

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie se zaměřením na vzdělávání  
Studijní obor: Biologie a geografie se zaměřením na vzdělávání



Anna Veronika Vaverová

Patogeny jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) a potenciál jejich  
detekce pomocí optických metod.  
Pathogens of silver fir (*Abies alba* Mill.) and the potential for their  
detection using optical methods.

Bakalářská práce

Školitel: Mgr. Zuzana Lhotáková, Ph.D.  
Konzultanti: prof. RNDr. Jana Albrechtová, Ph.D.  
Ing. Michal Samek

Praha, 2025

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Během práce jsem použila umělou inteligenci k překladům některých článků a pro jazykovou a stylistickou úpravu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 7. 8. 2025

Anna Veronika Vaverová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala své vedoucí práce Mgr. Zuzaně Lhotákové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, cenné rady a vstřícnost. Mé poděkování patří také Ing. Michalu Samkovi za odborné rady a konzultace a prof. RNDr. Janě Albrechtové, Ph.D. za celkové zhodnocení, její čas a odborné připomínky.

## Abstrakt

Jedle bělokora (*Abies alba* Mill.) byla v minulosti běžnou součástí našich lesů, ke které se dnes v rámci lesního hospodářství vracíme jako k možnému řešení problémů spojených s nestabilitou dosavadních monokulturních smrkových porostů. Existuje celá řada abiotických a biotických činitelů, kteří se podílí na zhoršeném zdravotním stavu tohoto taxonu. Z houbových patogenů se v posledních letech nejčastěji setkáváme s problémy asimilačního systému. Původci těchto problémů bývají sypavky a rzi. Mezi další patogeny patří kořenové hniloby a dřevokazné houby včetně tzv. rakovin kmene. Pro mladší jedince představuje velký problém i korovnice s výskytem souběžným se sypavkami, což má za následek celkové oslabení stromu. Vliv těchto činitelů se projevuje opadem jehlic, zpomalením růstu a v pokročilejších fázích i úhynem.

V druhé části se tato práce zabývá potenciálem sledování zdravotního stavu využitím optické detekce. Současný výzkum hledá efektivní cesty, jak tyto problémy včas rozpoznat a omezit jejich dopad. Jednou z nadějných možností jsou metody založené na analýze optických vlastností vegetace. Tyto techniky využívají změny v odrazivosti listového aparátu, které souvisejí s fyziologickým stavem rostliny, například se strukturou listu, s obsahem chlorofylu nebo vody. Měření se pak hodnotí podle průběhu spektrálních křivek a různých vegetačních indexů, které vyjadřují míru fyziologické vitality nebo známky stresu.

Analýza těchto údajů umožňuje zjistit, kde se stromům nedaří ještě předtím, než dojde k vážnému makroskopickému poškození. Přestože většina dosavadních pokusů byla prováděna na jiných dřevinách, ukazuje se, že použité postupy lze přenést i na jedli. V několika studiích byla ověřena možnost rozeznat časně příznaky oslabení, které souvisejí s chorobami či nedostatkem vody. Výsledky tak naznačují, že optické snímání vlastností listové může být užitečné při sledování fyziologického stavu porostů a plánování hospodářských zásahů.

## Klíčová slova

Jedle bělokora, patogeny, patogeny asimilačního aparátu, optická detekce, dálkový průzkum Země, vegetační spektroskopie, globální změna klimatu

## Abstract

Silver fir (*Abies alba* Mill.) was a common part of forests in Czechia in the past. Today, we are returning to it in forestry as a possible solution to problems associated with the instability of existing spruce monocultures.

Among fungal pathogens, we have most frequently encountered problems with the assimilatory system in recent years. The agents causing these problems are typically needle casts and rusts. Other pathogens include root rots and wood-decay fungi, as well as so called stem cankers. For younger trees, *Dreyfusia* spp. also pose a major problem, with their occurrence often coinciding with needle casts, which results in an overall weakening of the tree. The impact of these agents manifests as needle shedding, slowed growth, and in more advanced stages, mortality.

The second part of this thesis deals with the potential for monitoring health status using optical detection. Current research seeks effective ways to recognize these problems early and limit their impact. One promising option are methods based on the analysis of optical properties of vegetation. These techniques utilize changes in the reflectance of the foliage, which are related to the physiological state of the plant, such as leaf internal structure, chlorophyll or water contents. Measurements are then evaluated based on spectral curves and various vegetation indices that express the degree of physiological vitality or signs of stress.

The analysis of these data makes it possible to determine locations where trees are not prospering well, even before serious macroscopic damage occurs. Although the majority of previous experiments were conducted on other tree species, it appears that the procedures used can also be applied to fir. Several studies have verified the possibility of recognizing early symptoms of weakening related to diseases or water scarcity. The results thus suggest that optical sensing can be useful in monitoring stand physiological conditions and planning management interventions.

## Key words

Silver fir, pathogens, assimilation system diseases, optical detection, remote sensing, vegetation spectroscopy, global climate change

# Obsah

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod .....                                                                                      | 1  |
| 1. Jedle bělokorá.....                                                                          | 2  |
| 2. Stručný přehled patogenů jedle bělokoré .....                                                | 4  |
| 2.1. Patogeny jehlic.....                                                                       | 4  |
| 2.1.1. Choroby sypavkovitého charakteru .....                                                   | 4  |
| 2.1.2. Rzi.....                                                                                 | 7  |
| 2.2. Další patogeny jedle bělokoré .....                                                        | 10 |
| 2.2.1. Václavky .....                                                                           | 10 |
| 2.2.2. Kořenovníky (červená hniloba) .....                                                      | 12 |
| 2.2.3. Pevník krvavějící .....                                                                  | 13 |
| 2.2.4. Neonectria neomacrospora .....                                                           | 14 |
| 2.2.5. Gremmeniella abietina.....                                                               | 14 |
| 2.2.6. Korovnice rodu Dreyfusia .....                                                           | 15 |
| 3. Potenciál optických vlastností jehlic pro detekci patogenů jedle .....                       | 17 |
| 3.1. Optická detekce a dálkový průzkum Země.....                                                | 17 |
| 3.2. Spektrální vlastnosti vegetace .....                                                       | 18 |
| 3.2.1. Vliv chemického složení na odrazivost vegetace .....                                     | 20 |
| 3.2.2. Vliv vnitřní struktury listu a obsahu vody na odrazivost vegetace .....                  | 20 |
| 3.2.3. Další faktory ovlivňující odrazivost vegetace .....                                      | 21 |
| 3.2.4. Projevy stresu na spektrálním profilu listu .....                                        | 22 |
| 3.3. Hyperspektrální a multispektrální data .....                                               | 24 |
| 3.4. Nosiče pro sběr optických dat .....                                                        | 25 |
| 3.5. Význam správného načasování sběru dat .....                                                | 26 |
| 3.6. Zpracování a analýza dat, modely a strojové učení .....                                    | 27 |
| 3.7. Potenciál použití u jedle .....                                                            | 28 |
| 3.8. Příklady úspěšného použití optických dat u detekce patogenů na jehličnatých stromech ..... | 29 |
| 3.8.1. Příklady použití optických dat ve studiích zabývajících se lýkožroutem smrkovým .....    | 31 |
| Závěr.....                                                                                      | 33 |
| Seznam použité literatury .....                                                                 | 34 |

## Seznam zkratek

DPZ – Dálkový průzkum Země

EVI – Enhanced Vegetation Index (zesílený vegetační index)

ESA – European Space Agency (Evropská kosmická agentura)

GSCP – Green shoulder curvature point (bod zakřivení ve vzestupné části zeleného spektra)

GSIP – Green shoulder inflexion point (lokální maximum v zelené oblasti elektromagnetického spektra)

HNB – Herpotrichia needle browning (hnědnutí jehlic způsobené sypavkou)

MIR – Middle infrared (střední infračervená oblast elektromagnetického spektra)

NASA – National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a vesmír)

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (normalizovaný rozdílový/diferenční vegetační index)

NIR – Near infrared (blízká infračervená oblast elektromagnetického spektra)

SWIR – Short-wave infrared (krátkovlnná infračervená oblast elektromagnetického spektra)

UAV – Unmanned aerial vehicle (bezpilotní letouny, drony)

VIS – Visible spectrum (viditelná oblast elektromagnetického spektra)

# Úvod

Současné lesní hospodářství čelí významným výzvám spojeným s nestabilitou monokulturních porostů, které jsou vysoce náchylné k abiotickým i biotickým stresorům, včetně působení fytopatogenů. V kontextu probíhající klimatické změny a probíhajících adaptačních strategií je jedle bělokorá vnímána jako vhodná dřevina pro přeměnu těchto nestabilních monokulturních porostů na ekologicky vyváženější a odolnější smíšené lesy. Při těchto obnovných procesech je však důležité zohlednit zdravotní rizika spojená s infekcí patogeny, které mohou významně ovlivnit růst, vitalitu i dlouhodobou udržitelnost populace této dřeviny (Bednář 2024).

Napadení patogeny může vést k defoliaci, redukci fotosyntetické aktivity, snížení růstové dynamiky a v krajních případech i odumírání jedinců či celých populací. Tyto procesy mají významné ekologické i hospodářské důsledky, především zhoršení stability porostů a snížení produkční schopnosti lesních ekosystémů (Vejpustková et al. 2019).

Efektivní monitoring a diagnostika těchto patogenů je proto nezbytná pro včasnou identifikaci ohrožených populací a optimalizaci strategií lesnického managementu. V posledních letech dochází k rozvoji moderních metod detekce, které umožňují neinvazivní hodnocení zdravotního stavu dřevin na základě jejich optických vlastností. Spektroskopické metody a dálkový průzkum Země poskytují nové možnosti identifikace symptomů patogenního napadení a umožňují efektivnější sledování změn ve vegetačních strukturách (Kupková et al. 2017).

Tato práce se zabývá současnými poznatky o patogenech jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.), s důrazem na jejich vliv v kontextu globální klimatické změny. Shrnuje současné znalosti o spektru patogenů jedle bělokoré, kteří mohou napadat tuto dřevinu v různých vývojových stádiích, od kultur semenáčů přes mlaziny až do fáze dospělých porostů, a zabývá se možností využití detekce optických vlastností jako diagnostické metody pro detekci a identifikaci patogenů. Cílem této práce je kromě shrnutí poznatků o fytopatogenech též objasnit možnosti využití optické detekce patogenů a určení fyziologického stavu pozorovaných dřevin nedestruktivním způsobem. Tyto poznatky mohou přispět k optimalizaci strategií ochrany lesů a podpořit snahy o obnovu druhově bohatších a stabilnějších lesních ekosystémů.



## 1. Jedle bělokorá

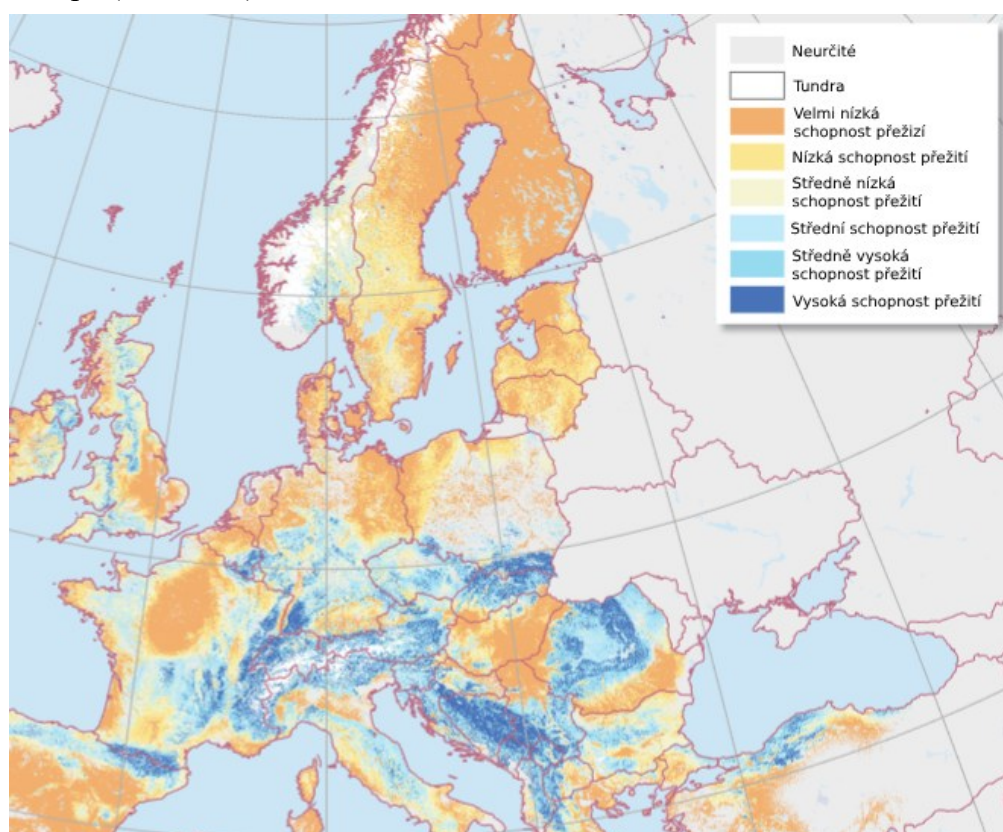
Jedle bělokorá (*Abies alba* Mill.) je původní dřevinou středoevropských lesů a hraje významnou roli v ekosystémech této oblasti (Bledý et al. 2024). Jedle bělokorá se nejčastěji vyskytuje ve vyšších polohách střední Evropy, obvykle v nadmořské výšce 500 až 2000 metrů. Pro svůj zdárný růst potřebuje dostatečnou vlhkost po celý rok, s průměrnými ročními srážkami pohybujícími se mezi 700 a 1800 milimetrů. Tento druh dřeviny je důležitým pro evropské lesy z hlediska ekologie a stability, vzhledem k tomu, že se jedná o druh tolerantní k zastínění, může být jedle bělokorá vhodnou náhradou smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] H. Karst.) v měnícím se klimatu. Hraje tak roli v udržení vysoké biodiverzity v temperátních lesních ekosystémech střední Evropy. Mladým stromům se daří pod korunami starších dominantních stromů po desítky let, a zajišťují tak budoucí generace lesa. Díky své snadné přirozené obnově jedle často proniká i do listnatých lesů, což přispívá k tvorbě smíšených porostů (Mauri et al. 2016).

Při poškození borky je dřevo jedle na rozdíl od smrku méně náchylné k hnilobám. Dospělé jedlové porosty v těžebním věku nebývají tak často postiženy faktory klimatické změny a kalamitní těžbou (Bledý et al. 2024). Ve studii Metzlera et al. (2012) bylo 40 jedlí a 40 smrků poraněno stejným způsobem, kdy byla na spodní části kmene odstraněna část borky. Po dvou letech byly zkoumané patogeny (níže popsané Pevníky krvavějící) nalezeny u 28 % smrků, ale jen u 8 % jedlí. U smrků se v místě poranění často objevovalo výrazné vysychání dřeva, což může růstu hub napomáhat. Jedle má odlišnou vnitřní stavbu. Skutečnost, že nemá běžně rozptýlené pryskyřičné kanálky jako smrk, houbám ztěžuje šíření. Navíc dokáže poraněné místo uzavírat pomocí ochranných látek, které udržují vlhkost, a tím snižují pravděpodobnost napadení (Metzler et al. 2012).

Historicky tvořila jedle významnou složku smíšených porostů, avšak v důsledku intenzivního lesního hospodaření došlo k jejímu ústupu. V České republice byla v minulých stoletích její přirozená populace výrazně redukována, což vedlo k dominanci smrkových monokultur (Bledý et al. 2024). Zastoupení jedlí v rámci druhového složení lesů v Česku bylo v roce 2023 podle výroční zprávy 1,3 % (Ministerstvo zemědělství 2024). Historicky bylo zastoupení jedle bělokoré v českých lesích výrazně vyšší, odhadem kolem 20 %, s lokálními vrcholy dokonce přesahujícími 50 % v některých oblastech v průběhu pravěku a středověku (Kozáková et al. 2011). I přes tuto redukci v zastoupení má jedle stále ekologický význam a její obnova v lesní skladbě je cílem současného lesnictví. V posledních desetiletích jsou však její zdravotní stav a fyziologická vitalita výrazně ovlivňovány řadou stresových faktorů. K nejvýznamnějším patří

dopady klimatické změny, především sucha a dále historická zátěž znečištěním ovzduší, poškození způsobené zvěří a konkurence ostatních dřevin (Mauri et al. 2016; Bledý et al. 2024).

Klimatická změna obecně snižuje fyziologickou vitalitu i produkční vlastnosti a zvyšuje stres stromů. Častější klimatické extrémy zvyšují náchylnost jedle k poškození. Mladé jehlice s tenčí kutikulou a vyšším obsahem vody jsou zvláště náchylné k infekcím. Celkově dobrý zdravotní stav a fyziologická vitalita porostu jsou základem odolnosti jedle proti patogenům (Košulič 2010). Schopnost přežití jedle bělokoré v měnícím se evropském klimatu je znázorněna na přiložené mapě (obrázek 1).



**Obrázek 1:** Schopnost přežití jedle bělokoré v Evropě. Mapa znázorňuje predikovanou míru přežití jedle bělokoré v různých regionech Evropy, s ohledem na environmentální podmínky a klimatické změny. Oblasti s tmavě modrou barvou indikují vysokou schopnost přežití, zatímco oranžové a světle modré odstíny značí nižší až velmi nízkou schopnost přežití (Mauri et al. 2016).

Nicméně, i přes zmíněné problémy, je jedle bělokorá významnou dřevinou, pro svůj hospodářský význam, i ekologické funkce. Plní důležitou meliorační a půdoochrannou roli, zlepšuje půdní podmínky a přispívá k efektivnímu vodnímu hospodářství v lesních ekosystémech (Košulič 2010). Je také třeba poznamenat, že klimatická změna pozitivně ovlivnila roční objemový přírůst jedle díky delšímu vegetačnímu období. U smrku byl naopak vidět trend opačný a spolu s oteplováním jeho produkce klesala. To naznačuje, že při konstantních srážkách je jedle méně náchylná k útlumu radiálního růstu v důsledku teplejších

podmínek než smrk (Hilmers et al. 2019). Její přítomnost také zvyšuje biologickou rozmanitost a přispívá k celkové stabilitě lesních porostů, včetně jejich odolnosti vůči klimatické změně (Košulič 2010).

