92 % plochy vykazuje stagnaci hodnoty indexu. Pozitivní směřování dosáhlo podílu téměř 4 % a obdobné zastoupení pak tvoří lokality s negativním vývojem.

Tab. 14 Lesní plochy v ochranném pásmu železnice dle meziroční změny vegetačního indexu NDVI – září/říjen

Kategorie		Změna NDVI indexu [-]	Zastoupení v zalesněném ochranném pásmu železnice [%]
nárůst	vysoký	více než 0,5	0,00
	střední	0,3 – 0,5	0,38
	nízký	0,1 – 0,3	3,53
stagnace		-0,1 – 0,1	92,76
pokles	nízký	-0,1 – -0,3	3,23
	střední	-0,3 – -0,5	0,09
	vysoký	méně než -0,5	0,00

Celkový meziroční vývoj hodnoty vegetačního indexu NDVI, byl stanoven jako medián hodnot odpovídajících si pixelů ze všech tří ročních období. Tento postup zaručuje dosažení nejobektivnějšího výsledku, protože eliminuje mimořádné propady způsobené výrazně odlišnými růstovými podmínkami. Lokality, na kterých byl ve všech případech zjištěn negativní průběh, je možné jednoznačně označit za ohrožené.

Zjištěné změny indexu NDVI jsou uvedeny v tabulce 15. Z výsledku je patrné, že většina lesního porostu, který se nachází v ochranném pásmu železnice, vykazuje

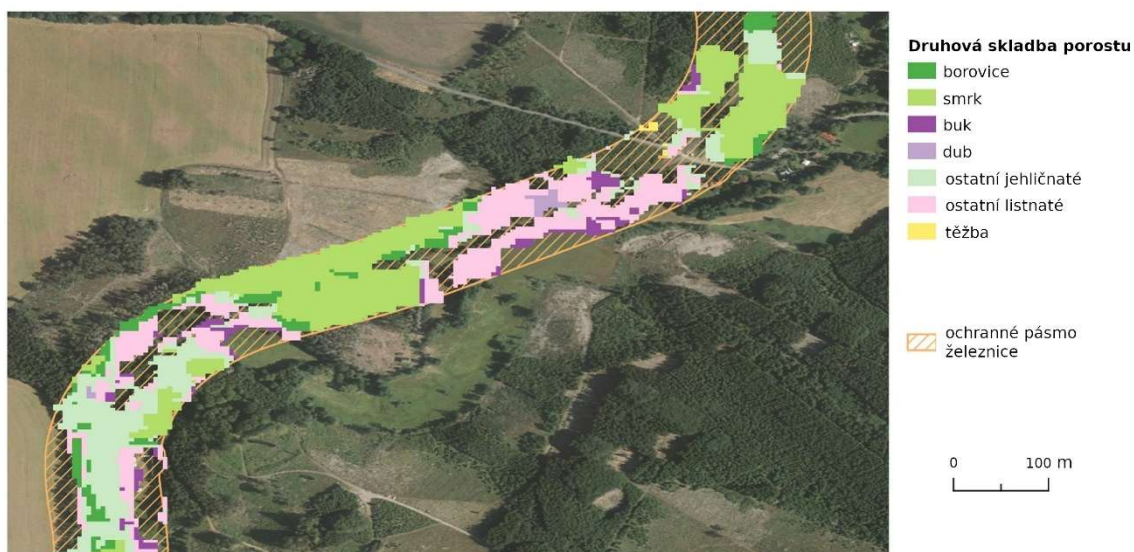
příznivý vývoj. Konkrétně téměř 96 % vegetace spadá do kategorie v rozmezí zaznamenané meziroční změny -0,1 až 0,1. Pro ni je charakteristický vyrovnaný stav. Pozornost je však nutné věnovat lesním porostům, které pokrývají téměř 2,5 % zalesněných ploch ochranného pásma železnice. Ty vykazují meziroční propad hodnoty indexu NDVI v rozmezí -0,1 až -0,3.

Tab. 15 Lesní plochy v ochranném pásmu železnice dle meziroční změny vegetačního indexu NDVI – celkem

Kategorie		Změna NDVI indexu [-]	Zastoupení v zalesněném ochranném pásmu železnice [%]
nárůst	vysoký	více než 0,5	0,00
	střední	0,3 – 0,5	0,02
	nízký	0,1 – 0,3	1,55
stagnace		-0,1 – 0,1	95,99
pokles	nízký	-0,1 – -0,3	2,34
	střední	-0,3 – -0,5	0,1
	vysoký	méně než -0,5	0,00

Druhová skladba vegetace

Druhová skladba byla vyhodnocena u souvislých porostů nacházejících se v ochranném pásmu železnice, mimo ploch, na kterých byla zjištěna těžba, protože tyto lokality nepředstavují ohrožení (obr. 29).



Obr. 29 Ukázka dat družové skladby porostu v ochranném pásmu železnice na podkladu leteckých snímků v roce 2020.

Největší zastoupení mají dvě nejednoznačně vymezené kategorie: *ostatní jehličnaté* a *ostatní listnaté*. U nich nebylo na základě spektrálního chování možné přesně určit vyskytující se druh stromu, případně se může jednat o místa vícedruhového porostu. Na základě odborné literatury je znám fakt, že takové porosty se jeví jako odolnější proti působení vnějších vlivů. Je tedy možné na ně nahlížet jako na lokality, od kterých lze očekávat nižší ohrožení. Problematika těchto kategorií a způsob jakým na ně nahlížet byla konzultována s Ing. Filipem HÁJKEM Ph.D., jenž tuto datovou sadu vytváří.

Kategorie *ostatní listnaté* pokrývá plochu 123,6 km², která odpovídá podílu na porostu o velikosti 49,6 %. Tedy téměř polovinu souvislé stromové vegetace v ochranném pásmu dráhy tvoří smíšené listnaté porosty. Tyto struktury, jak již bylo zmíněno, vykazují vyšší úroveň odolnosti a jsou tedy vhodné pro umístění v blízkosti dopravní infrastruktury. Kategorie *ostatní jehličnaté* se nachází na území o velikosti 49,6 km², což odpovídá podílu téměř 20 %. I tyto smíšené porosty se vyznačují vyšší rezistencí než v případě monokultur.

Tab. 16 Druhová skladba lesního porostu v ochranném pásmu železnice

Druh dřeviny	Rozloha [km ²]	Zastoupení v ochranném pásmu železnice [%]
borovice	18,4	7,3
buk	10,6	4,2
dub	19,4	7,8
smrk	23,0	9,2
ostatní jehličnaté	49,6	19,9
ostatní listnaté	123,6	49,6
kultura	3,1	1,2

Rozlišenou dřevinou, jejíž výskyt je v posuzovaném území nejčtenější, je smrk (tab. 16). Ten se nachází na území o rozloze 23 km² a dosahuje 9% podílu na celkovém porostu. Především kvůli vzrůstajícím teplotám se v současnosti stávají porosty dominantně smrkové problematické. Zejména proto, že pro ně vhodné růstové klima se přesouvá do chladnějších vyšších nadmořských výšek. U stávajících porostů může docházet ke chřadnutí, které snižuje jejich rezistenci vůči parazitům. To ve výsledku vede k celkovému poklesu odolnosti dřevin a nárůstu jejich rizikovosti. Méně rozsáhlé území pokrývají dubové porosty, konkrétně pak plochu o velikosti 19,4 km² (7,8 %). Pouze mírně menší plochu, a to 18,4 km² (7,3 %), zaujímá borovice. Téměř poloviční podíl vůči ostatním druhům pak vykazuje bukový porost, jeho zastoupení je pouze 4,2 %, to odpovídá území 10,6 km². Poslední obsaženou kategorií je *kultura*.

Ta zahrnuje nově vysazený les, ve kterém je výška dřevin v rozmezí 1 až 1,5 m. Z této definice je patrné, že tyto stromy riziko pro přilehlou železnici nepředstavují.

6.2 Výsledné váhy parametrů získané metodou AHP

Dotazníková šetření

Dotazníkové šetření bylo rozděleno do tří částí. První obsahovala posouzení hlavních parametrů porostu sloužící pro stanovení jeho míry hrozby. Druhá obsahovala jednotlivé druhy stromů a poslední sestavené výškové rozsahy vegetace. Každá část byla vyhodnocena samostatně. Celkově se do testování zapojilo 15 odborných respondentů (z celkového počtu 30 oslovených).

Výsledky první části cílily na posouzení hlavních parametrů porostu využívaných v této studii, tedy druhové skladby, výšky porostu a zdravotního stavu. Získané odpovědi účastníků vykazují míru homogenity priorit 72,6 %. Tato hodnota vypovídá o relativně vysoké shodě mezi dotazovanými. Průměrná shoda mezi účastníky byla 83,9 %. Na základě těchto zjištění je zřejmé, že výsledky jsou poměrně jednoznačné. Dle výsledku je nejdůležitějším atributem pro stanovení rizikovosti porostu *zdravotní stav*. S výjimkou dvou případů byl vždy vybrán respondenty jako nejvýznamnější, a to velice výrazně při srovnání s ostatními parametry (tab. 17). Jeho celková hodnota priority je 63,6 %. Druhou úroveň významnosti obsadil atribut *výška porostu* s výslednou prioritou 23,6 %. Pouze dva respondenti mu přisuzovali významně vyšší význam. *Druhá skladba* má výslednou prioritu 12,80 %.

Součástí výsledků nástroje AHP Online System je i údaj CR_{max} , ten vypovídá o konzistenci názoru v odpovědích respondenta. Jeho hodnota by neměla překročit úroveň 20 %. V takovém případě by se jednalo o rozporuplný výsledek, který by neposkytoval jednoznačný názor. V celém dotazníkovém šetření však takový případ nebyl zaznamenán. Při posouzení hlavních parametrů porostu dokonce v žádném případě nepřekročil hodnotu 4 %. Z toho je patrné, že respondenti měli v této části jednoznačný názor. Jeho nízká hodnota rovněž odráží menší počet dostupných možností, ze kterých mohl dotazovaný vybírat.

Tab. 17 Respondenty přiřazené priority včetně jejich výsledné hodnoty v části zaměřené na posouzení hlavních parametrů porostu

Priorita [%]				
zdravotní stav	výška porostu	druhovú skladba	CR _{max}	
75,10	17,80	7,00	3,00	
75,10	7,00	17,80	3,00	
72,70	18,20	9,10	0,00	
71,70	21,70	6,60	3,90	
72,60	17,20	10,20	3,00	
12,20	64,80	23,00	0,40	
62,60	30,10	7,20	0,20	
68,10	6,90	25,00	1,00	
68,20	21,60	10,30	0,30	
47,60	45,20	7,20	0,30	
69,20	23,10	7,70	0,00	
67,20	6,30	26,50	3,00	
55,00	24,00	21,00	1,90	
23,10	69,20	7,70	0,00	
Celková priorita	63,60	23,60	12,80	0,00

Nástroj AHP Online Systém uvádí výsledné priority v procentech. Pro následné dosazení do vzorce pro výpočet IVTIR byly váhy poděleny hodnotou 100 tak, aby v součtu hodnota vah byla rovna jedné (tab. 18).

