



Metodika mapování invazních druhů pomocí dálkového průzkumu

Jana Müllerová, Tomáš Bartaloš, Josef Brůna, Petr Dvořák a Michaela Vítková

2017

T A
Č R

 **BOTANICKÝ
ÚSTAV AV ČR**
v.v.i.

 **VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ**

 **gisat**

Autorský kolektiv:

Jana Müllerová^a, Tomáš Bartaloš^b, Josef Brůna^a, Petr Dvořák^c, Michaela Vítková^d

^aOddělení GIS a dálkového průzkumu země, Botanický ústav AV ČR, v. v. i., Zámek 1, Průhonice

^bGISAT s. r. o., M. Horákové 1523/57, Praha 7

^cLetecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, Brno

^dOddělení ekologie invazí, Botanický ústav AV ČR, v. v. i., Zámek 1, Průhonice

Kontaktní informace: Müllerová J., Oddělení GIS a dálkového průzkumu země, Botanický ústav AV ČR, v. v. i., Zámek 1, 25243 Průhonice, e-mail: jana.mullerova@ibot.cas.cz, tel.: +420 271015207; www.invaznirosliny.cz

Odborní recenzenti:

ing. Kateřina Berchová, Ph.D., Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 1176, 16521 Praha

Ing. Filip Hájek, Ph.D., Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, Specializované pracoviště Dálkový průzkum Země a fotogrammetrie, Pobočka Frýdek-Místek, Nádražní 2811, 738 01 Frýdek-Místek

Abstrakt:

Metodika obsahuje podrobný popis detekce a monitoringu vybraných druhů invazních rostlin metodami dálkového průzkumu Země. Jedná se o bolševník velkolepý (*Heracleum mantegazzianum*), druhy rodu křídlatka (k. japonská, *Fallopia japonica*; k. sachalinská, *F. sachalinensis*; a k. česká, *F. x bohémica*), pajasan žláznatý (*Ailanthus altissima*) a trnovník akát (*Robinia pseudoacacia*). Součástí dokumentu je také stručný popis druhů, jejich biologie a ekologie, rozšíření a zhodnocení stavu a rizika invaze v ČR. Metodika představuje také možnosti prezentace a využití získaných dat a zapojení veřejnosti do monitoringu.

Metodika byla zpracována za finanční podpory TA ČR (www.tacr.cz; projekt TA04020455). Zpracovaná metodika nezasahuje do práv jiných osob, souhlasíme s jejím volným zpřístupněním. Stejně jako další výsledky z projektu je dostupná na webových stránkách www.invaznirosliny.cz a na stránkách oddělení <http://labgis.ibot.cas.cz/>

Citace: Müllerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J., Dvořák, P., & Vítková, M. (2017). Metodika mapování invazních druhů pomocí dálkového průzkumu. Botanický ústav AV ČR, Průhonice.

Foto na obálce - P. Dvořák

Obsah:

1. Úvod a cíle metodiky	1
2. Popis zájmových druhů	4
2.1 Bolševník velkolepý	4
2.2 Křídlatky	7
2.3 Pajasan žláznatý	10
2.4 Trnovník akát	12
3. Detekce rostlinných invazí pomocí DPZ	15
3.1. Sběr dat pomocí bezpilotního prostředku	16
3.1.1. Prostředky vhodné pro snímkování vegetace	16
3.1.2. Sběr snímků	18
3.1.3. Snímkovací strategie	19
3.1.4. Provoz UAV	20
3.2. Tvorba ortomozaiky z UAV	21
3.2.1. Uložení dat	22
3.2.2. Kontrola kvality dat	22
3.2.3. Preprocessing	22
3.2.4. Tvorba ortomozaiky	23
3.2.5. Kontrola a finalizace výstupů	24
3.3. Klasifikace snímků - metody DPZ	24
3.4. Vyhodnocení přesnosti výsledků	26
4. Postup mapování zájmových druhů z dat DPZ	28
4.1 Detekce bolševníku velkolepého	28
4.1.1 Bolševník - doba snímkování	28
4.1.2 Bolševník - klasifikační přístup a typ dat	29
4.2 Detekce křídlatek	31
4.2.1 Křídlatky - doba snímkování	31
4.2.2 Křídlatky - klasifikační přístup a typ dat	32
4.3 Detekce pajasanu žláznatého	33
4.3.1 Pajasan - doba snímkování	33
4.4.2 Pajasan - klasifikační přístup a typ dat	34
4.4 Detekce trnovníku akátu	35

4.4.1 Akát - doba snímkování	35
4.4.2 Akát - klasifikační přístup a typ dat	37
5. Rozšíření zájmových druhů	39
5.1 Geoportál	39
5.2 Zapojení veřejnosti	40
5.3 Další zdroje	41
6. Uplatnění metodiky	43
7. Srovnání s jinými metodami mapování	43
8. Závěr	45
9. Poděkování	45
10. Seznam použité literatury	46
11. Vysvětlení termínů a zkratk	50
Přílohy	52
Související publikace autorského kolektivu, které metodice předcházely	54

1. Úvod a cíle metodiky

Problematika rostlinných invazí představuje v současné době téma velmi aktuální na světové i národní úrovni, jelikož invaze způsobují rozsáhlé škody na majetku, životním prostředí (biodiversitě), lidském zdraví i ekosystémových funkcích (Pyšek & Richardson 2010). Představují vážnou hrozbu pro moderní, rychle se měnící krajinu, která trpí na jedné straně velmi intenzivním využíváním člověkem a na straně druhé opouštěním tradičního obhospodařování (Millennium Ecosystem Assessment 2005). I přes celosvětovou snahu o kontrolu a omezení invazních druhů jejich dopad roste (Hulme et al. 2009), a může i nadále stoupat ve spojitosti s globálními změnami. Také v ČR představují rostlinné invaze vážný problém (Pyšek et al. 2012a), a to i přes nemalé prostředky vynakládané v posledních letech na jejich likvidaci (např. projekt Omezení výskytu invazních druhů rostlin v Karlovarském kraji, OPŽP 2013-15, dotace 73,42 mil. Kč). Některé invazní druhy jsou přímo toxické pro člověka i domácí zvířata (např. bolševník velkolepý) nebo způsobují alergie (např. ambrosie peřenolistá či pajasan žláznatý, Pyšek & Richardson 2010). Všechny invazní druhy způsobují výrazný pokles biodiversity a potlačují původní druhy, některé dokonce významně mění půdní prostředí (např. trnovník akát, Vítková et al. 2015). Kromě nepřímých nákladů na jejich likvidaci mohou způsobovat také výrazné přímé ekonomické škody, např. narušovat stavby rychle rostoucími kořeny a oddenky (např. křídlatky). Některé druhy, jako např. trnovník akát, přináší i ekonomické zisky a v takových případech je složité najít shodu na vhodné strategii. V případě akátu se střetávají zájmové skupiny lesníků a včelařů, kterým dřevina přináší zisky, s ochranou přírody a rekreanty, pro něž je druh problémový. U druhů tohoto typu, které se v krajině pěstují již dlouho a jsou velmi rozšířeny, a zároveň neprokazují agresivní šíření, je proto třeba management přizpůsobit, tj. zaujmout tvrdý postoj tam, kde druh významně ohrožuje biodiversitu (cenné přírodní lokality) a naopak jej ponechat v intenzivně využívané krajině (Vítková et al. 2017).

Invazní druhy se často šíří velmi rychle, což představuje velký problém při jejich likvidaci, zvláště pak v pozdějších stádiích. Poté, co se rostlina v krajině značně rozšíří, je velmi složité invazi zastavit, či alespoň zpomalit. Likvidační zásahy by proto měly vždy mířit na počáteční stadia invaze a ohniska potenciálního šíření rostliny (Müllerová et al. 2013; Pluess et al. 2012). Proto je potřebná včasná a přesná detekce a pravidelný monitoring, a to jak pro cílení samotné eradikace, tak i pro kontrolu účinnosti zásahů (Evropská komise 2008, 2014). Dálkový průzkum Země (DPZ) představuje účinný způsob detekce za podmínky, že rostlina je dostatečně odlišná od okolní vegetace (spektrální charakteristiky, květy, architektura listů atp.) a formuje porosty dostatečně velké v kontextu spektrálního, časového a/či prostorového rozlišení dostupných dat DPZ. Tyto metody umožňují poměrně snadno opakovatelné detailní vegetační mapování na větších územích za snížených nákladů ve srovnání s pozemním šetřením. Potenciál DPZ pro monitoring invazí nebyl ještě vyčerpán a pro mnoho druhů zatím nejsou popsány vhodné algoritmy.