## **2. Stručný přehled patogenů jedle bělokoré**

Mezi nejdůležitější patogeny jedle v posledních letech patří patogeny asimilačního aparátu, a to především sypavky a rzi. Představují riziko zejména pro stadia mlazin a tyčkovin. Velkou a významnou skupinu patogenů asimilačního aparátu jedle, dle symptomů, které způsobují, souhrnně nazýváme „choroby sypavkovitého charakteru“. Dále pak mezi významné rzi napadající jedle patří následně popsané rez vrbková nebo rez jedlová (Kowalski a Andruch 2010; Sánchez-Miranda et al. 2006; Asiegbu a Kovalchuk 2022). Ve starších porostech představuje největší riziko parazitická houba václavka (*Armillaria* sp.), jakožto nejčastější původce kořenových hnilob v lesním hospodářství. Mezi méně časté patogeny způsobující hniloby patří celá řada dalších druhů, jako je kořenovník jedlový, kořenovník vrstevnatý, kořenovník smrkový, pevník krvavějící, *Gremmeniella abietina* (též *Ascocalyx abietina*), a korovnice rodu *Dreyfusia* (Asiegbu a Kovalchuk 2022). Pro lepší přehlednost a orientaci byly v této kapitole patogeny rozděleny na základě přístupu této publikace.

### **2.1. Patogeny jehlic**

#### **2.1.1. Choroby sypavkovitého charakteru**

Chřadnutí a opad jehlic bývá často fyziologického původu, ale v posledních letech se setkáváme s houbovými chorobami sypavkovitého charakteru, které může způsobovat celá řada patogenů. Jejich souhrn a základní symptomy výskytu jsou charakterizovány níže.

Mezi nejčastější projevy napadení patogeny posledních let patří na jedli bělokoré hnědnutí jehlic neboli sypavka jedlová, choroba postihující jehlice jedlí v angličtině označovaná jako „Herpotrichia needle browning (HNB)“ (Atlas of Forest Pests 2025d). Projevuje se odumíráním a hnědnutím jehlic, které získávají slámovitě žlutou až hnědou barvu (obrázek 2a a 2b). Na bázi jehlic se občas objevuje bílé mycelium, kterým zůstávají jehlice připevněné na větvích, což je pro HNB oproti jiným sypavkám typické (Atlas of Forest Pests 2025d; Kowalski a Andruch 2012; Pusz et al. 2021). Symptomy jsou nejprve patrné ve spodních částech korun stromů a častěji se vyskytují u starších a vyšších jedinců (Pusz et al. 2021). Intenzivní napadení vede k defoliaci a odumírání výhonů, zejména ve vlhkých a hustých porostech s omezenou cirkulací vzduchu (Kowalski a Andruch 2010).

Sypavky se šíří buď nepohlavními sporami, tedy konidii, nebo pohlavními askosporami.

Většinou bývají nové jehlice napadány koncem jara a začátkem léta. Infekční spory klíčí ve vodě v klíční vlákno. To se přichycuje k povrchu jehlice, zduří a vyklíčí z něj hyfa, která proniká do jehlic skrz průduchy. Houbové mycelium se poté rozrůstá v buňkách mezofylu, přičemž vylučuje látky rozkládající celulózu buněčné stěny. Napadené jehlice ztrácejí zelenou barvu, jsou hnědé a odumírají (Palovčíková 2017). Mohou předčasně opadávat nebo v případě chorob HNB zůstávají na větvičkách (Kowalski a Andruch 2010). Na jejich povrchu se pak tvoří plodnice typicky až následující rok na jaře (Palovčíková 2017). Ne však vždy a u každého druhu sypavkovitého charakteru je cyklus i výskyt plodnic stejný a plodnice mohou být odlišných tvarů i barev (Kowalski a Andruch 2010; 2012; Grabowski a Kanner 2018).

Historicky je za hlavního původce HNB jedlí označována *Nematostoma parasiticum* (R. Hartig) M.E. Barr (dříve *Herpotrichia parasitica*), popsána Hartigem v roce 1884 (Lerat et al. 2023). Ačkoliv je *Nematostoma parasiticum* s touto chorobou spojována nejčastěji, výzkumy ukazují, že na odumřelých jehlicích se často vyskytují i jiné druhy hub. Například ve studiích Kowalskiho a Andrucha (2010, 2012) byl v 92 % postižených jehlic zjištěn druh *Rhizoctonia* spp. a kromě něj, bylo identifikováno dalších 8 druhů hub. Mezi další možné původce HNB patří také *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl., *Sydowia polyspora* (Bref. & Tavel) E. Müll. nebo *Rhizosphaera makrospora* Gourb. & M. Morele. (Kowalski a Andruch 2010). HNB je hlavně řešena ve spojitosti s komerčně pěstovanými vánočními stromky jedle balzámové (*Abies balsamea* var. *balsamea*) (Pusz et al. 2021).

*N. parasiticum* způsobuje od pozdního podzimu a převážně na jaře na jehlicích typické černé kulovité plodničky (Kowalski a Andruch 2010), které jsou vidět na obrázku 2c. Životní cyklus *N. parasiticum* není zatím v žádné studii přesně popsán. *S. polyspora* je oportunní patogen (Lerat et al. 2023) schopný kolonizovat jehlice zejména u stromů oslabených abiotickými stresory nebo hmyzem. Tato houba má velmi široký hostitelský rozsah a zahrnuje mnoho druhů jehličnanů. Je rozšířena v Evropě a adaptovaná na různé podmínky (Lazarević a Menkis 2022). *A. alternata*, česky také čern střídavá, je pravděpodobně spíš sekundárním kolonizátorem než hlavním původcem HNB. Má širokou škálu hostitelů a je hemibiotrofem. Izolována je především z odumírajících jehlic. Studie se jí zabývají především ve spojitosti mykotoxinů a černé skvrnitosti ovoce (Gupta a Saxena 2023). Většina studií o *Rhizosphaera* L. Mangin & Har na jehličnatých stromech se týká rodu smrk (*Picea* A. Dietr.), který je tímto rodem hub hlavně postižen. Výskyt *R. makrospora* se objevuje na starších stromech a je důsledkem stresu rostlin způsobeného změnami prostředí, jako je sucho, které spustí změnu strategie houby z endofytu na patogen a vede k předčasnému vadnutí jehlic (Pusz et al. 2021).

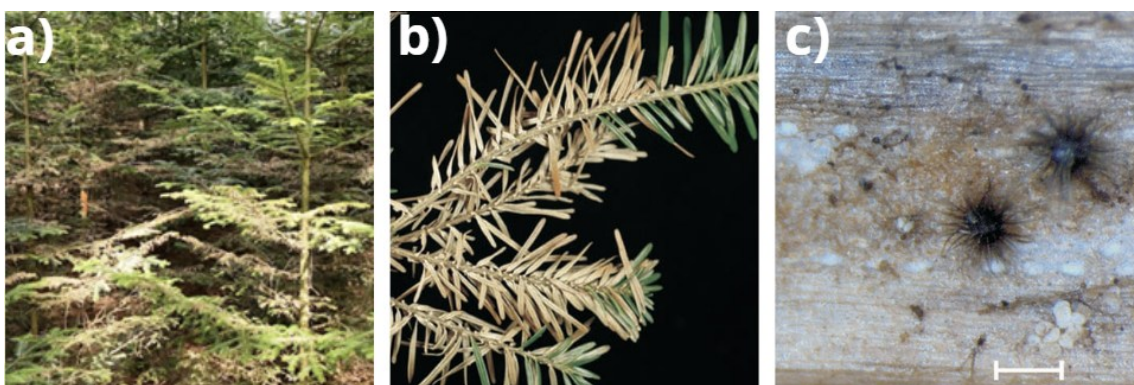
Identifikace původců HNB je obtížná, k přesné identifikaci jednotlivých druhů je zapotřebí využít molekulární metody a na odumřelých jehlicích se často vyskytuje více druhů hub, nejen primární patogeny (Lerat et al. 2023). K přesnější a časnější identifikaci těchto původců by mohla pomoci hyperspektrální detekce, která dokáže zachytit jemné fyziologické změny v jehlicích ještě před viditelným makroskopickým poškozením a rozšířením patogenu.

Následující popsané choroby sypavkovitého charakteru už nejsou označovány jako HNB. *Rhizosphaera kalkhoffii* Bubak je dalším příkladem hemibiotrofního patogenu sypavkovitého charakteru napadajícího jedle. Přezimuje v odumřelých jehlicích a nové infikuje na jaře. První projevy jsou žlutavé skvrny a na podzim a v zimě se pak zbarvuje jehlice hnědě. Nejvíce náchylné jsou mladší jehlice (Atlas of Forest Pests 2025c). Na jehlicích jsou vidět i malé černé plodnice vynořující se ze stomat. Takto napadené jehlice často druhým rokem opadají (Goldberg 2024). *Lophodermium piceae* (Fuckel) Höhn. je běžným endofytem jehlic smrku, ale napadá i jedle. Infikuje živé jehlice, které odumírají před dalším vegetačním obdobím. První příznaky jsou žluté skvrny koncem léta až začátkem podzimu, které hnědnou od špiček jehlic k bázi. Charakteristické jsou černé oválné plodnice na nemocných jehlicích, které za vlhka uvolňují spory. Spory se šíří přibližně od srpna do listopadu. Většina infekcí probíhá koncem léta během vlhkých období (Brazee 2022).

Další sypavkovité choroby napadající jedli jsou *Lirula nervisequa* (DC.) Darker, *Lirula mckrospora* (R. Hartig) Darker a *Lirula abietis-concoloris* (Mayr ex Dearn.) Darker. Jejich symptomy se projevují koncem léta žloutnutím a hnědnutím vnitřních jehlic. Následující rok se na spodní straně infikovaných jehlic objeví plodnice v podobě vystouplé černé čáry. Napadené jehlice zůstávají na stromě několik let a mají šedohnědou barvu. Životní cyklus je víceletý, houba přezimuje v jehlicích a spory se šíří deštěm na nové jehlice od jara do poloviny léta (Grabowski a Kanner 2018). Na rozdíl od chorob sypavkovitého charakteru, označovaných jako HNB, se většina ostatních sypavek, jako je sypavka jedle způsobená houbou *L. nervisequia*, vyznačuje rychlým opadem napadeného jehličí (Kowalski a Andruch 2010).

### 2.1.1.1 Obrana a prevence proti sypavkám

Prevence spočívá ve snižování vlhkosti porostu prořezávkami a ořezáváním napadených větví. V krajních případech je nutné kácení a pálení stromů. K infekci jsou náchylnější stromy pocházející z umělé obnovy lesa. Právě u stromů z umělé výsadby se výskyt onemocnění objevuje dokonce čtyřikrát častěji než u stromů s přirozenou regenerací (Kowalski a Andruch, 2010). Příčina vyšší úmrtnosti stromů z umělé výsadby je však v poslední době sporná, protože u jehličnanů, jako je například jedle korejská (*Abies koreana* 'Horstmanns Silberlocke'), houbová onemocnění způsobují vážnou úmrtnost sazenic již ve školkách. To naznačuje, že sazenice mohou být infikovány patogeny ještě před samotnou výsadbou na stanoviště (Choi et al. 2023).



**Obrázek 2:**

a) Mladá jedle bělokorá s příznaky HNB (foto: K. Andruch).

b) Větev jedle bělokoré s příznaky raného stádia infekce (foto: T. Kowalski).

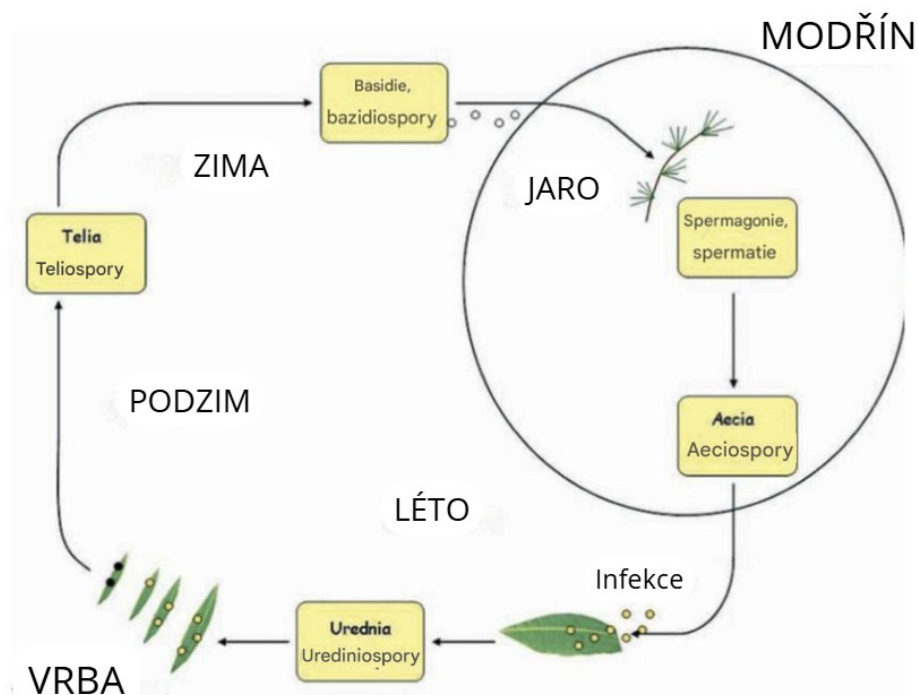
c) Plodnice *Nematostoma parasiticum* na jehlicích jedle bělokoré (bar = 200  $\mu$ m) (foto: T. Kowalski).

### 2.1.2. Rzi

Další významnou kategorií patogenů asimilačního aparátu jedle bělokoré jsou rzi, které spadají do řádu *Pucciniales*. Pro zástupce rzi bývá v lesním hospodářství zpravidla typické střídání hostitelů během životního cyklu, ale existují i zástupci, kteří jsou schopni dokončit životní cyklus na jednom hostiteli (Scholler et al. 2022). Pro ilustraci životního cyklu střídání hostitelů je přiložen obrázek 3, který znázorňuje cyklus rodu *Melampsora*, patogenu modřínů a vrb (Ciszewska-Marciniak a Jedryczka 2011). Mezi hlavní zástupce patogenů napadajících jedle, patří rody *Pucciniastrum* a *Melampsorella*. Čeleď *Pucciniastraceae* zahrnuje rzi, které jako své aeciální hostitele využívají jehličnany z podčeledi *Abietoideae*, tedy například jedle nebo jedlovec (tsuga [Endl.] Carrière). Rod *Pucciniastrum* tvoří aecie na jehlicích jedlí, zatímco jeho teliální hostitelé jsou rostliny z čeledi *Pupalkovité* (*Onagraceae* Juss). Rod *Melampsorella*, rovněž patří do čeledi *Pucciniastraceae* a také má jedle jako aeciální hostitele (Scholler et al. 2022). Jak je naznačeno v obrázku 3, aeciálním hostitelem je označována rostlina, na které rzivá houba vytváří své rozmnožovací struktury aecie, v nichž vznikají aeciospory. Naopak čeleď



*Coleosporiaceae* se specializuje na aeciální hostitele z podčeledí *Pinoideae* a *Piceoideae*, kam spadají borovice (*Pinus* L.) a smrky (*Picea* A. Dietr.)(Scholler et al. 2022).



**Obrázek 3:** Životní cyklus rodu *Melampsora*. Bazidiospory z přezimujících telií infikují na jaře modřín (*Larix* spp.), kde se vyvíjejí spermagona a aecie produkující aeciospory. Tyto aeciospory se šíří a infikují vrbové hostitele (*Salix* spp.), na nichž se tvoří uredinia s urediniosporami, které slouží k šíření infekce během léta. Na podzim se na vrbách vyvíjejí telia s teliosporami, které přezimují. Na jaře z telií vyrůstají bazidie s bazidiosporami, čímž se cyklus uzavírá. Upraveno a převzato z: (Ciszewska-Marciniak a Jedryczka 2011)

#### 2.1.2.1 Rez vrbková

Rez vrbková (*Pucciniastrum epilobii* [Pers.] G.H. Otth) na jehličí jedlí vytváří plodničky zvané aecie, které jsou na obrázku 4a a 4b. Z aecií se uvolňují drobné spory, kterými se houba přenáší na druhého, bylinného hostitele. Mezi bylinami se v létě šíří pomocí urediospor. V teliálním stadiu pak houba na bylinném hostiteli přezimuje. Až na jaře na bylině vyrostou basidiospory, které se vzduchem dostanou zpátky k jedlím a mohou infikovat nové jedince (Kolmer et al. 2009; Aime a McTaggart 2020).

U *P. epilobii* se aecia objevují především na spodní straně jehličí. Jsou to nažloutlé podlouhlé útvary, dlouhé zhruba jeden milimetr, zobrazené na obrázku 3b. Napadené jehličí postupem léta často žloutne. Toto stadium se na jedli vyskytuje hlavně v létě (Atlas of Forest Pests 2025b). Na rozdíl od *Melampsorella*, která napadá kromě jehlic i kmen a větve, kde způsobuje zduření a narušuje vodivá pletiva, *P. epilobii* napadá pouze jehlice, je tedy méně škodlivá (Aime a McTaggart 2020; Solla et al. 2006).

