

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE
Drevárska fakulta
Katedra protipožiarnej ochrany

KONCEPCIA MONITORINGU ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA

Experimentálne územie Vydrovskej doliny
LS Beňuš, OZ Horehronie
Porasty zasiahnuté lykožrútovou kalamitou

Projekt 09I01-03-V04-00088

Vývoj, testovanie, demonštrácia a validácia konceptuálnych metodologických a technologických
riešení zvyšujúcich odolnosť porastov napadnutých lykožrútom smrekovým

Pracovný balík NV2 – Tvorba koncepcie monitoringu územia, mapovanie územia, kontinuálny
bezpilotný letecký monitoring a komplexné posúdenie rizík

Zvolen, 2025

Koncepcia monitoringu záujmového územia stanovuje odborný rámec pre systematické sledovanie experimentálneho územia Vydrovskej doliny v pôsobnosti LS Beňuš, OZ Horehronie. Územie bolo zvolené s ohľadom na rozsah zmien vyvolaných lykožrútovou kalamitou a na potrebu zachytiť ďalší vývoj porastov v dostatočnom priestorovom aj časovom detaile. Dokument preto nevychádza z jednej monitorovacej technológie. Prepája opakovaný letecký monitoring prostredníctvom UAV, cielené pozemné zisťovanie, priestorové analýzy a po obstaraní a inštalácii zariadení aj kontinuálny IoT monitoring.

Nosnú časť koncepcie tvorí opakovaný letecký monitoring. Jeho úlohou nie je iba vytvoriť aktuálnu ortofotomapu, ale zachytiť, kde a akým tempom sa mení štruktúra kalamitne zasiahnutých porastov, ako postupuje obnova, kde vznikajú otvorené plochy a aké zmeny možno pozorovať v okolí existujúcich prírode blízkych riešení. Letecké údaje budú preto od začiatku získavané tak, aby sa dali opakovane porovnávať a overovať v teréne.

Koncepcia rešpektuje aj reálnu postupnosť projektových činností. V období, pre ktoré bol tento metodický rámec pripravený, IoT monitorovacie jednotky ešte neboli obstarané. Dokument preto neprezentuje kontinuálne senzorové merania ako už prebiehajúcu aktivitu. Určuje však požiadavky na ich budúce umiestnenie, sledované veličiny, dátový tok a spôsob prepojenia s UAV a terénymi údajmi, aby sa po ich sprevádzkovaní stali prirodzenou súčasťou jedného monitorovacieho systému.

Úvod

Koncepcia vychádza zo súčasného smerovania monitoringu zdravotného stavu lesov, v ktorom sa UAV údaje nepoužívajú izolovane, ale ako medzistupeň medzi detailným terénnym zisťovaním a plošným diaľkovým prieskumom. Systematické prehľady poukazujú na vysokú flexibilitu UAV a veľmi vysoké priestorové rozlíšenie, súčasne však zdôrazňujú potrebu štandardizovaných pracovných postupov, viac časových sérií, terénnej validácie a transparentného spracovania údajov (Ecke et al., 2022; Kautz et al., 2024; Che et al., 2025). Pre koncepciu LS Beňuš z toho vyplýva požiadavka, aby každá letecká kampaň bola súčasťou reprodukovateľného monitorovacieho dizajnu a nie jednorazovým mapovaním.

Pri monitorovaní smrekových porastov poškodených podkôrnym hmyzom je osobitne dôležité rešpektovať limity tzv. včasná detekcia (angl. *early detection*). Kautz, Feurer a Adler (2024) na základe kritického prehľadu upozorňujú, že diaľkový prieskum zatiaľ nedosahuje takú spoľahlivosť a časovú odozvu, aby nahradil terénnu kontrolu pri operatívnom vyhľadávaní čerstvo napadnutých stromov. Na druhej strane, opakované multispektrálne UAV snímkovanie môže na lokálnej úrovni významne podporiť diferenciáciu zdravotného stavu korún; Klouček et al. (2024) demonštrovali význam NIR-pásma a vegetačných indexov pri sledovaní smrekových porastov v podmienkach Českej republiky. V tejto koncepcii sa preto UAV monitoring chápe ako komplementárny nástroj, ktorého výsledky sa interpretujú spolu s terénnym overením.

Pre hodnotenie obnovy a NbS sa koncepcia opiera o princíp účelovo viazaných indikátorov. Európsky prehľad 95 štúdií obnovy identifikoval 84 rôznych indikátorov a poukázal na obmedzenú vhodnosť univerzálneho súboru bez väzby na cieľ opatrenia (Menéndez-Miguélez et al., 2024). Novšie práce zároveň zdôrazňujú potrebu prepájať ekologické, technické, ekonomické a sociálne hľadiská a zohľadniť časovú mierku účinku (van Lierop et al., 2025; Lapin et al., 2025). Z tohto dôvodu sú indikátory v dokumente viazané na konkrétnu monitorovaciu otázku a funkciu NbS.

1. Odborné východiská monitoringu kalamitne zmenených porastov

Lykožrútová kalamita predstavuje z hľadiska monitoringu dynamický disturbančný proces, ktorého dôsledky sa prejavujú na viacerých priestorových a časových úrovniach. Na úrovni jednotlivého stromu možno pozorovať zmenu vitality koruny, postupnú farebnú transformáciu asimilačného aparátu a následnú mortalitu. Na úrovni porastu dochádza k zmene zápoja, k vzniku medzier, k nárastu podielu stojaceho a ležiaceho mŕtveho dreva, k zmene svetelných a mikroklimatických podmienok a k rozvoju prirodzenej alebo umelej obnovy. Na úrovni širšieho územia sa mení priestorová kontinuita porastov, dostupnosť lesného paliva, odtokové pomery a citlivosť niektorých plôch na erózne procesy. Monitorovací systém preto nemôže byť založený na jednom indikátore, ale musí zachytiť vzájomne previazané zmeny štruktúry, zdravotného stavu a prostredia.

Z hľadiska projektu je rozhodujúce, aby monitorovanie nevytváralo iba obraz aktuálneho stavu, ale umožňovalo analyzovať zmenu. Referenčný dataset musí byť preto získaný a spracovaný spôsobom, ktorý bude možné reprodukovat' v ďalších monitorovacích termínoch. Pri UAV údajoch sa to týka predovšetkým priestorového rozsahu snímkovania, geometrie letu, rozlíšenia, spôsobu georeferencovania a fotogrametrického spracovania. Pri pozemných údajoch ide o stabilitu monitorovacích plôch, jednotné kategórie hodnotenia a jednoznačnú identifikáciu pozorovaných objektov. Ak sa tieto podmienky nezachovávajú, rozdiel medzi dvoma datasetmi môže byť spôsobený metodikou a nie skutočnou zmenou porastu.

Koncepcia preto vychádza z princípu viaczdrojovej observácie. Letecký monitoring poskytuje priestorovú súvislosť a detail, pozemné zisťovanie poskytuje referenčnú informáciu o stave stromov, obnovy, mŕtveho dreva a povrchu, budúce IoT merania poskytnú časovú kontinuitu mikroklimatických a ďalších environmentálnych veličín. Výsledkom ich integrácie má byť dátový model, v ktorom je pri každom indikátore známe, z akého zdroja vznikol, akú má priestorovú a časovú platnosť a s akou mierou neistoty sa interpretuje.

1.1 Cieľ monitorovania

Monitorovací systém je orientovaný na niekoľko vecných otázok: ako sa v čase mení rozsah a priestorové usporiadanie poškodených a odumretých častí porastov; ako sa mení otvorenosť zápoja a vertikálna štruktúra; kde dochádza k akumulácii odumretej biomasy a k vytváraniu priestorovo súvislých palivových štruktúr; ako sa vyvíja obnova na plochách po rozpade alebo spracovaní porastu; kde sa prejavujú erózne alebo odtokové procesy; a aký je stav už existujúcich prírode blízkych riešení. Druhou skupinou otázok je vhodnosť lokalít pre návrh nových NbS. V tomto prípade monitoring poskytuje vstupné údaje pre rozhodovanie, ale samotný výber riešenia musí zohľadniť aj lesnícke, prevádzkové, vlastnícke a ekonomické kritériá.

2. Vymedzenie záujmového územia a monitorovacích jednotiek

Záujmové územie projektu je situované vo Vydrovskej doline v pôsobnosti Lesnej správy Beňuš, OZ Horehronie. V projektovej dokumentácii predstavuje Vydrovská dolina experimentálne územie určené na prepojenie priestorového, terénneho a následne aj kontinuálneho senzorového monitoringu. Z vecného hľadiska ide o lesné porasty, ktorých súčasný stav a ďalší vývoj sú významne ovplyvnené lykožrúťovou kalamitou. Práve táto disturbancia určuje hlavné monitorovacie otázky: rozsah a dynamiku poškodenia, zmeny porastovej štruktúry, vývoj obnovy, zmenu palivového komplexu, vodného režimu a mikroklimatických podmienok a odozvu územia na existujúce alebo navrhované prírode blízke riešenia.

Vydrovská dolina sa v koncepcii neposudzuje ako homogénna plocha. Kalamitný vývoj vytvoril priestorovú mozaiku porastov s rozdielnym stupňom poškodenia a odlišnou vývojovou trajektóriou. Vedľa relatívne zachovaných častí sa nachádzajú porasty so symptómami poškodenia, plochy s odumretými stromami, otvorené alebo spracované kalamitné plochy a plochy s rôznym stupňom

prirodzenej alebo umelej obnovy. Táto heterogenita je z pohľadu výskumného dizajnu výhodou: umožňuje porovnávať kontrastné stavy v rámci jedného územia a sledovať ich vývoj rovnakou metodikou.

Základnou priestorovou jednotkou bude monitorovací blok. Jeho hranica sa uloží ako stabilná GIS vrstva a pri opakovaných kampaniach sa nebude meniť bez zdokumentovaného dôvodu. Po referenčnom mapovaní budú bloky stratifikované podľa stavu porastu a účelu sledovania. Minimálne sa rozlíšia relatívne zachované porasty, kalamitne poškodené porasty, plochy po spracovaní kalamity, plochy obnovy a lokality relevantné pre monitorovanie existujúcich alebo návrh nových NbS. Takéto členenie umožní oddeliť pozorovanú zmenu od rozdielov, ktoré boli medzi lokalitami prítomné už na začiatku sledovania.