S rostoucí dostupností dat s velmi vysokým prostorovým a časovým rozlišením (např. z bezpilotních leteckých systémů) roste potenciál těchto metod pro detekci i hůře rozpoznatelných druhů. Pro detekci rostlinných druhů je klíčové správné načasování sběru dat DPZ, jelikož některé druhy jsou lépe rozeznatelné v určité fenofázi (např. kvetení či žloutnutí listů), ať už díky výrazné barvě/tvaru v tomto období (např. bolševník velkolepý) nebo díky rozdílu ve fenologii invazního

druhu a okolních rostlin (Shouse et al. 2013; Rocchini et al. 2015; Müllerová et al. 2017a, b). V současnosti volně dostupná satelitní data (Landsat, Sentinel-2) nedosahují dostatečného prostorového rozlišení. Komerčně dostupná satelitní data s vyšším prostorovým rozlišením jsou kromě finanční náročnosti omezena v temporálním rozlišení zejména z důvodu oblačnosti, což zvláště v případě území s vyšším podílem mračné oblohy může být problém.

Naproti tomu bezpilotní letecké systémy (UAV, známé také pod označením UA, UAS, RPAS nebo Dron) poskytují ideální nástroj pro flexibilní pořizování dat s extrémně vysokým prostorovým a časovým rozlišením při nízkých nákladech. Jsou také vhodné pro cílený monitoring (zaměřený např. na zvláště chráněné k invazi náchylné lokality nebo na kontrolu po zásazích). UAV se stále častěji využívají v různých oblastech ekologie a ochrany přírody (Whitehead et al. 2014; Zweig et al. 2015). Mají však i své limity, a to především v případě nízkonákladového řešení je to snížené spektrální rozlišení a degradace dat způsobená geometrickým a radiometrickým zkreslením (Colomina & Molina 2014; Whitehead & Hugenholtz 2014). Velké množství produkovaných snímků také vytváří potřebu automatického zpracování dat, a extrémně vysoké prostorové rozlišení přináší problémy s přesnou lokalizací validačních dat vzhledem k omezením dostupných měřících přístrojů, a to především v zalesněných či zvlněných územích (Müllerová et al. 2017a). Je nutné zmínit také pravidla provozu bezpilotních prostředků, která významně omezují jejich použití v zástavbě, v okolí liniových staveb, atp. (v ČR jsou pravidla definována leteckým předpisem L2, doplněk X), což může být limitující vzhledem k tomu, že invazní druhy často preferují intravilán obcí a měst (Kowarik 2008). Tímto omezením nejsou klasické letecké či satelitní snímky svázány. Při volbě vhodných dat pro monitoring je tedy třeba zohlednit jejich výhody a nevýhody (Tabulka 1).

Cílem metodiky jako výstupu z projektu TAČR TA0402045, řešeného v letech 2014-2017 Botanickým ústavem AV ČR, v.v.i., VUT v Brně a firmou GISAT bylo navrhnout nízkonákladové a flexibilní řešení semi-automatické detekce zájmových invazních druhů za využití navrženého bezpilotního prostředku. Byly vybrány problematické invazní druhy, které podle databáze DAISIE (<http://www.europe-aliens.org>) patří v Evropě mezi 100 nejinvazivnějších druhů a v ČR jsou zařazeny do Černého seznamu nepůvodních druhů (Pergl et al. 2016a). Patří mezi ně byliny bolševník velkolepý (*Heracleum mantegazzianum*) a skupina invazních křídlatek - k. japonská, sachalinská a česká (*Fallopia japonica*, *F. sachalinensis* a *F. x bohemica*, pro účely metodiky bylo třeba tyto křídlatky seskupit, protože není možné je od sebe metodami DPZ rozlišit). Z dřevin jsou to pajasan žláznatý (*Ailanthus altissima*) a trnovník akát (*Robinia pseudoacacia*). Metodika navrhuje postup mapování těchto invazních druhů pomocí metod dálkového průzkumu jako rychlou a účinnou detekci jejich rozšíření. Cílem bylo najít nejvhodnější postup, který bude efektivním nástrojem pro ochranu přírody a přispěje k vyšší účinnosti opatření přijatých proti šíření těchto problémových druhů.

Tabulka 1. Výhody a nevýhody různých druhů dat DPZ pro monitoring invazních druhů. Nejlepší možnosti vyznačeny tučně (adaptováno z Müllerová et al. 2017b)

Parametr	NASA & ESA družice např. LANDSAT či SENTINEL	komerční družice s vysokým prostorovým rozlišením	letecké snímky	bezpilotní snímky
flexibilita načasování	žádná, ale rozsáhlý archiv	nízká	střední	vysoká
prostorové rozlišení	až 10 m	až 0,3-0,4 m	0,1 - 0,5 m	až 1 cm
spektrální rozlišení	vysoké	střední	různé dle nosiče	různé dle nosiče
časové rozlišení	vysoké	střední	nízké	velmi vysoké
náklady	žádné	vysoké	vysoké	nízké
sběr dat	snadný - dostupné na internetu	snadný - komerční objednávka	snadný - komerční objednávka	nutná zkušenost, ale možno také komerčně objednat
příprava dat	standardizována	standardizována	standardizována	nestandardizovaná, komplexní
limit sběru dat - mračná obloha	nemožné	nemožné	nemožné	možné v případě vyšší oblačnosti bez deště
limit sběru dat - vítr	nemá vliv	nemá vliv	limitující je jen velmi silný vítr	velmi problematické
zákonná omezení	ne	ne	málo	mnoho omezení (např. v zastavěných plochách, soukromých pozemcích, komerčních zónách, v okolí letišť...)
množství dat	střední	vysoké	vysoké	velmi vysoké

2. Popis zájmových druhů

2.1 Bolševník velkolepý

Bolševník velkolepý (*Heracleum mantegazzianum* Sommier et Lévier 1895, Obr. 1) je dvouletá až vytrvalá rostlina z čeledi miříkovitých, dorůstající výšky 5 m s nápadným bílým květenstvím, které může dosahovat až 60 cm v průměru. Pochází ze Západního Kavkazu (JZ Asie). Jako dekorativní rostlina byl introdukován do Evropy v r. 1817, na území ČR pak v r. 1862 do zámeckého parku Kynžvart. Už v roce 1877 se naturalizoval v blízkém okolí parku a brzy se stal populární, masivně šířit se ale začal až v 80. letech 20. st. (Pyšek et al. 2008). Záměna je nepravděpodobná – u nás původní b. obecný (*H. sphondylium*) je mnohem menší, invazní b. perský (*H. persicum*) je vzácný (ojediněle na Opavsku), a b. Sosnowského (*H. sosnowskyi*) se v ČR vůbec nevyskytuje.



Obr. 1 Bolševník velkolepý je impozantní rostlina, a to jak v době květu, kdy tvoří výrazná bílá květenství složených okolíků, i době zralosti, kdy tvoří velké množství semen (průměrně 20 000). Díky své velikosti (výška až 5 m a listy až 2 m dlouhé) a výraznému květenství (o průměru až 1 m) je dobře identifikovatelný pomocí metod dálkového průzkumu (foto J. Müllerová a M. Vítková)

Rostlina se dožívá maximálně 13 let. Jeho semenáčky vzcházejí velmi brzy na jaře, mortalita je vysoká, takže do dospělosti přežívá jen malé procento. V prvních letech vytváří přízemní listovou růžici a v tomto stadiu většinou přetrvává 3 až 5 let, v nepříznivých podmínkách i 12 let, a ukládá zásobní látky do hlavního kulovitého kořene (max. 3 m). Vykvete až po nahromadění dostatečných

zásob. Nejvhodnějším obdobím pro detekci bolševníku pomocí DPZ je právě doba květu, což je ve středoevropských podmínkách ideálně od poloviny června do poloviny července (Müllerová et al. 2008, 2017b). Nápadná bíle kvetoucí rostlina má specifickou architekturu. Až 5 m vysoká rostlina má dutou lodyhu s průměrem 2–10 cm a až 2 m dlouhými zpeřenými listy v přízemní růžici. Kvete drobnými, bílými květy uspořádanými v květenství složených okolíků, které je tvořeno největším a nejdříve kvetoucím vrcholovým okolíkem (až 60 cm v průměru) a až osm menších satelitních okolíků složených z okolíčků (celkově až 1 m v průměru; Obr. 1). Na jedné rostlině se zároveň vyskytují oboupohlavné a samčí květy.