#### 2.1.2.2 Rez jedlová

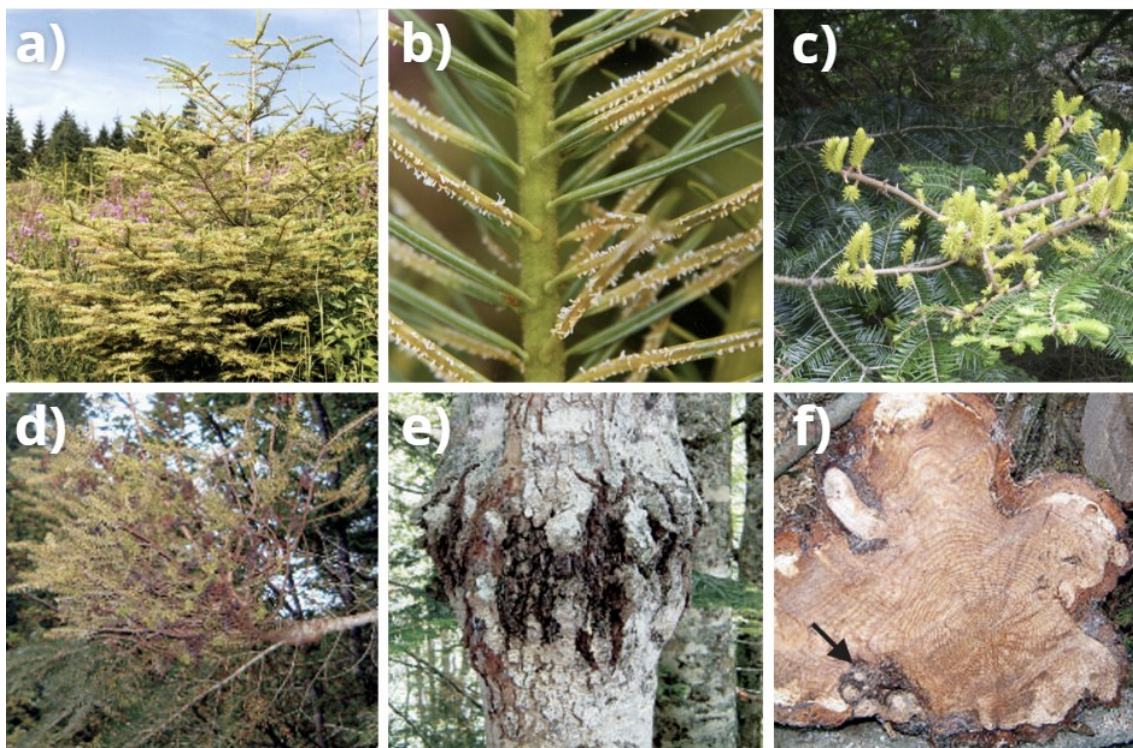
Rod *Melampsorella* je stejně jako *Pucciniastrum* z čeledi rzí *Pucciniastraceae*. Rez jedlová

(*Melampsorella caryophyllacearum* J. Schröt.) je česky také nazývána „Prášilka jedlová“. Vyskytuje se po celé Evropě a v severní Americe (Catalogue of Life 2025).

U *M. caryophyllacearum* je jedním z hostitelů jedle, zatímco druhým hostitelem jsou byliny z čeledi hvozdíkovitých (Atlas of Forest Pests 2025a). *M. caryophyllacearum* je výjimečná tím, že má systémové mycelium v kmeni aeciálního hostitele. To znamená, že toto mycelium houby je rozsáhle prorostlé vnitřními pletivy rostliny, včetně jejích vodivých pletiv, a šíří se do více orgánů hostitele, jako jsou kmen a větve. Takové systémové mycelium způsobuje metlovitost větvíček (Hunter 1948). Neprojevuje se tedy přímo na jehlicích jako u *P. epilobii*, ale spíše na zduřeninách a v hustých shlucích větvíček nazývaných „čarověníky“, které houba na jedli způsobuje. Tyto čarověníky, zobrazené na obrázku 4c a 4d, vypadají jako husté shluky deformovaných výhonků na větvích a pupenech. Jehličí je zde oproti zdravým větvím kratší, žlutavé a předčasně opadáva (Atlas of Forest Pests 2025a; Kolmer et al. 2009).

Kromě čarověníků se na kmenech a větvích objevují rakovinné nádory, jako například na obrázku 4e a 4f, které narušují strukturu dřeva a umožňují vstup pro další patogeny (Atlas of Forest Pests 2025a; Solla et al. 2006). Vnitřní poškození stromu, zahrnuje snížený radiální růst, tvorbu hypertrofovaných letokruhů a výskyt traumatických pryskyřičných kanálků v xylému. Tyto změny vedou k abnormálnímu růstu dřeva a snížení jeho vodivosti. Infikované stromy vykazují až o 20 % nižší radiální růst ve srovnání se zdravými stromy. Tato snížená vitalita ovlivňuje konkurenceschopnost stromů a složení lesního porostu (Solla et al. 2006). Pryskyřičné kanálky a další poškození narušují normální vodivost xylému. Zároveň je také vážně narušen transport fotosyntetických produktů, což je funkce primárně zajišťovaná floémem. V důsledku působení patogenu dochází k narušení buněk floému, který pak v nakažených větvích může zcela chybět. Poškození xylému i floému oslabují strom, činí ho náchylnějším k dalším patogenům a snižují kvalitu dřeva (Atlas of Forest Pests 2025a; Solla et al. 2006).





**Obrázek 4:**

- a)** Plodnice rzi vrbkové (*Pucciniastrum epilobii*) na spodní straně jehlic (foto: M. Zúbrik z Atlas of Forest Pests 2025b).
- b)** detail plodnic druhu *Pucciniastrum epilobii* na spodní straně jehlic (foto: M. Zúbrik).
- c)** Větve jedle napadené rží jedlovou (*Melampsorella caryophyllacearum*) s typickým znetvořením do podoby čarověníku (foto: Ján Guniš z Atlas of Forest Pests 2025a).
- d)** Detail čarověníku na jedli způsobený rží jedlovou (*Melampsorella caryophyllacearum*) (foto: Sánchez-Miranda a kol. 2006).
- e)** Detail kmene jedle bělokoré s nádorovými zduřeními, která jsou typická pro infekci rží jedlovou (*Melampsorella caryophyllacearum*) (foto: Sánchez-Miranda a kol. 2006).
- f)** Průřez kmenem jedle bělokoré (*Abies alba*) v místě zduření, kde je patrný excentrický růst vyvolaný rakovinovou lézí (šipka) způsobený *M. caryophyllacearum* (foto: Sánchez-Miranda a kol. 2006).

## 2.2. Další patogeny jedle bělokoré

### 2.2.1. Václavky

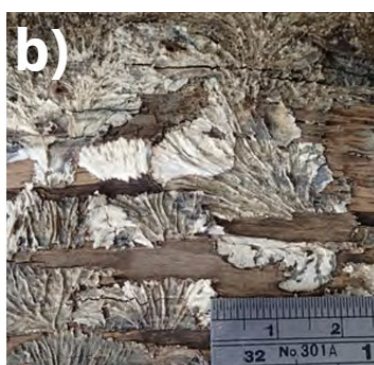
Kořenová hniloba václavek je celosvětově významná choroba způsobená houbami z rodu *Armillaria*, běžně známými jako václavky, které patří do čeledi *Physalacriaceae* (Baumgartner et al. 2011; Downer a Faber 2019).

Václavky jsou fakultativním nekrotrofem. Kolonizují živé kořeny, usmrcují hostitelská pletiva a následně využívají odumřelé pletivo saprofyticky. Jejich mycelium prorůstá do kambia a rozkládá vaskulární cévní pletiva, což vede k úhynu stromu (Baumgartner et al. 2011). Hlavní část houby je pod povrchem ve formě rozsáhlého mycelia. Mycelium tvoří bílé vějířovité povlaky pod borkou infikovaných stromů, které jsou zobrazené na obrázku 5a. Pod borkou jedle můžeme objevit i rhizomorfy, což jsou tmavá micelární vlákna a můžeme je najít i v půdě nebo na kořenech (Kim et al. 2022; Baumgartner et al. 2011).

Nejnápadnějším projevem napadení václavkami jsou hnědé plodnice (basidiokarpy), které jsou vidět na obrázku 5b, rostoucí na podzim v trsech u paty stromu či z kořenů u povrchu země (Downer a Faber 2019). Tyto plodnice se ovšem nemusí objevovat vždy, a proto je třeba vyhledávat i jiné symptomy (Downer a Faber 2019). Napadení václavkou se projevuje chřadnutím stromu. To může vést buď k náhlému úhynu s hnědnutím, avšak přetrváním jehlic na stromě, nebo postupnému chřadnutí, které se projevuje žloutnutím jehlic, řidnutím koruny, až odumíráním větví (Downer a Faber 2019). Včasné známky stresu, zahrnující změny v pigmentaci a obsahu vody v jehlicích, jsou ideálními cíli pro detekci pomocí optických metod dálkového průzkumu, které mohou identifikovat postižené stromy ještě před opadem jehlic (Oblinger et al. 2022). Pro odhalení napadení václavkami je však často stále třeba odkopání kořenového krčku. Zde pak můžeme vidět bílé vějířovité útvary, zřetelné právě pod borkou na spodních částech kmenů a na kořenech napadených stromů (Kim et al. 2022; Downer a Faber 2019). Václavky jsou schopny se na nového hostitele šířit bazidiosporami z plodnic i na větší vzdálenost, ale primárně se šíří vegetativně přímým kontaktem, a to právě přes rhizomorfy. Infekce však může nastat i bez přítomnosti rhizomorf, při přímém kontaktu náchylného stromu s myceliem (Baumgartner et al. 2011).

Rod *Armillaria* zahrnuje mnoho patogenních druhů napadajících stovky druhů stromů po celém světě, včetně jedle (Kim et al. 2022). V Evropě jsou mezi agresivními primárními patogeny hlavně václavka smrková (*Armillaria ostoyae* [Romagn.] Herink) a václavka obecná (*Armillaria mellea* [Vahl.] P. Kumm.), která však způsobuje škody hlavně u listnatých stromů. Mnoho druhů václavek, jako například václavka hlíznatá (*Armillaria gallica* Marxmüller & Korhonen), jsou spíš oportunistické a nejsou příliš škodlivé, naopak jsou nám jakožto saprofyt prospěšné (Dálya et al. 2019; Kim et al. 2022). Pro jedli bělokorou jsou významné především již zmíněná václavka smrková a václavka cibulkotřenná (*Armillaria cepistipes* Velen.), jež jsou druhy, které se vyskytují na lokalitách s velmi podobnou ekologickou valencí, jako právě jedle bělokorá (Jankovský 2003). Václavka smrková je označována za hlavní příčinu kořenových hnilob jehličnatých stromů v Evropě, s největším rizikem ve schopnosti napadat i zdravé stromy (Kim et al. 2022). Určení konkrétního druhu václavky je kvůli značné komplexnosti morfologických znaků velmi obtížné a proto se v posledních letech stále častěji přistupuje k využití molekulárních analýz (Dálya et al. 2019; Kim et al. 2022).

Václavky jsou velmi odolné. Jejich vegetativní stádium je, na rozdíl od ostatních basidiomycetů, diploidní. Mají široký okruh hostitelů a dokážou na místě přetrvávat po desetiletí (Kim et al. 2022; Ferguson et al. 2003). Prevencí je výsadba smíšených porostů, kde nebude mít jeden patogenní druh tak snadné se šířit na příbuzné hostitele (Dálya et al. 2019). Stromy jsou náchylné při mechanickém poškození kořenů, zhutňování půdy, či nedostatku vody (Downer a Faber 2019). Se změnou klimatu se dá očekávat zvýšení aktivity václavek, což může dále ohrozit stabilitu jehličnatých porostů (Dálya et al. 2019). Přestože se mycelium houby šíří pod povrchem maximálně tři metry za rok, mohou dlouhodobým růstem vzniknout i tak rozsáhlé útvary, jako byl nalezen v Oregonu, kde se nachází geneticky identické mycelium václavky smrkové o rozloze 965 ha (Ferguson et al. 2003). Zajímavostí u václavek je jejich schopnost bioluminiscence, nebo že jsou některé druhy václavek známy jako jedlé „medové houby“ (Baumgartner et al. 2011).



**Obrázek 5:**

**a)** Plodnice václavek rostoucí v trsech (foto: J. Turney z Downer a Faber 2019)

**b)** Myceliové vějíře houby václavek pod kůrou infikovaného stromu (foto: I. Lacan z Downer a Faber 2019)

### 2.2.2. Kořenovníky (červená hniloba)

Kořenovník je dřevokazná chorošovitá houba s kosmopolitním rozšířením. Častěji napadá stromy oslabené suchem či větrem. Nejčastěji se vyskytuje v lesích severního mírného pásu. V Česku má na svědomí významné škody především na smrkových porostech. Náchylné k napadení jsou nejvíce porosty na bývalých zemědělských půdách (Soukup 2011).

Kořenovník napadá hlavně kořenový systém a později se šíří do kmene (Soukup 2011). Zpočátku je infikované dřevo světle žlutavé a pevné, avšak postupně se jeho zbarvení mění do červenohnědé a dřevo měkne. Této fázi se vžil název červená hniloba (Asiegbu a Kovalchuk 2022). Dřevo se rozpadá od centra a pak postupuje podle letokruhů. V pokročilé fázi je dřevo zcela rozložené, světle hnědé až žluté s černými tečkami (Soukup 2011).

Tím, že červená hniloba rozkládá dřevo zevnitř kmene, zůstává poškození dlouho skryté. Na zdravé stromy se kořenovníky myceliem přenáší přímým kontaktem kořenovými srůsty (University of California 2021; Soukup 2011). Dokud se neobjeví viditelné příznaky, jako pryskyřice, řidnutí koruny, nebo plodnice (obrázek 6a), které jsou častější na pařezech než na

živých stromech, tak se houba šíří pod zemí kořenovými srůsty. To má za následek, že stromy umírají skupinově v ohniscích (Soukup 2011). Právě jedle často uhynou několik let po infekci kořenovníkem, zatímco napadený smrk přežívá s nákazou déle. Napadené stromy jsou navíc náchylné k vývratům, či zlomům při silném větru (University of California 2021; Soukup 2011). Vzhledem k tomu, že kořenovník rozkládá dřevo zevnitř, mohla by se optická detekce zaměřit na sekundární příznaky stresu, jako změny v obsahu vody v jehlicích, které se projeví ve spektrální odrazivosti dříve než viditelné symptomy.

Kořenovník není jednotný druh, ale zahrnuje tři rozlišitelné druhy, které bylo možné pozorovat i v Česku. Riziko pro jedle představuje především méně hojný kořenovník jedlový (*Heterobasidion abietinum* Niemelä & Korhonen), který má drobné póry a jemnou plst' na okraji klobouku. Z pohledu lesního hospodářství jsou důležitějšími zástupci rodu kořenovník vrstevnatý (*Heterobasidion annosum* [Fr.] Bref.), který roste na borovicích a listnatých stromech a kořenovník smrkový (*Heterobasidion parviporum* Niemelä & Korhonen), který upřednostňuje smrk (Soukup 2011).

Nejdůležitějším krokem v ochraně proti kořenovníku je prevence, při které se využívá smíšená druhová skladba a další lesopěstební opatření. Pokud se patogen již na lokalitě nachází je vhodné přistoupit k asanaci infikovaných jedinců a odstranění čerstvých pařezů. V některých případech je možné využití chemických přípravků, například aplikace fungicidů na čerstvé pařezy (University of California 2021; Soukup 2011).

### 2.2.3. Pevník krvavějící

Pevník krvavějící (*Stereum sanguinolentum* [Alb. & Schwein.] Fr.) je houba, která napadá především jehličnaté stromy, včetně jedle bělokoré. Jedle bělokorá je k tomuto patogenu však podstatně méně náchylná než smrk ztepilý (Metzler et al. 2012).

Pevník krvavějící je dřevokazná houba napadající především bělové dřevo odumřelých, padlých, ale i poraněných živých jehličnatých stromů, vzácněji i tvrdého dřeva. Preferuje jehličnany jako smrk a jedli. Pevník se šíří bazidiosporami roznášenými větrem, zejména za deštivého a chladného počasí (Callan 2024). Spory infikují dřevo skrz otevřené rány, způsobené těžbou, prořezáváním, požáry, vichřicemi, nebo loupáním zvěří a jsou nejúspěšnější, pokud povrch hostitele není již kolonizován jinými organismy (Čermák et al. 2004; Callan 2024; Bledý et al. 2024). Právě okus zvěří je jedním z nejvíce limitujících faktorů pro obnovu a prosperitu jedle bělokoré (Bledý et al. 2024).

První známkou nákazy je světle žlutá až červenohnědá skvrna v jádrovém dřevě, způsobená

fungálními pigmenty a rozkladnými produkty. Pevník krvavějící rozkládá celulózu i lignin, čímž způsobuje bílou hnilobu, při níž se dřevo stává měkkým, drolivým a nakonec vláknitým. Plodnice, které jsou vidět na obrázku 6b, se vyvíjejí na ranách stromů a dřevěných zbytcích, přičemž jsou charakteristické svým zbarvením do krvavě červené barvy při poranění, díky čemuž je houba známá jako „krvácející houba“ (Callan 2024; Čermák et al. 2004).

Hniloba na jedli bělokoré je však častěji spojována s jinými houbami, jako je kořenovník jedlový, který proniká přes poraněnou kůru. Tyto houby, na rozdíl od pevníku, představují pro jedli významnější riziko (Bledý et al. 2024).

#### **2.2.4. *Neonectria neomacrospora***

*Neonectria neomacrospora* C. Booth & Samuels způsobuje rakovinné léze na větvích a kmenech, tok pryskyřice a odumírání částí stromů nad postiženými oblastmi. Infekce může začít na jehlicích, výhonech nebo starých šiškách. Poprvé byl tento patogen zaznamenán v Norsku v roce 2008 a od té doby se rozšířil do dalších evropských zemí. Napadá širokou škálu druhů jedlí. Je přizpůsobivý klimatu, a byl dokonce již zaznamenána i v Severní Americe a Číně. S největší pravděpodobností se šíří vzduchem prostřednictvím konidií rozptýlených deštěm a na delší vzdálenosti pak askosporami nesenými větrem. V pozdním podzimu a v zimě, za vlhkých podmínek, se na napadených částech mohou objevit malé kulaté červené plodnice. V současné době se jeho management zaměřuje především na hygienická a sanační opatření. Napadené větve se odstraňují, aby se minimalizovalo další šíření (González et al. 2021).

#### **2.2.5. *Gremmeniella abietina***

Jedním z možných patogenů jedle je i *Gremmeniella abietina* (Lagerb.) M. Morelet (Mauri et al. 2016). Jedná se o jednobuněčnou houbu, která způsobuje především odumírání výhonů, ale napadá i dospělé stromy. K náchylným druhům patří především druhy borovic, potom také smrky či modřiny (*Larix* Mill.) (Romeralo et al. 2023). Charakteristické příznaky infekce zahrnují oranžové až hnědé zbarvení bází jehlic, jako na obrázku 6c a 6d, které se postupně šíří k jejich špičkám, a následný opad. Na napadených výhonech se objevují pryskyřičné léze a pupeny se často neotevírají. Napadení začíná v dolní části koruny a šíří se nahoru (EPPO 2023). Kmenové rakoviny typické pro *G. abietina* jsou sice u jedle méně časté, ale na kmenech se mohou objevit léze (Kaitera et al. 2015). *G. abietina* dokáže přežít v bezpříznakových výhonech po dobu až osmi let a za příznivých podmínek, jako jsou chladná a vlhká jara, se rychle šíří (EPPO 2023).