Tab. 18 Stanovené váhy jednotlivých parametrů porostu

Parametr	Přiřazená váha
Druhovú skladba (V_{PD})	0,128
Výška porostu (V_{PV})	0,236
Zdravotní stav (V_{PZ})	0,636

Výška porostu

Jednotlivé hodnoty výšky porostu z datové sady byly rozděleny do 4 kategorií. Jejich hranice byly stanoveny na základě předpokládaného rizika ohrožení stromy tohoto vzrůstu. Rovněž v rámci zvoleného výškovém rozsahu by stromy měly představovat obdobnou úroveň nebezpečí. Správné sestavení kategorií je obtížné, a proto byl v dotazníku zahrnut i prostor pro možné vyjádření příhodnějšího vymezení výškových rozsahů. Ani jeden odborný respondent prostor pro návrh lepšího členění nevyužil a je ho tak možné považovat za vhodně sestavený.

Odpovědi v této části dotazníku opět vykazují vysokou míru homogenity priorit a to konkrétně 97,8 %. To vypovídá o opravdu vysokém vzájemném souladu priorit respondentů. Průměrná shoda mezi účastníky byla 97,8 %.

Výsledky potvrzují předpoklad, že vyšší strom představuje i vyšší úroveň ohrožení. Současně s tím dochází k posouzení úrovně rizikovitosti mezi vymezenými výškovými kategoriemi. Z tabulky 19 je patrné, že většina respondentů očekává téměř dvojnásobné možné ohrožení u stromů dosahujících vzrůstu nad 20 m, než u stromů v rozsahu 10 až 20 m. Celková hodnota priority nejvyšších stromů je 59,1 %, u kategorie 10 až 20 m pak 25,8 %.

Výrazně nižší rizikovitost je očekávaná u zbývajících dvou kategorií pokrývajících stromy nižšího vzrůstu. Ty patřící do rozsahu 5 až 10 m dosáhly celkové hodnoty priority 10,0 %, menší než 5 m pak 5,0 %.

Hodnota parametru CR_{max} , vypovídajícím o konzistenci odpovědí respondenta, ve většině případů nepřekračuje hodnotu 10 %. Pouze u 4 dotazovaných byla tato úroveň mírně překročena. Nedosáhla však limitní hodnoty 20 % a nemuselo tedy dojít k jejich vyřazení. Při porovnání jednotlivých částí dotazníkového šetření je však patrné, že tato část byla pro rozhodování nejnáročnější.

Tab. 19 Respondenty přiřazené priority včetně jejich výsledné hodnoty v části zaměřené na posouzení rozdílné výšky porostu

	Priorita [%]				CR_{max}
	méně než 5	5-10	10-20	více než 20	
	4,00	8,70	26,10	61,10	5,70
	6,60	11,00	27,20	55,30	9,60
	5,20	7,20	21,90	65,60	12,30
	6,20	8,30	23,70	61,90	11,30
	3,50	12,70	29,10	54,70	12,10
	6,00	9,20	26,10	58,80	3,00
	4,00	8,30	19,80	67,90	9,60
	4,00	7,90	30,80	57,30	7,50
	4,50	13,50	23,80	58,20	2,90
	4,00	7,70	28,40	59,90	6,60
	5,20	10,40	23,30	61,10	3,50
	4,10	13,10	25,30	57,50	3,80
	3,80	6,80	31,20	58,20	9,00
	6,70	16,50	25,80	50,90	1,50
	9,80	12,40	24,30	53,50	10,80
Celková priorita	5,00	10,00	25,80	59,10	5,80

Z výsledků je možné odvodit skutečnost, že mezi jednotlivými kategoriemi dochází vždy k přibližně zdvojnásobení očekávaného rizika. Stanovené váhy tohoto atributu porostu pro výpočet ohrožení železnice jsou uvedeny v tabulce 20.

Tab. 20 Váhy jednotlivých kategorií výšky porostu – váha vedlejší dle výšky stromu (V_{VV})

Výška stromu [m]	Přiřazená váha
méně než 5	0,050
5-10	0,100
10,1-20	0,258
více než 20	0,591

Druhová skladba

V této části dotazníkového šetření došlo k posouzení rizikovosti 4 stromových druhů, které v krajině převládají (tab. 21). Jednalo se o *borovici, buk, dub a smrk*. Homogenita priorit dosáhla v této části úrovně 84,3 %, průměrná shoda mezi účastníky pak 91,2 %. Kromě dvou dotazovaných byl za nejrizikovější druh označen smrkový porost. Ten ve srovnání s ostatními dosahuje výrazně vyšších hodnot priority okolo 60 %. Z toho vyplývá, že byl zvolen za nejproblematictější dřevinu. Smrk výrazně převyšuje druhý zahrnutý jehličnatý druh a to borovici. V povědomí respondentů je zřetelný fakt, že očekávají menší úroveň odolnosti právě u jehličnanů. Tato skutečnost vyplývá z pro ně typického kořenového systému, který nedosahuje takových hloubek jako u listnatých stromů.

Na druhém místě se umístila borovice, pouze dva respondenti ji zvolili jako nejrizikovější druh. Zbývající účastníci u ní volili hodnoty priority pohybující se okolo 20 %, celková priorita pak dosáhla 22,6 %. U dvou respondentů byla zvolena jako bezpečnější dřevina než buk a dub.

V porovnání vzniku možného nebezpečí u dvou listnatých druhů dopadl lépe dub, který dosáhl celkové hodnoty priority 6,9 %. Buk pak získal téměř dvojnásobnou hodnotu a to 10,4 %.

Parametr CR_{max} pouze u 6 respondentů přesahuje hodnotu 10 %. Jeho nejvyšší úroveň je 15,6 %, nebylo tedy nutné přistoupit k vyřazení žádného záznamu šetření.

Tab. 21 Respondenty přiřazené priority včetně jejich výsledné hodnoty v části zaměřené na posouzení rozdílné druhové skladby porostu

	Priorita [%]				CR _{max}
	smrk	borovice	dub	buk	
	69,60	18,10	5,60	6,70	7,90
	61,60	24,90	5,00	8,50	1,90
	39,70	46,70	6,70	6,90	5,70
	52,80	35,40	4,70	7,10	3,10
	67,00	4,90	12,70	15,50	10,80
	59,00	23,70	5,00	12,30	8,70
	68,60	4,50	4,90	22,00	15,00
	60,30	24,90	5,60	9,20	1,90
	49,00	23,10	11,60	16,30	4,40
	27,20	64,10	4,30	4,30	12,50
	61,10	24,60	5,30	9,10	15,40
	62,40	24,70	4,80	8,00	15,60
	68,60	19,00	4,00	8,40	11,60
	60,50	13,60	12,30	13,60	0,80
	53,20	30,30	10,10	6,30	1,70
Celková priorita	60,20	22,60	6,90	10,40	1,20

Váhy jednotlivých stromových druhů jsou uvedeny v tabulce 22. Nejvyšší získal smrk (0,602), dále následovala s třetinovou hodnotou borovice (0,226), dále buk (0,104) a nejnižší hodnotu dosáhl dub (0,069). Mezi nejvíce a nejméně ohrožující dřevinou je patrný velice výrazný rozdíl, který dosahuje téměř desetinásobku předpokládaného rizika.

Tab. 22 Stanovené váhy jednotlivých druhů stromů – váha vedlejší dle druhu stromu (V_{VD})

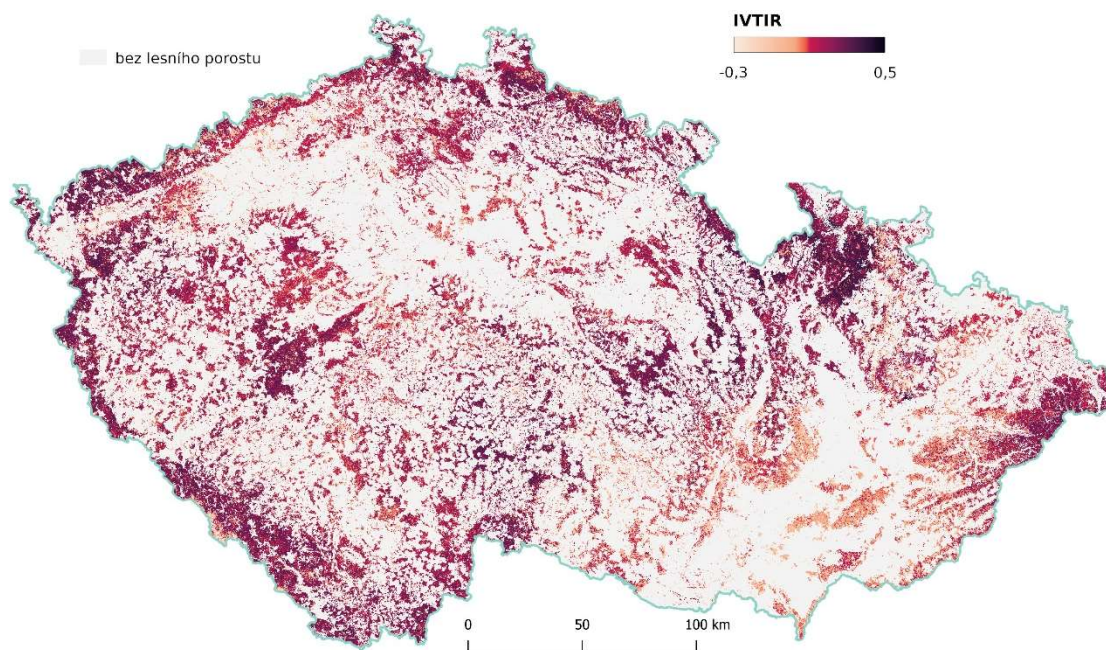
Druh stromu	Přiřazená váha
Borovice	0,226
Buk	0,104
Dub	0,069
Smrk	0,602
Ostatní listnaté*	0,069
Ostatní jehličnaté*	0,226

*Odvozeno z výsledků dotazníkového šetření. Na základě předpokladu vyšší odolnosti smíšeného porostu, získala každá kategorie nižší váhu z dvojice stromů, které do ní patří.

Úplné vyhodnocení použité datové sady je problematické kvůli dvěma v ní vymezeným kategoriím: *ostatní listnaté* a *ostatní jehličnaté*. U nich nebylo možné na základě spektrálního chování provést jednoznačnou identifikaci výskytu konkrétního druhu stromu ve zdrojových datech, proto je obtížné stanovit rizikovost porostu. Rovněž se může jednat o vícedruhový porost, který je kvůli své pestré skladbě odolnější vůči vnějším vlivům. Na základě předpokladu vyšší odolnosti smíšeného porostu, získala každá kategorie nižší váhu z dvojice stromů, které do ní patří. Druh *ostatní listnaté* má přiřazenou váhu jako dub, *ostatní jehličnaté* má přiřazenou váhu jako borovice.

6.3 Výsledky indexu ohrožení stromovou vegetací pro ČR – Studie 2

Z vrstev sestavených v předchozích krocích byla sestavena výsledná vrstva, která poskytuje informaci o úrovni ohrožení vegetací prostřednictvím indexu IVTIR (obr. 30). Ten byl vypočítán pro všechny lesní porosty nacházející se na území České republiky. Cílem disertační práce je však vyhodnocení míry ohrožení pro železnici, z tohoto důvodu bylo zájmové území zúženo pouze na její ochranné pásmo. Index IVTIR však může najít své uplatnění i v jiných oblastech zájmu, mezi ty může patřit například vyhodnocení ohrožení silniční sítě.



Obr. 30 Index IVTIR na území ČR mezi roky 2019 a 2020

Index IVTIR na území ČR pro období 2019/2020 nabývá hodnot v rozmezí -0,3 až 0,4. Záporné hodnoty odpovídají místům, na kterých došlo k meziročnímu nárůstu vegetačního indexu. Na základě dotazníkového šetření byl zdravotní stav vyhodnocen jako nejvýznamnější pro stanovení úrovně ohrožení vegetací z použitých parametrů.