Po odkvětu rostlina hyne, vegetativně se nemnoží. Rozšiřuje se výhradně semeny, kterých vytváří průměrně 20 000 (Perglová et al. 2006; Obr. 1). Semena se šíří na krátkou vzdálenost (2–10 m) především větrem, na větší vzdálenosti pak buď pomocí vody nebo člověka. Pro klíčení je nutná stratifikace chladem. Přes 90 % semen vyklíčí brzy na jaře po první zimě, zbytek tvoří krátkodobou semennou banku, po třetím roce zůstává asi jen 1 % živých a dormantních semen (Moravcová et al. 2006).

Výskyt

Ačkoliv je bolševník schopen růst v různých klimatických podmínkách, nejlépe se mu daří v chladném a vlhkém klimatu. Preferuje sice hluboké, vlhké půdy bohaté na humus a živiny, zejména dusík, může ale růst i na půdách chudších a sušších, kde dorůstá nižší velikosti. Snese i krátkodobé zaplavení a určitou míru zasolení. To mu umožňuje invadovat širší škálu biotopů než většina ostatních neofytů. Nejrychleji osídluje otevřené narušované plochy s dostatečnou zásobou dusíku a absencí pravidelného managementu, jako jsou vlhčí rumišťe, okolí vodních toků a silnic, neudržované zahrady a louky či okraje lesa. Naopak na intenzivně obhospodařovaných, suchých nebo silně zastíněných lokalitách se téměř nevyskytuje (např. Pyšek et al. 2012b). Jakmile na stanoviště pronikne, často se rychle šíří bez ohledu na charakter původní vegetace a stanovištní podmínky. Může vytvářet velkoplošné porosty, častěji však roste v menších populacích nebo skupinkách. Mění druhové složení a snižuje diversitu zasažených společenstev díky mimořádné listové ploše a výšce, která mu umožňuje pohltnout většinu dopadajícího světla (Hejda et al. 2009).

V současné době je bolševník naturalizovaný nebo invazní v severní a střední Evropě, centrálním Rusku, Severní Americe, Austrálii a na Novém Zélandě, naopak se vůbec nevyskytuje v teplých oblastech vzhledem k nutné stratifikaci semen chladem (Pyšek et al. 2007). Rostlina je odolná vůči mrazu a díky hlubokému kořenovému systému dokáže tolerovat i mírná letní sucha. V teplejších oblastech vyhledává zastíněná stanoviště. V ČR není jeho výskyt rovnoměrný, masivně se vyskytuje v z. Čechách, kde byl poprvé introdukován, a odkud se začal nekontrolovatelně šířit až v souvislosti se změnou využívání krajiny a antropogenními disturbancemi po 2. světové válce (Pyšek & Prach 1993; Müllerová et al. 2005). V ostatních částech ČR většinou tvoří menší lokální porosty (např. Lounsko, Žatecko, Křivoklátsko, okolí Prahy, Prostějovsko). Postupně obsazuje narušovaná stanoviště v okolí vodních toků, silnic a železnic a začíná pronikat i do teplejších oblastí a méně narušovaných polopřirozených biotopů (Pyšek et al. 2007).

Nebezpečnost

Jako druh s mimořádným invazním potenciálem byl bolševník zařazen mezi 100 nejinvaznějších druhů Evropy (DAISIE 2012), invazní nepůvodní druhy s významným dopadem na Unii (Evropská komise 2017) a nejnebezpečnější neofyty v ČR (skupina BL1; Pergl et al. 2016a, b). Pro jeho vysoký invazní potenciál je určující kombinace mnoha schopností, mezi něž patří samoopylení, rychlý růst, vysoká produkce biomasy i semen, výborná klíčivost, plasticita v načasování kvetení, vysoký regenerační potenciál a schopnosti uplatnit se na narušených stanovištích (Pyšek et al. 2007). Jeho výskyt přináší mnohé problémy, je např. obtížným plevelem, způsobuje erozi břehů a má negativní dopad i na lidské zdraví, jelikož způsobuje dotykovou alergii. Celá rostlina obsahuje fenolické glykosidy ze skupiny furanokumarinů, které po potřísnění pokožky či pouhým dotykem a následném ozáření UV paprsky způsobují závažné zdravotní komplikace (Nielsen et al. 2005).

Management

Managementu bolševníku velkolepého je věnována značná pozornost (např. Nielsen et al. 2005, Pyšek et al. 2007, Lvončík et al. 2010). Důležitá je prevence jeho šíření, která by v oblastech náchylných k invazi měla zahrnovat zamezení přísunu semen a udržení nebo zavedení vhodného způsobu obhospodařování krajiny. Návrhem optimálního managementu se zabývá např. instruktážní návod na stránkách projektů na likvidaci bolševníku na Mariánskolázeňsku a Sekersku (<http://bolsevník.eu/>), Nielsen et al. (2005), Lvončík et al. (2010), Karlovarský kraj (2015), Pergl et al. (2016b). Více informací lze najít také na stránkách AOPK ČR, zabývajících se invazními druhy (<http://invaznidruhy.nature.cz/>). Plánované zásahy je nezbytné zasadit do kontextu krajiny a rozsahu samotné invaze. Protože se bolševník rozmnožuje výhradně semeny, je třeba kontrolovat jejich pohyb v krajině a omezit jejich produkci. V plošně rozsáhlých porostech nebo v oblastech, kde je vyloučena aplikace herbicidů lze dlouhodobě opakovat mechanické metody likvidace jako pastvu, kosení či včasné odstraňování okolíků (Obr. 2). Důležité je porost likvidovat vždy celý, aby nedocházelo k jeho regeneraci z ponechaných jedinců např. na okrajích pozemků a velkou pozornost věnovat kvetoucím rostlinám. Skot a ovce bolševník preferují, je ale třeba s pastvou začít brzy, kdy jsou rostliny relativně měkké a tudíž dobře požitelné. Opatření je třeba opakovat několikrát za sezónu a provádět pravidelnou kontrolu lokality po cca 7 let, aby nedošlo k vytvoření semen z regenerujících rostlin (Obr. 2). Po úspěšné likvidaci hrozí zvýšené nebezpečí eroze, a obnažené plochy jsou navíc ideálním stanovištěm pro opětovné uchycení bolševníku nebo jiných invazních rostlin. Relativně jednoduchým řešením je založit na asanovaných místech travní porost, který bude pravidelně obhospodařován (Nielsen et al. 2005).



Obr. 2 Lokalita po mechanické likvidaci bolševníku. Mnoho rostlin po zásahu regeneruje a některá semena z odříznutého okolíku vpravo pravděpodobně dokáží dozrát (foto J. Müllerová)

Na území ČR je bolševník pravidelně likvidován orgány ochrany přírody, a proběhlo také několik projektů na jeho velkoplošnou likvidaci jako např. projekty na likvidaci bolševníku na Mariánskolázeňsku a Sekersku (<http://bolsevník.eu/>) nebo projekt CZ.1.02/6.2.00/12.17406 (<http://gis.kr-karlovarsky.cz/heracleum-public/>). Omezení výskytu invazních druhů rostlin v Karlovarském kraji. Největším problémem takových projektů je udržitelnost po jejich skončení, jelikož jsou víceméně krátkodobé. Pro dlouhodobé omezení či dokonce likvidaci výskytu jakéhokoliv invazního druhu, a velmi rozšířených druhů jako je bolševník zvláště, je klíčová dlouhodobá systematická péče o krajinu a monitoring např. za použití nových metod jako je DPZ představený v této metodice.

2.2 Křídlatky

V České republice se vyskytují tyto tři nepůvodní druhy: křídlatka japonská (*Fallopia japonica* Houtt.), k. sachalinská *F. sachalinensis* (F. Schmidt) Ronse Decraene) a k. česká (*F. × bohémica* (Chrtek & Chrtková) J. P. Bailey). Synonymem rodového jména *Fallopia* je *Reynoutria*. Jedná se o statné vytrvalé dvoudomé byliny dva (k. japonská) až čtyři metry vysoké (k. sachalinská) s bohatě rozvětvenými, silnými dlouhými oddenky a drobnými bílými květy. Pocházejí z Japonska, příp. i přilehlých oblastí Koreje, Číny, Taiwanu a ostrova Sachalin (k. sachalinská; Bailey & Conolly 2000). Kříženec obou druhů k. česká byl popsán z Evropy, ale vyskytuje se i v původním areálu (zde popsán jako *R. × mizushima*, Mandák et al. 2004).