2.1 Priestorové usporiadanie monitoringu

Priestorové usporiadanie bude vychádzať z kombinácie plošného UAV mapovania a bodových alebo plošných terénnych referencií. UAV kampane zabezpečia súvislý obraz monitorovacích blokov; terénne plochy a validačné body budú umiestnené tak, aby pokryli hlavné typy porastového stavu a súčasne boli použiteľné na opakované overenie. Miesta budúcich IoT jednotiek sa nebudú voliť mechanicky v pravidelnej sieti. Ich poloha sa odvodí od potreby zachytiť kontrastné mikroklimatické a pôdne podmienky, napríklad medzi zapojeným porastom, kalamitne otvorenou plochou, obnovujúcou sa plochou a vybranou lokalitou s NbS.

Technický návrh budúcej IoT vrstvy počíta s meteorologickými, pôdnymi a environmentálnymi senzormi, meraním vetra a zrážok a s prenosom údajov prostredníctvom LoRaWAN. Z pohľadu tejto koncepcie je dôležité najmä to, aby každý senzor reprezentoval jasne definovaný typ prostredia a aby jeho údaje bolo možné priradiť k rovnakým monitorovacím blokom, ktoré sa hodnotia z UAV a v teréne. Tým sa vytvorí väzba medzi priestorovým obrazom z leteckého monitoringu a kontinuálnym časovým priebehom podmienok prostredia.

2.2 Priestorová referencia a evidencia lokalít

Všetky priestorové produkty budú vedené v jednotnom súradnicovom referenčnom systéme určenom pre projekt. Každý monitorovací blok, terénna plocha, fotografický bod, budúci senzor a lokalita NbS dostane stabilný identifikátor. Evidencia bude obsahovať polohu, dátum založenia, účel, stručnú charakteristiku porastu alebo opatrenia a väzbu na príslušné datasety. Takto nastavená referencia je nevyhnutná pre porovnanie a zároveň znižuje riziko, že sa pri neskoršom spracovaní spoja údaje z vecne neporovnateľných miest.

Presné súradnice monitorovacích zariadení a detailné prevádzkové údaje sa nebudú uvádzať vo verejne distribuovaných verziách dokumentácie, ak by ich zverejnenie zvyšovalo riziko poškodenia alebo neoprávneného zásahu. Pre odborné spracovanie však zostanú súčasťou internej projektovej geodatabázy.

3. Architektúra monitorovacieho systému

Monitorovací systém je navrhnutý ako hierarchický. Prvú vrstvu predstavuje plošný UAV monitoring, ktorý zabezpečuje priestorovo súvislé údaje. Druhú vrstvu tvoria terénne referenčné plochy a fotografické body. Tretiu vrstvu tvoria tematické merania viazané na konkrétny problém, napríklad detailný záznam mŕtveho dreva, erózneho prejavu alebo stavu NbS. Po sprevádzkovaní IoT jednotiek pribudne štvrtá vrstva, t. j. kontinuálne časové rady environmentálnych parametrov. Všetky vrstvy sa spájajú prostredníctvom spoločnej priestorovej a časovej identifikácie.

Dôležitou súčasťou architektúry je oddelenie primárneho merania od interpretácie. Ortofotosnímka, mračno bodov alebo záznam teploty sú primárne alebo spracované údaje. Trieda zdravotného stavu koruny, mapa palivovej kontinuity alebo identifikácia lokality vhodnej pre NbS sú odvodené interpretačné produkty. Pri každom odvodenom produkte musí byť možné späť dohľadať vstupné dáta a verziu postupu, ktorým bol vytvorený. Tento princíp je nevyhnutný pre odbornú reprodukovateľnosť a pre prípadné neskoršie prehodnotenie klasifikácie.

Časový rozmer systému sa opiera o referenčný stav a opakované kampane. Referenčný stav nemusí predstavovať stav pred kalamitou; v podmienkach prebiehajúceho projektu predstavuje prvý metodicky konzistentný a dostatočne kvalitný dataset, od ktorého možno merať ďalšiu zmenu. Historické ortofotomapy alebo iné archívne podklady môžu rozšíriť časovú perspektívu, ale nesmú sa bez overenia presnosti a porovnateľnosti miešať s UAV datasetmi ako rovnocenné merania.

4. Letecký monitoring prostredníctvom UAV

Letecký monitoring je navrhnutý ako hlavný nástroj pre opakované mapovanie stavu porastov. Jeho výhodou je schopnosť zachytiť súvislý priestorový obraz v rozlíšení, ktoré umožňuje interpretáciu jednotlivých korún alebo malých skupín stromov v závislosti od výšky letu a použitého senzora. V členitom lesnom prostredí však kvalita výsledku závisí od správneho návrhu letu, dostatočného prekryvu, stabilných svetelných podmienok a presného georeferencovania.

Referenčné UAV snímkovanie musí byť plánované s ohľadom na budúce opakovanie. Pred letom sa vytvorí hranica monitorovacieho bloku, identifikujú sa potenciálne miesta vzletu a pristátia a overí sa členitosť terénu. Výška letu sa neurčuje jednou univerzálnou hodnotou; odvodí sa od požadovaného priestorového rozlíšenia, ohniskovej vzdialenosti senzora, reliéfu, výšky porastu a platných prevádzkových podmienok. V horskom teréne je potrebné zabezpečiť primeranú výšku nad povrchom terénu a porastu, nie iba konštantnú výšku vzhľadom na miesto vzletu.

Pre fotogrametrické spracovanie sa letové línie navrhnu s dostatočným pozdĺžnym a priečnym prekryvom. Konkrétne hodnoty sa stanovujú podľa senzora a charakteru porastu; pri lesných korunách je potrebné počítať s tým, že ich trojrozmerná štruktúra, pohyb vo vetre a opakujúce sa textúry sťažujú párovanie snímok. Preto je vhodné používať vyšší prekryv než pri jednoduchom mapovaní

rovinného otvoreného povrchu. Pri opakovaných snímkovaniach (leteckých kampaniach) sa zachová rovnaký princíp letových línií a porovnateľné priestorové rozlíšenie.

4.1 RGB snímkovanie

RGB snímkovanie je základným zdrojom pre tvorbu ortomozaiky a vizuálne hodnotenie stavu porastu. Z farebnej ortomozaiky možno identifikovať otvorené plochy, medzery v zápoji, výrazne odumreté koruny a ďalšie objekty, pokiaľ ich rozlíšenie a viditeľnosť umožňujú spoľahlivú interpretáciu. Pri hodnotení farebných zmien korún sa musí zohľadniť osvetlenie, tieň, expozícia svahu a fenologická fáza. Absolútne hodnoty digitálnych čísel RGB snímok sa preto bez radiometrickej kontroly nepovažujú za priamo porovnateľný fyziologický ukazovateľ.

4.2 Multispektrálne snímkovanie

Ak bude pre monitorovacie kampane dostupný multispektrálny senzor, jeho využitie sa zameria na doplnenie informácie o vegetačnom stave. Vegetačné indexy môžu pomôcť pri priestorovej diferenciácii korún s odlišnou spektrálnou odozvou, ale výsledok sa musí validovať terénymi údajmi. Index nie je diagnózou napadnutia lykožrútom. Je indikátorom spektrálnej odlišnosti, ktorá môže mať viac príčin vrátane vodného stresu, fenológie, poškodenia alebo mortality.

4.3 Laserové skenovanie

Ak je k dispozícii UAV LiDAR alebo iný vhodný zdroj laserových údajov, využije sa najmä na charakterizáciu vertikálnej štruktúry porastu a na získanie presnejšieho modelu terénu v miestach, kde fotogrametrický model povrchu nedokáže spoľahlivo preniknúť pod zápoj. LiDAR údaje umožnia odvodiť výšku porastu, variabilitu výšky a vybrané ukazovatele vertikálnej členitosti. Ich interpretácia musí byť viazaná na hustotu bodov a kvalitu klasifikácie terénnych návratov.

5. Návrh opakovaných UAV snímkaní (kampaní)

Opakované kampane majú zachytiť zmenu, preto je ich metodická konzistencia dôležitejšia než maximálna technická variabilita. Pri každej kampani sa zaznamená dátum a čas, použitá platforma a senzor, výška a rýchlosť letu, prekryv, spôsob georeferencovania, stav oblačnosti, vietor a ďalšie podmienky, ktoré môžu ovplyvniť kvalitu snímok. Ak sa niektorý parameter zmení, dôvod a očakávaný vplyv na porovnateľnosť sa uvedie v protokole.

Časovanie sa viaže na monitorovaciu otázku. Pre hodnotenie medzироčnej zmeny zdravotného stavu je vhodné porovnávať snímkovanie z obdobnej fenologickej fázy. Pre dokumentovanie následku konkrétnej udalosti je naopak potrebný let vykonaný v primeranom čase po udalosti. Tieto dva typy kampaní sa v databáze rozlišujú. Dataset získaný z takéhoto snímkovania môže byť veľmi hodnotný, ale nemožno ho automaticky zaradiť do sezónnej časovej série bez zohľadnenia rozdielu podmienok.

Pred každým letom sa vykoná kontrola dostupnosti lokality, bezpečnostných podmienok a aktuálnych pravidiel prevádzky UAV. V lesnom horskom prostredí sa venuje pozornosť turbulentnému prúdeniu, nárazovému vetru, obmedzeným možnostiam núdzového pristátia a strate priamej viditeľnosti platformy za terénymi alebo porastovými prekážkami. Bezpečnostné rozhodnutie má prednosť pred požiadavkou na dodržanie plánovaného termínu.

6. Fotogrametrické spracovanie a tvorba referenčných produktov

Spracovanie obrazových UAV údajov sa realizuje štandardizovaným fotogrametrickým pracovným postupom (angl. workflow). Prvým krokom je kontrola kvality snímok, pri ktorej sa identifikujú neostré, podexponované alebo inak nepoužiteľné zábery. Následne sa vykoná orientácia snímok a kontrola geometrie bloku. Pri použití presného GNSS sa vyhodnotí kvalita polohového riešenia; pri použití pozemných kontrolných bodov sa oddelí funkcia bodov použitých na orientáciu od nezávislých kontrolných bodov, ak to počet bodov umožňuje.