Jeho významný pozitivní nárůst se pak ve výpočtu projeví právě zápornou hodnotou indexu. Tato místa je možné považovat za plochy s nízkou úrovní ohrožení právě díky pozitivnímu rozvoji vegetace.

6.3.1 Stanovení kategorií ohrožení

Z rasterového souboru s hodnotami indexu IVTIR byly vybrány pouze plochy nacházející se v ochranném pásmu železnice. Tento krok vychází z hlavního cíle disertační práce, který cílí na vyhodnocení úrovně ohrožení železnice přilehlou lesní stromovou vegetací. Zmenšení posuzovaného území rovněž umožňuje vyhodnotit úroveň ohrožení ve větším detailu.

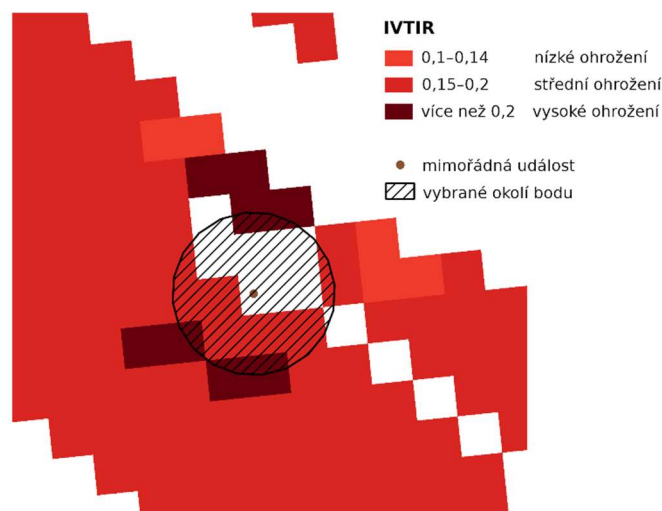
Tab. 23 Hodnoty indexu IVTIR na lesních plochách v ochranném pásmu železnice mezi roky 2019 a 2020

Kategorie	IVTIR	Rozloha [ha]	Zastoupení [%]
bez ohrožení	méně než 0,0	356	1,6
velmi nízké	0,0–0,09	7 583	34,6
nízké ohrožení	0,1–0,14	4 665	21,3
střední	0,15–0,2	6 795	31,0
vysoké	více než 0,2	2 537	11,6

Nejnižší zjištěná hodnota indexu IVTIR v ochranném pásmu železnice na území ČR pro období 2019/2020 byla $-0,285$, nejvyšší pak $0,426$. Z tohoto zjištění je patrné, že velikost ohrožení jednotlivých lesních porostů je silně variabilní. Tento fakt potvrzuje i rozložení hodnot v tabulce 23. Žádné ohrožení vykazuje 1,6 % lesních ploch v ochranném pásmu železnice, kdy jejich úroveň indexu IVTIR nepřesáhla 0. Velmi nízké ohrožení bylo zaznamenáno u téměř 35 % ploch, střední ohrožení u 31 % a vysoké u 11,6 %.

Hranice indexu IVTIR, při níž se stává porost pro přilehlou infrastrukturu nebezpečným, byla identifikována pomocí srovnání jeho hodnot v rasteru s výskytem skutečných mimořádných událostí z let 2021 až 2024 způsobených pádem stromu. Celkem se jednalo o 380 událostí, z nichž 65 se nacházelo mimo lesní vegetaci. Hodnotu indexu k nim tedy nebylo možné přiřadit. V těchto případech mohla být nehoda způsobena samostatně rostoucími stromy, které není navrhovaná metodika schopna odhalit. Avšak u zbývajících 315 událostí (82 % z celkového počtu) by v případě identifikace ohrožení mohlo dojít k zajištění opatření a nehodám tak předejít.

Úroveň indexu IVTIR pro jednotlivé mimořádné události byla spočítána dvěma způsoby a to pomocí průměru a mediánu hodnot pixelů nacházejících se v jejich 20m okolí. Cílem tohoto kroku bylo zjištění dominantních hodnot indexu v okolí každé události. Mezi oběma hodnotami však byly zjištěny minimální diference. Z toho vyplývá, že okolní hodnoty k mimořádnostem jsou bez výraznějších rozdílů.



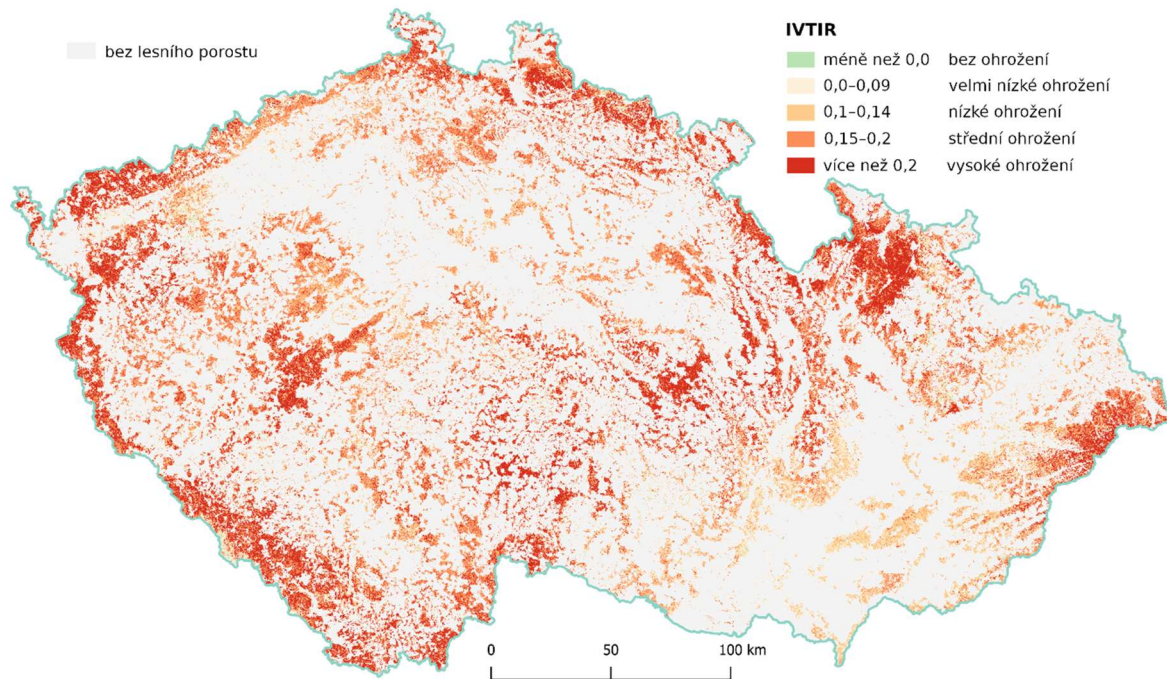
Obr. 31 Ukázka lokalizace mimořádné události na podkladové vrstvě indexu IVTIR včetně vymezeného 20 m okolí bodu

Způsob provedení je ilustrován na obrázku 31. Je patrné, že v místech výskytu kolejnice se lesní porost nenachází. Proto výsledná hodnota pixelu nevychází pouze z hodnoty nacházející se v konkrétním místě výskytu mimořádnosti, ale bere v potaz úroveň ohrožení v okolní vymezené oblasti. Tím dochází k potlačení vlivu ploch bez stanovené úrovně indexu. Rovněž je zajištěno stanovení charakteristického ohrožení pro danou lokalitu. Je potlačen dopad případných extrémních samostatně vyskytujících se hodnot. V případě nepřesné lokalizace bodu pořizovatelem dat, je zvoleným postupem rovněž zajištěna korekce.

K identifikaci meze indexu VTIR, při kterém se stává porost významně ohrožujícím své okolí, byl využit opět průměr a medián všech hodnot IVTIR jednotlivých mimořádných událostí zmíněných v předchozím odstavci. Celková mediánová hodnota pro 315 událostí dosáhla úrovně 0,155 a průměrná pak 0,149. Je tak možné hovořit o zanedbatelném rozdílu výsledku pro obě spočítané charakteristiky.

Na základě zjištěných skutečností byly vymezeny kategorie indexu IVTIR dle očekávané úrovně ohrožení. Žádné ohrožení lze předpokládat u hodnoty indexu nižší než 0. Jeho záporné hodnoty vypovídají o meziročním zlepšení zdravotního stavu porostu. Velmi nízká úroveň ohrožení je v rozmezí 0,0 až 0,09, nízké ohrožení pak mezi 0,1 až 0,14. Následující kategorie již vypovídají o vyšší úrovni očekávaného

ohrožení. Spodní hranice kategorie středního ohrožení byla odvozena od porovnání indexu IVTIR s výskytem skutečných mimořádných událostí. Její rozsah byl zvolen v rozmezí 0,15 až 0,2. Opravdu vysoké ohrožení lze očekávat u hodnot indexu vyšších než 0,2. K určení rozsahu vymezených kategorií bylo využito posouzení parametrů stromů do nich spadajících, dle předpokládaného vlivu na míru ohrožení.

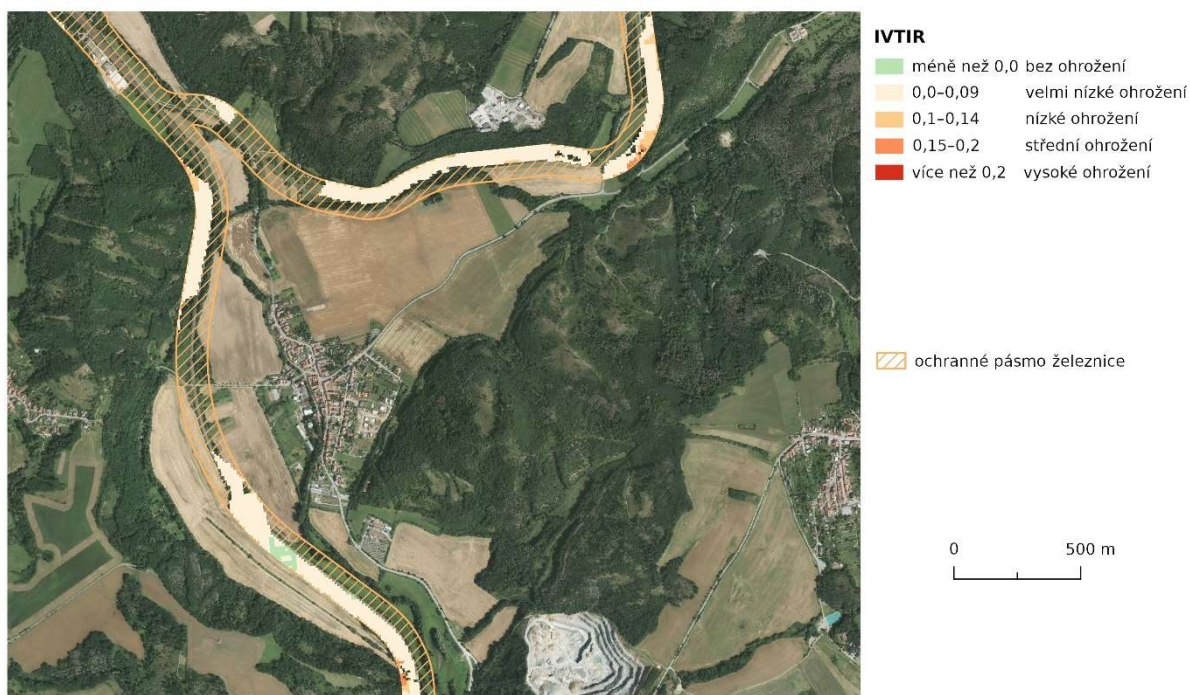


Obr. 32 Kategorizovaný index IVTIR dle úrovně ohrožení mezi roky 2019 a 2020 na území ČR

Z obrázku 32 je patrné, že nejvyšší hodnoty indexu IVTIR se nachází zejména v horských oblastech. Předmětem analýzy této studie je však pouze území ochranného pásma železnice, kde pro ni může blízký lesní porost představovat ohrožení. Nicméně v celorepublikovém měřítku jsou tyto plochy obtížně rozeznatelné, proto se ukázky vypočítaného indexu ve větším detailu nachází na obrázcích 33 a 34.