Křídlatky byly introdukovány do Evropy jako okrasné rostliny v 19. století (poprvé v r. 1825) a brzy se začaly spontánně šířit do okolí. K. japonská v Evropě pochází pravděpodobně z jediného klonu z Nizozemska z konce 40. let 19. st. (Bailey & Conolly 2000), v ČR byla poprvé zmíněna v r. 1883 (Mandák et al. 2004). K. sachalinská byla do Evropy introdukována poprvé r. 1855 do Petrohradu (Bailey & Conolly 2000), v ČR poprvé zaznamenána v r. 1921 (Pyšek & Prach 1993). O kříženci neexistují spolehlivé historické záznamy, jelikož byl poprvé popsán poprvé z ČR teprve v r. 1983, ale podle herbářových dokladů byl pěstován v anglických botanických zahradách už v r. 1872 (Bailey & Conolly 2000).

Křídlatky se staly oblíbeným prvkem zahrad a parků, díky rychlému růstu se využívaly jako dekorativní či medonosná rostlina, pícnina, zelenina i na ochranu choulostivých zemědělských kultur (Bailey & Conolly 2000). Do začátku 20. st. zplaňovaly jen výjimečně, zlom však nastal v meziválečném období, kdy byly běžně nabízeny v zahradnictvích. Do krajiny se začala exponenciálně šířit nejdřív k. japonská a poté i k. sachalinská.

Jednotlivé druhy křídlatek se od sebe liší především velikostí a tvarem listů. K. japonská má nejmenší listy s okrouhlou až široce trojúhelníkovitou, na bázi kolmo uťatou čepelí. Na rubu je nezřetelně chlupatá s krátkými papilami, které mají silně nafouklou bázi. K. sachalinská má naopak listy největší s podlouhle vejčitou čepelí, na vrcholu zaokrouhlenou a na bázi hluboce srdčitou. Na rubu jsou roztroušeně dlouze chlupaté stejně dlouhými, neztlustlými chlupy. K. českou lze snadno zaměnit za rodičovské druhy, nejpodobnější je k. sachalinské. Křídlatky kvetou od července do září. Květenstvím je lata mnohokvětých lichoklasů, v nichž květy nemají rozlišený kalich a korunu. Kvetou bíle (k. japonská) až zelenobíle (k. sachalinská). Plodem je 3-hranná nažka. K. česká je jen zřídka plodná, naproti tomu k. japonská plodí bohatě, a to i přesto, že se nemůže generativně rozmnožovat, jelikož do Evropy byl zavlečen pouze jediný klon - samičí (Pyšek et al. 2003). V pozdním podzimu (listopad) se lodyhy s opadávajícími listy barví do žluta, později do rezava, což je vhodné pro detekci pomocí metod DPZ (Obr. 3).

Křídlatky vytvářejí velké polykormony díky systému rozvětvených oddenků (Obr. 3). Šíření pomocí semen je vzácné, šíří se hlavně vegetativně pomocí malých úlomků oddenků i lodyh, a to i na velké vzdálenosti. Díky rychlému růstu mají křídlatky velkou konkurenční schopnost, vytlačují původní vegetaci a vytvářejí neprostupné porosty. Velkou hrozbou jsou zejména pro říční nivy, kde dochází k téměř úplné eliminaci ostatních druhů. Druhová bohatost postiženého společenstva nemá vliv na úspěšnost invaze, důležitější je kombinace stanovištních podmínek a přísun propagulí (tj. částí organismu sloužící k šíření a reprodukci; Bímová et al. 2004). Klonální růst umožňuje křídlatkám dobře regenerovat, takže se mohou na stanovišti udržet velmi dlouho. K. česká má lepší regenerační schopnosti než rodiče, je konkurenčně schopnější, takže je často z lokalit společného výskytu vytlačuje. Naproti tomu k. sachalinská je konkurenčně nejslabší, vyznačuje se menší schopností regenerace z lodyhy i oddenků a obvykle netvoří tak rozsáhlé porosty (Bímová et al. 2003).



Obr. 3 Porost křídlatky české na Přerovsku v létě a v pozdním podzimu, kdy se barví do rezava (foto M. Vítková)

Výskyt

Křídlatky preferují půdy s vyšším obsahem živin, mírně kyselé a vlhké. Za nejdůležitější je považováno pravidelné narušování stanovišť (Bímová et al. 2003), proto jsou vázány na lidská sídla, břehy vodních toků, silnice a železnice, ale najdeme je i na rumišťích, lesních okrajích, ojediněle ve světlých lesích, na loukách a pastvinách. Právě management jako pastva, pravidelná seč nebo orba křídlatky výrazně potlačuje. Záměrně vysazeny bývají v zahradách, parcích nebo jako živé ploty.

Nejméně náročná je k. japonská, která roste na všech typech půd, a dokáže tolerovat nedostatek dusíku i vysoké koncentrace těžkých kovů v městském prostředí. Je omezena klimaticky – limitují ji jarní a podzimní mrazy a roční úhrny srážek pod 500 mm. Roste především v severní a střední Evropě, ale byla zaznamenána i na jihu Evropy, v S. Americe, Austrálii, N. Zélandu a J. Americe (Chile). K. sachalinská je vysoce invazní v Evropě, S. Americe, Austrálii, N. Zélandě, Indii a Jihoafrické republice. K. česká je invazní v celé Evropě a S. Americe, přičemž v jižnějších a východnějších částech Evropy je zřejmě hojnější než rodičovské druhy. V ČR jsou křídlatky rozšířeny po celém území. K. česká se šíří dvojnásobnou rychlostí než rodičovské druhy, nejpomaleji invaduje k. sachalinská (Mandák et al. 2004).

Nebezpečnost

Všechny zmíněné křídlatky patří mezi 100 nejinvaznějších druhů Evropy (DAISIE 2012), v ČR jsou zařazeny do skupiny BL2 (neofyty s mírným až masivním vlivem; Pergl et al. 2016a). Protože jsou vnímány jako agresivní invazní druhy a perspektivně se předpokládá jejich další šíření, je s výjimkou příměstských oblastí doporučena jejich likvidace, a to pokud možno ještě v počátku, než dojde ke vzniku souvislých porostů. Nové porosty, ať už z okrasných nebo hospodářských důvodů, by neměly být zakládány (Pergl et al. 2016b).

Management

Likvidace křídlatek je obtížná a velmi zdoluhavá, jelikož vytvářejí mohutný podzemní kořenový systém a mají vysokou schopnost regenerace i z velmi malých úlomků oddenků (k. japonské stačí oddenek o váze menší než 0,7 g) či nadzemních výhonů. Management tedy vyžaduje pečlivý přístup a opatrné nakládání jak s rostlinným odpadem (posekanou biomasou), tak i s kontaminovanou zemínou. Metody likvidace křídlatek testoval Barták et al. (2010) v Moravskoslezském kraji v rámci projektu LIFE, hojně je používán tzv. Beskydský postup (Šrubař & Albín 2005). Z výsledků těchto projektů vychází i Pergl et al. (2016b). Více informací lze najít také na stránkách AOPK ČR, zabývajících se invazními druhy (<http://invaznidruhy.nature.cz/>). Nejvhodnější metodou likvidace křídlatek je aplikace herbicidu na list koncem léta, kdy musí být zasažena maximální listová plocha. Na ochranněsky hodnotných lokalitách nebo v okolí vodních zdrojů je vhodnější metodou injektáž, tj. bodová aplikace herbicidu vpichy do stvolů. Přestože mechanické metody (pastva, sekání) nevedou k totální likvidaci křídlatek, jsou používány v případech, kdy nelze použít herbicidy. Z důvodu rychlého růstu a dřevnatění stvolů se ruční kosení doporučuje opakovat až 8krát za rok a vždy co nejdříve u země. Tato metoda účinně brání rozrůstání křídlatek, jen pokud je aplikována opakovaně a dlouhodobě. Křídlatky je možné také omezovat pastvou a dosekáváním, pastva však musí být

zahájena co nejdříve kvůli stravitelnosti křídlatky. Vyrývání a vykopávání křídlatek se nedoporučuje z důvodu vysoké regenerační schopnosti z úlomků kořenů a finanční náročnosti. Po ošetření lokalit musí následovat výsev vhodné travní směsi, aby se zamezilo invazi jiných nežádoucích druhů. Likvidace křídlatek je tedy obtížná a nejlepším způsobem je prevence a včasný monitoring potenciálních ohnisek invaze.