Z orientovaných snímok sa vytvorí husté mračno bodov alebo ekvivalentný 3D produkt, digitálny model povrchu a ortofotomozaika. Pre porastové analýzy sa podľa dostupnosti kvalitného modelu terénu vytvorí normalizovaný model výšky vegetácie ako rozdiel modelu povrchu a modelu terénu. Pri lesnom poraste sa musí overiť, či model terénu reprezentuje skutočný terén a nie interpolovaný povrch medzi nedostatočným počtom bodov pod korunovým zápojom.

Výsledná ortofotomozaika sa považuje za referenčný kartografický produkt iba po kontrole geometrickej presnosti a vizuálnych artefaktov. Typickými problémami sú deformácie korún na okrajoch snímok, švy medzi snímkami, rozdiely expozície a lokálne chyby spôsobené pohybom vegetácie. Pri automatizovanej analýze sa tieto miesta podľa potreby maskujú, aby nevytvárali falošné zmeny.

6.1 Detekcia zmeny

Detekcia zmeny sa vykonáva až po vzájomnej registrácii porovnávaných datasetov. Základom je rozdiel v tematickej klasifikácii alebo v kvantitatívnom indikátore medzi dvoma termínmi. Zmena sa interpretuje na úrovni objektu, plochy alebo pravidelnej mriežky podľa charakteru indikátora. Pri korunách jednotlivých stromov je potrebné počítat s posunom koruny vplyvom vetra a s odlišným uhlom snímania; preto sa drobný rozdiel na hranici koruny nepovažuje automaticky za biologickú zmenu.

7. Hodnotenie zdravotného stavu a dynamiky kalamity

Hodnotenie zdravotného stavu vychádza z kombinácie UAV obrazu a pozemného overenia. Základná interpretačná schéma rozlišuje živé koruny bez zjavného prejavu poškodenia, koruny s vizuálne alebo spektrálne zníženou vitalitou, odumreté koruny a neklasifikovateľné objekty.

Kategória zníženej vitality je zámerne formulovaná opisne. Bez terénneho dôkazu sa nepoužíva ako synonymum pre aktívne napadnutie lykožrútom.

Pre priestorové hodnotenie kalamitnej dynamiky sa sleduje prechod objektov medzi triedami v čase. Významným indikátorom nie je iba absolútny počet alebo plocha odumretých korún, ale vznik nových skupín poškodenia, ich priestorové rozširovanie a väzba na už narušené okraje porastu. Analýza sa môže realizovať na úrovni segmentovaných korún alebo na úrovni pravidelných buniek, ak individuálna segmentácia nie je pri konkrétnej kvalite údajov spoľahlivá.

Výsledky sa prezentujú spolu s mierou validačnej úspešnosti. Pri klasifikácii sa vytvorí referenčný súbor z terénne overených objektov. Ak sa používa automatizovaný klasifikátor, časť referenčných údajov sa vyčlení na nezávislé overenie. Výsledná mapa musí odlišovať skutočne klasifikované plochy od miest, kde bola interpretácia obmedzená tieňom, oklúziou alebo nedostatočnou kvalitou snímok.

8. Pozemný referenčný monitoring

Pozemný monitoring je navrhnutý tak, aby odpovedal na otázky, ktoré UAV údaje nedokážu vyriešiť samostatne, a aby poskytol validačné údaje pre leteckú interpretáciu. Na stabilných referenčných plochách sa zaznamenáva drevinové zloženie, stav stromov, viditeľné prejavy poškodenia, charakter mŕtveho dreva, stav obnovy a povrchové charakteristiky. Rozsah merania sa volí primerane cieľu projektu; nejde o úplnú hospodársku inventarizáciu všetkých porastov.

Pri stromoch určených na validáciu UAV klasifikácie sa zaznamená poloha s presnosťou primeranou možnosti spárovania s korunou na ortofotomozaike. Ak je individuálne spárovanie v hustejšom poraste neisté, referenčná informácia sa vedie na úrovni menšej plochy alebo skupiny stromov. Záznam obsahuje dátum a čas, aby bolo možné posúdiť časový odstup medzi pozemným pozorovaním a UAV letom.

Fotografické body sa zriaďujú na miestach, ktoré umožňujú opakovanú vizuálnu dokumentáciu porastového okraja, obnovy, erózneho prejavu alebo NbS. Pri každom bode sa uchová poloha, smer snímania, približná výška fotoaparátu a identifikátor. Fotografia bez priestorovej a smerovej informácie má pre časové porovnanie podstatne nižšiu hodnotu.

9. Monitoring mŕtveho dreva a lesného paliva

Kalamitne zmenené porasty môžu obsahovať významný podiel stojacej a ležiacej odumretej biomasy. Z pohľadu monitoringu je potrebné odlíšiť ekologickú funkciu mŕtveho dreva od jeho významu v palivovom komplexe. Koncepcia preto nesmeruje k plošnému odstráneniu mŕtveho dreva ani k jeho automatickému označeniu za riziko. Cieľom je priestorovo zachytiť jeho množstvo a usporiadanie v rozsahu potrebnom pre následné odborné hodnotenie.

UAV údaje umožnia mapovať najmä stojace odumreté stromy a hrubšie ležiace kmene v otvorených častiach porastu. Jemné povrchové palivo a drevo prekryté vegetáciou alebo korunovým zápojom sa hodnotí terénne. Na referenčných plochách sa zaznamenáva typ paliva, jeho kontinuita, kategória hrúbky a priestorová väzba na otvorené plochy, mladú obnovu a prístupové línie. Ak sa vykonáva kvantitatívne vzorkovanie paliva, metodika odberu sa uvedie v samostatnom pracovnom protokole.

Požiarne relevantným indikátorom je aj zmena porastovej mikroklimy po otvorení zápoja. Vyššia expozícia slnečnému žiareniu a vetru môže urýchliť vysychanie povrchových palív, pričom aktuálna vlhkosť paliva závisí od počasia a nemožno ju spoľahlivo odvodiť iba z ortofotomapy. Preto sa štrukturálne UAV indikátory interpretujú spolu s meteorologickými údajmi a podľa možnosti s terénnym meraním vlhkosti vybraných palivových frakcií.

10. Monitoring obnovy a vegetačnej sukcesie

Vývoj obnovy je jedným z kľúčových ukazovateľov dlhodobej odolnosti kalamitne zmeneného územia. Monitoring sa zameriava na priestorový výskyt obnovy, jej druhové zloženie v terénnych plochách, hustotu alebo pokryv podľa zvolenej metodiky a na vzťah k podmienkam stanovišťa. UAV obraz môže pri dostatočnom rozlíšení a otvorenom poraste zachytiť vyššie jedince alebo súvislejšie plochy obnovy, avšak nízka obnova pod bylinnou vegetáciou vyžaduje terénne zisťovanie.

Pri interpretácii sa odlišuje prirodzená a umelá obnova, pokiaľ je tento údaj známy z hospodárskych podkladov alebo terénneho záznamu. Zároveň sa sleduje konkurenčná vegetácia a miera odkrytia pôdy. Cieľom nie je vytvoriť samostatný pestovateľský monitoring, ale identifikovať priestorové vzorce, ktoré môžu ovplyvniť vhodnosť a návrh prírode blízkych opatrení.

Časové porovnanie obnovy sa vykonáva prednostne v rovnakej fenologickej fáze. Rozdiel v sezónnom vývoji vegetácie môže výrazne meniť viditeľnosť mladých drevín na UAV snímkach. Preto sa pri každej kampani uvádza vegetačný stav a pri neporovnateľných podmienkach sa UAV odvodený trend označí ako neistý.

11. Monitoring povrchu, erózných prejavov a odtoku

Otvorenie porastu, pohyb mechanizmov a zmena vegetačného krytu môžu lokálne ovplyvniť infiltráciu a povrchový odtok. Koncepcia preto zahŕňa identifikáciu obnažených plôch, erózných rýh, miest akumulácie sedimentu a línii, po ktorých sa pri zrážkach koncentruje voda. UAV ortofotomozaika poskytuje priestorový kontext, zatiaľ čo digitálny model terénu umožňuje odvodiť sklon, expozíciu a modelové smery odtoku.

Modelové odtokové línie sa nepovažujú za priamo pozorovaný hydrologický jav. Ich význam spočíva v identifikácii miest, ktoré majú byť overené v teréne. Pri kontrole sa zaznamenáva prítomnosť ryhy, sedimentu, podmáčania, bariéry alebo iného znaku, ktorý potvrdzuje

alebo spochybňuje modelový predpoklad. Takto sa zabráni tomu, aby sa rozhodovanie o NbS opieralo iba o automatický GIS výpočet bez znalosti reálneho povrchu.

Pri opakovaných UAV kampaniach sa sleduje vznik nových narušení a zmena rozsahu existujúcich erózných prvkov. Ak je dostupný dostatočne presný 3D dataset, možno analyzovať aj zmenu mikroreliefu, avšak iba v prípade, že očakávaná zmena presahuje geometrickú neistotu oboch porovnávaných modelov.

12. Koncepcia budúceho IoT monitoringu

Funkčný návrh IoT monitorovacích jednotiek počíta s kombináciou meteorologických meraní, zrážok a vetra, pôdnej vlhkosti a teploty a environmentálnych veličín využitelných aj pri hodnotení podmienok súvisiacich s požiarnym rizikom. Komunikačná vrstva je koncipovaná na báze LoRaWAN s databázovým ukladáním a následnou vizualizáciou.

Stanice sa navrhnu tak, aby reprezentovali kontrastné podmienky, napríklad relatívne zachovaný porast, otvorenú kalamitnú plochu, obnovujúcu sa plochu a podľa potreby lokalitu s NbS. Pri výbere sa zohľadní nadmorská výška, expozícia, dostupnosť, bezpečnosť, komunikačné pokrytie a riziko poškodenia zariadenia.

Po inštalácii sa každý senzor eviduje samostatným identifikátorom, polohou, dátumom uvedenia do prevádzky, typom a výrobným číslom, intervalom záznamu a informáciou o kalibrácii. V databáze sa odlišuje surový záznam od údajov po kontrole kvality. Výpadky, presuny alebo výmena senzora sa nesmú späťne zahľadiť; zaznamenajú sa ako udalosti v časovej sérii.