Životní cyklus *G. abietina* trvá dva roky. Počáteční infekce se odehrává na jaře, kdy se vyvíjejí



pupeny. Konidie nebo askospory pronikají do apikálních pupenů a vyvíjejících se výhonů. Houba se agresivně rozvíjí během následující zimy, kdy je strom v klidovém stavu. Pyknidie, se vyvíjejí během prvního a druhého roku symptomatické infekce, objevují se na bázi odumřelých jehlic nebo na mrtvých špičkách výhonů. Pyknidie uvolňují konidie, které jsou hlavním zdrojem infekce a šíří se především vodou. Askospory se uvolňují v létě a jsou roznášeny větrem na delší vzdálenosti. Infekce může probíhat i bez zjevných symptomů. Maximální uvolňování spor probíhá přibližně při 17 °C a za přítomnosti vody. V případě napadení se doporučuje odstranění nemocných stromů a spálení infikovaných zbytků, aby se minimalizovalo riziko reinfekce. Ve školkách je možné využití fungicidů (EPPO 2023).

Detekce *G. abietina* se provádí vizuální kontrolou příznaků a laboratorním vyšetřením. V přítomnosti zralých plodnic lze houbu identifikovat na místě. V opačném případě se vzorky inkubují ve vlhké komoře nebo se pěstují na kultivačních médiích k vyvolání sporulace, což umožňuje morfologické určení. K přesnější identifikaci biotypů, které se morfologicky neliší, se používají molekulární metody, jako je PCR se specifickými primery (EPPO 2023). Toto jsou všechno složité a finančně nákladné metody, navíc v klidové fázi může *G. abietina* asymptomaticky přetrvávat v hostitelských tkáních a šířit se zdánlivě zdravým rostlinným materiálem (EPPO 2023). Zde se nabízí potenciál pro detekci pomocí spektroskopie, která by mohla pomoci identifikovat infikované rostliny levněji a dříve, než se objeví viditelné symptomy.



**Obrázek 6:**

a) Plodnice kořenovníku vrstevnatého na bázi pařezu smrku (foto: LOS VÚLHM, F. Soukup)

b) Plodnice pevníku krvavějšího na kmeni (foto: B.E. Callan, Natural Resources Canada)

c) Jedle silně napadená houbou *Gremmeniella abietina*, která způsobuje odumírání výhonů a jehlic (foto: Nuri Kaan Ozkazanc)

d) Detail napadené jehlice s apothecii *Gremmeniella abietina* (foto: Nuri Kaan Ozkazanc)

#### 2.2.6. Korovnice rodu *Dreyfusia*

Korovnice (čeledi *Adelgidae*) jsou skupinou mšic, které se živí výhradně na jehličnatých dřevinách. V Česku se vyskytuje přibližně 15 druhů (Kapitola 2003). I když se jedná o zcela odlišného škůdce v porovnání s houbovými patogeny, je jeho charakteristika v předloženém textu žádoucí. Jeho výskyt totiž často bývá simultánní s vybranými zástupci sypavek a rzí.

Korovnice poškozují dřeviny sáním rostlinných šťáv, vpichem narušují pletiva a vylučují toxické sliny. Tím strom nejen oslabují, ale i usnadňují vstup houbovým patogenům. Mohou způsobovat změny zbarvení a deformaci jehličí, které se stáčí dolů, praskliny v kůře, tvorbu hálek na smrku a produkci voskových chomáček. Korovnice hojně vylučují sladkou medovici, na které se následně rozvíjejí i huby známé jako černě, což dále zhoršuje zdravotní stav stromu (Kapitola 2003; Liška et al. 2009).

Přítomnost korovnic je možné poznat podle bílých voskových chomáček tvořících se na povrchu kůry napadeného stromu. Struktury připomínají vat, jak je vidět na obrázku 7a, a jsou patrné na kmenech i silných větvích. Vznikají sekrecí vosku z tělních žláz. Množství vosku se zvyšuje s vývojem jedince, přičemž nejvyšší produkci vykazují starší larvy a dospělé samice (Kapitola 2003).

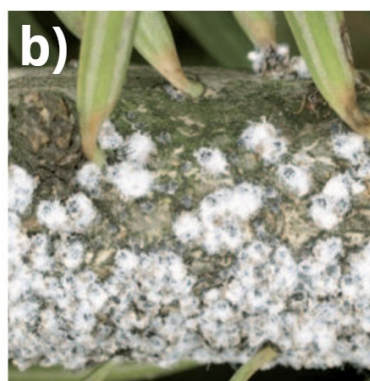
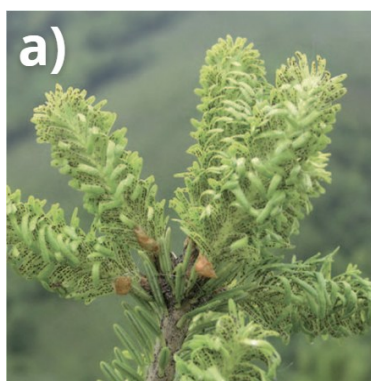
Korovnice se vyvíjejí ve třech stádiích, tedy jako vajíčko, larva a dospělec. Vajíčka kladou samice ve velkém množství, larvy procházejí několika vývojovými fázemi a dospělci jsou obvykle drobní. Během životního cyklu se u korovnic objevuje až šest morfologicky odlišných forem s různými funkcemi. Charakteristická bílá vosková vlákna, vylučují zejména starší larvy a dospělé samice. Samci se vyskytují pouze v jedné generaci, jinak převažují samice. Úplný cyklus zahrnuje střídání primárního (což bývá téměř vždy smrk) a sekundárního hostitele. Některé druhy mají zkrácený cyklus a žijí pouze na jednom hostiteli, často partenogeneticky. U korovnice jedlové je běžný výskyt formy *sistens*, která prezimuje a trvale žije na kůře jedlí (Kapitola 2003).

Nejvážnějším škůdcem jedlí v Česku je korovnice kavkazská (*Dreyfusia nordmannianae* Eckstein, 1890), která napadá mladé jedle a může vést k jejich odumírání, obzvláště při opakovaném výskytu (Kapitola 2003). Korovnice jedlová (*Dreyfusia piceae* Ratzeburg, 1844) se vyskytuje převážně na starších jedlích. Nepotřebuje primárního hostitele a rozmnožuje se pouze partenogeneticky, tedy bez samců. Oproti korovnici kavkazské je její škodlivost nižší, a i při silnějším výskytu většinou neohrožuje životaschopnost stromu. Tyto dva druhy se dají odlišit právě podle již zmíněných chomáček, které larvy tvoří na kůře stromu. Korovnice kavkazská vytváří pravidelné okrouhlé chomáčky, zatímco korovnice jedlová tvoří nepravidelné protáhlé chomáčky (Liška et al. 2009).

Při napadení jedlí korovnicemi se larvy rozlišují dle místa sání. Larvy z linie *progrediens* sají na jehlicích. To vede k deformacím a stáčení jehlic, které je vidět na obrázku 7b. Tyto larvy korovnice kavkazské jsou patrné jako tmavé tečky na spodní straně deformovaných jehlic.

Napadené jehlice často reznou a opadávají. Druhá skupina larev, linie sistens, saje na kůře větví a kmínků. Zpočátku jsou nepozorovatelné, ale po klidové fázi vytvářejí voskové výměšky (Liška et al. 2009).

Preventivní ochrana zahrnuje pěstební opatření. Například obnovu jedlových porostů přirozeným zmlazením a pěstování jedle na vhodných stanovištích, v optimálním zápoji a pod ochranou mateřského porostu či zástinu jiných dřevin. Využít lze i mechanické metody, jako je odřezávání hálek nebo odstraňování napadených stromků (Kapitola 2003; Liška et al. 2009). Chemické ošetření by bylo zátěží pro životní prostředí. Pokud by se použilo, vyžaduje přesné načasování, protože korovnice jsou často chráněny voskovými vlákny a insekticidy na vajíčka neúčinkují. Ideální je aplikace krátce po vyrašení výhonků, kdy larvy ještě nejsou kryté voskovými vlákny. Podzimní ošetření je doporučeno pro menší dopad na přirozené nepřátele (Liška et al. 2009).



**Obrázek 7:** Poškození jedle korovnicemi rodu *Dreyfusia*  
**a)** Výhony jedle s deformovanými a zkroucenými jehlicemi, což je důsledek sání larev korovnice kavkazské (*Dreyfusia nordmannianae*) a linie larev na spodní straně jehlic Převzato z: Liška et al. (2009).  
**b)** Voskovité chomáčky, tvořené voskovými vlákny, kryjící larvy a dospělé korovnice rodu *Dreyfusia* na borci v sacím stádiu prodregiens Převzato z: Liška et al. (2009).

### 3. Potenciál optických vlastností jehlic pro detekci patogenů jedle

Tradiční metody diagnostiky patogenů jehličnanů, jako jsou terénní průzkumy a mikroskopie, zůstávají běžnou součástí lesnické praxe. Terénní průzkumy umožňují identifikaci symptomů přímo v porostech. Mikroskopická analýza infikovaných pletiv poskytuje detailní pohled na strukturu patogenu a může sloužit k předběžnému určení původce onemocnění, je ale časově náročná, finančně nákladná a obtížně použitelná u většího počtu vzorků. Tyto tradiční přístupy se většinou využívají až po vzniku viditelných příznaků (Bledý et al. 2024). To vytváří prostor pro využití metod využívajících optická data získaná nedestruktivním dálkovým průzkumem. Tyto postupy mohou umožnit dřívější zachycení změn ve stavu porostů.

#### 3.1. Optická detekce a dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) získává informace o objektech a jevech na povrchu planety, a to bez fyzického kontaktu s nimi. Díky tomu se dá DPZ využívat na velkých plochách. Jedná se navíc o metodu nedestruktivní (Cotrozzi 2022). Optické metody DPZ zahrnují postup od sběru



dat až po jejich analýzu. Sběr dat se provádí záznamem elektromagnetického záření, a to buď přímým měřením v terénu na jehlicích pomocí ručních přístrojů, nebo snímáním z výšky pomocí bezpilotních letounů, letadel či satelitů (Kupková et al. 2017). Měří se především odražené záření, které je závislé na fyzikálních a chemických vlastnostech vegetace, jako je vnitřní struktura listu, pigmentové složení nebo obsah vody (Gitelson et al. 2003; Gates et al. 1965). Po sběru následuje zpracování dat, podle způsobu záznamu se dělají atmosférické a geometrické korekce pro odstranění zkreslení způsobených atmosférou a geometrií snímání (Kupková et al. 2017). Z korigovaných dat se poté extrahují spektrální křivky a odvozují se z nich spektrální vegetační indexy, které slouží jako ukazatele stavu vegetace. Pro hlubší analýzu a kvantifikaci fyziologických změn se využívají pokročilé algoritmy pro zpracování obrazu a rozpoznávání vzorů, včetně metod strojového učení, které umožňují včasnou detekci stresu nebo jiných anomálií (Verrelst et al. 2020).

Cílem optických metod dálkového průzkumu je monitorování ekosystémů, např. lesů a detekce stresu nebo chorob na vegetaci, často ještě před tím, než jsme schopni tyto projevy vidět pouhým okem (Stone a Mohammed 2017). Optické metody se běžně používají v zemědělství a jsou už využívány i pro monitorování chorob v lesnictví (Kogut 2024). Tyto metody jsou obzvláště výhodné pro detekci širokého spektra patogenů, jako jsou rzi, HNB nebo kořenové hniloby, u kterých jsou včasné vizuální příznaky často nenápadné. U jedle by mohla optická detekce pomoci nejen hledat a monitorovat stromy již napadené patogeny, ale i identifikovat stromy oslabené abiotickými faktory, a tím předpovídat jejich náchylnost k infekci oportunistickými patogeny. To může mít význam pro patogeny, jako je například *Gremmeniella abietina*, která může dlouhodobě přetrvávat v bezpříznakových výhonech (EPPO 2023).

### 3.2. Spektrální vlastnosti vegetace

Spektrální křivka odrazivosti popisuje odrazivost listoví v závislosti na vlnové délce (Kupková et al. 2017). Při dopadu záření na vegetaci může dojít k jeho odrazu, absorpci nebo transmisi (průchodu) skrz pletiva, jak je znázorněno na obrázku 8a a 8b. Vegetační spektroskopie se většinou soustředí na měření odraženého záření, které odráží vnitřní stavbu jehlice, její chemické složení nebo množství obsažené vody (Cotrozzi 2022). Různé druhy rostlin a jejich listová struktura se liší v odrazivosti světla, a proto mají i svou specifickou spektrální křivku (Gitelson et al. 2003). Jehličnany, vystavené stresorům, jako je sucho nebo napadení škůdci, procházejí řadou fyziologických a biochemických změn, které ovlivňují jejich celkovou vitalitu i optické vlastnosti. Tyto změny často slouží jako včasný indikátor stresu, předcházející viditelným symptomům (Abdullah et al. 2018).

Měření probíhá v různých spektrálních pásmech, z nichž každé poskytuje specifické informace o vegetaci (Cotrozzi 2022). Při optické detekci u vegetace se většinou měří v rozmezí 350 až 2500 nm vlnové délky elektromagnetického spektra, kde rozlišujeme jednotlivá pásma: viditelnou oblast (VIS „visible spectrum“: 400 až 700 nm), blízkou infračervenou oblast (NIR „near infrared“: 700 až 1200 nm) a krátkovlnnou infračervenou oblast (SWIR „short-waveinfrared“: 1200 až 2500 nm) (Kupková et al. 2017).

Viditelná oblast (VIS), zahrnuje modrou (přibližně 400 až 500 nm), zelenou (přibližně 500 až 600 nm) a červenou (přibližně 600 až 700 nm) část spektra. Ve VIS dochází k silné absorpci světla chlorofylem a a b a dalšími rostlinnými pigmenty. Zdravá vegetace pohlcuje většinu modrého a červeného světla pro fotosyntézu, zatímco zelené světlo je odraženo a propuštěno, což dává rostlinám jejich typickou barvu. Jakýkoli pokles obsahu chlorofylu, jako v důsledku stresu, vede ke snížení absorpce a zvýšení odrazivosti v červené a modré oblasti (Kupková et al. 2017). Tyto spektrální změny, charakteristické pro zdravou i stresovanou vegetaci, jsou názorně popsány na spektrální křivce odrazivosti a jejích derivacích v obrázku 8b.

Blízká infračervená oblast (NIR) je charakteristická vysokou odrazivostí zdravé vegetace. Tato vysoká odrazivost je způsobena vnitřní buněčnou strukturou listů a přítomností mezibuněčných prostor vyplněných vzduchem. Jakékoli poškození buněčné struktury způsobené stresem suchem nebo patogeny, vede k poklesu odrazivosti v NIR (Kupková et al. 2017; Gates et al. 1965).

Červený okraj neboli „red edge“, je charakteristická oblast ve spektru odrazivosti listů rostlin, nacházející se přibližně mezi 680 a 750 nanometry. V této oblasti je strmý nárůst odrazivosti z nízkých hodnot v červené části viditelného spektra (kde chlorofyl silně absorbuje světlo) na vysoké hodnoty v blízké infračervené oblasti (kde chlorofyl absorbuje světlo minimálně). Posun inflexního bodu červeného okraje směrem k delším vlnovým délkám je raným a citlivým indikátorem poklesu chlorofylu, a tedy i nástupu stresu nebo napadení patogenem (Gitelson et al. 2003; Kupková et al. 2017). Oblast červeného okraje (692 až 706 nm) byla například využita ve studii Bijou et al. (2025) k včasné detekci napadení lýkožroutem na území Krkonošského národního parku.

V krátkovlnné infračervené oblasti (SWIR) se odrazivost snižuje v důsledku silné absorpce vody a dalších biochemických látek, jako jsou lignin, škrob, celulóza, bílkoviny a fenoly. Změny v obsahu vody jsou v této oblasti velmi dobře detekovatelné. Pozdní stadia chorob, která často souvisí s dehydratací pletiv a výraznou ztrátou vody, se většinou projevují změnou odrazivosti

právě ve SWIR oblasti (Cotrozzi 2022).

### **3.2.1. Vliv chemického složení na odrazivost vegetace**

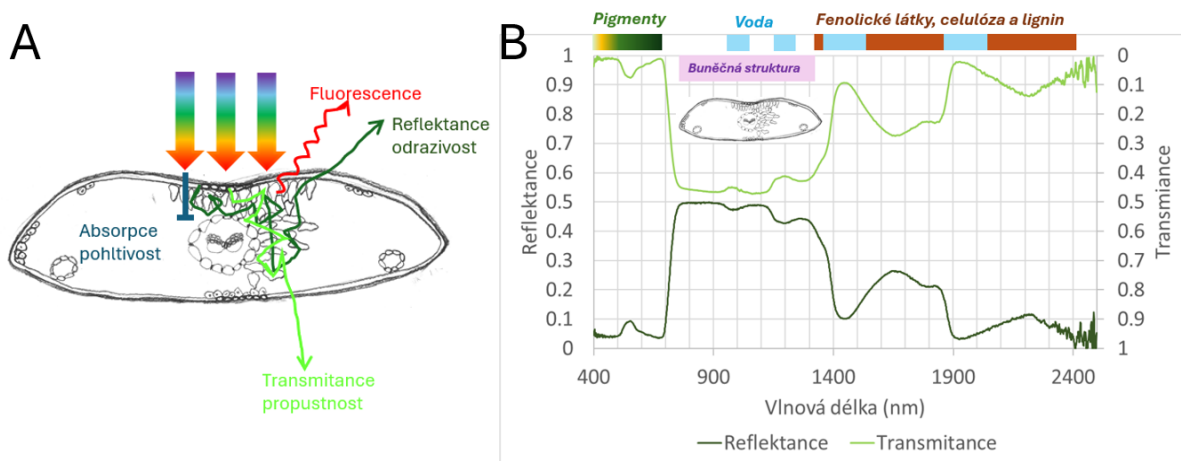
Hlavním fotosyntetickým pigmentem v absorpci slunečního záření je chlorofyl a a b. Chlorofyl absorbuje světlo v modré části viditelného spektra a v červené části.