Obr. 33 Kategorizovaný index IVTIR dle úrovně ohrožení mezi roky 2019 a 2020 na vybraném území



Obr. 34 Kategorizovaný index IVTIR dle úrovně ohrožení mezi roky 2019 a 2020 na vybraném území

Obrázek 33 znázorňuje stav vegetace, jež vykazuje vysoké úrovně indexu ohrožení. V těchto místech by mělo dojít k pozemnímu šetření a v případě identifikace ohrožení

zajistit opatření. Díky nim by se zvýšila bezpečnost provozu a snížilo ohrožení železnice během mimořádných povětrnostních podmínek.

Na obrázku 34 dochází ke znázornění opačné situace, kdy porost nedosahuje takové úrovně ohrožení jako v předchozím případě a hodnoty indexu se řadí do kategorie velmi nízkého ohrožení. Tento stav je možné považovat za bezpečný i v případě silného větrného proudění. V této lokalitě není předpoklad vzniku mimořádné situace způsobené pádem stromu do kolejiště.

6.3.2 Vyhodnocení ohrožení v jednotlivých krajích ČR

Detailnější analýza hodnot indexu ohrožení IVTIR byla provedena pro území jednotlivých krajů ČR. Na základě zjištění, že průměrná hodnota indexu ohrožení nabývá v blízkosti skutečných mimořádných událostí způsobených stromy hodnoty 1,5, je důraz kladem zejména na kategorie středního a vysokého ohrožení.

Nejvíce ohrožená železniční infrastruktura se nachází v Jihočeském kraji. Nejvyšší úroveň vysokého ohrožení, kdy index IVTIR přesahuje hodnotu 0,2 vykazuje zalesněná plocha ochranného pásma železnice o rozloze 511 ha. Střední úroveň pak byla zaznamenána na území 867 ha. Takto vysoké úrovně vyžadují detailnější posouzení a případné zajištění nápravných opatření vedoucích ke snížení úrovně ohrožení. Příčina vysokých hodnot indexu spočívá především v silném zastoupení jehličnatých lesů vysokého vzrůstu na území kraje. Počet mimořádností způsobených stromem však i přes takto vysoké hodnoty indexu dosahuje až 6. nejvyšší úrovně ze všech krajů. Hustota železniční sítě je v tomto kraji nejnižší, jedná se 94 km železnice na 1 000 km² území.

Nejvyšší počet mimořádností a to konkrétně 77, byl zaznamenán ve Středočeském kraji (tab. 24). Tato úroveň významně převyšuje hodnoty ostatních krajů, kdy druhý nejvyšší počet byl v Plzeňském kraji. Jednalo se o 44 mimořádností, což je nižší počet o 42 %. Středočeský kraj vykazuje index IVTIR středního ohrožení na 135 ha a nejvyššího ohrožení pak na 974 ha. Tyto hodnoty v součtu dosahují 2. nejvyšší úrovně, je zde tedy patrná souvislost indexu s výskytem skutečných mimořádných událostí.

Tab. 24 Počet mimořádných událostí způsobených srážkou se stromem či jeho pádem na kolejiště mezi roky 2021 a 2024 podle krajů doplněný údajem hustoty železniční infrastruktury v daném kraji

Kraj	JHČ	JHM	KVK	HKK	LBK	MSK	OLK	PAK	PLK	PHA	STČ	ULK	VYS	ZLK
Počet mimořádných událostí	28	14	24	32	33	19	27	11	44	3	77	16	41	11
Pořadí podle počtu událostí	6	11	8	5	4	9	7	12/13	2	14	1	10	3	12/13
Hustota žel. [km na 1 000 km ²] ¹⁾	94	153	162	135	145	154	143	162	109	745	167	256	103	116
Pořadí podle hustoty železnice	14	7	4/5	10	8	6	9	4/5	12	1	3	2	13	11

1) vlastní výpočet

Je však nutné brát v potaz, že počet mimořádností významně ovlivňuje nahodilost výskytu mimořádných povětrnostních situací v jednotlivých krajích. Pokud nejsou na rizikové porosty kladeny zvýšené vnější tlaky, mohou odolat a nezpůsobit tak žádnou škodu. Přesto však představují potencionální ohrožení v budoucnosti a jejich identifikací je možné jim předcházet.

Další kraje s nejvyšším zastoupením ohrožených ploch jsou Karlovarský a Liberecký kraj. Příčina souvisí s výskytem zalesněného hornatého území. Tratě procházející těmito odlehlými lokalitami je obtížné udržovat bez vzrostlé vegetace a mnohdy je to dokonce nemožné. Přesto však díky přesné identifikaci silně ohrožených území může dojít k zajištění lokálních opatření, tedy není nutné jejich celoplošné provedení. Tím roste reálná možnost zajištění bezpečného okolí železniční infrastruktury. Silné ohrožení v Libereckém kraji podporuje i počet zjištěných mimořádností, které dosahují 4. nejvyšší úrovně a to 33. V Karlovarském kraji pak došlo k zaznamenání 8. nejvyššího počtu nehod se stromem, konkrétně 24.

Tab. 25 Plochy zalesněného ochranného pásma železnice podle kategorií hodnoty indexu IVTIR mezi roky 2019 a 2020 pro kraje ČR

		Plocha zalesněného ochranného železničního pásma [ha]						
		Kraj						
Kategorie	IVTIR	JHČ	JHM	KVK	HKK	LBK	MSK	OLK
bez ohrožení	méně než 0,0	31	35	41	6	21	13	7
velmi nízké ohrožení	0,0-0,09	507	873	517	202	298	512	255
nízké ohrožení	0,1-0,14	632	259	407	256	277	306	158
střední ohrožení	0,15-0,2	867	178	543	556	677	396	467
vysoké ohrožení	více než 0,2	511	15	378	173	220	77	280
Kategorie	IVTIR	PAK	PLK	PHA	STČ	ULK	VYS	ZLK
bez ohrožení	méně než 0,0	10	49	16	46	52	20	9
velmi nízké ohrožení	0,0-0,09	292	624	260	1194	1420	461	168
nízké ohrožení	0,1-0,14	159	479	86	727	574	235	109
střední ohrožení	0,15-0,2	331	668	59	974	675	362	43
vysoké ohrožení	více než 0,2	137	212	1	135	154	236	7

Druhou nejnižší rozlohu ohrožených ploch vykazuje Praha, tento region je však kvůli své silné urbanizaci, vyplývající z umístění hlavního města, atypický. Je tak na něj nutné nahlížet vůči ostatním krajům specificky. Také se zde nachází nejhustší železniční síť odpovídající 745 km železnice připadající na 1 000 km² území. Počet mimořádných událostí způsobených srážkou se stromem či jeho pádem na infrastrukturu byl mezi roky 2021 a 2024 pouze ve 4 případech. Území je tak možné charakterizovat jako bezpečné. Hodnota indexu IVTIR, spadajícího do dvou nejvyšších kategorií, vykazuje pouze 60 ha plochy.

Nejmenší hodnotu středního a vysokého ohrožení vykazuje Zlínský kraj, a to konkrétně na 50 ha území. Zjištěný fakt potvrzuje i nejnižší počet mimořádností v počtu 11 výskytů. Stejně hodnoty dosáhl i Pardubický kraj, který v součtu dvou nejvyšších úrovní ohrožení dosahuje 4. nejnižší úrovně.

Zjištěné skutečnosti potvrzují souvislost mezi vypočítanými hodnotami indexu IVTIR a skutečným výskytem mimořádných událostí způsobených stromovou vegetací. Na základě tohoto zjištění je možné sestavenou metodiku pro stanovení úrovně ohrožení železnice stromovou vegetací hodnotit jako správně navrženou.

Tab. 26 Kategorizované zastoupení hodnot indexu IVTIR v zalesněném ochranném pásmu železnice mezi roky 2019 a 2020 podle krajů

		Zastoupení v zalesněném ochranném železničním pásmu [%]						
		Kraj						
Kategorie	IVTIR	JHČ	JHM	KVK	HKK	LBK	MSK	OLK
bez ohrožení	méně než 0,0	1,2	2,6	2,2	0,5	1,4	1,0	0,6
velmi nízké ohrožení	0,0-0,09	19,9	64,2	27,4	16,9	19,9	39,3	21,9
nízké ohrožení	0,1-0,14	24,8	19,0	21,6	21,4	18,6	23,4	13,6
střední ohrožení	0,15-0,2	34,0	13,1	28,8	46,6	45,4	30,4	40,0
vysoké ohrožení	více než 0,2	20,0	1,1	20,1	14,5	14,8	5,9	24,0
Kategorie	IVTIR	PAK	PLK	PHA	STČ	ULK	VYS	ZLK
bez ohrožení	méně než 0,0	1,0	2,4	3,8	1,5	1,8	1,5	2,6
velmi nízké ohrožení	0,0-0,09	31,5	30,7	61,6	38,8	49,4	35,1	50,0
nízké ohrožení	0,1-0,14	17,2	23,6	20,5	23,6	20,0	17,9	32,5
střední ohrožení	0,15-0,2	35,6	32,9	13,9	31,7	23,5	27,5	12,8
vysoké ohrožení	více než 0,2	14,7	10,4	0,2	4,4	5,4	18,0	2,2

Procentuální zastoupení ohrožených ploch stromovou vegetací na celkové rozloze zalesněného ochranného pásma železnice je uvedeno v tabulce 26. Nejvyšší hodnoty středního a vysokého ohrožení o velikosti 64 % dosáhl Olomoucký kraj. Takto vysoký podíl je možné spojovat s lokalitou CHKO Litovelské Pomoraví a pohořím Jeseníků, kde se nachází CHKO Jeseníky. Na těchto územích se nachází rozlehlé stromové porosty vysokého vzrůstu. Kvůli ochraně přírody a průchodem tratí horským územím není často možné zajistit dostatečné provádění údržby v okolí tratí, které by snížilo ohrožení. Dále následují s nejvyšším podílem ohrožených ploch Královéhradecký (61,1 %) a Liberecký kraj (60,2 %).

Nejnižší zastoupení dvou nejvíce ohrožených kategorií indexu IVTIR vykazuje Praha (14,1 %), Jihomoravský kraj (14,2 %) a Zlínský kraj (15 %).

6.3.3 Vyhodnocení vlivu vlhkostního režimu půd

Cílem kombinace indexu ohrožení IVTIR s dalšími v současnosti existujícími vrstvami je zejména zvýšení jeho vypovídající úrovně. Rovněž může dojít k identifikaci lokalit vykazujících extrémní riziko ohrožení, jež nemusí být z použitých parametrů ve výpočtu indexu rozeznatelné.