13. Integrácia UAV, terénnych a IoT údajov

Integrácia viaczdrojových údajov sa realizuje prostredníctvom spoločnej priestorovej a časovej referencie. UAV produkt reprezentuje stav územia v konkrétnom čase snímkovania, terénne údaje reprezentujú stav referenčnej plochy v čase návštevy a IoT údaje vytvárajú kontinuálny priebeh medzi kampaniami. Pri analýze sa preto nepoužíva jednoduché spájanie údajov bez kontroly časového nesúladu.

Pre každú UAV kampaň sa vytvorí časové okno environmentálnych podmienok, ktoré charakterizuje obdobie pred snímkaním a počas neho. Po sprevádzkovaní IoT systému to umožní vysvetľovať, či zmena spektrálnej odozvy alebo viditeľnosti vegetácie mohla súvisieť s krátkodobým suchom, zrážkami alebo inou meteorologickou situáciou. Takáto interpretácia je významná najmä pri porovnávaní kampaní z rôznych rokov.

Priestorová integrácia sa uskutočňuje v GIS. Referenčné plochy, fotografické body, senzory, NbS a tematické objekty majú stabilné identifikátory. Odvođené rastre sa ukladajú s informáciou o dátume a rozlíšení. Vektorové objekty, ktoré sa menia v čase, sa neprepisujú; vedie sa ich časová verzia, aby bolo možné analyzovať vznik, zánik alebo zmenu atribútu.

14. Monitorovanie existujúcich prírode blízkych riešení

Existujúce prírode blízke riešenia v experimentálnom území sa monitorujú ako reálne realizované opatrenia, pri ktorých je možné hodnotiť stav, priestorové začlenenie a vybrané funkčné prejavy. Projekt ich neprezentuje ako opatrenia implementované v rámci tejto činnosti. Toto rozlíšenie je dôležité pre správne vyhodnotenie projektových výsledkov: predmetom je dokumentácia a odborné posúdenie existujúcich riešení a využitie poznatkov pri návrhu ďalších NbS.

Pre každé existujúce NbS sa vytvorí karta lokality obsahujúca priestorové vymedzenie, stručný technický opis, stav pri referenčnom monitoringu, očakávanú funkciu a súbor indikátorov. Indikátory sa vyberajú podľa typu opatrenia. Pri opatrení orientovanom na vodný režim môže ísť o prejavy spomalenia alebo rozptýlenia odtoku, pri opatrení súvisiacom s vegetačným krytom o stabilizáciu povrchu a vývoj vegetácie, pri opatrení s požiarnou funkciou o zmenu kontinuity a priestorového usporiadania paliva.

Ak nie sú k dispozícii údaje pred realizáciou opatrenia, nemožno jeho účinok vyjadriť ako klasickú zmenu pred-po. V takom prípade sa využíva časová séria od prvého projektového monitoringu, priestorové porovnanie s vhodnou referenčnou lokalitou alebo procesné hodnotenie založené na pozorovaných mechanizmoch. Zvolený prístup a jeho limity sa pri každom opatrení uvedú explicitne.

15. Podklady pre návrh nových NbS

Návrh nových NbS sa opiera o výsledky monitoringu a o katalóg potenciálnych prírode blízkych riešení. Monitoring identifikuje problémové miesta a poskytuje údaje o stave porastu, sklone, expozícii, povrchovom kryte, odtokových líniiach, palivovej štruktúre a obnove. Samotný návrh opatrenia musí následne zohľadniť jeho technickú realizovateľnosť, vlastnícke a prevádzkové podmienky a očakávanú dlhodobú údržbu.

Priestorová vhodnosť sa nebude určovať jedným súhrnným indexom bez transparentného vysvetlenia. Pre každý typ NbS sa stanoví súbor podmienok, ktoré podporujú alebo obmedzujú jeho použitie. Výsledkom môže byť mapa vhodnosti s kategóriami, avšak každá kategória musí byť spätne vysvetliteľná konkrétnymi vstupnými vrstvami. Takýto postup je vhodnejší pre odborné rozhodovanie než nepriehľadné skóre, pri ktorom nie je zrejmé, prečo bola lokalita označená ako prioritná.

Návrh každého NbS bude obsahovať aj monitorovací plán. Už vo fáze návrhu sa určí, ktorý indikátor má preukázať očakávaný účinok, aký bude referenčný stav a v akom časovom intervale je reálne očakávať zmenu. Tým sa zabezpečí, že neskoršie hodnotenie nebude založené na dodatočne zvolených ukazovateľoch, ktoré sa prispôbia pozorovanému výsledku.

16. Komplexné posúdenie rizík

Údaje z monitoringu vstupujú do komplexného posúdenia rizík ako empirický opis stavu a priestorovej expozície. Riziko sa nebude stotožňovať iba s prítomnosťou hrozby. Pri každej tematickej oblasti je potrebné rozlišovať zdroj alebo pravdepodobnosť nežiaduceho javu, zraniteľnosť sledovaného prvku a možné následky. Monitoring poskytuje najmä informácie o stave územia, ktoré umožňujú tieto zložky priestorovo diferencovať.

V oblasti lesných požiarov sa využijú údaje o otvorení porastu, priestorovej kontinuite paliva, mŕtvom dreve, prístupových líniách a mikroklimatických podmienkach. Pri riziku erózie sa kombinujú údaje o sklone terénu, narušení povrchu, vegetačný kryt a terénne potvrdené erózne prejavy. Pri hodnotení odolnosti porastov sa sleduje zdravotný stav, dynamika mortality, obnova a priestorová heterogenita. Tieto tematické hodnotenia sa najprv spracujú samostatne; až následne sa posúdi ich vzájomná súvislosť.

Ak sa použije multikritériálne hodnotenie, váhy jednotlivých kritérií sa zdokumentujú a vykoná sa citlivostná kontrola. Cieľom nie je vytvoriť numericky presný výsledok tam, kde sú vstupy kvalitatívne, ale transparentne identifikovať lokality, ktoré si vyžadujú zvýšenú pozornosť alebo detailnejšie terénne posúdenie.

17. Časová organizácia monitoringu

Časová organizácia vychádza z rozdielnej dynamiky sledovaných procesov. UAV monitoring zdravotného stavu a porastovej štruktúry sa realizuje opakovane v termínoch umožňujúcich porovnanie. Terénna validácia sa vykonáva čo najbližšie k termínu letu. Fotografické body sa dokumentujú pri každej relevantnej návšteve. Po inštalácii IoT jednotiek budú environmentálne údaje zaznamenávané kontinuálne v intervale zodpovedajúcom technickým možnostiam senzorov a požadovanému časovému rozlíšeniu.

Harmonogram musí zostať dostatočne flexibilný, pretože UAV zber je závislý od počasia a bezpečnosti. Posun letu o niekoľko dní z dôvodu vetra alebo zrážok nie je metodickým zlyhaním, pokiaľ sa zachová biologická porovnateľnosť a zmena sa zdokumentuje. Naopak, let vykonaný za nevhodných podmienok iba s cieľom dodržať kalendárny termín môže vytvoriť dataset s nízkou analytickou hodnotou.

Osobitne sa eviduje snímkovanie počas mimoriadnych udalostí. Tie sa spúšťajú po významnej zmene, napríklad po vetrovej udalosti, zásahu v poraste alebo inom procese, ktorý môže zmeniť stav sledovaných objektov. Takéto snímkovanie dopĺňa pravidelnú časovú sériu a umožňuje presnejšie určiť okamih zmeny.

18. Kontrola kvality a validácia

Kontrola kvality začína už pri návrhu zberu údajov. Pri UAV kampani sa pred odchodom z lokality kontroluje úplnosť pokrytia, ostrosť snímok a dostupnosť navigačných údajov. Pri terénnom monitoringu sa kontroluje úplnosť povinných polí a konzistentnosť identifikátorov. Pri IoT údajoch bude kontrola zahŕňať rozsah fyzikálne možných hodnôt, skokové zmeny, výpadky a porovnanie susedných senzorov tam, kde je to metodicky vhodné.

Tematická validácia UAV klasifikácie sa vykoná na nezávislom referenčnom súbore. Výsledok sa nebude uvádzať iba ako celková presnosť, pretože tá môže pri nevyvážených triedach skresľovať kvalitu klasifikácie. Podľa typu úlohy sa vyhodnotí zámena medzi triedami a samostatne schopnosť identifikovať poškodené alebo odumreté objekty. Pri mapách určených na rozhodovanie sa zároveň uvedú oblasti, kde je klasifikácia neistá.

Geometrická kontrola je nevyhnutná pred každou časovou analýzou. Stabilné objekty v území sa použijú na kontrolu vzájomného posunu. Ak je geometrická chyba porovnateľná s veľkosťou analyzovanej zmeny, výsledok sa nesmie interpretovať ako spoľahlivá zmena. Rovnaký princíp sa uplatní pri výškových rozdieloch digitálnych modelov.

19. Dátový model, archivácia a reprodukovateľnosť

Každý dataset dostane jednoznačný identifikátor, ktorý spája lokalitu, typ zberu, dátum a verziu. Surové údaje sa uchovávajú bez obsahovej úpravy. Spracované produkty sa ukladajú oddelene a ich názov alebo metadáta obsahujú verziu spracovania. Pri zmene algoritmu sa pôvodný produkt neprepisuje, ale vytvorí sa nová verzia. Tento postup je dôležitý najmä pri dlhšej časovej sérii, keď sa môže metodika spracovania postupne spresňovať.

Metadáta obsahujú minimálne pôvod údajov, dátum a čas, lokalitu, použitý prístroj, priestorový referenčný systém, rozlíšenie, zodpovednú osobu, spôsob spracovania a známe obmedzenia. Pri UAV produktoch sa dopĺňajú letové parametre a spôsob georeferencovania. Pri terénnych údajoch sa eviduje verzia formulára a metodiky. Pri IoT dátach sa bude evidovať senzor, jeho poloha, kalibračný stav a história servisných zásahov.

Reprodukovateľnosť sa podporí aj archiváciou parametrov analytických postupov. Pri klasifikácii sa uchová tréningový a validačný dataset alebo ich jednoznačná identifikácia. Pri GIS analýze sa zaznamenávajú vstupné vrstvy a parametre. Pri výpočte indikátora sa jeho definícia uvedie v dátovom slovníku tak, aby rovnaký postup mohol byť aplikovaný na ďalšiu monitorovaciu kampaň.