2.3 Pajasan žláznatý

Pajasan žláznatý (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle 1916) je opadavý listnatý strom vysoký 20-25 m s rovným kmenem a hladkou, šedavou, ve stáří slabě rozbrázděnou borkou. Má řídkou korunu se silnými větvemi a 30-100 cm dlouhými lichozpeřenými listy (Obr. 4). Jeho původní areál výskytu je v severovýchodní a východní Číně a Koreji do nadmořské výšky 1000 m. Do Evropy se dostal v roce 1740 (do Paříže). Vyskytuje se i v Americe, severní Africe, Austrálii a Novém Zélandu (Křivánek 2006). Do českých zemí byl introdukován nejspíš až v r. 1799 do Lednice, k prvnímu zplanění pak došlo v roce 1874.

Je to krátkověký pionýrský druh, který se dožívá okolo 50 let. Pajasan je dvoudomá dřevina. Květy rozkvétají v koncových 10-40 cm dlouhých žlutozelených latách od dubna do července. Samičí rostliny jsou medonosné s velmi dobrou kvalitou medu. Plodem je křídlatá podlouhlá nažka, zpočátku červená, později tmavne. Plodit začíná v 10 letech, produkuje až 300 000 semen (Bory & Clair-Maczulajtys 1980; Obr. 4). Šíří se velmi dobře na velké vzdálenosti větrem, ale i vodou. Z bohaté úrody klíčí mezi 65-85 % semen, klíčivost je ale krátká. Semenáčky dokáží vyrůst prakticky kdekoli a za 1. rok mohou dosáhnout až 2 m výšky. Pajasan také intenzívně zmlazuje z kořenů a pařezů, výmladky se objevují až ve vzdálenosti 300 m od rodičovského jedince, a mohou přežívat až 20 let i ve špatných světelných podmínkách, pokud není spojení přerušeno. Obsazený prostor si pajasan brání i alelopaticky tím, že vylučuje látky bránící růstu konkurenčních druhů (Lawrence et al. 1991). Dřevo pajasanu je tvrdé, lehké, ohebné, v suchém prostředí trvanlivé. Využívá se jako stavební surovina, palivo a na výrobu papíru. Na Slovensku se pajasan pěstuje jako produkční dřevina, v ČR je jeho lesnické využití minimální. Kvůli vysoké odolnosti vůči znečištěnému ovzduší je oblíben zejména pro městské výsadby, do větrolamů, jako dekorativní a protierozní dřevina k rekultivaci. Celá rostlina je pro člověka slabě jedovatá.

Laickou veřejností bývá pajasan zaměňován za původní jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*) nebo škumpu orobincovou (*Rhus hirta*), která pochází ze S. Ameriky. Škumpa je druh zdomácnělý (naturalizovaný) s počínajícím šířením (Pyšek a kol. 2012b). Mladé, zplanělé porosty škumpy a pajasanu se na první pohled dají snadno splést, obsazují stejná stanoviště a mají podobné lichozpeřené listy. Rozdíl mezi listy všech tří dřevin je na obr. 4, škumpa navíc na podzim barví listy do červena na rozdíl od jasanu a pajasanu.



Obr. 4 Pajasan žláznatý je napříč Evropou vázán zejména na městské prostředí, v teplejších oblastech se šíří i do volné krajiny. Bývá zaměňován za jiné podobné druhy (foto M. Vítková)

Výskyt

Jako agresivní invazní druh se pajasan šíří jak v domovině, tak na ostatních kontinentech. Vyhovuje mu dlouhá a teplá vegetační sezóna, pravidelné zimní mrazy a roční srážky >500 mm. Limitující je pro něj teplota a nedostatek světla - ve střední Evropě je optimální průměrná roční teplota do 8°C a nadmořská výška do 350 m. V ČR preferuje teplejší oblasti nížin (j. Moravu a Polabí), narušená místa, příměstskou krajinu a dopravní koridory, ale na jižní Moravě se šíří i do přirozených biotopů, např. teplomilné trávníků, skalních stepí, luhů a světlých lesů. Počet lokalit v poslední době narůstá. Směrem na sever se omezuje výhradně na městské prostředí, kde využívá delší vegetační sezóny a mírnějších mrazů uvnitř městského tepelného ostrova (Kowarik 2008). Při vyhovujícím klimatu je schopen obsadit jakoukoli opuštěnou plochu, kde rychle vytváří husté porosty a vytlačuje původní druhy. Roste na půdách aluviálních, vápenatých, písčitých i jílovitých, vysychavých až po zcela surové, zamořené nebo zasolené antropogenní půdy.

Nebezpečnost

Pajasan je agresivní invazní druh, který tvoří metapopulace na širokém spektru stanovišť. Kromě toho je nadále vysazován jako okrasná dřevina, takže opětovně zplaňuje. Patří mezi 100 nejinvaznějších druhů Evropy (DAISIE 2012), 40 nejinvaznějších dřevin světa (Rejmánek & Richardson 1996) a v ČR je zařazen do skupiny BL2 (neofyty s mírným až masivním vlivem; Pergl et al. 2016a). V současné době je omezen převážně klimaticky, ale můžeme předpokládat, že s pokračujícím globálním oteplováním bude jeho vliv narůstat. Díky rychlému růstu, výborné schopnosti vegetativního rozmnožování, bohaté produkci snadno se šířících semen s velmi dobrou klíčovostí a tvorbě toxinů inhibujících klíčení a růst konkurenčních druhů dokáže výrazně potlačit původní vegetaci a zcela ovládnout invadovaný biotop. Při kontaktu s kůží působí na citlivější pokožce kožní záněty. Jeho pyl je alergenní. Celá rostlina, zejména semena a kůra, je pro člověka slabě jedovatá. Pajasan také hostí řadu škůdců. Kořenový systém pajasanu často narušuje chodníky, zdi a stavby.

Management

Prioritou managementu je zabránit novým výsadbám pajasanu a omezit stávající v cenných územích (Pergl et al. 2016b). Jeho porosty lze tolerovat v intravilánu v oblastech mimo zájmy ochrany přírody. Protože se však velmi účinně rozšiřuje semeny i intenzívně zmlazuje z kořenů a pařezu, prioritní je odstranit plodné jedince se samičími květy, aby došlo k eliminaci zdroje semen. Pergl et al. (2016b) doporučuje stromy částečně kroužkovat nebo injektovat a pak nechat odumřít nastojato.

2.4 Trnovník akát

Trnovník akát (*Robinia pseudoacacia* L.) je opadavý listnatý strom o výšce až 30 m, obvykle však pouze 12–18 m, se zakřiveným kmenem a řídkou, nepravidelnou korunou; na teplých a skalnatých stráních dosahuje jen keřovitého vzrůstu. Do Evropy byl introdukován počátkem 17. st. z jv. části USA jako okrasná dřevina. Už v 18. st. byl propagován pro svou nenáročnost, medonosnost, trvanlivé a vysoce výhřevné dřevo, rychlý růst, snadné rozmnožování a schopnost zpevňovat a zlepšovat půdu. V ČR byl vysazován především na strmých, suťových stráních kolem řek a železnic (Vítková et al. 2017) a z výsadeb snadno zplaňoval (první spontánní výskyt už v r. 1874, Pyšek et al. 2012a).

Kvůli lichozpeřeným listům může být v ČR zaměněn za jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*), v městském prostředí i za jerlín japonský (*Sophora japonica*), který má ale mnohem větší listy a kvete později (červenec až srpen). Akát kvete několik dní v květnu až začátkem června, zhruba měsíc po vyrašení listů. Délka a načasování květu je ale značně závislá na aktuálním průběhu počasí a může se mírně lišit i mezi sousedními jedinci. Řídké, převislé hrozny jsou 10–20 cm dlouhé s 5–15 bílými květy, které intenzívně voní. Ostatní běžně pěstované trnovníky (trnovník lepkavý – *Robinia viscosa*, t. srstnatý – *R. hispida* a *R. x ambigua*) jsou nevonné s růžovými až červenofialovými květy. Plodem je 6–8 cm dlouhý hnědý lusk s 6–9 ledvinitými zploštělými semeny, který se otvírá na podzim (Obr. 5).



Obr. 5 Trnovník akát má květy uspořádané v dlouhých bílých hroznech. Největší nebezpečí představuje pro teplomilné trávníky s chráněnými druhy (foto J. Müllerová)

V přirozeném areálu se akát chová jako krátkověký, raně sukcesní druh preferující slunná stanoviště a propustné půdy. Jeho výhodou je rychlý růst a schopnost vázat vzdušný dusík pomocí symbiotických bakterií v hlízkách na kořenech. To mu poskytuje výhodu v konkurenci a umožňuje mu

rychle se stát dominantní dřevinou. Díky absenci přirozených nepřátel a konkurenčně silných druhů tvoří v sekundárním areálu monodominantní porosty, které se na daném stanovišti udrží desítky let. Průměrný věk akátových porostů na území ČR je 65 let, může ale dosáhnout až 140 let (Vítková 2011).