Vysoká nadbytečná vlhkost půdy může mít negativní vliv na odolnost stromů, kdy jejím přičiněním dochází pouze k jejich mělkému zakořenění. Problematické může být zejména nerozeznání těchto potencionálně problematických stromů od standardně rostoucích. Možným řešením je identifikace vlhkých půd na základě

jejich hydrické řady z kódu uvedeném v datech BPEJ a následně detailní posouzení porostů nacházejících se v těchto lokalitách. Vhodnějším řešením je však udržování nízké výšky stromů či jejich nahrazení keři.

Půda patřící do mokré a zamokřené řady zaujímá v zalesněném ochranném pásmu železnice plochu přesahující 3,5 tis. ha. Rašelinová půda (kód hydrické řady 6) se na posuzovaném území nevyskytuje. Vyhodnocením hodnot indexu IVTIR stromové vegetace nacházejících se na vlhkých půdách (kódy hydrické řady 4 a 5), dochází ke zjištění, že převažují hodnoty do úrovně nízkého ohrožení. Pouze 685 ha vykazuje střední ohrožení v rozsahu indexu 0,15 až 0,2 (tab. 27).

Tab. 27 Rozlohy zamokřených a mokrých půd v ochranném pásmu železnice podle hodnoty indexu IVTIR mezi roky 2019 a 2020

IVTIR	Ohrožení	Rozloha [ha]
méně než 0,0	bez ohrožení	114
0,0 – 0,09	velmi nízké ohrožení	1 896
0,1 – 0,14	nízké ohrožení	713
0,15 – 0,2	střední ohrožení	685
více než 0,2	vysoké ohrožení	0

Příčinou této skutečnosti je výskyt tohoto typu půd především v blízkosti říčních toků, u kterých prospívají zejména listnaté druhy. To podporuje i analýza druhové skladby porostů, jež ukazuje, že se listnaté druhy nacházejí na téměř 75 % tohoto území. Jehličnaté druhy pokrývají 23 %. Na zbývajících ploše roste mladý porost (kultura) nebo na ni byla provedena těžba.

Průměrná výška stromu v této oblasti dosahuje hodnoty 19,2 m, to vypovídá o skutečnosti, že se jedná zejména o starší porosty. Pokud dojde k posouzení výšek dle kategorií vymezených v této práci, tak výšky přesahující 20 m vykazuje téměř 40 % lesního porostu. Do rozsahu 10,1 m až 20 m pak spadá více než 55 %.

Zdravotní stav porostu vyhodnocený dle meziročního vývoje NDVI indexu vykazuje u více než 52 % porostu pokles, tedy chřadnutí. Ve většině případů se však jedná o velice nízké propady, které pouze u 2,5 % ploch přesahují hodnotu 0,1.

Na základě těchto výsledků došlo k charakterizování typického porostu nacházejícího se na vlhkých půdách. Jedná se o prospívající listnatý strom o vzrůstu přibližně 20 m. Avšak v případě silných větrů může kvůli svému mělkému kořenovému systému představovat vysoké ohrožení, které nemusí být ze základních vybraných sledovaných parametrů rozeznatelné. To vypovídá o nutnosti využívat i další dostupné datové zdroje.

6.3.4 Vyhodnocení vlivu sklonu terénu

Sklon terénu může významně ovlivnit úroveň ohrožení lesním porostem, a to zejména v případě, kdy přesahuje 12°. Hodnoty indexu IVTIR na takovém typu území jsou uvedeny v tabulce 28. Jeho nejvyšší úroveň (více než 0,2) vykazuje více než 38 ha zalesněného ochranného pásma železnice. Tyto lokality tak představují opravdu vysokou míru ohrožení pro infrastrukturu a mělo by neprodleně dojít k nápravě stavu.

Tab. 28 Hodnoty indexu IVTIR mezi roky 2019 a 2020 na zalesněných svazích se sklonem více než 12° v ochranném pásmu železnice

IVTIR	Ohrožení	Rozloha [ha]
méně než 0,0	bez ohrožení	33,39
0,0 – 0,09	velmi nízké ohrožení	285,96
0,1 – 0,14	nízké ohrožení	285,44
0,15 – 0,2	střední ohrožení	279,17
více než 0,2	vysoké ohrožení	38,51

6.3.5 Vyhodnocení vlivu větrných polomů

Prostřednictvím vrstvy větrných polomů je možné identifikovat oblasti, na nichž je lesní porost více ohrožen intenzivními projevy počasí. Tyto lokality mohou být specifické svým terénním profilem, který nepředstavuje překážku větrnému proudění. Při celkovém vyhodnocení reliéfu terénu z běžných výškových dat nemusí být tato místa rozeznatelná. Rozšíření výsledku indexu ohrožení IVTIR o vrstvu větrných polomů, je možné vyspecifikovat více ohrožené lokality a přistupovat k nim odlišným přístupem v očekávání jejich vyšší potenciální úrovně rizikovitosti.

Tab. 29 Hodnoty indexu IVTIR mezi roky 2019 a 2020 v zalesněném ochranném pásmu železnice v místech výskytu větrného polomu

IVTIR	Ohrožení	Rozloha [ha]
méně než 0,0	bez ohrožení	0,26
0,0 – 0,09	velmi nízké ohrožení	31,78
0,1 – 0,14	nízké ohrožení	41,63
0,15 – 0,2	střední ohrožení	70,43
více než 0,2	vysoké ohrožení	51,79

Vyhodnocením zalesněného ochranného pásma železnice byl výskyt těchto lokalit zjištěn na území středního a vysokého stupně ohrožení indexu IVTIR o velikosti 122 ha. Na těchto plochách by mělo dojít k neprodlenému zajištění opatření, které by

odstranilo hrozbu pro železnici. Nízké ohrožení bylo zaznamenáno na ploše přesahující 41 ha (tab. 29).

6.3.6 Porovnání se skutečným stavem

Správnost navržené metodiky byla vyhodnocena prostřednictvím terénního průzkumu. Došlo k výběru několika lokalit v Olomouckém kraji s rozdílnými úrovněmi ohrožení vyjádřeném indexem IVTIR. V nich byl následně posouzen aktuální stav porostu (stav v roce 2024). Částečným omezením je však skutečnost, že index je založen na datech z roku 2020. Kvůli pomalé rychlosti růstu dřevin je však tento časový rozdíl akceptovatelný.



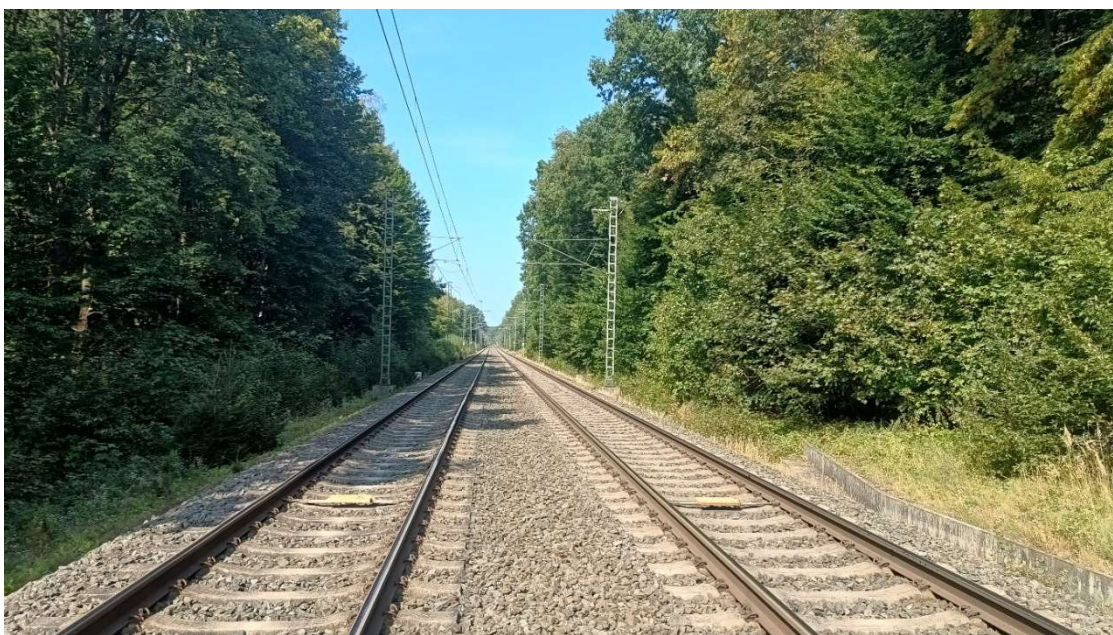
Obr. 35 Traťový úsek se zaznamenanou nízkou úrovní ohrožení přilehlou vegetací mezi stanicemi Červenka-Moravičany (zdroj: autor práce)

Na obrázku 35 je patrný vegetační porost nerizikový a s nízkou úrovní ohrožení. Je zřejmé, že jeho vzrůst nemůže v případě mimořádně nepříznivých povětrnostních podmínek představovat pro železnici ohrožení. Tento stav je možné považovat za ideální pro zajištění bezpečnosti provozu a předcházení mimořádným událostem. Samozřejmě je nutné provádět opakované vyhodnocení jeho stavu i v následujících letech, kdy kvůli růstu může úroveň jeho ohrožení vzrůstat.

Vysoká úroveň ohrožení je zobrazena na obrázku 36, na kterém se nachází smíšený listnatý porost vysokého vzrůstu. Stromy jsou umístěny v těsné blízkosti železnice a pokud dojde k pádu stromu, zcela jistě zasáhne infrastrukturu. Takto udržované

ochranné pásmo se jeví jako zcela nevhodné a při extrémních projevech počasí lze očekávat způsobení mimořádnosti. Problematické je i narušení větrného proudění vlivem zářezu v porostním segmentu. To je však pro liniové dopravní stavby charakteristické, riziko z něj plynoucí je však možné snížit omezením vzrůstu blízkých stromů k železnici. Provozování infrastruktury v takovémto porostu ji činí potencionálně ohroženou a nespolehlivou. Možnou příčinou této skutečnosti je průchod železnice ochranným přírodním pásmem, které může představovat omezení pro kácení dřevin. Pro zvýšení a zajištění bezpečnosti je však nutné provést úpravu stávající situace.