20. Priestorové a štatistické vyhodnotenie

Priestorové vyhodnotenie bude pracovať s dvoma základnými úrovňami: objektovou a plošnou. Objektová úroveň je vhodná tam, kde možno spoľahlivo identifikovať jednotlivé koruny, kmene alebo konkrétne prvky NbS. Plošná úroveň je vhodná pri súvislých javoch, ako je zápoj, obnažený povrch, vegetačný kryt alebo riziková zóna. Voľba úrovne musí vychádzať z kvality dát a z monitorovacej otázky, nie z technickej možnosti softvéru.

Štatistické hodnotenie časových zmien bude rozlišovať opakované merania na rovnakých plochách od nezávislých pozorovaní. Pri monitorovacích plochách sa preto zachová identifikátor a história. Ak sa analyzuje vzťah zdravotného stavu k topografickým alebo mikroklimatickým faktorom, zohľadní sa priestorová autokorelácia a skutočnosť, že susedné bunky alebo stromy nie sú úplne nezávislé pozorovania.

Výsledky sa budú prezentovať s mierou variability a neistoty, nie iba jednou priemernou hodnotou. Pri porovnaní plôch sa uvedie počet pozorovaní a rozsah. Pri modelových mapách sa oddelí empirická vrstva od predikcie. Tento prístup je dôležitý pre následné rozhodovanie o NbS, pretože umožňuje rozlíšiť robustný priestorový vzorec od lokálneho alebo neistého signálu.

21. Výstupné produkty monitoringu

Koncepcia predpokladá vytvorenie súboru vzájomne previazaných výstupov. Základom bude referenčná ortomozaika a nadväzujúce aktualizované ortomozaiky. Z nich a z 3D údajov vzniknú tematické rastrové a vektorové vrstvy charakterizujúce zápoj, otvorené plochy, zdravotný stav, mŕtve drevo v rozsahu detegovateľnom použitou metódou, obnovu a vybrané povrchové javy. Terénne údaje budú tvoriť samostatnú referenčnú databázu pre validáciu.

Pre potreby projektového hodnotenia sa z priestorových údajov vytvoria agregované indikátory na úrovni monitorovacích blokov a podľa potreby porastových jednotiek. Agregácia však nebude nahrádzať pôvodnú priestorovú informáciu. Ak sa napríklad uvedie podiel otvorenej plochy, súčasťou výstupu zostane mapa, ktorá ukazuje, kde sa otvorené plochy nachádzajú a ako sa medzi termínmi menili.

Výstupy budú slúžiť aj ako podklad pre výskumnú správu z komplexného posúdenia rizík, pre dokumentáciu existujúcich NbS, pre návrh nových NbS a neskôr pre ekonomické hodnotenie riešení. Monitorovacie dáta preto musia byť pripravené tak, aby ich bolo možné prepájať s technickými a ekonomickými charakteristikami opatrení bez straty informácie o lokalite a čase.

22. Odborné kritériá interpretácie

Interpretácia výsledkov bude rešpektovať hranice použitých metód. UAV snímka poskytuje informáciu o opticky alebo geometricky pozorovateľnom stave povrchu. Neumožňuje bez ďalších meraní priamo určiť fyziologický mechanizmus stresu, presnú vlhkosť paliva, podpovrchový vodný režim ani príčinu mortality. Terénny záznam je detailnejší, ale priestorovo obmedzený. IoT senzor poskytuje vysoké časové rozlíšenie, ale reprezentuje podmienky v konkrétnom bode alebo jeho bezprostrednom okolí. Výsledná odborná interpretácia preto vzniká syntézou, nie preferovaním jedného zdroja.

Pri hodnotení lykožrútovej kalamity sa bude používať formulácia zodpovedajúca sile dôkazu. Ak UAV údaje ukazujú zmenu farebnosti alebo mortalitu, výsledok sa označí ako zmena zdravotného stavu alebo odumretie. Ako napadnutie lykožrútom sa objekt označí vtedy, keď je táto informácia podložená terénnym pozorovaním alebo iným relevantným evidenčným podkladom. Tento postup znižuje riziko kauzálne nesprávnej interpretácie.

Rovnako sa pri NbS bude odlišovať pozorovaný stav od preukázaného účinku. Skutočnosť, že je opatrenie zachované alebo že sa v jeho okolí nachádza vegetácia, sama osebe nepreukazuje účinnosť. Účinok sa hodnotí vo vzťahu k vopred definovanému mechanizmu a indikátoru, pričom sa zohľadní dostupnosť referenčného stavu alebo porovnávacej lokality.

23. Riziká realizácie monitoringu a adaptačné postupy

Najvýznamnejším prevádzkovým rizikom UAV monitoringu sú nevhodné meteorologické podmienky. Silný alebo nárazový vietor znižuje bezpečnosť a zároveň spôsobuje pohyb korún, ktorý zhoršuje fotogrametrickú rekonštrukciu. Premennivá oblačnosť môže vytvárať výrazné rádiometrické rozdiely medzi snímkami. Zrážky a nízka dohľadnosť môžu let úplne znemožniť. Harmonogram preto musí obsahovať náhradné termíny a kvalita datasetu má prednosť pred formálnym dodržaním konkrétneho dňa.

Ďalším rizikom je zmena dostupnosti plôch v dôsledku ťažby, spracovania kalamity alebo bezpečnostného obmedzenia vstupu. Ak sa referenčná plocha stane nedostupnou, jej časová séria sa ukončí alebo sa pokračuje iba diaľkovým monitoringom; náhradná plocha sa nezamieňa s pôvodnou, ale dostane nový identifikátor. Tým sa zabráni vytvoreniu falošnej kontinuity údajov.

Samostatným projektovým rizikom je časový posun obstarania a sprievádzkovania IoT jednotiek. Toto riziko nemení metodiku UAV a terénneho monitoringu, ktoré môžu vytvoriť referenčný stav nezávisle. Po inštalácii sa senzorová vrstva pripojí k už existujúcej priestorovej evidencii. Dôležité bude zdokumentovať dátum uvedenia jednotlivých bodov do prevádzky a neinterpretovať kratší časový rad ako plnohodnotnú sezónnu alebo medziročnú sériu.

24. Väzba koncepcie na pracovný balík NV2 a ďalšie časti projektu

Koncepcia je metodickým základom pracovného balíka NV2, pretože určuje, akým spôsobom budú získané rastrové a vektorové priestorové údaje a ako budú aktualizované pri ďalších monitorovacích kampaniach. Zároveň stanovuje, ktoré monitorované charakteristiky vstúpia do komplexného posúdenia rizík. Tým vytvára priamu väzbu medzi zberom údajov a analytickými výstupmi projektu.

Na pracovný balík zameraný na IoT monitoring nadväzuje definovaním požadovaných funkcií budúcich monitorovacích jednotiek, princípov ich priestorového rozmiestnenia a pravidiel integrácie časových radov. Na časť venovanú NbS nadväzuje tým, že existujúce riešenia zaraďuje medzi samostatné monitorovacie objekty a pre návrh nových riešení vytvára priestorové a stavové podklady.

Koncepcia zároveň vytvára dátový základ pre neskoršie hodnotenie ekonomickej efektívnosti. Ekonomická analýza potrebuje vedieť, aké opatrenie sa hodnotí, v akých podmienkach, aký bol jeho stav a aký účinok sa sleduje. Monitorovací systém poskytuje práve tento technický a environmentálny kontext. Pri riešeniach z katalógu, ktoré ešte nie sú v území realizované, môže ekonomická analýza pracovať s modelovými alebo referenčnými nákladmi, pričom sa musí odlíšiť od empirického hodnotenia existujúceho opatrenia.

25. Implementačný protokol monitorovacej kampane

Každá monitorovacia kampaň sa začne definovaním účelu. V protokole sa uvedie, či ide o referenčné mapovanie, pravidelnú opakovanú kampaň, snímkovanie v prípade vzniku mimoriadnej udalosti alebo detailné monitorovanie NbS. Následne sa určia monitorovacie bloky, požadované senzory, terénne validačné plochy a minimálny súbor výstupov. Takýto postup zabraňuje zberu veľkého objemu údajov bez jasnej väzby na analytickú otázku.

Po zbere údajov sa vykoná technická kontrola a vytvorí sa záznam o odchýlkach. Až potom sa začne fotogrametrické a GIS spracovanie. Výstupy prejdú geometrickou a tematickou kontrolou. Validovaná verzia sa uloží do dátového archívu a použije sa na výpočet indikátorov. Ak sa neskôr zistí chyba, oprava sa vykoná ako nová verzia a pôvodný súbor zostane dohľadateľný.

Po ukončení kampane sa spracuje krátky monitorovací záznam obsahujúci dátum, rozsah, techniku, podmienky, zoznam vytvorených datasetov, kvalitatívne zhodnotenie kvality a zoznam udalostí, ktoré môžu ovplyvniť interpretáciu. Tento záznam je dôležitý pre neskoršie vysvetlenie rozdielov medzi kampaňami.

26. Súbor kľúčových indikátorov

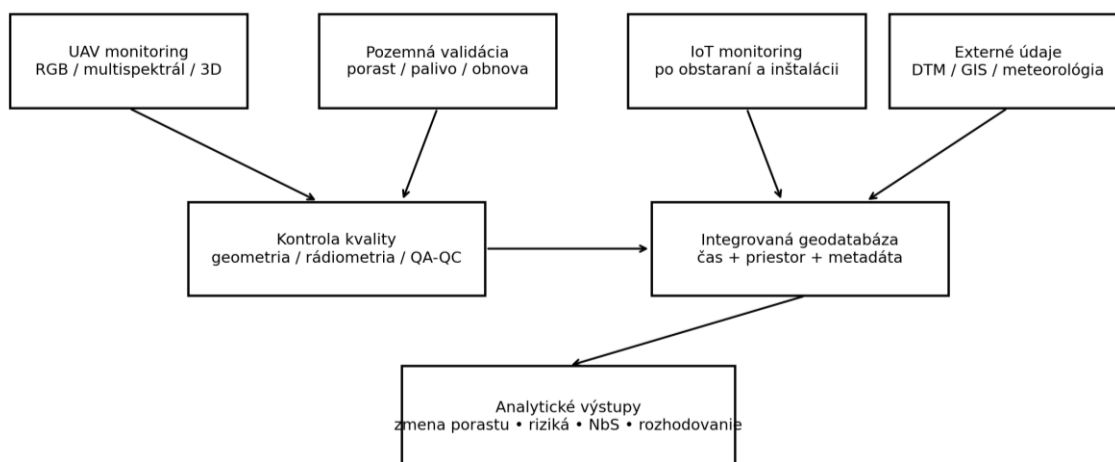
Súbor indikátorov je navrhnutý tak, aby pokryl stav porastu, dynamiku kalamitných zmien, obnovu, lesné palivo, povrchové procesy a NbS. Indikátory sa budú spresňovať podľa reálne dostupných senzorov a kvality referenčných údajov, avšak ich definícia musí zostať počas porovnávanej časovej série stabilná. Ak sa definícia zmení, nový indikátor sa vedie ako nová verzia a historické hodnoty sa podľa možnosti prepočítajú rovnakým postupom.