Obsah chlorofylu v listech vypovídá o fyziologickém stavu rostlin a jejich primární produkci. Množství absorbovaného slunečního záření listem je přímo úměrné obsahu fotosyntetických pigmentů. Obsah chlorofylu tedy přímo určuje fotosyntetický potenciál a primární produkci (Gitelson et al. 2003). Kromě toho chlorofyl nepřímo vypovídá o stavu některých živin v rostlině, protože velká část dusíku v listech je vázána v chlorofylu. Snížení chlorofylu v listech je typickým příznakem stresu nebo stárnutí – senescence. To vede ke změně barev listu a změně odrazivosti zejména ve viditelném spektru. V oblastech zelené odrazivosti (520 až 580 nm) a červeného okraje (kolem 700 nm) se tyto změny dají přesně detekovat, protože tam odrazivost lineárně koreluje s obsahem chlorofylu (Gitelson et al. 2003).

Kromě chlorofylu hrají v odrazivosti listů roli i další pigmenty, především karotenoidy a xantofyly. Tyto pomocné pigmenty mají tu vlastnost, že rozšiřují spektrum absorpce napříč viditelnou oblastí. Zatímco chlorofyl a a chlorofyl b silně absorbují v modré (kolem 445 nm) a červené (kolem 645 nm) oblasti, karotenoly a xantofyly absorbují primárně v modré oblasti. Jejich přítomnost vede k rozšíření absorpčního spektra zejména v modré a zelené části viditelného světla. Například na panašovaném listu břečťanu (*Hedera helix* L.), který v bílých oblastech postrádá chlorofyl, je vidět velmi malá absorpce v zelené a červené oblasti, přičemž absorpce roste pouze v modré oblasti díky protochlorofylu (Gates et al. 1965). To naznačuje, že i když nejsou hlavním fotosyntetickým pigmentem, mají karotenoidy a xantofyly vliv na celkovou absorpci a odrazivost listu, zejména v případě nedostatku chlorofylu (Gates et al. 1965).

### **3.2.2. Vliv vnitřní struktury listu a obsahu vody na odrazivost vegetace**

Vnitřní buněčná struktura listu a mezibuněčné prostory ovlivňují odrazivost, zejména v NIR oblasti. Jak je zobrazeno na nákresu v obrázku 8a, světlo vstupující do listu se opakovaně odráží na rozhraních mezi buněčnými stěnami a mezibuněčnými prostory. Změna indexu lomu z vody na vzduch zde umožňuje efektivní vnitřní odraz (Zabihi et al. 2021; Gates et al. 1965).



**Obrázek 8:** Náčrt řezu jehlicí jedle (A) znázorňuje základní principy optické detekce, konkrétně absorpci, reflektanci, transmitanci a fluorescenci světla ve vztahu k rostlinným pletivům. Graf vpravo (B) zobrazuje typické spektrální křivky reflektance (tmavě zelená) a transmitance (světle zelená) pro zdravou vegetaci v rozsahu vlnových délek od 350 do 2500 nm. Absorpce světla chlorofylem probíhá ve viditelné oblasti (pigmenty), vysoká odrazivost v NIR je dána buněčnou strukturou a absorpce v krátkovlnné infračervené oblasti je spojena s obsahem vody a strukturních látek (fenolické látky, celulóza a lignin). Zdroj: Poskytnuto školitelkou Dr. Lhotákovou

Silná absorpce vody ve SWIR oblasti výrazně snižuje odrazivost. Chloroplasty, obsahující chlorofyl, a grana uvnitř chloroplastů mají rozměry srovnatelné s vlnovou délkou světla. To může způsobovat větší rozptyl světla vstupujícího do chloroplastů. Silná absorpce vody ve SWIR oblasti je patrná i na spektrální křivce v obrázku 8b. Listy mají vysokou propustnost a odrazivost v NIR, což snižuje absorpci slunečního záření a zabraňuje přehřívání (Gates et al. 1965).

Zajímavostí je, že i přes tuto adaptaci teploty listů na slunci často přesahují teplotu vzduchu a mohou dosáhnout kritických 50 °C, což je blízko bodu denaturace rostlinných proteinů (Gates et al. 1965). Dlouhovlnné infračervené záření (nad 2500 nm) rostliny opět účinně absorbují, ale zároveň jsou efektivními zářiči, což jim umožňuje chlazení sáláním. Přibližně tři čtvrtiny pohlcené energie jsou vyzářeny a zbytek je odveden konvekcí a využit na skupenskou přeměnu vody při transpiraci (Gates et al. 1965). Poškození buněčné struktury, způsobené stresem nebo patogeny, vede k poklesu odrazivosti v NIR (Stone a Mohammed 2017). Tenčí listy vykazují v NIR vyšší propustnost než odrazivost, zatímco u tlustších listů se odrazivost zvyšuje a kompenzuje pokles propustnosti. Jehličnaté rostliny mají obecně vyšší absorpci v celém viditelném a NIR spektru, avšak jejich válcovitá geometrie jehlic snižuje efektivní absorpční plochu pro sluneční záření (Gates et al. 1965).

### 3.2.3. Další faktory ovlivňující odrazivost vegetace

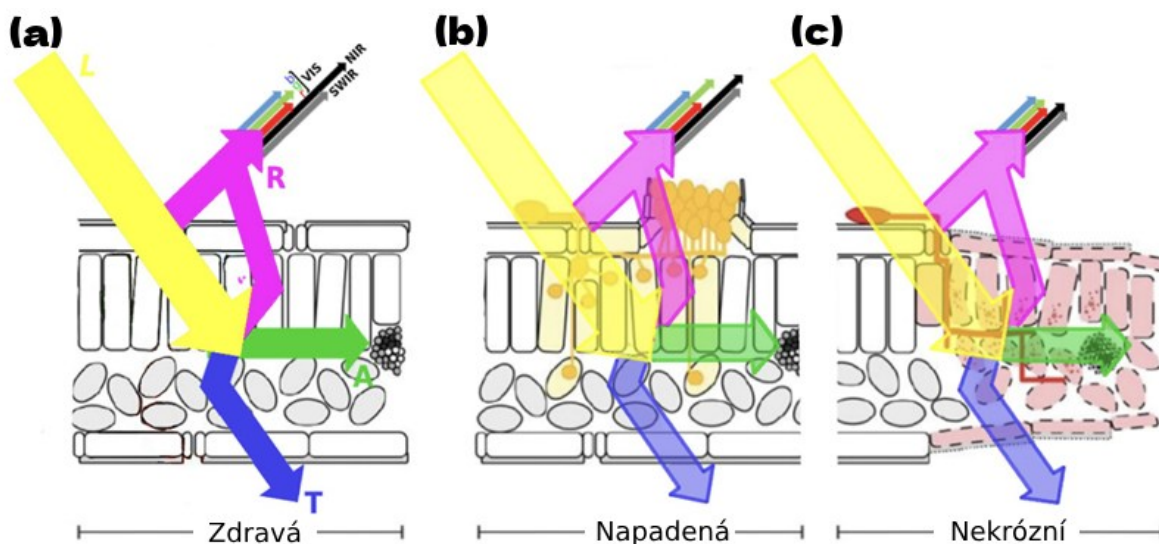
Spektrální křivku vegetace ovlivňuje také aklimace na ozáření. Listy rostoucí ve stínu se liší od listů vystavených plnému slunci z hlediska obsahu pigmentů, tloušťky a vnitřní struktury, což

ovlivňuje jejich spektrální odrazivost (Gitelson et al. 2003; Gates et al. 1965; Zabihi et al. 2021). Například u listů s nižším obsahem chlorofylu (typicky stinné listy nebo listy pod stresem) dochází k saturaci odrazivosti v modré a červené oblasti při nižších koncentracích chlorofylu než u listů s vyšším obsahem chlorofylu (Zabihi et al. 2021).

Dalším faktorem který ovlivňuje spektrální odrazivost jehlice je stáří. Během celého vývoje rostliny dochází k přirozeným změnám ve fyziologickém stavu a chemickém složení listů, což se promítá do jejich optických vlastností. Odlišnosti v odrazivosti jsou patrné mezi mladými, nově rašícími jehlicemi, zralými a plně vyvinutými listy a nakonec i senescentními jehlicemi (Gitelson et al. 2003). Například u jehličnanů, jako je smrk ztepilý, se optické vlastnosti listoví znatelně liší v závislosti na jejich stáří a to napříč stanovišti (Lhotáková et al. 2021). U jehlic odebraných na konci vegetační sezóny dochází k postupné akumulaci fotosyntetických pigmentů v průběhu několika let. Obsah pigmentů u starších jehlic může zůstat konstantní, nebo se vlivem dlouhodobého působení stresových faktorů může mírně snižovat (Kupková et al. 2017). Každá tato vývojová fáze má specifické spektrální charakteristiky. Proto je důležité zohlednit načasování sběru dat pro přesnou detekci změn ve fyziologické vitalitě vegetace.

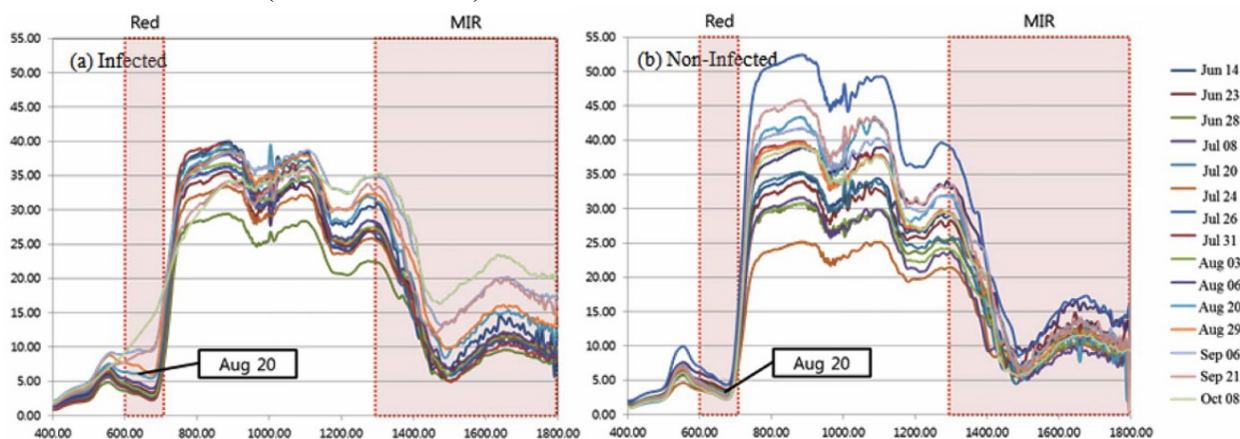
#### **3.2.4. Projevy stresu na spektrálním profilu listu**

Napadením nebo nekrózou listu se poměr mezi odraženým, propuštěným a absorbovaným světlem liší. U zdravých jehlic (obrázek 9a) je tato interakce charakteristická specifickým spektrálním profilem. Avšak při nástupu patogeneze, ať už biotrofního (obrázek 9b) nebo nekrotrofního (obrázek 9c) charakteru, dochází k měřitelnému rozdílu odraženého světla. Tyto odlišnosti, na obrázku vizuálně naznačené změnou délky a intenzity šipek odraženého záření, jsou přímým důsledkem ovlivnění strukturálních a chemických vlastností jehlice. Například snížení obsahu chlorofylu, nebo poškození buněčné struktury, vede ke změně absorpce a následné zvýšené odrazivosti v oblastech, kde by zdravý list světlo pohlcoval, zatímco snížení odrazivosti se projeví v oblastech, kde by normálně docházelo k vysoké reflexi, jako je blízká infračervená oblast (Cotrozzi 2022).



**Obrázek 9:** Základní principy interakce dopadajícího světla (L) dopadajícího na povrch vegetace, které může být odraženo (R; difúzní, zrcadlové), propuštěno (T; s refrakcí) nebo absorbováno (A). Během patogeneze, listové patogeny, například biotrofní (b) a nekrotrofní (c), ovlivňují strukturní a chemické vlastnosti listu, čímž se výrazně mění jeho odrazivost a další optické vlastnosti ve VIS, NIR a SWIR spektru. Upraveno a převzato z: (Cotrozzi 2022)

Jak už bylo zmíněno, projevy stresu na optickém spektru vegetace se liší v čase. I přes tyto časové rozdíly lze však stále pozorovat rozlišitelné změny mezi infikovanými a zdravými stromy. Následující graf (obrázek 10) ilustruje charakteristické rozdíly ve spektrální odrazivosti mezi infikovanými a neinfikovanými stromy borovice Thunbergovy (*Pinus thunbergii* Parl.) hád'átkem borovicovým (*Bursaphelenchus xylophilus* [Steiner & Buhrer, 1934]) v závislosti na datu měření v průběhu vegetačního období. U infikovaných stromů jsou patrné změny v odrazivosti v červené (600 nm až 700 nm) a střední infračervené (1400 nm až 1500 nm) oblasti již během dvou měsíců po inokulaci, zatímco u neinfikovaných stromů zůstává spektrální odrazivost stabilní (Kim et al. 2013).

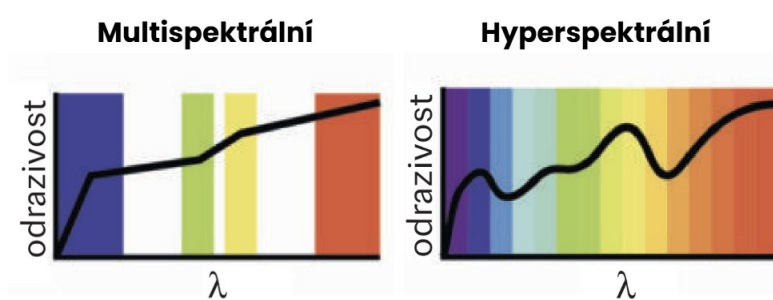


**Obrázek 10:** Grafy znázorňují časový průběh spektrální odrazivosti jehlic borovice Thunbergovi (*Pinus thunbergii* Parl.) měřené od června do října. U infikovaných stromů (a) je patrný nárůst odrazivosti v červené (Red) a střední infračervené (MIR) oblasti po 20. srpnu, což odpovídá přibližně dvěma měsícům po inokulaci. Naopak u neinfikovaných stromů (b) zůstává spektrální odrazivost víceméně stabilní a odpovídá typickým spektrálním vlastnostem zdravé vegetace. Tyto změny indikují fyziologický stres a změnu obsahu vody v rostlinách. Převezato z: (Kim et al. 2013).

Ne vždy jsou projevy stresu na optických vlastnostech odrazivosti vegetace uniformní a mohou se odlišovat z mnoha různých důvodů. Například studie (Gao et al. 2023) zaměřená na borovici čínskou (*Pinus tabulaeformis* Carrière) napadenou lýkožroutem *Dendroctonus valens* (LeConte, 1857) odhalila spektrální změny, které se liší od obecných projevů stresu. Zatímco spektrální křivka odrazivosti napadených stromů si celkově udržuje podobný trend jako u zdravých jedinců, významné rozdíly se projevují v 67 pásmech ve VIS. Konkrétně byla u napadených stromů zjištěna vyšší odrazivost v zelené oblasti lokálního maxima (520 až 588 nm) a v červené oblasti (634 až 732 nm) elektromagnetického spektra. Pozice zeleného maxima se navíc posunula k delším vlnovým délkám (z 550 nm na 554 nm). Zajímavé je, že v oblasti NIR nebyly pozorovány významné rozdíly mezi napadenými a zdravými stromy, což je v rozporu s obecnými předpoklady o poklesu odrazivosti v NIR při stresu. Ve zmíněné studii se domnívají, že jev může být způsoben tím, že celkovou odrazivost koruny a vliv pozadí a stínů na snímcích maskují vnitřní strukturální změny jehlic (Gao et al. 2023).

### 3.3. Hyperspektrální a multispektrální data

Pro dálkový průzkum Země a detailní analýzu vegetace se využívají různé typy dat, v závislosti na spektrálním rozlišení, především multispektrální a hyperspektrální. Obě technologie zaznamenávají elektromagnetické záření. Liší se v množství a šířce spektrálních pásem, jak je názorně vidět na obrázku 11 pro porovnání multispektrálního (vlevo) a hyperspektrálního (vpravo) snímání. To ovlivňuje jejich využití a složitost zpracování. Jedná se o pasivní způsob snímání, kdy senzory měří přirozené sluneční záření odražené od zemského povrchu, tedy reflektanci. Multispektrální senzory zachycují odrazivost ve vybraných širších pásmech a nepokrývají souvisle elektromagnetické spektrum. Hyperspektrální data představují odraz ve velkém počtu úzkých a na sebe navazujících pásmech, což umožňuje podrobnější pohled na stav vegetace. Obě technologie využívají různé části elektromagnetického spektra v rámci VIS, NIR i SWIR oblasti (Kupková et al. 2017).



**Obrázek 11:** Porovnání multispektrálního (vlevo) a hyperspektrálního (vpravo) snímání. Multispektrální senzory zaznamenávají odrazivost ve vybraných, širších spektrálních pásmech, zatímco hyperspektrální senzory sbírají data ve stovkách úzkých souvislých vlnových pásmech, což umožňuje získat detailní spektrální profil objektu. Upraveno a převzato z: (Kupková et al. 2017)

Multispektrální senzory zaznamenávají světlo v několika širokých diskrétních vlnových pásmech. Běžně bývá méně než 10 pásem, někdy i pouze 3, v závislosti na typu senzoru.

Jednotlivá pásma bývají široká několik desítek až stovek nanometrů. Tato pásma jsou například v modré, zelené, červené a NIR oblasti a obvykle nepokrývají přechod mezi VIS a NIR částí spektra, tedy oblast zvanou červený okraj, která je velmi důležitá pro monitorování stresu vegetace. Menší velikost a nižší cena senzorů usnadňuje použití na bezpilotních letounech. Tyto systémy jsou vhodné pro rozlišení širokých kategorií povrchů, jako je vegetace, voda nebo půda (Landgrebe 2002; Cotrozzi 2022).