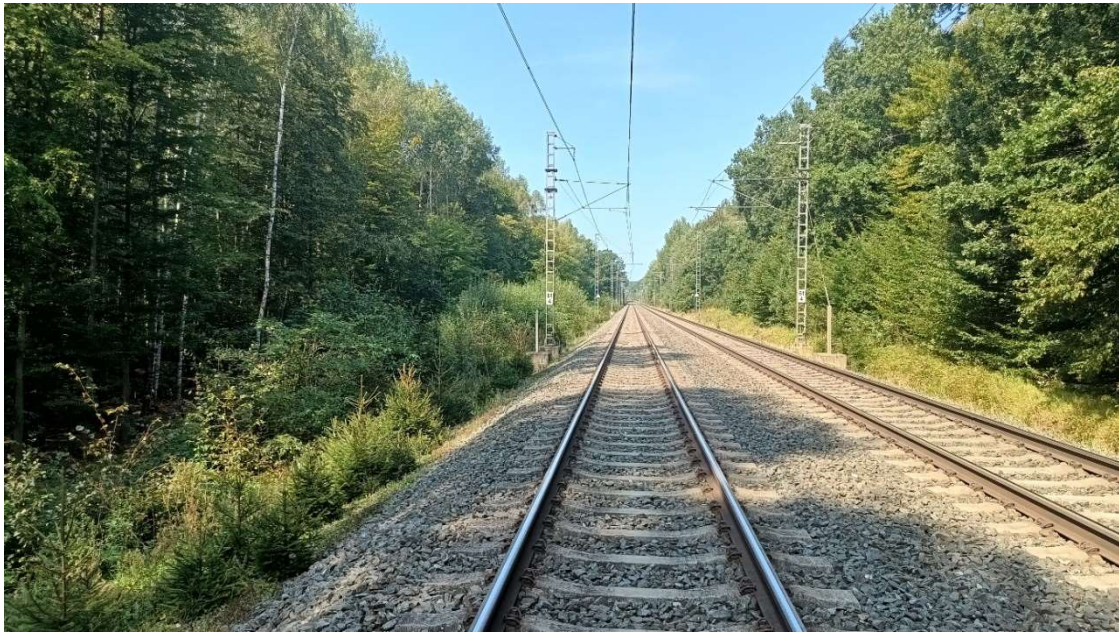
Index IVTIR může být prostředkem, který i v problematických chráněných oblastech může pomoci k nápravě. Zejména v případě, kdy dojde k zaznamenání lokálního chřadnutí vegetace. Tyto oblasti mohou být detailně posouzeny přímo na místě a zjištěné skutečnosti mohou následně podpořit potřebu vymýcení ohrožujícího porostu na činných orgánech. Bez použití indexu IVTIR se jeví lokalizace těchto míst na celém území ČR jako velmi složitá až zcela nemožná.



Obr. 36 Traťový úsek se zaznamenanou vysokou úrovní ohrožení přilehlou vegetací mezi stanicemi Červenka-Moravičany (zdroj: autor práce)

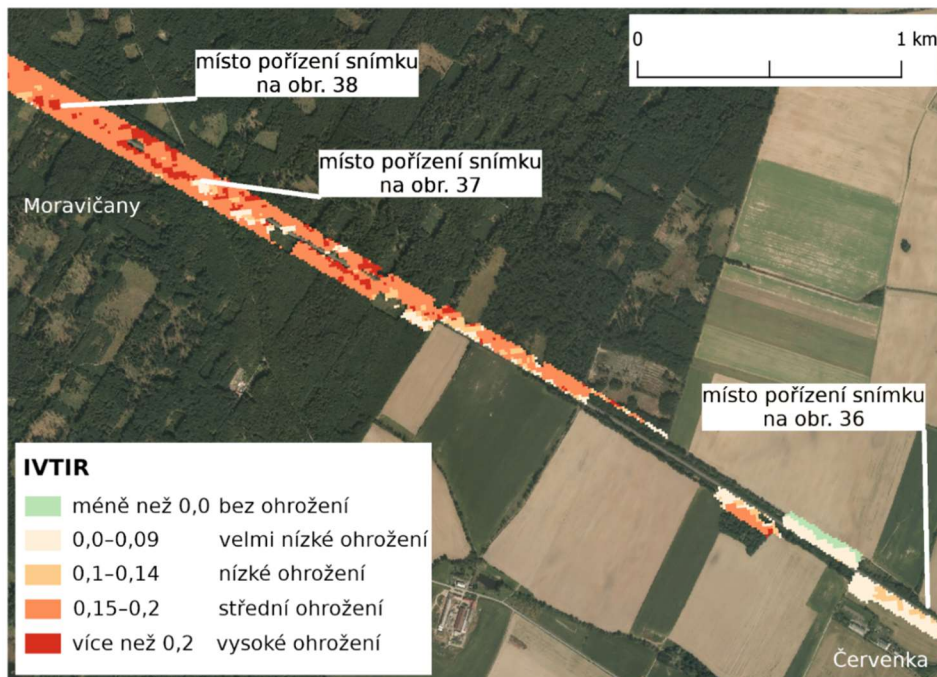
Na obrázku 37 je zobrazen traťový úsek, na kterém se nachází dřeviny s nízkou a vysokou úrovní ohrožení. V levé části je patrné, že došlo k vymýcení původního porostu. Tento prostor však nebyl osazen vybranými dřevinnými druhy, či v tomto případě vzhledem k blízkosti trati raději keři, ale došlo k uchycení náletových dřevin. V popředí je viditelná mladá smrčina, která se v této lokalitě nacházející se v CHKO Litovelské Pomoraví jeví jako nežádoucí. Jedná se o listnaté lesy v lužní oblasti.

V případě jejich prospívání se v budoucnosti stanou tyto stromy ohrožením pro železniční infrastrukturu.



Obr. 37 Traťový úsek kombinující nízkou a vysokou úroveň ohrožení přilehlou vegetací mezi stanicemi Červenka-Moravičany (zdroj: autor práce)

Místa pořízení tří kontrolních fotografií trati jsou včetně hodnot indexu IVTIR zobrazena na obrázku 38.



Obr. 38 Lokalizace míst, ze kterých byly pořízeny snímky na obrázcích 35 až 37 mezi stanicemi Červenka-Moravičany

Odstranění vysokých porostů v blízkosti tratí zajistí okamžité odstranění ohrožení. Pro snížení budoucích nákladů údržby by bylo vhodné prostory osadit plánovaně. V teoretické rovině se tento způsob provedení jeví jako zcela logický a správný, ale kvůli možným rozdílným vlastníkům dotčených pozemků může být ve skutečnosti problematický.

7 DISKUZE

Problematika pro vyhodnocení rizika přilehlou stromovou vegetací patří u nás i ve světě mezi velice málo zpracovávaná témata. Tuto skutečnost lze přisuzovat odlišnému způsobu výstavby tratí, která obvykle nedosahuje takové hustoty. Rovněž bývá ve většině případů zajištěno ochranné pásmo železnice bez vegetace, případně nízkého vzrůstu. Z tohoto důvodu nebylo možné čerpat existující zdroje v sobě přímo zahrnující zkoumanou oblast. Práce je však založena na výběru studií, které se dotýkají vyhodnocovaných okruhů, z nichž je tato studie sestavena. Rovněž došlo ke konzultaci navrženého postupu s odborníky v oboru dendrologie, lesnictví a dálkového průzkumu Země. Jejich návrhy a připomínky byly do metodiky zapracovány. Konkrétně byl do výzkumu zapojen například prof. RNDr. Vilém PECHANEC, Ph.D. (UPOL), RNDr. Jan BRUS, Ph.D. (UPOL), Ing. Pavel SAMEC, Ph.D. (Czech Globe), Ing. Tomáš ZAMEC (ÚHÚL), Ing. Jan HUBENÝ (ÚHÚL), Ing. Zdeněk SOUŠEK (ÚHÚL), Ing. Filip HÁJEK, Ph.D. (ÚHÚL), Ing. Roman ŠIMEK (ÚHÚL), Ing. Soňa TICHÁ, Ph.D. (MENDELU), Ing. Zdeněk ŠUP (Flora Olomouc) a další.

Vyhodnocení zdravotního stavu bylo provedeno na základě snímků družice Sentinel-2. Pomocí korekčních vrstev byla snaha o odstranění vlivu oblačnosti, avšak i přesto je její mírný projev ve výsledku patrný. Budoucí zlepšení je možné zajistit rozšířením časového období, ze kterého pochází vyhodnocované snímky. Rovněž by bylo možné provést kombinaci více zdrojů satelitních dat a pomocí korekčních přepočtů zajistit jejich kompatibilitu.

Výpočet rizikovosti vegetace v pilotní studii prostřednictvím indexu VTIR je založen na vzájemném pronásobení vah vybraných parametrů porostu. Tím může docházet k zesílení jejich vlivu na výsledek v případě jejich vyšších hodnot. Cílem této části bylo zejména sestavení vhodného postupu zpracování a výběr dat. Významný vliv na výsledek VTIR má zjištěný zdravotní stav vegetace, tento předpoklad byl založen na existující odborné literatuře. Prostřednictvím dotazníkového šetření mezi odborníky v rámci Studie 2, byl významný vliv zdravotního stavu potvrzen i pro výpočet hodnoty indexu IVTIR.

Jednotlivé váhy sledovaných parametrů v pilotní studii byly stanoveny na základě teoretických znalostí a provedených analýz z oblasti lesnictví. Ve druhé Studii 2 pak byly váhy stanoveny prostřednictvím odborného názoru odborníků, zabývajících se řešenou problematikou. Váhy byly stanoveny pomocí metody AHP. Tento postup závisí na zkušenostech a znalostech jednotlivých respondentů a může být částečně zkreslen. Vyšším počtem dotazovaných byla snaha získat co nejobjektivnější informace, ale přesto je k tomuto faktu nutné přihlédnout. Výsledky šetření však

poskytují jednoznačné informace a názory respondentů ve většině případů spolu silně korespondují. Aplikací této studie do praxe bude možné případnou nepřesnost ve stanovení vah atributů porostu identifikovat a zajistit jeho korekci.

Prostorové rozlišení výsledné vrstvy ohrožení, které odráží vlastnosti vstupních dat, je 20 m. Díky tomu není možné provést přesnou identifikaci jednotlivých ohrožujících stromů. Avšak výsledek lze použít jako nástroj pro obecnou lokalizaci ohrožených míst a pro ně v případě potřeby provést detailnější nasnímkování. Pozitivní stránkou navržené metodiky vyhodnocení je použití volně dostupných dat s vysokou periodicitou aktualizace.

Z důvodu využití družicových snímků v navržené metodice je detekce určena především pro identifikaci ohrožení železnice plynoucího z přilehlých souvislých lesních struktur. Navržená metodika má schopnost analyzovat i nedostupné a odlehlé lokality, kde je odhalení a odstranění zjištěného negativního stavu složitější. Samostatně rostoucí stromy lze považovat kvůli jejich nechráněnému umístění rovněž za rizikové, ale zvolené datové prostředky, které umožňují pravidelné vyhodnocení při minimálních nákladech, nejsou pro stanovení jejich úrovně ohrožení vhodné. K jejich vyhodnocení by bylo nutné zajistit nasnímkování okolí tratě prostřednictvím dronu či kamery umístěné na lokomotivě.

Navržený postup je možné automatizovat prostřednictvím programovacích jazyků. Součástí této práce jsou skripty v jazyce Python, které ze stažených družicových snímků provádí sestavení mozaiek a výpočet vegetačního indexu NDVI. Jejich zdrojové kódy jsou umístěné na webové adrese <https://github.com/kuceraIVTIR>. Dalším rozšířením je možné vytvořit autonomní proces, který bude průběžně vyhodnocovat míru rizika v okolí železnice. V případě detekce vysoké úrovně ohrožení může dojít k navržení možných opatření. Pro zajištění kvalitního výsledku této studie bylo nutné provést výběr družicových snímků Sentinel-2 manuálně. Zejména kvůli formě výskytu oblačnosti. Informace o její úrovni je vyjádřena prostřednictvím procentuálního zastoupení zasažených pixelů na celkové ploše snímku. V některých případech však zasahují území mimo zájmovou lokalitu. Výběrem takovýchto snímků i s případně vyšší celkovou úrovní oblačnosti tak může dojít k získání kvalitnějšího výsledku.

Proces stanovení ohrožení železnice přilehlým porostem je založen na vyhodnocení tří parametrů porostu, které patří dle odborné literatury mezi nejvýznamnější. Samozřejmě je možné proces rozšířit i o další a výsledek dále zpřesňovat. Ukázka potenciálně vhodných datových sad je uvedena v závěrečné části kapitoly Výsledky. Navržená metodika tak tvoří základní pilíř pro stanovení úrovně ohrožení, který je možné dále rozšiřovat dle možností zpracovatele.