Jako světlomilná dřevina se snadno šíří do otevřených porostů typu teplomilných trávníků, písčin, skalních stepí či světlých lesů, ale také na výsypky, skládky, železniční násypy a opuštěné plochy v městském prostředí. Pro rozmnožování akátu jsou nejdůležitější kořenové a kmenové výmladky vznikající především v místě poranění. Ve srovnání se semenáčky rychleji rostou a dříve plodí (Vítková & Kolbek 2010). Semenáčky se mohou uplatnit jen na narušené holé půdě nebo na spáleništích.

Akát výrazně mění složení bylinného patra (Vítková & Kolbek 2010), a to především dlouhodobou změnou stanoviště. Díky fixaci atmosférického dusíku, intenzivní mineralizaci a nitrifikaci zvyšuje zásoby přístupných forem dusíku v půdě, a může docházet i ke snížení pH a k výplachu iontů (Vítková et al. 2015). Oproti přirozeným lesům jsou akátiny světlejší, se sušším a teplejším mikroklimatem. Bylinnému patru s výrazným jarním aspektem často dominují nitrofilní druhy, buď s jednou výraznou dominantou, nebo se dominanty mozaikovitě střídají.

Výskyt

Sheppard et al. (2006) řadí akát mezi 20 nejinvazivnějších rostlinných druhů Evropy: nevyskytuje se pouze v nejsevernějších oblastech a na středomořských ostrovech (Weber 2003). V Maďarsku se stal neoficiálním národním stromem, pokrývá 24 % lesní půdy. V současné době představuje druhou nejvíce pěstovanou dřevinu na světě, a invazní je také v Asii, Africe, Kanadě, Argentině, Austrálii a N. Zélandu. V ČR je to nejrozšířenější introdukovaná dřevina. S výjimkou hraničních pohoří a Českomoravské vrchoviny ho najdeme všude, především na jižní Moravě, ve středních Čechách, na Litoměřicku a Roudnicku (Vítková et al. 2017).

Podle Chytrého et al. (2005) patří akát mezi 10 neofytů s největší schopností adaptace na různorodé biotopy, dokáže tolerovat širokou škálu geologických substrátů a půdních typů. Více než půdní chemismus ho limituje nedostatečné provzdušnění a vysoký obsah vody v půdě, toleruje sice vysychavé půdy, ale nesnáší půdy zhutnělé a se stagnující vodou, kde zřejmě dochází k inhibici fixace atmosférického dusíku (Vítková et al. 2015). Akát je mimořádně odolný vůči znečištěnému ovzduší i zasolení půdy, dobře snáší požáry, seřezávání, škody zvěří, navíc nemá v Evropě vážnějšího škůdce (Vítková et al. 2017). Naopak v přirozeném areálu je náchylný k poškození dřevokazným hmyzem a jádrovou hnilobou, takže se jeho pěstování pro produkci užitkového dřeva v tamních podmínkách nedoporučuje (Huntley 1990).

Nebezpečnost

Jedná se o invazní druh s velkou regenerační schopností, který je navíc schopen agresivního klonálního šíření pomocí kořenových výmladků. Patří mezi 100 nejinvazivnějších druhů Evropy (DAISIE 2012), 40 nejinvazivnějších dřevin světa (Rejmánek & Richardson 1996) a v ČR je zařazen do skupiny BL2 (neofyty s mírným až masivním vlivem; Pergl et al. 2016a), jelikož kolonizuje jak uměle vytvořená stanoviště, tak i ochránářsky hodnotné biotopy, kde způsobuje komplexní změnu stanovištních podmínek a následně i bylinných společenstev (Vítková & Kolbek 2010). Na druhou stranu je to

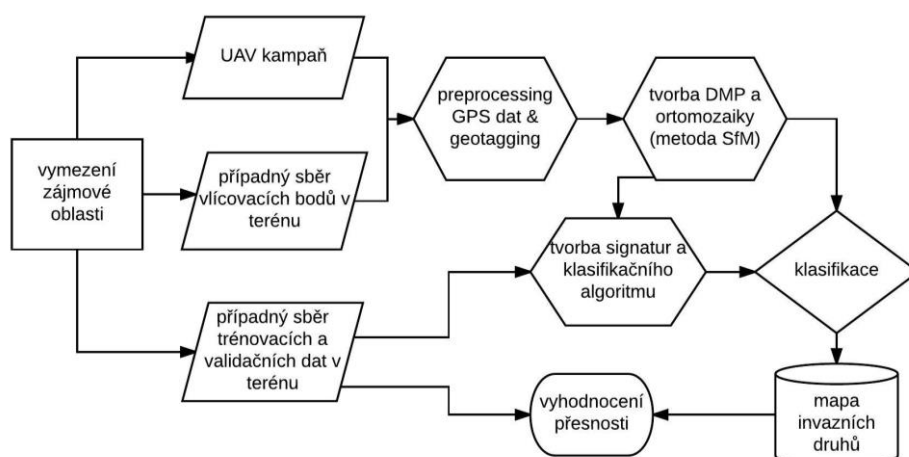
důležitá hospodářská dřevina, a proto (a i vzhledem ke globálnímu oteplování) je jeho další šíření velmi pravděpodobné. Kromě nektaru je celá rostlina jedovatá.

Management

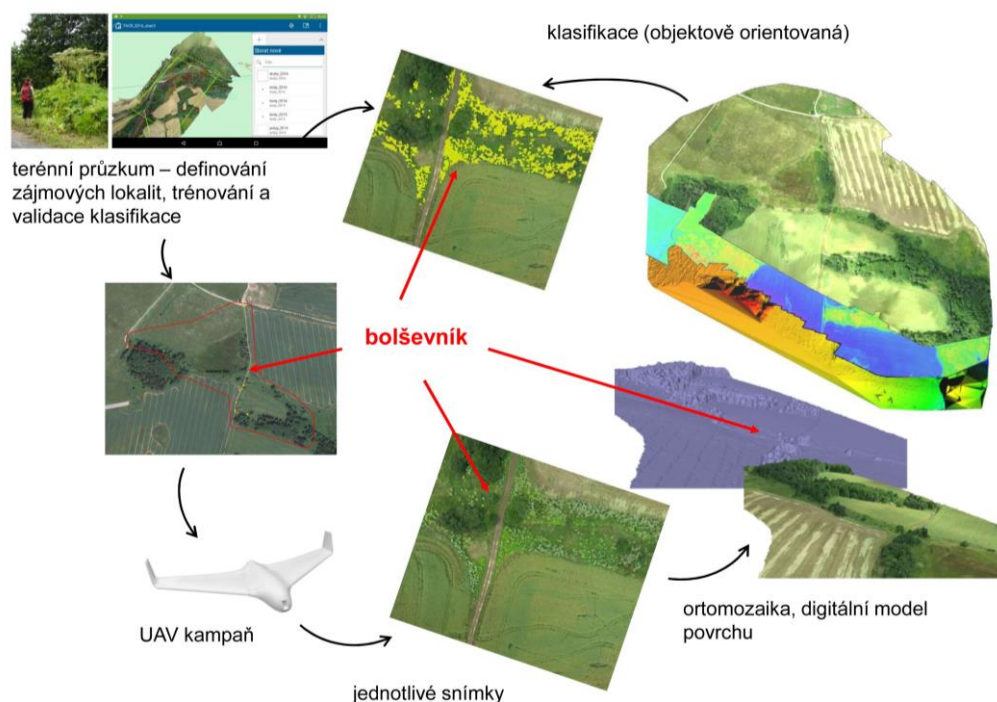
Akát je kontroverzní dřevina, která je na jedné straně důležitou hospodářskou surovinou, na straně druhé obávaným invazním druhem. Vzhledem k tomu, že invaduje či se pěstuje na široké škále stanovišť od městského prostředí přes lesní porosty až k přirozenému bezlesí, optimální strategie musí být založena na stratifikovaném přístupu zohledňujícím (1) ekologické vlastnosti druhu, (2) specifické stanovištní podmínky a (3) socioekonomické a environmentální aspekty (např. Sádlo et al. 2017). Pěstování akátu lze tedy v některých oblastech tolerovat, zatímco z ochrannýsky hodnotných biotopů a jejich okolí je nutné jej důsledně odstranit. Přesným vymezením typu biotopu a podmínek, za nichž lze (pokud vůbec) založit nový porost, obhospodařovat stávající porosty a ekonomicky je využívat, tolerovat přirozenou sukcesi, nebo akát odstranit a porost převést na jiný typ vegetace, se zabývají Pergl et al. (2016b) a Sádlo et al. (2017), kteří vypracovali na příkladu akátu jednotnou managementovou strategii pro nakládání s invazními dřevinami v rámci Evropy. V ČR se akát nepěstuje v energetických plantážích, ani nejsou zakládány nové porosty na lesní půdě, přesto je jeho management problematický.