Hyperspektrální senzory naproti tomu shromažďují data ve stovkách až tisících velmi úzkých souvislých vlnových pásmech, obvykle o šířce pouhých 5 až 20 nanometrů. To umožňuje vytvoření nepřetržitého spektrálního profilu pro každý pixel, poskytující detailní informace o chemickém složení a fyzikálním stavu objektu (Landgrebe 2002; Cotrozzi 2022). Hyperspektrální data jsou dobrá pro včasnou detekci jemných fyziologických změn v rostlinách, které nejsou pouhým okem rozlišitelné nebo viditelné, například mírného poklesu chlorofylu nebo obsahu vody v listech (Haagsma et al. 2020). Hyperspektrální zobrazování poskytuje vysoké spektrální rozlišení, což umožňuje přesně rozlišovat vlnové délky a identifikovat a kvantifikovat materiály na základě jejich jedinečných spektrálních signatur. Prostorové rozlišení hyperspektrálních dat však bývá obvykle nižší. Tato technologie je složitější, nákladnější a náročnější na zpracování dat (Kogut 2024).

Hyperspektrální snímkování z bezpilotních letounů poskytuje vysoce detailní data ve vysokém prostorovém rozlišení, která umožňují pozorovat biochemické složení, fluorescenci chlorofylu, obsah sušiny a vody, nebo teplotu koruny a vegetační strukturu. Tyto vlastnosti jsou úzce spjaté s fyziologickým stavem rostlin a jejich reakcí na stresory. Pro sledování změn fyziologické vitality vegetace se využívá analýza spektrálních změn spojených s pigmenty. Detekují se tak změny v obsahu chlorofylu, karotenoidů a xantofylů (Watt et al. 2023), což jsou nespecifické stresové indikátory. Tato metoda se uplatňuje například pro sledování vadnutí borovic, chřadnutí dubů nebo hniloby smrků (Bledý et al. 2024). Detailní posouzení fyziologického stavu rostlin vyžaduje hyperspektrální zobrazování, zatímco mapování krajinného pokryvu ve velkém měřítku je efektivnější s multispektrálním zobrazováním.

### **3.4. Nosiče pro sběr optických dat**

Měření může probíhat v laboratoři na vzorcích jehličí či větví nebo v terénu pomocí ručních přístrojů. Data se také sbírají z výšky, kdy se používají různé nosiče, jako letadla, bezpilotní letouny nebo satelity pro sledování větších oblastí.

Tradiční satelitní DPZ je vhodný pro monitorování rozsáhlých lesních ploch a dlouhodobé



sledování změn. Používají se často data z družic Landstat, MODIS (obě NASA) nebo Sentinel (ESA), které poskytují multispektrální data a mají dlouhou historii záznamů a můžeme díky nim porovnávat data z různých období. Pro detailní posouzení zdraví jednotlivých stromů je však tento přístup z důvodů nízkého prostorového rozlišení neefektivní, neboť sťažuje detekci menších ohnisek chorob nebo stresu, které se projevují na úrovni jednotlivých stromů. Časová frekvence satelitních přeletů u cirkumpolárních satelitů nemusí být dostatečná pro sledování rychle se šířících chorob nebo škůdců. To může vést ke zpoždění v detekci problémů. Oblačnost také výrazně omezuje sběr dat optickými satelitními senzory a vytváří mezery v časových řadách snímků (Ecke et al. 2022).

Omezení prostorového rozlišení satelitních snímků sťažují odlišení napadených stromů v raných fázích od zdravých. Je nepravděpodobné, že by satelitní snímky s mnohem nižším rozlišením dokázaly detekovat rané fáze napadení, kdy nejsou změny ještě detekovatelné pouhým okem (Huo et al. 2024). Ačkoliv satelitní snímky s nízkým prostorovým rozlišením nemusí být schopny detekovat rané fáze napadení, nové multispektrální satelity mají lepší rozlišení barevných odstínů, zachycují jemnější rozdíly v množství odraženého světla a mají také vyšší prostorové rozlišení. Jejich flexibilita v době opětovného snímkování a cena snímků rovněž ovlivňují výběr senzoru. Často používané jsou třeba satelitní snímky WorldView-2 a WorldView-3 (NASA). Satelitní snímky Sentinel-2 jsou volně dostupné, což zvyšuje jejich popularitu (Camarretta et al. 2024; Stone a Mohammed 2017).

Bezpilotní letouny (UAV unmanned aerial vehicle), také známé jako drony, nahrazují v některých případech tradiční satelitní dálkový průzkum Země. Využívají se především k identifikaci problémů u jednotlivých stromů. UAV umožňují získat snímky s vysokým prostorovým rozlišením v rámci centimetrů, jak ukázaly například studie Bijou et al. (2025), kde monitorovaly smrky napadené kůrovcem s rozlišením 3 cm. Díky tomu je možné pozorovat jednotlivé koruny stromů a zaznamenat i menší známky poškození nebo změn. To usnadňuje dřívější zjištění chorob. Výhodou UAV je také možnost častých přeletů a rychlé nasazení. Přístroje mohou fungovat i za oblačného počasí, kdy není možné použít satelitní snímky. Pro menší území je tento způsob sledování levnější než použití družic nebo letadel s posádkou (Ecke et al. 2022).

### **3.5. Význam správného načasování sběru dat**

Dříve lesní hospodářství často reagovalo na problémy až ve chvíli, kdy byly plně rozvinuté. Dnes však novější přístupy optické detekce dokážou rozpoznat změny ve stavu listů ještě předtím, než se objeví viditelné makroskopické příznaky. Díky tomu se optická detekce využívá

jak ke zjištění již vzniklých škod, tak i především k jejich včasnému odhalení. Zachycení problému v rané fázi umožňuje rychle zasáhnout a omezit šíření chorob v lese, čímž pomáhá snižovat ekologické i ekonomické dopady. Má to obzvlášť velký význam u rychle se šířících patogenů nebo u nepůvodních invazních druhů. To může vést k šetrnějšímu přístupu k lesům a menším nákladům na jejich obnovu (Cotrozzi 2022).

Pokud je cílem hodnocení aktivní zásah proti škůdci, musí se načasování detekce řídit raným stadiem, ve kterém lze patogen nejúčinněji potlačit. Problémem je, že toto stadium často odpovídá příznakům, které jsou zpočátku nenápadné a obtížně se detekují. Také je nutné připomenout, že různé hmyzí škůdci a houbové patogeny mají odlišnou chronologii projevů příznaků. Z těchto důvodů je nezbytné definovat takzvané „biookno“ (Stone a Mohammed 2017). Toto biookno představuje ideální časový interval pro sběr dat. Během něj jsou příznaky poškození na stromech nejlépe detekovatelné dálkovými senzory a zároveň poskytují dostatek času pro včasnou reakci nebo efektivní zásah proti patogenu či škůdci. Definice optimálního biookna proto vyžaduje pochopení životního cyklu škůdce. Zahrnuje také znalost posloupnosti příznaků poškození a fenologie hostitelské rostliny, tedy jejího vývojového cyklu. Pokud je však hlavním cílem mapování rozsahu a závažnosti poškození nebo odhad výnosu, pak se hodnocení obvykle shoduje s maximálním projevem příznaků na koruně stromu (Stone a Mohammed 2017).

### **3.6. Zpracování a analýza dat, modely a strojové učení**

Data získaná ze senzorů procházejí zpracováním a odstraněním šumů. Následně se z každého pixelu obrazu extrahuje spektrální křivka odrazivosti (Cotrozzi 2022). Z těchto křivek se pak často odvozují spektrální vegetační indexy, což jsou matematické kombinace odrazivosti v různých vlnových délkách nebo pásmech, které slouží jako jednoduché indikátory stavu vegetace (Pandey et al. 2021; Cotrozzi 2022). Těchto indexů existuje velké množství a většina z nich je k dispozici v online databázi <https://www.indexdatabase.de/>, včetně popisu získání a výpočtu jednotlivých indexů. Jejich účelem je zmenšit spektrální rozsah dat na jedinou hodnotu, která vystihuje zkoumanou vlastnost vegetace. Tyto indexy jsou konstruovány s využitím vlnových délek, které odpovídají výrazným absorpčním minimům nebo maximům dané látky v rostlině. Například NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) je často používaný vegetační index. NDVI se vypočítává z rozdílu dvou spektrálních pásem, a to červeného (kde chlorofyl silně absorbuje světlo) a NIR (kde vegetace silně odráží světlo). Pomocí tohoto indexu lze efektivně rozlišit vegetační pixely od pixelů pozadí, jako je například půda. Nízké hodnoty NDVI většinou znamenají nevegetační plochy nebo stresovanou vegetaci. Vysoké hodnoty se

naopak objevují v oblastech s hustou a zdravou vegetací (Pandey et al. 2021).

U multispektrálních i hyperspektrálních dat je často potřeba jejich předzpracování. U dat získaných dálkovým průzkumem Země, ať už ze satelitů či bezpilotních letounů, to zahrnuje zejména geometrické a atmosférické korekce, které minimalizují zkreslení způsobená polohou senzoru, terénem a vlivem atmosféry. Naproti tomu u měření na listech získaných například z laboratorních podmínek se aplikují jiné typy předzpracování, které se zaměřují na redukci šumu, kalibraci a normalizaci dat, atmosférické a geometrické korekce zde však nejsou potřeba (Kupková et al. 2017).

Metody strojového učení má schopnost zpracovávat velké mnohovrstevné a vysokodimenzionální datasety, zvládají šumová a chybějící data, numerická a kategorická data i integraci pomocných prostorových dat. Mohou odhalit stres dříve než běžné metody (Stone a Mohammed 2017).

K detailnější analýze a měření proměnných, které popisují vegetaci, se používají pokročilé modelovací algoritmy. Tyto algoritmy se hodí zvláště pro hyperspektrální data. Podle Verrlest et al. (2020) se rozdělují do několika skupin. Sem patří parametrické regrese, kam spadají například vegetační indexy a neparametrické regrese, které zahrnují algoritmy strojového učení, jako jsou neuronové sítě. Dále existují fyzikálně založené modely, mezi něž patří modely přenosu záření. Tyto se zpracovávají numerickou optimalizací nebo pomocí vyhledávacích tabulek. Používají se i hybridní přístupy, které kombinují simulace z modelů přenosu záření se strojovým učením. Cílem všech těchto algoritmů je převést naměřená spektrální data na smysluplné informace o sledovaných objektech (Verrelst et al. 2020). Laboratorní spektroskopie se používá k získání referenčních spektrálních dat porostů a měří se na úrovni jednotlivých listů, vrstvy listů nebo výhonů. Tato data se pak modelují na úroveň porostů, aby mohla být využita k interpretaci dat DPZ (Cotrozzi 2022).

### **3.7. Potenciál použití u jedle**

V dostupné literatuře sice stále převažují studie zaměřené na jiné druhy jehličnanů, především rodu *Picea*, metodologické principy jsou však přenositelné. Nedávná studie navíc již zkoumala optické vlastnosti jedle bělokoré ve vztahu k jejímu zdravotnímu stavu, a to studie Crespo-Antia et al. (2024), která se zaměřila na vztah vegetačních indexů a vitality porostů jedle bělokoré ve španělských Pyrenejích. Tento výzkum porovnával stav chřadnoucích a nechřadnoucích porostů jedle. Studie zjistila, že vegetační indexy odráží úbytek jehličí a menší růst u chřadnoucích jedlí. Poskytují tak doplňkové informace pro včasnou detekci odumírání lesů. Jedlové porosty

reagovaly na environmentální stresory, jako je sucho a nízká vzdušná vlhkost. Tyto stresory jsou pro jedli bělokorou známe zejména v jižních oblastech jejího výskytu. Výsledky ukazují možnosti dálkového průzkumu pro monitorování časných známek chřadnutí v porostech jedle bělokoré, kde se index EVI (enhanced vegetation index) prokázal jako spolehlivější pro detekci změn ve vitalitě než NDVI. Zároveň ve studii upozorňují na nutnost kombinace těchto dat s terénními měřeními pro přesnou interpretaci (Crespo-Antia et al. 2024).

Pro úspěšnou detekci chorob u jedle bělokoré pomocí dálkového průzkumu je nezbytný větší cílený výzkum zaměřený na jedinečnou fenologii, morfologii a typické patogeny jedle bělokoré. Tento výzkum by měl zahrnovat tvorbu spektrálních knihoven, sběr dat pro pozemní ověřování a validaci modelů. Zároveň je třeba provést výzkum na specifické spektrální signatury pro patogeny, jako je HNB nebo systémové infekce, jako je rez jedlová, které se projevují jedinečnými fyziologickými změnami. Důležité je určení načasování sběru dat a interpretace spektrálních změn. Nezbytné je také přizpůsobení prostorového rozlišení senzoru velikosti koruny a struktury porostu (Stone a Mohammed 2017).

K vytvoření nástrojů na konkrétní druhy stromů a patogenů je DPZ nákladný a náročný, nabízí však i mnoho již výše zmíněných výhod, jako možnosti pro hodnocení zdravotního stavu a vitality jedle bělokoré v hustých časových řadách, možnost srovnávání dat atd. Umožňuje včasnou detekci stresu způsobeného nedostatkem vody, živin nebo počátečním napadením patogeny, a to ještě před zjevnými vizuálními projevy. Tyto metody umožňují vytvářet mapy vitality porostů jedle, které podporují efektivní lesní hospodaření. V rámci optimalizace lesnického hospodaření lze identifikovat oslabené jedince vyžadující cílenou péči. Díky tomu lze upřednostňovat těžbu napadených stromů nebo monitorovat úspěšnost zalesňování. Spektrální data by mohla přispět i k odhadu biomasy a produkce.

S ohledem na predispozice jedle bělokoré růst ve smíšených porostech v zástínu se ale otevírá otázka, jak účinné a vůbec možné by bylo monitorování takovýchto porostů z dálky ve velké ploše. UAV mají větší potenciál ve smíšených porostech díky vyššímu prostorovému rozlišení. Například studie Bijou et al. (2025) využila snímky s rozlišením 3 cm k detekci napadení smrku lýkožroutem. Podobně Zhong et al. (2022) použily UAV hyperspektrální snímky s rozlišením 10 cm pro identifikaci druhů stromů ve smíšených lesích.

### **3.8. Příklady úspěšného použití optických dat u detekce patogenů na jehličnatých stromech**

Tato kapitola představuje úspěšné aplikace vegetační spektroskopie a dálkového průzkumu pro

detekci stresu a patogeneze u jehličnanů. V dostupné literatuře chybí přímé studie specificky zaměřené na optické vlastnosti jedle bělokoré ve vztahu k jejímu zdravotnímu stavu, proto se příklady opírají především o rozsáhlý výzkum provedený na jiných druzích jehličnanů, zejména na smrku ztepilém, který je v této oblasti nejprozkoumanější. Tyto příklady nicméně demonstrují obecný potenciál a přenositelnost těchto metod pro monitorování vitality a zdraví lesních porostů.

Příkladem úspěšného použití je detekce rzi vejmutovkové (*Cronartium flaccidum* [Alb. & Schwein.] G. Winter) na sazenicích borovice. V této studii bylo využito hyperspektrální zobrazování v kombinaci se strojovým učením. Díky hyperspektrálnímu snímání bylo možné toto onemocnění detekovat s působivou 87% přesností. Tato metoda dokázala identifikovat napadení ještě před znatelnými projevy (Haagsma et al. 2020). Další studie se zaměřila na detekci rzi vřetenovité (*Cronartium quercuum* f. sp. fusiforme) na sazenicích borovice kadidlové (*Pinus taeda* L.). I v tomto případě bylo využito hyperspektrální odrazivost v kombinaci se strojovým učením. Bylo zjištěno, že nejlepší výsledky, s přesností 77 %, přináší analýza spektrálních dat z horní poloviny stonku, kde se hlavní vizuální symptomy (aecie) primárně projevují. Tento cílený přístup pomohl zlepšit diagnostiku (Pandey et al. 2021). Podobný způsob by se mohl dát využít ve školkách i u detekce rzi na jedli pro včasný zásah v lesních školkách nebo mladých porostech.

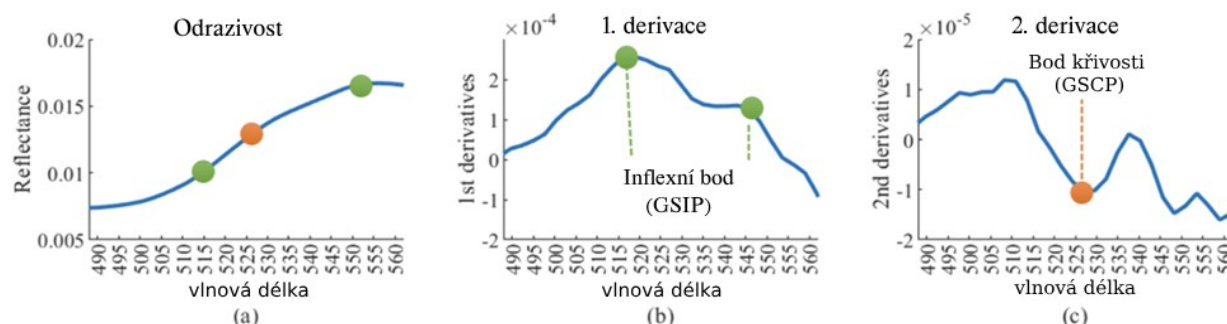
Pro detekci a mapování kořenové hniloby způsobené václavkami v lesích na severozápadě Severní Ameriky se úspěšně využívá kombinace technologií založených na optických datech. Konkrétně se jedná o letecký LiDAR a vysoce rozlišitelnou leteckou ortofotografii (Oblinger et al. 2022). LiDAR je aktivní světelné detekční a dálkové měření. Informace o prostředí získává vysíláním světelných pulzů a měřením času jejich návratu, což umožňuje vytvářet prostorově přesné 3D mapy. Poskytuje prostorovou strukturu lesa, včetně výšky, rozestupů a hustoty stromů, a dokáže vidět skrz koruny až na úroveň lesního dna. Poskytuje informace o struktuře porostu a úbytku jehličí či listí, což je obtížné nebo nemožné zjistit pouze z monitorování odraženého slunečního světla optickými senzory (Raj et al. 2020). Ortofotografie pak doplňuje data ze tří pásem RGB (červené, zelené a modré). S využitím strojového učení, konkrétně algoritmu Random Forest, lze s vysokou přesností 83 % klasifikovat stromy. Klasifikace zahrnovala čtyři zdravotní kategorie: bezpříznakově zdravé, živé infikované, nedávno odumřelé (s více než 50 % uschlého jehličí) a starší odumřelé (s méně než 50 % uschlého jehličí). Pro tuto klasifikaci jsou hlavní parametry získané z LiDARu, jako je průměrná a směrodatná odchylka zdánlivé odrazivosti LiDARu a z ortofotografie, například průměrná hodnota indexu kontrastu

vegetace. Živé stromy mají nižší odrazivost ve SWIR oblasti, odumřelé dřevo však odráží toto záření silněji. Tato metoda umožňuje identifikovat pro václavky typické prostorové shluky mrtvých stromů a volná místa v korunovém zápoji. Díky tomu bylo možné upřednostnit oblasti pro terénní výzkumy a efektivněji plánovat lesnická opatření (Oblinger et al. 2022).