8 ZÁVĚR

Studie využívá několik již existujících datových zdrojů z oblasti lesnictví a dálkového průzkumu Země. Cílem je vytvoření metodiky k detekci rizika ohrožení železniční infrastruktury přilehlou stromovou vegetací. Snahou je navrhnout takový postup, který by byl snadno udržitelný a aplikovatelný s důrazem na minimalizaci možných nákladů. Díky tomu by bylo možné provádět aktualizaci stavu v pravidelných intervalech a reagovat tak na aktuální vývoj.

Součástí práce jsou dvě studie. První **pilotní studie** měla za úkol především navrhnout metodiku pro stanovení úrovně ohrožení železnice lesním porostem nacházejícím se v jejím ochranném pásmu, včetně výběru vhodných dostupných datových sad. Navržený postup byl aplikován na území Libereckého kraje, na kterém došlo k ověření jeho správnosti. Výsledkem je **index VTIR** vypovídající o míře ohrožení porostem.

Na základě něj bylo identifikováno nejnižší ohrožení porostem mezi roky 2016 a 2017 na ploše ochranného pásma železnice 1 183 ha. Jedná se o 21,8 % jeho celkové rozlohy. Střední míra byla identifikována na 291 ha (5,3 %) a vysoké ohrožení pak na 49 ha (0,9 %). Zbývající území nebylo pokryto lesním porostem.

Studie 2 navazovala na první s cílem vylepšení metodiky výpočtu. Také bylo rozšířeno hodnocené území na celou plochu ČR. Díky tomu došlo k získání kompletního obrazu stavu lesních porostů nacházejících se v blízkosti železniční infrastruktury. Významným rozdílem ve srovnání s pilotní studií, je způsob stanovení vah parametrů porostu využitých pro výpočet ohrožení. V první studii byl založen na odborných publikacích, ve druhé pak bylo uplatněno dotazníkové šetření mezi experty na řešenou problematiku a to bylo ve výsledku vyhodnoceno metodou AHP. Způsob výpočtu indexu ohrožení byl rovněž upraven a pro zajištění snadného rozlišení byl přejmenován na IVTIR. Hodnoty **indexu ohrožení IVTIR** byly klasifikovány do pěti kategorií právě dle míry očekávaného ohrožení železnice (tab. 30).

Tab. 30 Úrovně ohrožení vegetací dle hodnot indexu IVTIR

IVTIR	Ohrožení
méně než 0,0	bez ohrožení
0,0 - 0,09	velmi nízké ohrožení
0,1 - 0,14	nízké ohrožení
0,15 - 0,2	střední ohrožení
více než 0,2	vysoké ohrožení

Výsledný vzorec pro výpočet indexu ohrožení IVTIR po dosazení tří hlavních vah je uveden ve vzorci 4.

$$IVTIR = -(0,636 \times Z_{NDVI}) + 0,128 \times V_{VD} + 0,236 \times V_{VV}$$

IVTIR – vylepšený index rizikovosti vegetace (Improved Vegetation Threat Index for Railway infrastructure)

Z_{NDVI} – meziroční změna vegetačního indexu NDVI

V_{VD} – váha vedlejší dle druhu stromu

V_{VV} – váha vedlejší dle výšky stromu

Vzorec 4 Vzorec pro výpočet rizika ohrožení železniční infrastruktury stromovou vegetací

V ochranném zalesněném pásmu železnice bylo v roce 2020 identifikováno vysoké a střední ohrožení na 42,6 % jeho plochy. Na základě porovnání hodnot indexu IVTIR s výskytem skutečných mimořádných událostí způsobených pádem stromu či srážkou s ním, byly tyto dvě kategorie označeny jako vysoce rizikové. Na zbývajícím území se nachází porost, který představuje nízké či žádné ohrožení. Přesto je však nutné jeho stav nadále sledovat, protože může dojít například vlivem zhoršení jeho zdravotního stavu k nárůstu úrovně ohrožení.

Vypočítané hodnoty indexu IVTIR byly porovnány se skutečným výskytem mimořádných událostí v jednotlivých krajích ČR. Dále bylo provedeno i terénní šetření na lokalitách s různou hodnotou indexu. Na základě porovnání skutečných výskytů mimořádností a terénního šetření je možné sestavenou metodiku pro stanovení úrovně ohrožení železnice stromovou vegetací hodnotit jako správně navrženou.

Navržená metodika a zjištěné výsledky mohou správci infrastruktury pomoci s identifikací ohrožených lokalit, na kterých by mělo dojít k přijetí nápravných opatření. Tím by došlo ke zvýšení bezpečnosti a zajištění plynulosti provozu i za mimořádných povětrnostních podmínek. Kromě železnice může najít uplatnění sestavená metodika také v dalších oblastech jako je například silniční doprava, energetika a další.

Mezi hlavní přínosy této práce lze řadit využití, v současnosti již existujících, datových zdrojů pro zvýšení bezpečnosti provozu železnice. Snahou je celý postup zautomatizovat a zajistit tak správci infrastruktury nástroj pro detekci ohrožení a umožnit zajištění opatření. Zdravotní stav v okolí tratě není posuzován v celorepublikovém měřítku a pozemní šetření představuje nákladný a zdlouhavý proces. Periodické snímkování systémem Sentinel-2 však přináší možnost pravidelného celorepublikového vyhodnocení.

Vybrané sestavené rastery jsou dostupné na webové stránce disertační práce <https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/phd/kucera24/>. Konkrétně se jedná o:

1. Hodnoty IVTIR v ochranném pásmu železnice
2. Meziroční změny vegetačního indexu NDVI (2019/2020)
3. Vybrané hydrické řady v ochranném pásmu železnice
4. Nebezpečné sklony terénu v ochranném pásmu železnice
5. Větrné polomy v ochranném pásmu železnice

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- Aklilu Tesfaye, A., & Gessesse Awoke, B. (2021). *Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem*. *Spatial Information Research*, 29(1), 109–121. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00339-5>
- Bednář, P. (2012). *Problematika sekundárních smrkových monokultur a možnosti jejich přestaveb bukem lesním*. Mendelova univerzita.
- Bid, S. (2016). *Change Detection of Vegetation Cover by NDVI Technique on Catchment Area of the Panchet Hill Dam, India*. *International Journal of Research in Geography*, 2(3). <https://doi.org/10.20431/2454-8685.0203002>
- Bíl, M., Andrášik, R., Nezval, V., & Bílová, M. (2017). *Identifying locations along railway networks with the highest tree fall hazard*. *Applied Geography*, 87, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.07.012>
- Bolyn, C., Lejeune, P., Michez, A., & Latte, N. (2022). *Mapping tree species proportions from satellite imagery using spectral–spatial deep learning*. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113205>
- Breidenbach, J., Waser, L. T., Debella-Gilo, M., Schumacher, J., Rahlf, J., Hauglin, M., Puliti, S., & Astrup, R. (2021). *National mapping and estimation of forest area by dominant tree species using Sentinel-2 data*. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(3), 365–379. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0170>
- ČHMÚ. *Historická data: Územní srážky* [online]. ČHMÚ, 2019. <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>
- ČSÚ. *Veřejná databáze*. ČSÚ, 2019. <http://vdb.czso.cz>
- ČÚZK. *Digitální geografický model území ČR (Data50): Vegetace a povrch*. ČÚZK, 2019.
- Chase, C. W., Kimsey, M. J., Shaw, T. M., & Coleman, M. D. (2016). *The response of light, water, and nutrient availability to pre-commercial thinning in dry inland Douglas-fir forests*. *Forest Ecology and Management*, 363, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.014>
- Cheng, H., Liu, C., & Kang, L. (2020). *Experimental study on the effect of plant spacing, number of rows and arrangement on the airflow field of forest belt in a wind tunnel*. *Journal of Arid Environments*, 178, 104169. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104169>
- Chen, L., Zhang, D., Li, P., & Lv, P. (2020). *Change Detection of Remote Sensing Images Based on Attention Mechanism*. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/6430627>
- Cortés-Ramos, J., Farfán, L. M., & Herrera-Cervantes, H. (2020). *Assessment of tropical cyclone damage on dry forests using multispectral remote sensing: The case of Baja California Sur, Mexico*. *Journal of Arid Environments*, 178, 104171. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104171>
- Divíšek, J., Culek, M., & Jiroušek, M. (2010). *Biogeografie*. MUNI. https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0005/18118868/index_com_HR.html

- Dobrovolný, P., Herber, V., & Hynek, A. (2001). *Mapování vegetace s využitím družicových snímků: Hlavní rysy spektrálního chování vegetace*. Masarykova univerzita.
- ESA. (2022). *Sentinel*. In Open Access Hub. ESA. <https://scihub.copernicus.eu>
- ESA. (2024). *Overview of S2 Applications*. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-applications>
- Glowienka, E., & Zembol, N. (2022). *Forest Community Mapping Using Hyperspectral (CHRIS/PROBA) and Sentinel-2 Multispectral Images*. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16(4), 103–117. <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.4.103>
- Goepel, K. D. (2018). *Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)*. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Goodarzi, M., Pourhashemi, M., & Azizi, Z. (2019). *Investigation on Zagros forests cover changes under the recent droughts using satellite imagery*. *Journal of Forest Science*, 65(1), 9–17. <https://doi.org/10.17221/61/2018-JFS>
- Hengkai, L., Feng, X., & Qin, L. (2020). *Remote sensing monitoring of land damage and restoration in rare earth mining areas in 6 counties in southern Jiangxi based on multisource sequential images*. *Journal of Environmental Management*, 267, 110653. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110653>
- Hoerbinger, S., Obrietan, M., Rauch, H. P., & Immitzer, M. (2020). *Assessment of safety-relevant woody vegetation structures along railway corridors*. *Ecological Engineering*, 158, 106048. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106048>
- Hosseini, S. A. O., Zandi, S., Fallah, A., & Nasiri, M. (2016). *Effects of geometric design of forest road and roadside vegetation on traffic noise reduction*. *Journal of Forestry Research*, 27(2), 463–468. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0187-9>
- Kučera, P. (2004). *Převodní klíč "hpj" na geobiocenologické řady*. MENDELU. https://user.mendelu.cz/xkucera0/galerie2004_5/bpej2.htm
- Kundu, A., Denis, D., Patel, N., & Dutta, D. (2018). *A Geo-spatial study for analysing temporal responses of NDVI to rainfall*. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 39(1), 107–116. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12217>
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2023). *A high-resolution canopy height model of the Earth*. *Nature Ecology & Evolution*, 7(11), 1778–1789. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6>
- Li, S., Ganguly, S., Dungan, J. L., Wang, W., & Nemani, R. R. (2017). *Sentinel-2 MSI Radiometric Characterization and Cross-Calibration with Landsat-8 OLI*. *Advances in Remote Sensing*, 06(02), 147–159. <https://doi.org/10.4236/ars.2017.62011>
- Loehle, C., Idso, C., & Bently Wigley, T. (2016). *Physiological and ecological factors influencing recent trends in United States forest health responses to climate change*. *Forest Ecology and Management*, 363, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.042>
- Lubojacký, J. (2013). *Škody působené větrem*. In LESNICKÁ PRÁCE. Lesnická práce.