3. Detekce rostlinných invazí pomocí DPZ

V rámci projektu byl pro metodiku odvozen optimální postup pro detekci zájmových invazních druhů založený na metodě dálkového průzkumu. Navržený postup vychází z dnes již standardních postupů aplikovaných pro satelitní a letecké snímkování s nezbytnou adaptací pro platformu UAV. Základní kroky zachycuje schéma na obr. 6, na příkladu bolševníku velkolepého pak obr. 7.



Obr. 6 Schéma postupu detekce invazních druhů z bezpilotních snímků (*DMP = digitální model povrchu*, *geotagging = přidání souřadnic k danému snímku*, *SfM = Structure from Motion algoritmus na tvorbu ortomozaik*, *vlíčovací body = body se zaměřenou polohou sloužící k tvorbě ortomozaiky*)



Obr. 7 Ukázka postupu pořízení a zpracování snímků do ortofotomapy a její klasifikace na příkladu bolševníku velkolepého

3.1. Sběr dat pomocí bezpilotního prostředku

3.1.1. Prostředky vhodné pro snímkování vegetace

Pro snímání zájmových území je třeba využít letadlo, které je schopné nést fotoaparáty pro záznam obrazu a má dostatečnou vytrvalost pro snímkování zájmové plochy. V zásadě lze použít letadla s pilotem na palubě i bez něj. Pilotovaná letadla lze s výhodou využít pro snímání větších území nebo území s výrazně asymetrickým tvarem, kde by nebylo možné zajistit povinný vizuální kontakt mezi bezpilotním letadlem a pilotem na zemi. Zjednodušeně lze rozdělit vhodnost platform např. podle plochy zájmového území:

- <10 ha - bezpilotní prostředek typu multicopter
- <250 ha - bezpilotní prostředek s pevným křídlem
- >250 ha - letadlo s pilotem na palubě

Vzhledem k typickému tvaru a velikosti zkoumaných lokalit byla jako nejvhodnější zvolena varianta bezpilotního letounu s pevnou nosnou plochou. Pro dobré výsledky při zpracování snímků metodou Structure From Motion (SfM, metoda pro tvorbu ortomozaik, vysvětlení viz kap. 3.2.4) je vhodné využívat metod automatického řízení letu, tzv. autopilota, který zajistí pravidelné rozestupy jednotlivých letových drah. Díky tomu je zabezpečen i dostatečný a konzistentní příčný překryv snímků. Manuální vedení letu je možné, nepovažujeme jej však za efektivní řešení.

Na základě typických podmínek na zájmových lokalitách je vhodné, aby použitá platforma splňovala následující parametry:

- schopnost nést multispektrální fotoaparát/y
- schopnost v rámci jednoho letu obsáhnout lokalitu s plochou >80ha při Ground Sampling Distance (GSD) 5cm/px
- jednoduchá obsluha bez složitých před- nebo po-letových postupů
- vysoká mechanická odolnost, jednoduchá opravitelnost v terénu
- nízká hmotnost a malé rozměry - transportovatelnost v osobním automobilu.
- schopnost startovat a přistávat do neupraveného terénu, bez dodatečného vybavení jako např. katapult
- nízká cena

Většinu výše zmíněných kritérií splňuje řada komerčně dostupných systémů, např. produkty Trimble/Gatewing, SenseFly eBee nebo Aeromapper. S výhodou však lze použít i řešení složené z open-source komponentů, které díky své otevřenosti a modularitě umožňuje experimentovat s různými druhy sensorů, přizpůsobí se aktuálním požadavkům na letové mise atp. Tento přístup byl zvolen i v rámci řešení projektu TAČR TA0402045, kdy byl na VUT v Brně vyvinut bezpilotní letoun optimalizovaný pro detekci a monitoring rostlinných invazí (Obr. 8, Tab. 2).



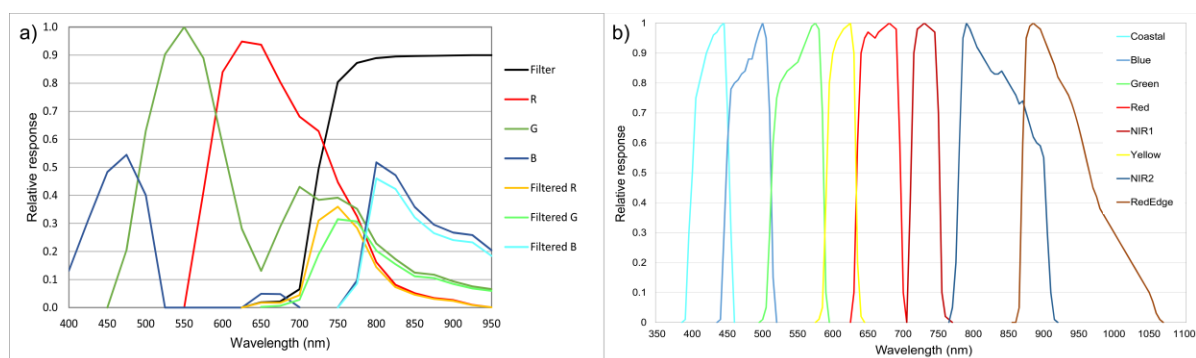
Obr. 8. Bezpilotní prostředek VUT 714 v letu (foto T. Hájek)

Tabulka 2. Základní parametry letounu VUT 714 vyvinutého na VUT v Brně, které mohou sloužit jako inspirace pro vývoj vlastních řešení se stejnou filozofií

Platforma	Vlastní návrh, skořepina GFC + Rohacell sendvič
RC souprava	Jeti Duplex DS14
RC telemetrie	Jeti Duplex Rsat2 + Mvario2EX + MT125EX
Pohonný akumulátor	Schweighofer Modster 4S1P 5000mAh
Regulátor pohonu	Jeti SpinPro 44 SBEC
Motor	Dualsky XM5010MR-9 390RPM/V, 110g
Vrtule	Aeronaut CAM Carbon folding prop 14/12"
Serva	2 x elevon: Hitec Mini Digital Servo HS-5245MG
Autopilot	Drotek Dropix v2.1, PowerModule, Digital Airspeed sensor
GPS	Drotek uBlox M8T, external magnetometer
Radiomodem	RF design RFD 868x
Základnová stanice	Panasonic Toughbook CF-19 / HP Pro Tab 8
Fotoaparát	Sony A6000 + Voigtlander 21/4 + Sony A5100 + E20/2.8

3.1.2. Sběr snímků

Kombinaci pilotované/bezpilotní platformy a snímacího zařízení je vhodné volit tak, aby bylo možné efektivně snímkovat zájmovou plochu s dostatečným rozlišením. Pro následnou automatizovanou klasifikaci se doporučuje zvolit GSD přibližně 5cm/px. Pro dostatečnou přesnost klasifikace je třeba, aby data obsahovala i informaci v blízkém infračerveném (NIR) spektrálním pásmu. Lze tedy využít dedikovanou multispektrální kameru (např. Micasense RedEdge, Tetracam atp.), to se ovšem vymyká požadavku na minimální cenu celkového řešení. Doporučujeme proto použít jeden fotoaparát pro snímání viditelného spektra (RGB) a druhý modifikovat pro NIR spektrum odstraněním IR-cut filtru (zabraňujícího průniku infračerveného záření), představeného před obrazový snímač. Tento pak lze nahradit IR filtrem (omezující průnik světla ve viditelném spektru) dle výběru, doporučujeme použít filtr Hoya R72 nebo ekvivalentní, případně lze zakoupit již takto modifikovaný fotoaparát. Na rozdíl od profesionálních senzorů s úzkými spektrálními pásy nabízí levné řešení pomocí modifikované RGB kamery nižší separabilitu jednotlivých kanálů (obr. 9), stále však poskytuje hodnotné informace z blízké infračervené části spektra.