Oblasť	Indikátor	Primárny zdroj	Interpretácia
Porastová štruktúra	podiel korunového zápoja / otvorených plôch	UAV RGB/3D	miera otvorenia porastu a jej zmena
Zdravotný stav	podiel objektov v definovaných triedach	UAV + terén	stav a dynamika poškodenia
Mortalita	nové odumreté objekty/plochy medzi termínmi	časová séria UAV	prírastok mortality
Vertikálna štruktúra	výška a variabilita výšky vegetácie	3D/LiDAR	štrukturálna heterogenita
Obnova	pokryv/hustota na referenčných plochách	terén + UAV	vývoj obnovy
Mŕtve drevo	výskyt a kontinuita identifikovateľnej odumretej biomasy	UAV + terén	palivová a štrukturálna charakteristika
Povrch	podiel obnaženej/narušenej pôdy	UAV + terén	citlivosť na eróziu
Erózia	počet/rozsah potvrdených erózných prejavov	UAV/DTM + terén	vývoj povrchových procesov
NbS	indikátor podľa funkcie konkrétneho opatrenia	UAV + terén + neskôr IoT	stav a funkčný prejav
Mikroklíma	časové rady vybraných veličín	IoT po inštalácii	environmentálny kontext

Pri každom indikátore sa v dátovom slovníku uvedie presný výpočet, jednotka, priestorová jednotka agregácie, minimálne požiadavky na kvalitu vstupných údajov a pravidlá pre chýbajúce hodnoty. Bez tejto špecifikácie by rovnaký názov indikátora mohol byť v rôznych kampaniach vypočítaný odlišne.

27. Integrovaný monitorovací dizajn

Monitorovací dizajn pre LS Beňuš je koncipovaný ako viacúrovňový observačný systém, v ktorom sa jednotlivé zdroje údajov vzájomne dopĺňajú. UAV platforma zabezpečuje detailný priestorový obraz, pozemné zisťovanie poskytuje referenčnú informáciu potrebnú na interpretáciu spektrálnych a štrukturálnych prejavov a budúce IoT jednotky vytvoria kontinuálny časový kontext. Takéto usporiadanie reaguje na základný metodický problém monitoringu lesa: žiadna jednotlivá metóda neposkytuje súčasne dostatočné priestorové rozlíšenie, časovú frekvenciu, biologickú interpretovateľnosť a prevádzkovú dostupnosť.

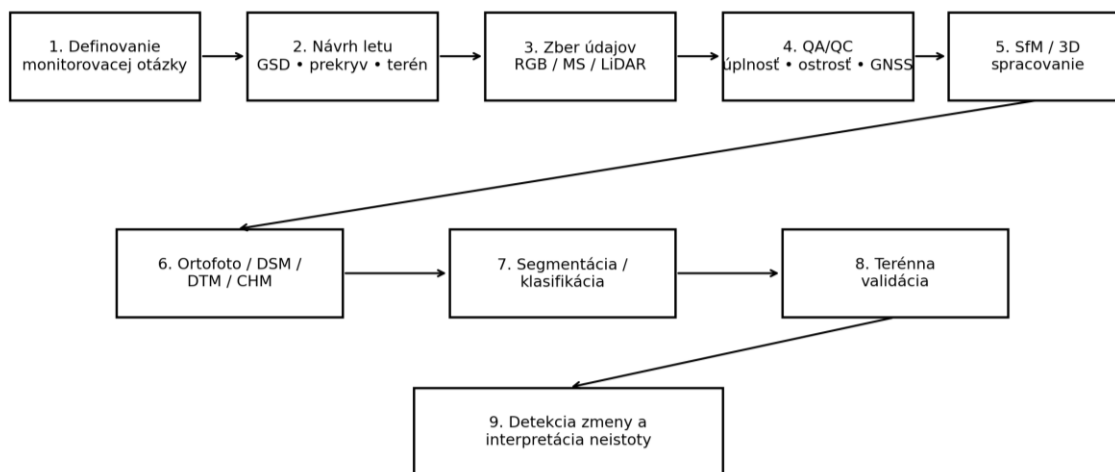


Obr. 1. Architektúra integrovaného monitorovacieho systému pre experimentálne územie Vydrovskej doliny.

Hierarchická architektúra zároveň umožňuje postupné rozširovanie systému bez narušenia už získanej časovej série. Skutočnosť, že IoT zariadenia ešte neboli obstarané, preto nepredstavuje metodickú prekážku pre začatie referenčného UAV a terénneho monitoringu. Podstatné je, aby budúce senzory vstúpili do rovnakého dátového modelu, používali stabilné identifikátory a aby ich umiestnenie bolo odvodené od monitorovacích otázok a priestorovej variability územia.

28. Detailný metodický rámec UAV monitoringu

UAV monitoring sa realizuje ako opakovateľný proces od formulácie otázky až po validovanú tematickú interpretáciu. Predmetom zberu nie je samotná snímka, ale dataset s definovanou geometrickou, rádiometrickou a časovou kvalitou. V horskom lesnom prostredí sa musí návrh letu prispôbiť reliéfu a výške porastu; konštantná výška voči bodu vzletu môže viesť k výrazným zmenám GSD a prekryvu. Preto sa uprednostňuje plánovanie letu so zohľadnením modelu terénu a zachovaním primeranej výšky nad povrchom porastu.



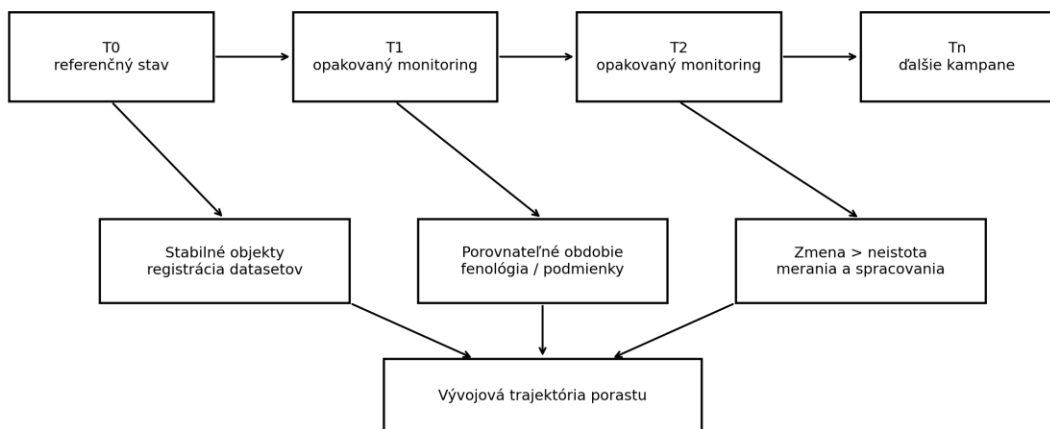
Obr. 2. Od návrhu monitorovacej otázky po validovanú interpretáciu UAV údajov.

Pri RGB fotogrametrii sa prioritne vytvára geometricky konzistentná ortomozaika a 3D reprezentácia povrchu. Multispektrálne údaje sa využívajú na hodnotenie relatívnych spektrálnych rozdielov medzi korunami a ich vývoja v čase. Pri interpretácii vegetačných indexov sa nepoužíva jednoduchá rovnica „nižší index = lykožrút“, pretože spektrálna odozva je ovplyvnená vodným stresom, fenológiou, zatienením, druhovou príslušnosťou a ďalšími faktormi. Výsledok sa preto uvádza ako spektrálne indikovaný stav a až po terénnom potvrdení ako stav spojený s konkrétnym škodlivým činiteľom. Tento konzervatívny interpretačný rámec zodpovedá súčasným odporúčaniam kritického prehľadu Kautz et al. (2024).

Výskum Klouček et al. (2024) na 250 ha smrekového lesa v Českej republike ukázal, že viacčasové UAV multispektrálne snímkovanie môže zachytiť rozdiely medzi zdravými a napadnutými stromami a že významnú úlohu môžu mať NIR-orientované indexy. Pre projekt je dôležitý najmä viacčasový charakter ich dizajnu: snímkovanie pred rojením, v skorom štádiu a po opustení stromov umožnilo hodnotiť dynamiku spektrálneho signálu. Táto logika podporuje návrh opakovaných kampaní aj v LS Beňuš, hoci konkrétne termíny musia rešpektovať lokálnu fenológiu, priebeh počasia a projektový harmonogram.

29. Časová porovnateľnosť a detekcia zmeny

Základným analytickým produktom monitoringu nemá byť séria samostatných ortofotomáp, ale časová informácia o zmene. To vyžaduje, aby boli kampane navzájom porovnateľné a aby sa pred výpočtom rozdielov overila ich vzájomná registrácia. Pri veľmi vysokom rozlíšení UAV dát môže aj malá horizontálna odchýlka vytvoriť falošnú zmenu na okraji koruny. Preto sa pred tematickou detekciou zmeny kontrolujú stabilné objekty a stanoví sa praktická minimálna veľkosť zmeny, ktorú možno vzhľadom na geometrickú neistotu považovať za interpretovateľnú.