- Lukeš, P., Strejček, R., Křístek, Š., & Mlčoušek, M. (2018). *Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.*
- McEachran, Z. P., Slesak, R. A., & Karwan, D. L. (2018). *From skid trails to landscapes: Vegetation is the dominant factor influencing erosion after forest harvest in a low relief glaciated landscape.* *Forest Ecology and Management*, 430, 299–311.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.021>
- Minařík, R., & Langhammer, J. (2016). *Use of a multispectral uav photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics.* *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 711–718.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-711-2016>
- Nazarova, T., Martin, P., & Giuliani, G. (2020). *Monitoring Vegetation Change in the Presence of High Cloud Cover with Sentinel-2 in a Lowland Tropical Forest Region in Brazil.* *Remote Sensing*, 12(11), 1829. <https://doi.org/10.3390/rs12111829>
- Nezval, V., & Bíl, M. (2020). *Spatial analysis of wildlife-train collisions on the Czech rail network.* *Applied Geography*, 125, 102304. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102304>
- Novo, A., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., González-de Santos, L. M., & Lorenzo, H. (2019). *Automatic detection of forest-road distances to improve clearing operations in road management.* *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1083–1088. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1083-2019>
- Ramík, J. (1999). *Vícekritériální rozhodování - analytický hierarchický proces (AHP).* Slezská univerzita.
- Schäffer, B., Brink, M., Schlatter, F., Vienneau, D., & Wunderli, J. M. (2020). *Residential green is associated with reduced annoyance to road traffic and railway noise but increased annoyance to aircraft noise exposure.* *Environment International*, 143, 105885.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105885>
- Snepsts, G., Kitenberga, M., Elferts, D., Donis, J., & Jansons, A. (2020). *Stem Damage Modifies the Impact of Wind on Norway Spruces.* *Forests*, 11(4), 463.
<https://doi.org/10.3390/f11040463>
- Státní pozemkový úřad. (2024a). *Definice a význam BPEJ: Bonitované Půdně-Ekologické Jednotky.* SPÚ. <https://www.spucr.cz/bpej/definice-a-vyznam-bpej>
- Státní pozemkový úřad. (2024b). *Bonitované Půdně-Ekologické Jednotky.* SPÚ.
- SŽ. *Data mimořádných událostí.* SŽ, 2019 (a).
- SŽ. *Data mimořádných událostí.* SŽ, 2024.
- SŽ. *Data železniční infrastruktury.* SŽ, 2019 (b).
- SŽ. *Data železniční infrastruktury.* SŽ, 2023.
- SŽ. *Snímkování železniční infrastruktury.* SŽ, 2020.
- Tavankar, F., lo Monaco, A., Nikooy, M., Venanzi, R., Bonyad, A., & Picchio, R. (2019). *Snow damages on trees of an uneven age in mixed broadleaf forests: effects of topographical conditions*

- and tree characteristics*. Journal of Forestry Research, 30(4), 1383–1394.
<https://doi.org/10.1007/s11676-018-0710-x>
- ÚHÚL. (2018a). *Druhová skladba dřevin*. ÚHUL.
- ÚHÚL. (2018b). *Těžba*. ÚHUL.
- ÚHÚL. (2018c). *Větrné polomy*. ÚHUL.
- ÚHÚL. (2018d). *Výšková skladba porostních segmentů*. ÚHUL.
- ÚKZÚZ. (2024). *Poruchy a poškození rostlin*. ÚKZÚZ.
https://mze.gov.cz/public/app/srs_pub/fytoportal/public/?key=%22b334040991e02362c16d6b241f6b11a2%22#rlp|poruchy|detail:b334040991e02362c16d6b241f6b11a2|popis
- Vicena, I. (2006). *Současný stav ochrany lesa proti polomům*. Lesnická práce. č. 11/06, ročník 85.
- Viewegh, J. (2012). *Klasifikace lesních rostlinných společenstev*. ČZU.
- Warrens, M. J. (2011). *Cohen's kappa is a weighted average*. Statistical Methodology, 8(6), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.stamet.2011.06.002>
- Wittke, S., Yu, X., Karjalainen, M., Hyyppä, J., & Puttonen, E. (2019). *Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 76, 167–178.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>
- Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., Li, Z., Huang, H., Vermote, E., Skakun, S., & Roger, J.-C. (2018). *Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences*. Remote Sensing of Environment, 215, 482–494. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>
- Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W.-H., Liu, H., & Liu, G. (2017). *Band selection in sentinel-2 satellite for agriculture applications*. 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC), 1–6. <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8081990>
- Zouhar, V., & Holuša, O. (2012). *Lesnická typologie – základní pojmy, účel a díla*. In Lesnická práce (Vol. 12, Issue 4). Lesnická práce.

Michal KUČERA

OSOBNÍ ÚDAJE

rok narození: 1990
bydliště: Olomouc, Česko
telefon: +420 602 760 705
email: m.kucera@email.cz

VZDĚLÁNÍ

2018 – dosud Univerzita Palackého Olomouc, **Geoinformatika a kartografie** (PhD)
téma disertace: *Hodnocení vlivů na železniční dopravu pomocí geoinformatických metod a metod analýzy vícedimenzionálních dat*

2014 – 2016 Univerzita Palackého Olomouc, **Geoinformatika** (Mgr.)
diplomová práce: *Uživatelské testování a optimalizace vizualizací nejistoty prostorových dat*

2010 – 2014 Univerzita Palackého Olomouc, **Geoinformatika a geografie** (Bc.)
bakalářská práce: *Využití open-source nástrojů pro přípravu, průběh a vyhodnocení eye-tracking experimentů*

ZAHRANIČNÍ STÁŽE A ŠKOLY

2021/9 – 11 **Žilinská univerzita, Žilina, Slovensko – Fakulta riadenia a informatiky**
výzkumná stáž

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2017 – dosud **Správa železnic, s. o.**
pozice: *systemový specialista*

2016 – 2017 **Ústav pro hospodářskou úpravu lesů**
pozice: *specialista dálkového průzkumu země a GIS*

JAZYKOVÉ ZNALOSTI

čeština mateřský jazyk angličtina středně pokročilý (B1)

SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI

software: GIS, DPZ, mapy ArcGIS, QGIS, MapInfo
grafika, design CorelDRAW, Gimp, Photoshop
web, programování Python, VBA, Java Script, HTML, CSS, PHP

řidičský průkaz: B – osobní automobil

V Olomouci dne 1. 9. 2024



Michal KUČERA

PŘEHLED ČINNOSTÍ STUDENTA V PRŮBĚHU STUDIA

Publikace studenta a veškeré uvedené činnosti vycházejí z náplně doktorského studia a z vědecko-výzkumných aktivit, na kterých se na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci podílel nebo podílí.

Studijní povinnosti

Absolvované zkoušky

7. 1. 2019	Management vědy a výzkumu (PRF/PGS00)
31. 8. 2019	Vývoj softwarových prostředků pro open-source GIS (KGI/PGSVS) doc. Mgr. Jaroslav HOFIERKA, PhD.
8. 9. 2020	Mapování krajinné pokrývky a jejich změn (KGI/PGSKP) doc. RNDr. Ján FERANEC, DrSc.
9. 9. 2020	Programování pro GIS (KGI/PGSVG) doc. Ing. Zdena DOBEŠOVÁ, Ph.D.
16. 12. 2020	Vědecko-výzkumná stáž (PRF/PGS01)
20. 5. 2022	Anglický jazyk pro doktorské studium (VCJ/PGSAJ)
12. 10. 2022	Prostorové analýzy geodat (KGI/PGSPA) prof. Ing. Jiří HORÁK, Dr.

Zahraniční stáže

2021	Žilinská univerzita, Žilina, Slovensko Fakulta riadenia a informatiky	12 týdnů	12. týdnů
------	--	----------	-----------

Výuka

KGI/PRG2	Programování 2 (akademické roky 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021)	22 hodin
KGI/DAMIN	Data mining (akademický rok 2019/2020)	4 hodiny
	<i>Celkem</i>	26 hodin

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Vztahující se k tématu disertace

Odborný časopis a sborník mezinárodní konference (WoS, Scopus)

DOBEŠOVÁ, Z., KUČERA, M. *Time series of workload on railway routes*, In Silhavy, R. (ed.) CSOC 2019. *Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems*, book series *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 985, pp. 370-380, 2020, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-19810-7_37, WoS, Scopus

KUČERA, M., DOBEŠOVÁ, Z. *Analysis of the Degree of Threat to Railway Infrastructure by Falling Tree Vegetation*, MDPI-Basel, *ISPRS Int. J. Geo-Inf. Switzerland*, 2021, 10 (292), 24 p. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050292>, Special Issue *GIS in Sustainable Transportation*, SCOPUS, WoS, IF 2,239

Konferenční příspěvky

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z. *Železniční doprava v roce 2020*, *Symposium GIS Ostrava 2022, Smart City – vize a realita*, 16. – 18. 3. 2022, 15 s., ISBN 978-80-248-4607-1, ISSN 1213-239X, VŠB-TUO, Ostrava, <https://doi.org/10.31490/9788024846071-161>

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z. *Charakter změn v osobní a nákladní železniční dopravě v roce 2020 a 2021*, XXV. kongres České geografické společnosti a 18. kongres Slovenskej geografickej spoločnosti, *Sborník abstraktů*, Eds. Fiedor, Minxová, Smolová, 6.-8. 9. 2022, Olomouc, Univerzita Palackého, <https://doi.org/10.5507/prf.22.24461786>, ISBN 978-80-244-6178-6

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z. *Hodnocení změn železničního provozu s využitím shlukových metod*, *Dopravně-geografický workshop 2022 (workshop mezioborové platformy)*, Brno 15.-16. 9. 2022, Ekonomicko-správní fakulta, Masarykova univerzita Brno

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z. *Změny v železniční dopravě v období pandemie*, *Dopravně-geografický workshop 2021 (workshop mezioborové platformy)*, Ekonomicko-správní fakulta, Masarykova Univerzita Brno, 23. -24. 9. 2021

Další účasti na konferencích bez sborníku

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z., *Využití QGIS pro zpracování dat míry ohrožení železnice*, Žilina: OSSCONF 2019.

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z., *Železniční trať a hodnocení lesní vegetace*, Praha: GIS Esri 2019.

KUČERA M., DOBEŠOVÁ Z., *Dopad pandemických restrikcí na železniční dopravu*, Olomouc: 15. Kartografický den 2020.

Ostatní publikace

Odborný časopis a sborník mezinárodní konference (WoS, Scopus)

BRUS, J., KUČERA M., POPELKA, S. *Intuitiveness of geospatial uncertainty visualizations: a user study on point symbols*. *Geografie*. Praha: Česká geografická společnost, 19/2, 2019. WoS IF 0.745

Konferenční příspěvky

DOBEŠOVÁ Z., MACKŮ K., KUČERA M. *Výuka geoinformatických předmětů na příkladech dat Evropské unie*, *Symposium GIS Ostrava 2022, Smart City – vize a realita*, 16. – 18. 3. 2022, 12 s., ISBN 978-80-248-4607-1, ISSN 1213-239X, VŠB-TUO, Ostrava, <https://doi.org/10.31490/9788024846071-153>

Přehled účasti na projektech

- 2021 IGA_PrF_2021_020 Aplikace geoinformačních technologií pro prostorové analýzy, modelování a vizualizace prostorových jevů
- 2022 IGA_PrF_2022_027 Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií
- 2023 IGA_PrF_2023_017 Analýza, modelování a vizualizace prostorových jevů pomocí geoinformačních technologií II.