### 3.8.1. Příklady použití optických dat ve studiích zabývajících se lýkožroutem smrkovým

Při napadení lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus* [Linnaeus, 1758]) je důležité včasné rozpoznání počátečních fyziologických změn ve fázi, kdy příznaky ještě nejsou viditelné. Během této doby lýkožrout kolonizuje hostitelský strom a vyvíjí se uvnitř kambia. Napadení lýkožroutem přerušuje tok vody a živin, což vede k degradaci chloroplastů a změnám v obsahu chlorofylu a vody v jehlicích. Tyto změny se projevují ve spektrální odrazivosti jehlic, zejména v NIR a SWIR oblasti. Zdravé stromy mají v těchto oblastech vyšší odrazivost než stromy napadené (Abdullah et al. 2018).

Studie Huo et al. (2024) zkoumala využití multi-temporálních hyperspektrálních dat získaných z dronů pro včasnou detekci napadení smrku ztepilého. Pro účinný management kůrovce je nutné odstranění napadených stromů před vylíhnutím nové generace. Studie zjistila, že rozdíl v odrazivosti mezi zdravými a napadenými stromy v raných fázích byl malý. První a druhé derivace spektrální odrazivosti však tyto jemné změny vitality zachytily s vyšší citlivostí. Nejvyšší rozlišitelnost byla v oblasti nárůstu odrazivosti v zelené části spektra (490 až 550 nm). V první derivaci odrazivosti zelené části spektra jsou dva vrcholy (kolem 520 nm a 545 nm) a ve druhé derivaci jedno lokální minimum (kolem 530 nm). Tyto body reagují na změny ve fotosyntéze a xantofylovém cyklu. Dlouhodobé napadení lýkožroutem posouvá tyto body, což indikuje snižující se vitalitu. Obrázek 12 ilustruje inflexní bod zelené části spektra a bod zakřivení zelené části spektra.



**Obrázek 12:** Ilustrace inflexního bodu zelené části spektra (GSIP) a bodu zakřivení ve vzestupné části zelené spektra (GSCP) na spektrálních křivkách. Graf (a) zobrazuje křivku odrazivosti ve vzestupné oblasti zeleného spektra. Graf (b) ukazuje její první derivaci s vrcholy, které se používají k odhadu obsahu chlorofylu, zatímco graf (c) představuje druhou derivaci s lokálním minimem, souvisejícím s vodním potenciálem. Tyto body se sledují pro včasnou detekci změn ve fotosyntéze a celkovém zdravotním stavu rostlin. Upraveno a převzato z: (Huo et al. 2024)

Na základě těchto zjištění byly vyvinuty nové indexy nárůstu odrazivosti v zelené části spektra, ty prokázaly vyšší úspěšnost detekce. Studie také navrhla zjednodušené indexy nárůstu odrazivosti v zelené části spektra pro multispektrální kamery a satelitní snímky. To může snížit náklady a rozšířit monitoring. Tyto indexy potřebují tři široká pásma: modré (490 nm) a dvě zelená (530 nm a 550 nm). Úspěšnost detekce v prvním měsíci po napadení byla sice nízká, ale poté se rychle zvýšila. Výsledky naznačují, že indexy nárůstu odrazivosti v zelené části spektra mají potenciál pro kvantifikaci fotochemických funkcí vegetace pod stresem. To dává nové možnosti pro včasnou identifikaci lesů se snižující se fyziologickou vitalitou (Huo et al. 2024).

Podle Zabihi et al. 2021 jsou pro přesné mapování zelené fáze napadení potřeba satelitní snímky s rozlišením menším než 4 m. Snímky by navíc měly být pořizované týdně nebo i každý druhý den. To je důležité pro snížení vlivu pozadí a smíšených pixelů. Mnoho vegetačních indexů je ovlivněno faktory, jako je stáří stromů a jehlic, struktura lesa a obsah vody v půdě, což může vést k nejistotě v modelech využívajících delší vlnové délky NIR a SWIR. Indexy založené na červeném okraji jsou citlivější na změny obsahu chlorofylu a mohou zlepšit včasnou detekci.

Studie Bárta et al. 2022 srovnávala terénní průzkum a letecký průzkum s využitím hyperspektrálního senzoru v České republice a zjistila, že terénní průzkumy detekovaly napadené stromy o 23 dní dříve než analýza hyperspektrálních dat. Nicméně, i přes toto zpoždění, dokázaly hyperspektrální indexy odhalit napadení včas a to do šesti týdnů po napadení, což je uznávané období pro účinná opatření k zabránění šíření kůrovce. Vlnové délky spojené s absorpcí chlorofylu byly ovlivněny jako první, což ukazuje citlivost hyperspektrálních dat na biochemické změny v rostlinách, které předcházejí viditelným (Bárta et al. 2022).

Dobrým příkladem rozšiřujícího se využití moderních technologií v České republice je nasazení dronů WingtraOne s multispektrální kamerou v Plzni (Správa informačních technologií města Plzně 2020). Tato technologie slouží k včasnému odhalení stromů napadených kůrovcem. Projekt byl realizován Správou informačních technologií města Plzně ve spolupráci se Správou veřejného statku. Pro efektivní zpracování dat byla vyvinuta specializovaná analytická aplikace. Využitím multispektrálních dat byly vytvořeny ortofotomapy s přesnou GPS lokalizací podezřelých stromů. Systém významně doplnil stávající terénní monitoring, jelikož umožnil identifikaci stromů již ve fázi aktivního napadení, tedy ještě před vizuální změnou barvy jehličí (Správa informačních technologií města Plzně 2020). Další již zmíněná studie zabývající se detekcí napadení je i například Bijou et al. (2025), kde se autoři zabývají hodnocením efektivity husté časové řady hyperspektrálních snímků z UAV pro včasnou detekci napadení smrku lýkožroutem.

## Závěr

Jedle bělokorá je považována za vhodnou dřevinu pro přeměnu nestabilních smrkových monokultur na ekologicky vyváženější a odolnější smíšené lesy. Současné poznatky o monitorování jejího zdravotního stavu a možnostech detekce jejích patogenů, oproti například smrku ztepilému, jsou omezené a bude potřebný rozsáhlejší výzkum. Jedle se velmi dobře přirozeně zmlazuje, vytváří lesní podrost, čímž přispívá k obnově lesa a zajišťuje budoucí generace stromů smíšeného lesa. Jedle má i velký produkční potenciál, ale pro jeho plné využití bude nezbytné lépe porozumět širokému spektru patogenů, které jedli ohrožují. Kromě lýkožroutů, jakožto nejčastějších biotických škůdců, mezi ně patří patogeny jehlic, jako jsou sypavky a rzi, kořenové hniloby a další houbové patogeny. Neméně důležitou kategorií jsou i mšice korovnice, které mohou představovat riziko především ve spojitosti s houbovými patogeny jehlic.

Optické metody diagnostiky a monitorování vegetace nabízejí slibné řešení pro včasnou detekci patogenů nebo náchylnost vegetace oslabené abiotickými stresy. Tyto metody zaznamenávají elektromagnetické záření odražené od vegetace, z kterého se dají sledovat její fyzikální a chemické vlastnosti. Změny ve spektrální křivce odrazivosti, které naznačují stres nebo napadení patogenem, mohou být zachyceny dříve, než jsou viditelné pouhým okem. Taktéž použití UAV přináší výhody bezkontaktního velkoplošného a rychlého monitoringu s velkým prostorovým rozlišením, jak se prokázalo u studií zaměřujících se na lýkožrouta u smrku ztepilého.

Ačkoliv se většina studií zaměřuje na jiné druhy jehličnanů, principy jsou přenositelné, a některé nedávné výzkumy již potvrdily potenciál DPZ pro monitorování fyziologické vitality jedle bělokoré. Pro úspěšné využití optických dat je u jedle bělokoré nezbytný další cílený výzkum. Tento výzkum musí zohlednit její specifickou fenologii a morfologii a její patogeny. Důležité je také správné načasování sběru dat, kdy jsou příznaky poškození nejlépe detekovatelné. Využití UAV s multispektrálními a hyperspektrálními senzory, v kombinaci s pokročilými algoritmy strojového učení, se prokazuje jako účinná metoda pro identifikaci napadených stromů s vysokou přesností a včasností. Tato technologie umožňuje obrazovou spektroskopií vytvářet mapy vitality porostů a efektivně podporovat lesní hospodaření. Přispívá tak ochraně a obnově stabilních a druhově bohatších lesních ekosystémů.

Optický monitoring a diagnostika vegetace nabízí výhody ve včasné detekci stresu a monitorování velkých ploch. Pro jeho účinnost je ale stále potřeba tyto metody kombinovat



s terénním výzkumem a sběrem dat. Vegetační spektroskopie může přispět k včasným zásahům a terénním výzkumům na konkrétních porostech a tím umožnit ekonomičtějšímu a ekologičtějšímu přístupu lesního hospodaření.

## Seznam použité literatury

- ABDULLAH, Haidi, Roshanak DARVISHZADEH, Andrew K. SKIDMORE, Thomas A. GROEN a Marco HEURICH, 2018. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. **64**, 199–209. ISSN 1569-8432. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2017.09.009
- AIME, Mary a Alistair MCTAGGART, 2020. A higher-rank classification for rust fungi, with notes on genera. *Fungal Systematics and Evolution* [online]. **7**, 21–47. Dostupné z: doi:10.3114/fuse.2021.07.02
- ASIEGBU, Fred a Andriy KOVALCHUK, 2022. *Forest Microbiology Volume 2: Forest Tree Health*. ISBN 978-0-323-85042-1.
- ATLAS OF FOREST PESTS, 2025a. *Melampsorella caryophyllacearum* / Fir broom rust. *FOREST PESTS Europe* [online] [vid. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://www.forestpests.eu/pest/melampsorella-caryophyllacearum>
- ATLAS OF FOREST PESTS, 2025b. *Pucciniastrum epilobii*. *FOREST PESTS Europe* [online] [vid. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.forestpests.eu/pest/pucciniastrum-epilobii>
- ATLAS OF FOREST PESTS, 2025c. *Rhizosphaera kalkhoffii*. *FOREST PESTS Europe* [online] [vid. 2025-04-22]. Dostupné z: <https://www.forestpests.eu/pest/rhizosphaera-kalkhoffii>
- ATLAS OF FOREST PESTS, 2025d. *Sypavka jedľová*. *FOREST PESTS Europe* [online] [vid. 2025-03-18]. Dostupné z: <https://www.skodcoviadrevin.sk/skodca/sypavka-jedlova>
- BÁRTA, Vojtěch, Jan HANUŠ, Lumír DOBROVOLNÝ a Lucie HOMOLOVÁ, 2022. Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees. *Forest Ecology and Management* [online]. **506**, 119984. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2021.119984
- BAUMGARTNER, Kendra, Martin P. A. COETZEE a Dirk HOFFMEISTER, 2011. Secrets of the subterranean pathosystem of *Armillaria*. *Molecular Plant Pathology* [online]. **12**(6), 515. Dostupné z: doi:10.1111/j.1364-3703.2010.00693.x
- BEDNÁŘ, Pavel, 2024. *Jedle bělokorá jako dřevina pro druhové přeměny lesních porostů ČR a vliv uplatněných obnovních sečí v interakci s podmínkami lesních stanovišť na její růst, vitalitu, odolnost vůči fytopatogenům a vývoj mykorhizních asociací*. Výroční zpráva QK24010275. B.m.: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.
- BIJOU, Salma, Lucie KUPKOVÁ, Lucie ČERVENÁ a Jakub LYSÁK, 2025. Assessing early bark beetle infestation in Norway spruce using multitemporal hyperspectral UAV imagery: Is detection during the green stage always timely? *Ecological Indicators* [online]. **178**, 113869. ISSN 1470160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2025.113869
- BLEDÝ, Michal, Stanislav VACEK, Pavel BRABEC, Zdeněk VACEK, Jan CUKOR, Jakub ČERNÝ, Richard ŠEVČÍK a Kateřina BRYNYCHOVÁ, 2024. Silver Fir (*Abies alba* Mill.): Review of Ecological Insights, Forest Management Strategies, and Climate Change's Impact on European Forests. *Forests* [online]. **15**(6), 998. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f15060998
- BRAZEE, Nicholas J., 2022. Lophodermium Needle Cast : Landscape : Center for Agriculture, Food, and the Environment at UMass Amherst. *University of Massachusetts Amherst* [online] [vid. 2025-06-21]. Dostupné z: <https://www.umass.edu/agriculture-food-environment/landscape/fact-sheets/lophodermium-needle-cast>
- CALLAN, B.E., 2024. Red heart rot. *Natural Resources Canada, Canadian Forest Service*

- [online] [vid. 2025-07-19]. Dostupné z: <https://tidcf.nrcan.gc.ca/en/diseases-caused-by-pathogens/factsheet/418>
- CAMARRETTA, Nicolò, Grant D. PEARSE, Benjamin S. C. STEER, Emily MCLAY, Stuart FRASER a Michael S. WATT, 2024. Automatic Detection of Phytophthora pluvialis Outbreaks in Radiata Pine Plantations Using Multi-Scene, Multi-Temporal Satellite Imagery. *Remote Sensing* [online]. **16**(2), 338. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs16020338
- CATALOGUE OF LIFE, 2025. *Melampsorella caryophyllacearum* J.Schröt. [online] [vid. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://www.gbif.org/species/2516840>
- CISZEWSKA-MARCINIAK, Joanna a Malgorzata JEDRYCZKA, 2011. Life cycle and genetic diversity of willow rusts (*Melampsora* spp.) in Europe. *Acta Agrobotanica* [online]. **64**. Dostupné z: doi:10.5586/aa.2011.001
- COTROZZI, Lorenzo, 2022. Spectroscopic detection of forest diseases: a review (1970–2020). *Journal of Forestry Research* [online]. **33**(1), 21–38. ISSN 1007-662X, 1993-0607. Dostupné z: doi:10.1007/s11676-021-01378-w
- CRESPO-ANTIA, Juan Pablo, Antonio GAZOL, Manuel PIZARRO, Ester GONZÁLEZ DE ANDRÉS, Cristina VALERIANO, Álvaro RUBIO CUADRADO, Juan Carlos LINARES a Jesús Julio CAMARERO, 2024. Matching Vegetation Indices and Tree Vigor in Pyrenean Silver Fir Stands. *Remote Sensing* [online]. **16**(23), 4564. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs16234564
- ČERMÁK, P., L. JANKOVSKÝ a J. GLOGAR, 2004. Progress of spreading *Stereum sanguinolentum* (Alb. et Schw.: Fr.) Fr. wound rot and its impact on the stability of spruce stands. *Journal of Forest Science* [online]. **50**(8), 360–365. ISSN 1212-4834, 1805-935X. Dostupné z: doi:10.17221/4662-jfs
- DÁLYA, László, P. CAPRETTI, Luisa GHELARDINI a Libor JANKOVSKÝ, 2019. Assessment of presence and distribution of *Armillaria* and *Heterobasidion* root rot fungi in the forest of Vallombrosa (Apennines Mountains, Italy) after severe windstorm damage. *iForest - Biogeosciences and Forestry* [online]. **12**, 118–124. Dostupné z: doi:10.3832/for2929-012
- DOWNER, Jim a Ben FABER, 2019. Non-chemical control of *Armillaria mellea* infection of *Prunus persica*. *Journal of Plant Science and Phytopathology* [online]. **3**(2), 050–055. ISSN 25750135. Dostupné z: doi:10.29328/journal.jpssp.1001031
- ECKE, Simon, Jan DEMPEWOLF, Julian FREY, Andreas SCHWALLER, Ewald ENDRES, Hans-Joachim KLEMMT, Dirk TIEDE a Thomas SEIFERT, 2022. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing* [online]. **14**(13), 3205. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14133205
- EPPO, 2023. *Gremmeniella abietina* [online]. EPPO datasheets on pests recommended for regulation. B.m.: European and Mediterranean Plant Protection Organization. Dostupné z: <https://gd.eppo.int>
- FERGUSON, BA, TA DREISBACH, CG PARKS, GM FILIP a CL SCHMITT., 2003. Coarse-scale population structure of pathogenic *Armillaria* species in a mixed-conifer forest in the Blue Mountains of northeast Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. **33**(4), 612–623. ISSN 0045-5067. Dostupné z: doi:10.1139/x03-065
- GAO, Bingtao, Linfeng YU, Lili REN, Zhongyi ZHAN a Youqing LUO, 2023. Early Detection of *Dendroctonus valens* Infestation at Tree Level with a Hyperspectral UAV Image. *Remote Sensing* [online]. **15**(2), 407. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs15020407
- GATES, David M., Harry J. KEEGAN, John C. SCHLETER a Victor R. WEIDNER, 1965. Spectral Properties of Plants. *Applied Optics* [online]. **4**(1), 11. ISSN 0003-6935, 1539-4522. Dostupné z: doi:10.1364/ao.4.000011
- GITELSON, Anatoly, Yuri GRITZ a Mark MERZLYAK, 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of plant physiology* [online]. **160**, 271–82. Dostupné