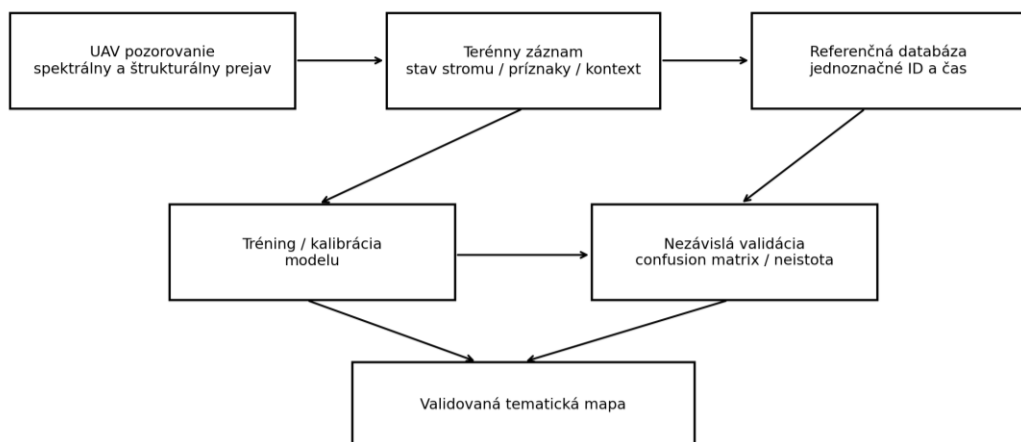


Obr. 3. Logika opakovaného monitoringu a odlíšenia skutočnej zmeny od neistoty merania.

Rovnako významná je fenologická porovnateľnosť. Dve geometricky správne ortofotomozaiky získané v odlišnej fáze vegetačnej sezóny môžu vykazovať spektrálne rozdiely, ktoré nesúvisia s poškodením. Pri plánovaných porovnávacích kampaniach sa preto preferuje podobné sezónne okno. Zalietania a mapovanie počas mimoriadnych udalostí sa evidujú oddelene a interpretujú sa ako dokumentácia konkrétnej zmeny, nie automaticky ako rovnocenný bod pravidelnej sezónnej série.

30. Terénna validácia a referenčný dataset

Terénna validácia je nosnou súčasťou koncepcie. Kritický prehľad Kautz et al. (2024) identifikoval nedostatočnú zhodu s dátami v teréne a obmedzené časové série ako opakujúce sa slabiny štúdií zameraných na skorú detekciu lykožrúta smrekového. Aj systematický prehľad UAV monitoringu zdravotného stavu lesov upozornil na nedostatok štandardizovaných pracovných postupov a dlhodobého opakovaného monitoringu (Ecke et al., 2022). Pre projekt z toho vyplýva potreba budovať referenčný dataset súbežne s UAV časovou sériou.



Obr. 4. Väzba medzi UAV pozorovaním, terénnym overením a validovanou tematickou mapou.

Referenčný dataset sa nesmie použiť celý súčasne na vytvorenie klasifikácie aj na deklarovanie jej presnosti. Ak sa bude využívať strojové alebo hlboké učenie, časť referenčných objektov sa vyčlení na nezávislé overenie. Ecke et al. (2024) demonštrovali prevádzkovo orientovaný pracovný postup spájajúci UAV multispektrálne údaje, terénne referencie a CNN na rozsiahlej množine údajov z 235 plôch počas troch rokov. Pre LS Beňuš nie je cieľom mechanicky preberať ich model, ale aplikovať princíp transparentného oddelenia tréningových a validačných údajov a zachovania prenositeľného spracovania dát.

31. Monitoring postdisturbančnej obnovy a odolnosti

Hodnotenie porastov po kalamite sa nemá redukovať na mapovanie mortality. Z pohľadu odolnosti je rozhodujúce, či a akým spôsobom sa systém po disturbancii obnovuje. Preto sa sleduje vývoj korunového krytu, podiel otvoreného povrchu, prirodzená a umelá obnova, vertikálna heterogenita a priestorová kontinuita vegetácie. Mandl et al. (2024) ukázali na rozsiahlej analýze východných Álp, že ekologicky interpretovateľné ukazovatele podielu stromového krytu a odkrytého povrchu môžu poskytovať vhodnejší obraz obnovy než samotné spektrálne indexy. Tento poznatok je relevantný aj pre projektový monitoring, pretože podporuje kombinovanie spektrálnych a štrukturálnych ukazovateľov.

Pri interpretácii obnovy sa musí zohľadniť, že vysoký vegetačný kryt nemusí automaticky znamenať úspešnú obnovu drevinovej zložky. UAV údaje sa preto prepájajú s terénnym hodnotením druhového zloženia, hustoty a výškovej štruktúry obnovy. V prípade mladých jedincov prekrytých bylinnou vegetáciou zostáva terénne zisťovanie nenahraditeľné.

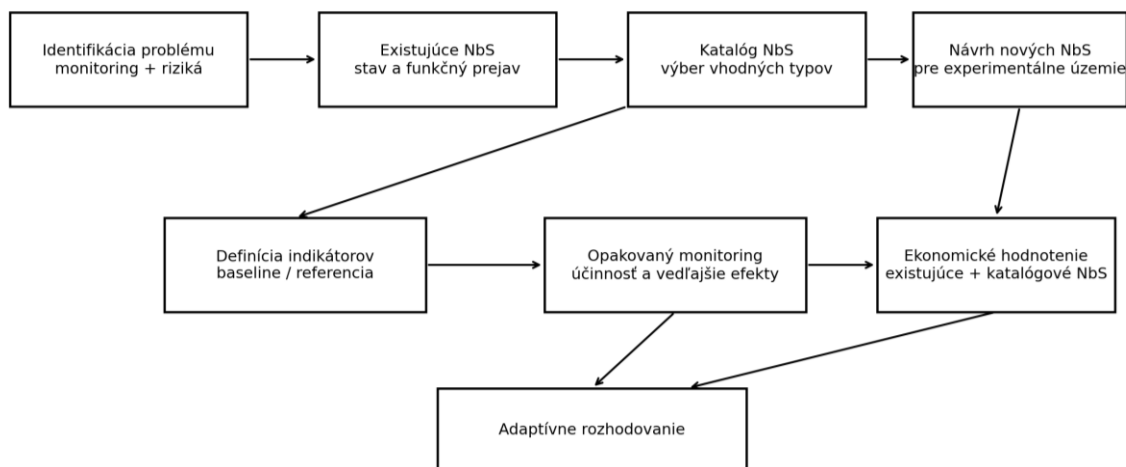
32. Monitoring lesného paliva a požiarne relevantných charakteristík

Kalamitne zmenené smrekové porasty menia nielen zdravotný stav lesa, ale aj priestorovú organizáciu palivového komplexu. Monitoring sa preto zameria na stojace sucháre, hrubé ležiace drevo detegovateľné z leteckých údajov, otvorenosť zápoja, vznik súvislých otvorených plôch a terénne charakteristiky jemného povrchového paliva. Význam jednotlivých zložiek sa nesmie hodnotiť izolovane: mŕtve drevo má ekologickú funkciu a jeho požiarne relevancia závisí od hrúbky, rozkladu, vlhkosti, priestorovej kontinuity a aktuálnych meteorologických podmienok.

Pre požiarne hodnotenie je osobitne významné prepojenie štrukturálnych údajov s mikroklimou. Otvorenie zápoja mení radiačnú bilanciu, prúdenie vzduchu a režim vysychania povrchových palív. Po sprevádzkovaní IoT jednotiek sa preto odporúča porovnávať mikroklimatické časové rady medzi zachovaným porastom, kalamitne otvorenou plochou a vybranou plochou s NbS. Takto možno oddeliť dlhodobejšiu štrukturálnu zmenu od krátkodobej meteorologickej variability.

33. Monitoring NbS a hodnotenie ich účinnosti

Koncepcia rozlišuje dve skupiny NbS: opatrenia, ktoré už v území existujú a projekt ich monitoruje, a nové riešenia, ktoré budú na základe výsledkov monitoringu a katalógu navrhnuté ako vhodné pre experimentálne územie. Toto rozlíšenie je zásadné aj pre hodnotenie účinnosti. Pri existujúcom opatrení možno sledovať reálny technický stav a funkčné prejavy; pri navrhovanom opatrení sa hodnotí vhodnosť, očakávaný mechanizmus účinku a predpoklady budúceho monitoringu.



Obr. 5. Monitorovací a rozhodovací cyklus pre existujúce a navrhované prírode blízke riešenia.

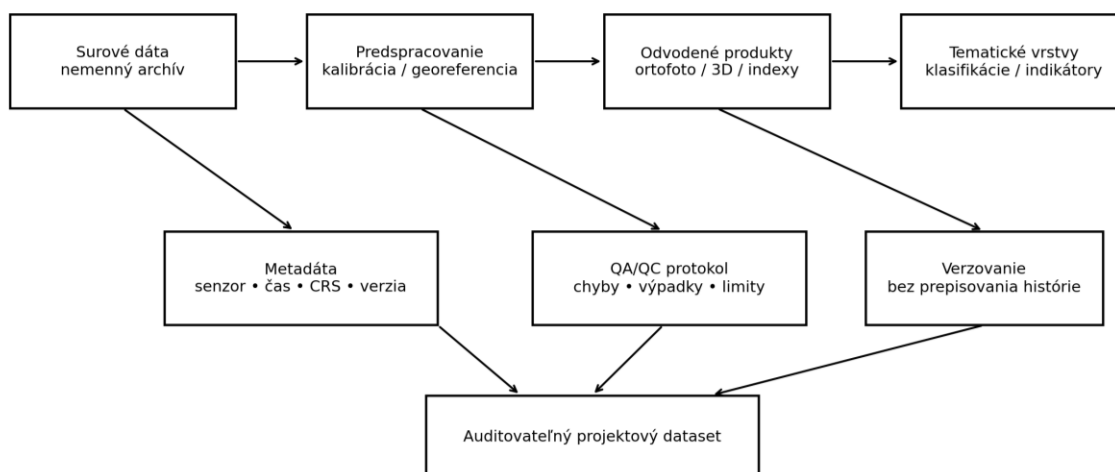
Súčasná európska literatúra podporuje cieľovo orientovaný výber indikátorov. Menéndez-Miguélez et al. (2024) identifikovali v európskych projektoch obnovy veľmi široké spektrum indikátorov a upozornili na náročnosť harmonizácie. Van Lierop et al. (2025) zdôrazňujú, že monitorovací rámec NbS musí okrem vedeckej relevancie zohľadniť technickú uskutočniteľnosť, legitimitu a časovú mierku. Európska analýza Lapin et al. (2025) navyše poukazuje na potrebu holistického hodnotenia ekologických, ekonomických, sociálnych a politických dimenzií obnovy. V projekte sa preto pre každé NbS vytvorí logický reťazec: problém – mechanizmus opatrenia – merateľný indikátor – referenčný stav – časový horizont – interpretácia výsledku.