- z: doi:10.1078/0176-1617-00887
- GOLDBERG, Natalie P., 2024. Rhizosphaera Needle Cast Choroba modrého smrku | Státní univerzita v Novém Mexiku – BUĎTE ODVÁŽNÍ. Utvářejte budoucnost. *New Mexico State University* [online] [vid. 2025-04-22]. Dostupné z: [https://pubs.nmsu.edu/\\_h/H163/index.html](https://pubs.nmsu.edu/_h/H163/index.html)
- GONZÁLEZ, Mario, Chris REYNOLDS, Jack FORSTER, Sietse VAN DER LINDE, Matt PARRAT, Michal DVORAK, Brian ROBERTSHAW a Ana PÉREZ-SIERRA, 2021. Incidence of the emerging pathogen *Neonectria neomacrospora* on *Abies* taxa in the National Arboreta in England (UK). *Forest Ecology and Management* [online]. **492**, 119207. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2021.119207
- GRABOWSKI, Michelle a Cynthia Ash KANNER, 2018. Lirula needle blight. *University of Minnesota Extension* [online] [vid. 2025-06-21]. Dostupné z: <https://extension.umn.edu/plant-diseases/lirula-needle-blight>
- GUPTA, Shreya a Sanjai SAXENA, 2023. Endophytes: Saviour of apples from post-harvest fungal pathogens. *Biological Control* [online]. **182**, 105234. ISSN 10499644. Dostupné z: doi:10.1016/j.biocontrol.2023.105234
- HAAGSMA, Marja, Gerald F. M. PAGE, Jeremy S. JOHNSON, Christopher STILL, Kristen M. WARING, Richard A. SNIEZKO a John S. SELKER, 2020. Using Hyperspectral Imagery to Detect an Invasive Fungal Pathogen and Symptom Severity in *Pinus strobiformis* Seedlings of Different Genotypes. *Remote Sensing* [online]. **12**(24), 4041. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12244041
- HILMERS, Torben, Admir AVDAGIĆ, Leszek BARTKOWICZ, Kamil BIELAK, Franz BINDER, Andrej BONČINA, Laura DOBOR, David I FORRESTER, Martina L HOBI, Aida IBRAHIMSPAHIĆ, Andrzej JAWORSKI, Matija KLOPČIČ, Bratislav MATOVIĆ, Thomas A NAGEL, Rudolf PETRÁŠ, Miren DEL RIO, Branko STAJIĆ, Enno UHL, Tzvetan ZLATANOV, Roberto TOGNETTI a Hans PRETZSCH, 2019. The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry: An International Journal of Forest Research* [online]. **92**(5), 512–522. ISSN 0015-752X, 1464-3626. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/cpz035
- HUNTER, Lillian M., 1948. A study of the mycelium and haustoria of the rusts of abies. *Canadian Journal of Research* [online]. **26c**(3), 221–238. ISSN 1923-4287. Dostupné z: doi:10.1139/cjr48c-021
- HUO, Langning, Niko KOIVUMÄKI, Raquel A. OLIVEIRA, Teemu HAKALA, Lauri MARKELIN, Roope NÄSI, Juha SUOMALAINEN, Antti POLVIVAARA, Samuli JUNTILA a Eija HONKAVAARA, 2024. Bark beetle pre-emergence detection using multi-temporal hyperspectral drone images: Green shoulder indices can indicate subtle tree vitality decline. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **216**, 200–216. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2024.07.027
- CHOI, Su-In, Hyo-In LIM, Henry AJUNA, Jae-Hyun MOON, Sang-Jae WON, Vantha CHOUB, Ju-Yeol YUN a Young Sang AHN, 2023. *Biocontrol of Fungal Diseases and Improvement of Nursery Seedling Quality for Korean Fir (Abies Koreana E.H.Wilson) Using Bacillus Velezensis CE 100* [online]. Dostupné z: doi:10.2139/ssrn.4528430
- JANKOVSKÝ, Libor, 2003. Distribution and ecology of *Armillaria* species in some habitats of southern Moravia, Czech Republic. *Czech Mycology* [online]. **55**(3–4), 173–186. ISSN 12110981. Dostupné z: doi:10.33585/cmy.55303
- KAITERA, J., K. MÄKITALO a J. HANTULA, 2015. Incidence of *Gremmeniella abietina* in planted seedlings of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in northern Finland. *Forest Pathology* [online]. **45**(1), 14–20. ISSN 1439-0329. Dostupné z: doi:10.1111/efp.12118
- KAPITOLA, Petr, 2003. Korovnicovití Adelgidae. *Lesnická práce* [online]. **2003**(5), Lesní ochranná služba. Dostupné z: [https://www.silvarium.cz/images/letak-los/2003/2003\\_korovnicoviti.pdf](https://www.silvarium.cz/images/letak-los/2003/2003_korovnicoviti.pdf)

- KIM, Mee-Sook, Renate HEINZELMANN, Frédéric LABBÉ, Yuko OTA, Rubén Damián ELÍAS-ROMÁN, María Belén PILDAIN, Jane E. STEWART, Stephen WOODWARD a Ned B. KLOPFENSTEIN, 2022. Armillaria root diseases of diverse trees in wide-spread global regions. In: *Forest Microbiology* [online]. B.m.: Elsevier, s. 361–378 [vid. 2025-06-18]. ISBN 978-0-323-85042-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85042-1.00004-5
- KIM, So-Ra, Woo-Kyun LEE, Kijun NAM, Yongho SONG, Hangnan YU, Moonil KIM, Jong-Yeol LEE a Seung-Ho LEE, 2013. Investigation Into Reflectance Characteristics of Trees Infected by Pine Wilt Disease. *Journal of Korean Forest Society* [online]. **102**. Dostupné z: doi:10.14578/jkfs.2013.102.4.499
- KOGUT, Peter, 2024. Multispectral Vs. Hyperspectral Imaging: Differences And Uses. *EOS Data Analytics* [online] [vid. 2025-07-13]. Dostupné z: <https://eos.com/blog/multispectral-vs-hyperspectral-imaging/>
- KOLMER, James A, Maria E ORDONEZ a James V GROTH, 2009. The Rust Fungi. In: WILEY *Encyclopedia of Life Sciences* [online]. 1. vyd. B.m.: Wiley [vid. 2025-04-21]. ISBN 978-0-470-01617-6. Dostupné z: doi:10.1002/9780470015902.a0021264
- KOŠULIČ, Milan, 2010. Smíšené porosty jedle, smrku a buku s úrazem na jedli. In: *Cesta k přirozenému hospodářskému lesu*. 1. vydání. Brno: FSC ČR, o.s., s. 333–353. ISBN 978-80-254-6434-2.
- KOWALSKI, T. a K. ANDRUCH, 2010. Herpotrichia needle browning on Abies alba in the Lesko Forest District stands: disease intensity and associated fungi. In: [online]. [vid. 2025-03-12]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Herpotrichia-needle-browning-on-Abies-alba-in-the-Kowalski-Andruch/d2d20b91ec0f5c7846e17f213ec9e10bd918f825>
- KOWALSKI, T. a K. ANDRUCH, 2012. Mycobiota in needles of Abies alba with and without symptoms of Herpotrichia needle browning. *Forest Pathology* [online]. **42**(3), 183–190. ISSN 1439-0329. Dostupné z: doi:10.1111/j.1439-0329.2011.00738.x
- KOZÁKOVÁ, Radka, Pavel ŠAMONIL, Petr KUNEŠ, Jan NOVÁK, Petr KOČÁR a Romana KOČÁROVÁ, 2011. *Contrasting local and regional Holocene histories of Abies alba in the Czech Republic in relation to human impact: Evidence from forestry, pollen and anthracological data* [online] [vid. 2025-02-04]. Dostupné z: doi:10.1177/0959683610385721
- KUPKOVÁ, Lucie, Markéta POTŮČKOVÁ, Lucie ČERVENÁ, Jan MIŠUREC, Zuzana LHOTÁKOVÁ, Campbell PETYA K. E. a Jana ALBRECHTOVÁ, 2017. Laboratorní a obrazová spektroskopie a jejich využití pro zobrazování vegetace. In: *Metody hodnocení fyziologického stavu smrkových porostů*. Praha: Česká geografická společnost, s. 193–202.
- LANDGREBE, David, 2002. Hyperspectral image data analysis. *Signal Processing Magazine, IEEE* [online]. **19**, 17–28. Dostupné z: doi:10.1109/79.974718
- LAZAREVIĆ, Jelena a Audrius MENKIS, 2022. Cytospora friesii and Sydowia polyspora are associated with the sudden dieback of Abies concolor in Southern Europe. *Plant Protection Science* [online]. **58**(3), 258–263. ISSN 12122580, 18059341. Dostupné z: doi:10.17221/120/2021-PPS
- LERAT, Sylvain, Charles ROUSSIN-LÉVEILLÉE, Amadou SIDIBÉ, Peter MOFFETT a Carole BEAULIEU, 2023. Evidence of the Involvement of Nematostoma parasiticum in Herpotrichia Needle Browning of Abies balsamea. *Plant Disease* [online]. **107**(10), 2935–2938. ISSN 0191-2917. Dostupné z: doi:10.1094/PDIS-01-23-0075-SC
- LHOTÁKOVÁ, Zuzana, Veronika KOPAČKOVÁ-STRNADOVÁ, Filip OULEHLE, Lucie HOMOLOVÁ, Eva NEUWIRTHOVÁ, Marian ŠVIK, Růžena JANOUTOVÁ a Jana ALBRECHTOVÁ, 2021. Foliage Biophysical Trait Prediction from Laboratory Spectra in Norway Spruce Is More Affected by Needle Age Than by Site Soil Conditions. *Remote Sensing* [online]. **13**(3), 391. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13030391
- LIŠKA, J., R. MODLINGER a J. HAVELKA, 2009. Korovnice rodu Dreyfusia na jedli. *Lesnická práce* [online]. **2009**(12), Lesní ochranná služba. Dostupné

- z: [https://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2009/2009\\_korovnice.pdf](https://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2009/2009_korovnice.pdf)
- MAURI, A., D. DE RIGO a G. CAUDULLO, 2016. *Abies alba* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. **2016**, 48–49.
- METZLER, Berthold, Ulrike HECHT, Michael NILL, Franka BRÜCHERT, Siegfried FINK a Ulrich KOHNLE, 2012. Comparing Norway spruce and silver fir regarding impact of bark wounds. *Forest Ecology and Management* [online]. **274**, 99–107. ISSN 0378-1127. Dostupné z: [doi:10.1016/j.foreco.2012.02.016](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.016)
- MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2024. Druhové složení lesů. In: *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2023* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství Těšnov 17, 110 00 Praha 1 [www.mze.gov.cz](http://www.mze.gov.cz), s. 57. ISBN 978-80-7434-790-0. Dostupné z: <https://nli.gov.cz/wp-content/uploads/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-ceske-republiky-v-roce-2023.pdf>
- OBLINGER, Brent W., Benjamin C. BRIGHT, Ryan P. HANAVAN, Mike SIMPSON, Andrew T. HUDAK, Bruce D. COOK a Lawrence A. CORP, 2022. Identifying conifer mortality induced by *Armillaria* root disease using airborne lidar and orthoimagery in south central Oregon. *Forest Ecology and Management* [online]. **511**, 120126. ISSN 03781127. Dostupné z: [doi:10.1016/j.foreco.2022.120126](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120126)
- PALOVČÍKOVÁ, Dagmar, 2017. Houbové choroby asimilačních orgánů jehličnanů v ČR. *Živa*. **05/2017**(5), 245–249.
- PANDEY, Piyush, Kitt G. PAYN, Yuzhen LU, Austin J. HEINE, Trevor D. WALKER, Juan J. ACOSTA a Sierra YOUNG, 2021. Hyperspectral Imaging Combined with Machine Learning for the Detection of Fusiform Rust Disease Incidence in Loblolly Pine Seedlings. *Remote Sensing* [online]. **13**(18), 3595. ISSN 2072-4292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs13183595](https://doi.org/10.3390/rs13183595)
- PUSZ, Wojciech, Anna BATURO-CIESNIEWSKA, Agata KACZMAREK-PIENCZEWSKA, Tomasz ZWIJACZ-KOZICA a Katarzyna PATEJUK, 2021. The mycobiota of needles and shoots of silver fir (*Abies alba* Mill.) with symptoms of *Herpotrichia* needle browning in the Tatra Mts. (Poland). *Annals of Forest Research* [online]. **63**(2), 45–56. ISSN 18448135, 20652445. Dostupné z: [doi:10.15287/afr.2020.1978](https://doi.org/10.15287/afr.2020.1978)
- RAJ, Thinal, Fazida Hanim HASHIM, Aqilah Baseri HUDDIN, Mohd Faisal IBRAHIM a Aini HUSSAIN, 2020. A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms. *Electronics* [online]. **9**(5), 741. ISSN 2079-9292. Dostupné z: [doi:10.3390/electronics9050741](https://doi.org/10.3390/electronics9050741)
- ROMERALO, Carmen, Leticia BOTELLA, Oscar SANTAMARÍA, Julio Javier DIEZ a Gaston LAFLAMME, 2023. *Gremmeniella abietina*: a Loser in the Warmer World or Still a Threat to Forestry? *Current Forestry Reports* [online]. **9**(5), 332–349. ISSN 2198-6436. Dostupné z: [doi:10.1007/s40725-023-00193-2](https://doi.org/10.1007/s40725-023-00193-2)
- SÁNCHEZ-MIRANDA, A., J. J. CAMARERO a A. SOLLA, 2006. Effects of the pathogenic fungus *Melampsorella caryophyllacearum* on radial growth of *Abies alba*. *Forest Systems* [online]. **15**(2), 171–181. ISSN 2171-9845. Dostupné z: [doi:10.5424/srf/2006152-00962](https://doi.org/10.5424/srf/2006152-00962)
- SCHOLLER, Markus, Uwe BRAUN, Ramona BUCHHEIT, Thomas SCHULTE a Ben BUBNER, 2022. Studies on European rust fungi, Pucciniales: molecular phylogeny, taxonomy, and nomenclature of miscellaneous genera and species in Pucciniaceae and Coleosporiaceae. *Mycological Progress* [online]. **21**(8) [vid. 2025-07-13]. ISSN 1617-416X, 1861-8952. Dostupné z: [doi:10.1007/s11557-022-01810-3](https://doi.org/10.1007/s11557-022-01810-3)
- SOLLA, Alejandro, Angela SÁNCHEZ-MIRANDA MORENO a Jesús CAMARERO, 2006. Radial-growth and wood anatomical changes in *Abies alba* infected by *Melampsorella caryophyllacearum*: A dendroecological assessment of fungal damage. *Annals of Forest Science* [online]. **63**, 293–300. Dostupné z: [doi:10.1051/forest:2006008](https://doi.org/10.1051/forest:2006008)
- SOUKUP, František, 2011. *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. s. l. kořenovník vrstevnatý [online]. **2011**(8), Lesní ochranná služba. Dostupné z: [https://home.czu.cz/storage/468/54065\\_2011\\_Heterobasidion.pdf](https://home.czu.cz/storage/468/54065_2011_Heterobasidion.pdf)

- SPRÁVA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ MĚSTA PLZNĚ, 2020. *Drony SIT pomáhají v boji proti kůrovci* [online] [vid. 2025-07-22]. Dostupné z: [https://www.sitmp.cz/novinky\\_detail/drony-sit-pomahaji-v-boji-proti-kurovci/](https://www.sitmp.cz/novinky_detail/drony-sit-pomahaji-v-boji-proti-kurovci/)
- STONE, Christine a Caroline MOHAMMED, 2017. Application of Remote Sensing Technologies for Assessing Planted Forests Damaged by Insect Pests and Fungal Pathogens: a Review. *Current Forestry Reports* [online]. **3**(2), 75–92. ISSN 2198-6436. Dostupné z: doi:10.1007/s40725-017-0056-1
- UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2021. Managing Pests in Gardens: Diseases: Heterobasidion root disease—UC IPM. *Managing Pests in Gardens: Diseases: Heterobasidion root disease—UC IPM* [online] [vid. 2025-06-20]. Dostupné z: [https://ipm.ucanr.edu/PMG/GARDEN/PLANTS/DISEASES/heterobasidion\\_annosum.html](https://ipm.ucanr.edu/PMG/GARDEN/PLANTS/DISEASES/heterobasidion_annosum.html)
- VEJPUŠTKOVÁ, Monika, Buriánek VÁCLAV, Tomas CIHAK, Petr FABIÁNEK, Fadrhonsová VĚRA, Katerina HELLEBRANDOVA, Radek NOVOTNÝ a Vít SRÁMEK, 2019. *Monitoring zdravotního stavu lesa v České republice v rámci programu ICP Forests a navazujících projektů Data do roku 2018 Monitoring of forest condition in the Czech Republic in frame of ICP Forests programme and follow-up projects Data to 2018.*
- VERRELST, Jochem, Zbyněk MALENOVSKÝ, C. TOL, Gustau CAMPS-VALLS, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY, Philip LEWIS, P.R.J. NORTH a Jose MORENO, 2020. *Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: a review on retrieval methods* [online]. Dostupné z: doi:10.48550/arXiv.2012.04555
- WATT, Michael S., Tomás POBLETE, Dilshan DE SILVA, Honey Jane C. ESTARIJA, Robin J.L. HARTLEY, Ellen Mae C. LEONARDO, Peter MASSAM, Henning BUDDENBAUM a Pablo J. ZARCO-TEJADA, 2023. Prediction of the severity of Dothistroma needle blight in radiata pine using plant based traits and narrow band indices derived from UAV hyperspectral imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. **330**, 109294. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2022.109294
- ZABIHI, Khodabakhsh, Peter SUROVY, Aleksei TRUBIN, Vivek Vikram SINGH a Rastislav JAKUŠ, 2021. A review of major factors influencing the accuracy of mapping green-attack stage of bark beetle infestations using satellite imagery: Prospects to avoid data redundancy. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [online]. **24**, 100638. ISSN 23529385. Dostupné z: doi:10.1016/j.rsase.2021.100638
- ZHONG, Hao, Wenshu LIN, Haoran LIU, Nan MA, Kangkang LIU, Rongzhen CAO, Tiantian WANG a Zhengzhao REN, 2022. Identification of tree species based on the fusion of UAV hyperspectral image and LiDAR data in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Northeast China. *Frontiers in Plant Science* [online]. **13**, 964769. ISSN 1664-462X. Dostupné z: doi:10.3389/fpls.2022.964769