Ekonomické hodnotenie bude nadväzovať na rovnakú logiku. Pri existujúcich NbS sa bude ekonomická efektívnosť vzťahovať k reálnemu opatreniu a dostupným údajom o jeho realizácii a funkčnom stave. Pri NbS zahrnutých v katalógu, ktoré v experimentálnom území implementované nie sú, sa ekonomická analýza spracuje ako modelové alebo referenčné hodnotenie. Tieto dve kategórie sa v záverečnej správe nebudú zamieňať.

34. Dátová integrita, QA/QC a reprodukovateľnosť

Dátová integrita je podmienkou použiteľnosti viacročného monitoringu. Každý analytický výsledok musí byť spätne prepojitelný s konkrétnym vstupným datasetom, verziou spracovania a použitými

parametrami. Surové dáta sa archivujú ako nemenná vrstva; všetky korekcie, transformácie a klasifikácie vznikajú ako odvodené produkty. Takýto postup umožňuje neskoršie prepočítanie časovej série pri zlepšení algoritmu bez straty pôvodnej informácie.



Obr. 6. Dátový tok od surového záznamu po auditovateľný projektový dataset.

Kontrola kvality bude dokumentovaná na troch úrovniach: kvalita zberu, kvalita spracovania a kvalita interpretácie. Prvá zahŕňa úplnosť pokrytia, ostrosť, GNSS a podmienky zberu; druhá geometrickú a rádiometrickú konzistenciu a kvalitu fotogrametrického riešenia; tretia presnosť klasifikácie, reprezentatívnosť referenčných dát a hranice interpretácie. Pri IoT časových radoch sa doplní kontrola fyzikálne možných rozsahov, skokových zmien, driftu, výpadkov a servisných udalostí.

35. Indikátory, prahové hodnoty a rozhodovacia interpretácia

Indikátory budú rozdelené na stavové, zmenové a funkčné. Stavový indikátor opisuje situáciu v konkrétnom termíne, napríklad podiel otvorenej plochy. Zmenový indikátor vyjadruje rozdiel medzi dvoma porovnateľnými termínmi, napríklad prírastok mortality. Funkčný indikátor sa viaže na mechanizmus NbS, napríklad zníženie koncentrácie povrchového odtoku alebo stabilizáciu vegetačného krytu. Toto členenie zabraňuje tomu, aby sa jednoduchý opis stavu vydával za dôkaz účinnosti opatrenia.

Prahové hodnoty sa nebudú určovať arbitrárne. Ak existuje vedecky alebo normatívne podložený prah, uvedie sa jeho zdroj a podmienky platnosti. Ak taký prah neexistuje, použije sa relatívne porovnanie s referenčnou plochou, predchádzajúcim termínom alebo distribúciou hodnôt v rámci monitorovanej populácie. Pri rozhodovacej mape sa preto bude rozlišovať medzi empiricky pozorovanou hodnotou a kategóriou vytvorenou pre potreby interpretácie.

36. SúčasnÉ poznatky a limity použitých technológií

Aktuálna literatúra potvrdzuje rastúci význam UAV pri monitorovaní zdravotného stavu lesov, ale zároveň nepodporuje predstavu, že technologický pokrok odstránil potrebu terénneho overenia. Systematický prehľad publikovaný v roku 2025 zahŕňajúci 40 štúdií z 23 krajín konštatuje vysoký potenciál RGB, multispektrálnych, hyperspektrálnych a LiDAR systémov, ale poukazuje na pretrvávajúci nedostatok štandardizácie a dlhodobých hodnotení. Pre projekt je preto vhodnejšie budovať stabilný a auditovateľný systém s menším počtom dobre definovaných indikátorov než meniť technológie pri každej kampani.

Strojové učenie a hlboké neurónové siete môžu podporiť segmentáciu korún a klasifikáciu ich stavu, ale modelová presnosť je podmienená kvalitou referenčných dát a reprezentatívnosťou tréningovej množiny. Výsledky z iného regiónu alebo iného senzora sa preto nebudú bez lokálnej validácie prenášať vo Vydrovskej doline. Model sa bude považovať za analytický nástroj, nie za autonómny zdroj biologickej pravdy.

Pre NbS a obnovu je podobne dôležité vyhnúť sa univerzálnym indikátorom bez väzby na cieľ. Novšie európske práce ukazujú, že monitorovanie obnovy potrebuje kombinovať ekologické procesy, odolnosť a podľa účelu aj sociálno-ekonomické charakteristiky. V lesnom experimentálnom území sa preto primárne sledujú indikátory, ktoré možno priamo prepojiť s projektovými otázkami: vývoj porastu, obnova, palivová štruktúra, erózne a odtokové prejavy, stav NbS a mikroklimatický kontext.

37. Syntéza metodického postupu pre Vydrovskú dolinu

V praxi bude monitoring prebiehať ako opakovaný pracovný cyklus. Najskôr sa vymedzí otázka a rozsah kampane, následne sa získajú UAV a terénne údaje, vykoná sa kontrola kvality a spracovanie a výsledky sa porovnajú s predchádzajúcim stavom. Až potom sa zmena interpretuje z hľadiska vývoja porastu, rizík a potreby ďalších opatrení. Ak monitoring ukáže, že pôvodné rozmiestnenie plôch alebo frekvencia zberu nezachytávajú podstatnú variabilitu, dizajn sa môže upraviť, ale každá takáto zmena musí zostať dohľadateľná v metodickom zázname.

Záver

Navrhnutá koncepcia vytvára odborný rámec pre dlhodobý porovnateľný monitoring porastov experimentálneho územia Vydrovskej doliny v pôsobnosti LS Beňuš, OZ Horehronie, zasiahnutých lykožrúťovou kalamitou. Je postavená na kombinácii opakovaného UAV mapovania a terénnej validácie, pričom po obstaraní monitorovacích jednotiek sa rozšíri o kontinuálne IoT časové rady. Takto vytvorený systém umožní sledovať nielen rozsah poškodenia, ale aj následný vývoj porastovej štruktúry, obnovy, lesného paliva a vybraných povrchových procesov.

Koncepcia kladie dôraz na reprodukovateľnosť a na rozlíšenie medzi meraním a interpretáciou. UAV údaje sa nebudú používať na kauzálne závery, ktoré neumožňuje ich informačný obsah, a tematické klasifikácie budú overované terénnymi údajmi. Pri časových analýzach sa bude kontrolovať geometrická a fenologická porovnateľnosť datasetov. Tieto zásady sú nevyhnutné na to, aby výsledné mapy a indikátory predstavovali odborný podklad pre rozhodovanie a nie iba vizuálne atraktívne produkty.

Výsledky monitoringu budú priamo využiteľné pri komplexnom posúdení rizík, pri dokumentovaní existujúcich prírode blízkych riešení a pri návrhu nových NbS vhodných pre experimentálne územie. Súčasne vytvoria technický a environmentálny kontext pre neskoršie ekonomické hodnotenie opatrení. Koncepcia je preto chápaná ako základný metodický dokument, ktorý spája zber dát, ich kontrolu, analytické spracovanie a využitie v ďalších projektových výstupoch.

Použitá odborná literatura

- ECKE, Simon et al. 2022. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing*. 14(13), 3205. DOI 10.3390/rs14133205.
- KAUTZ, Markus, Joachim FEURER a Petra ADLER. 2024. Early detection of bark beetle (*Ips typographus*) infestations by remote sensing – A critical review of recent research. *Forest Ecology and Management*. 556, 121595. DOI 10.1016/j.foreco.2023.121595.
- KLOUČEK, Tomáš et al. 2024. Early detection of bark beetle infestation using UAV-borne multispectral imagery: a case study on the spruce forest in the Czech Republic. *Frontiers in Forests and Global Change*. 7, 1215734. DOI 10.3389/ffgc.2024.1215734.
- ECKE, Simon et al. 2024. Towards operational UAV-based forest health monitoring: Species identification and crown condition assessment by means of deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. 219, 108785. DOI 10.1016/j.compag.2024.108785.
- MANDL, Lisa et al. 2024. Unmixing-based forest recovery indicators for predicting long-term recovery success. *Remote Sensing of Environment*. 308, 114194. DOI 10.1016/j.rse.2024.114194.
- MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, María et al. 2024. How to measure outcomes in forest restoration? A European review of success and failure indicators. *Frontiers in Forests and Global Change*. 7, 1420127. DOI 10.3389/ffgc.2024.1420127.
- VAN LIEROP, Martina et al. 2025. The why, how, and what of indicator-based monitoring of nature-based solutions: Perspectives from EU and LAC city practitioners. *Ambio*. 54, 1621–1634. DOI 10.1007/s13280-025-02174-0.
- LAPIN, Katharina et al. 2025. A comprehensive analysis of forest restoration practices across Europe: Ecological, economic, social and policy dimensions. *Ecological Indicators*. 173, 113348. DOI 10.1016/j.ecolind.2025.113348.
- CALFAPIETRA, Carlo et al. 2025. Perspectives From Nature-Based Solutions to Restore Soil and Ecosystems. *European Journal of Soil Science*. DOI 10.1111/ejss.70134.
- WARNER, Emily et al. 2025. Integrated above- and below-ground ecological monitoring for nature-based solutions. *Ecological Solutions and Evidence*. DOI 10.1002/2688-8319.70043.
- PELTO-ARVO, Mikko et al. 2024. Large-Area UAS-Based Forest Health Monitoring Utilizing a Hydrogen-Powered Airship and Multispectral Imaging. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLVIII-3-2024, 559–566.
- SHOOSHTARIAN, Salman et al. 2025. The use of UAV-based systems in monitoring forest health: Potentials and challenges. *Trees, Forests and People*. 2025.