Obr. 9 Spektrální charakteristiky čipu (a) kamer používaných v UAV (RGB a modifikovaná NIR kamera = filtered RGB) ve srovnání s (b) multispektrální družicí QuickBird (převzato z Müllerová et al. 2017a)

Doporučené vlastnosti fotoaparátu:

- Minimální hmotnost, minimální objem
- Mechanická odolnost
- Možnost plně manuálního nastavení expozice (případně dosažitelná externě pomocí alternativního firmware – např. CHDK na platformě Canon)
- Mechanická závěrka v relevantním rozmezí expozic (1/500 – 1/2000s)
- Možnost manuálního zaostřování (ideálně mechanické aretovatelné zaostřování)
- Pevný objektiv (bez zasunování, automatické krycí clony atp) s pevným ohniskem
- Vstup pro externí elektronickou spoušť (pro řízení z autopilota)
- Výstup synchronizace blesku, tzv. X-contact, pro přesný záznam okamžiku expozice v autopilotu

Výše uvedené požadavky z větší části splňuje např. Sony Alpha 5100 s objektivem Sony E20/2.8 či Sony Alpha 6000 s objektivem Voightlander 21/4. S těmito kombinacemi dosáhneme GSD 5cm z výšky cca 250m nad zemským povrchem (AGL – above ground level). Menší a lehčí řešení nabízí

např. Canon PowerShot S120, zde je ovšem nutné rezignovat na požadavek pevného objektivu či x-contactu. S tímto fotoaparátem dosáhneme GSD 5cm z výšky letu 150m AGL.

Doporučené nastavení fotoaparátu:

- Ukládání do formátu RAW (pokud máme diskové a časové kapacity na následný postprocessing), případně JPEG s co nejnížší kompresí
- Manuální zaostřování
- Manuální nastavení vyvážení bílé
- Manuální nastavení expozice – přizpůsobení aktuálním světelným podmínkám (čas závěrky kratší než 1/800, ISO co nejnížší, clonové číslo pokud možno takové, při kterém má objektiv nejlepší přenos kontrastu. Možno změřit např. pomocí kalibračních terčů a SW Imatest, příp. použít zjednodušené pravidlo pro “zlaté okno” objektivu - použít clonu o 2-3 stupně nižší než je minimální hodnota). Vhodné nastavení při slunečném počasí může být např. 1/1250s, f4, ISO 200.
- Vypnutí náhledu po expozici snímku
- Vypnutí detekce obličeje, detekce úsměvu a jiných výpočetně náročných algoritmů.
- Pro expozici pomocí intervalometru lze využít zabudované funkce fotoaparátu (pokud jsou k dispozici) nebo např. CHDK s vhodným skriptem, pokud používáme kompaktní fotoaparáty Canon.

3.1.3 Snímkovací strategie

Pokud použijeme dostatečný počet vhodně rozložených a zaměřených vlíčovacích bodů na zájmovém území, není třeba řešit označování jednotlivých snímků místem jejich expozice. Teoreticky tedy lze řídit snímání pouze pomocí časovače a není třeba provádět geotaggování snímků. V praxi je ovšem vhodnější minimalizovat počet vlíčovacích bodů v terénu, resp. je úplně eliminovat, neboť jejich zaměřování je časově náročné i při použití moderních prostředků, jako např. RTK GPS. V takovém případě je třeba co nejpřesněji označit snímky místem jejich vzniku. Na základě známých pozic stanovišť poté SfM algoritmus zajistí i správnou orientaci výsledných mapových produktů v požadovaném souřadném systému. Pro přesnou geolokaci pořizovaných snímků je vhodné řídit expozice snímků pomocí autopilota. Tím dojde k zajištění pravidelného podélného překryvu snímků. Ty jsou navíc pořizovány pouze nad zájmovým územím a není proto třeba mazat šikmé snímky vznikající při přeletech mezi jednotlivými snímacími liniemi atp. K označení snímků lze takto použít hlavní palubní GPS, která má zpravidla výrazně vyšší přesnost než zabudované GPS přijímače dostupné v některých fotoaparátech. Pokud do systému doplníme zpětnou vazbu o přesném okamžiku expozice (vyčítání x-contactu fotoaparátu pomocí digitálního vstupu autopilota) a korekci GPS souřadnic v reálném čase (RTK – Real Time Kinematics) či v rámci postprocessingu (PPK – Post Processing Kinematics), jsme schopni dosáhnout geometrické přesnosti výsledných mapových produktů v řádu jednotek centimetrů.

Podélný a příčný překryv snímků doporučujeme nastavit v rozmezí 65 – 85%. Čím větší překryv, tím lepší kvalita výsledného mapového produktu. Podélný překryv je omezen především maximální snímací frekvencí fotoaparátů (např. Canon PowerShot S120 je schopen dodržovat interval

mezi snímky 2,5s; Sony Alpha 5100 – 1,5s). V závislosti na rychlosti a výšce letu, ohniskové vzdálenosti použitého objektivu a rychlosti větru v letové výšce je třeba nastavit podélný překryv snímků tak, aby fotoaparát spolehlivě stíhal exponovat a ukládat všechny záběry (obr. 10).



Obr. 10 Příklad plánování snímkovací mise v prostředí open-source nástroje Mission planner. Na mapě jsou viditelné předpokládané pozice jednotlivých expozic.

3.1.4 Provoz UAV

Vlastní snímání lokality je třeba naplánovat zejména s ohledem na časové a prostorové aspekty:

- Načasování
 - Vhodná fenofáze zájmového druhu
 - Vhodné počasí pro snímání (ideální je zejména bezmračná slunečná obloha, případně konstantně zatažená obloha vysokou oblačností), akceptovatelný vítr.
 - Aktivace případných vzdušných prostorů
- Místo
 - Zkontrolovat pozici lokality s ohledem na publikované vzdušné prostory (vhodnými podklady jsou např. Mapa spodního vzdušného prostoru LAA ČR, Mapa ICAO 1:500 000, aplikace AisView ŘLP ČR)
 - Zkontrolovat blízkost liniových staveb, zastavěných území atp.
 - Identifikovat vhodnou plochu pro start a přistání, zařídí povolení ke vzletu a přistání z této plochy od majitele pozemku

Před výjezdem na plánovanou lokalitu se kontroluje předpověď pro sportovní létání a výstupy numerického modelu Aladin na stránkách chmi.cz. Tyto informace jsou konfrontovány s hlášeními

METAR a TAF (dostupné na meteo.rlp.cz) z přilehlých letišť, se záznamy z webkamer a stanic ČHMU a s alternativními numerickými modely yr.no a windy.com. Na místě vzletu je v případě pochybností změřena rychlost větru anemometrem a na výstupu z meteorologických radarů na serveru chmi.cz je zjištěna pravděpodobnost příchodu srážek pro dobu letu s dostatečnou časovou rezervou. Povětrnostní podmínky jsou vyhodnocovány jak vizuálně (srážky, dohlednost), tak pomocí anemometru, teploměru a vlhkoměru. Směr větru je zjištěn pocitově a vizuálně vyhozením lehkého předmětu do vzduchu. Místo vzletu a přistání je vybíráno tak, aby na něm nehrozilo výrazně turbulentní proudění vzduchu (za překážkami a budovami) a aby směr vzletu a přistání probíhal proti větru.

Pilot UAV musí vždy před vzletem zkontrolovat možná omezení a rizika okolního vzdušného prostoru podle aktuální letecké mapy (papírová či AisView), zpráv NOTAM a využití vzdušného prostoru (AUP, odkazy viz kapitola 5.3) a během letu buď sám, anebo s pomocí pozorovatele sleduje celý okolní letecký provoz tak, aby v případě výskytu jiného letadla v kolizním kurzu, které by přilétalo z jakéhokoli směru, mohl kdykoli okamžitě sklesat do bezpečné výšky. Stejně tak je vhodné se vyvarovat takových stanovišť pro vzlet, na kterých hluchost okolí znemožňuje zjištění blížícího se letadla podle zvuku.

Místo pro vzlet a přistání musí mít takový charakter, aby nemohlo dojít ke kolizi s jakýmkoli vysokým objektem v případě poryvu větru, výpadku GPS (anebo pohybu UAV v rámci nepřesnosti GPS navigace), anebo aby měl pilot vždy jasnou představu o vzdálenostech a výškách těchto objektů vzhledem k pohybu UAV. Jedná se zejména o vysoké budovy, sloupy a dráty elektrického vedení, sloupy pouličního osvětlení, komíny, vysílače a stromy. Stejně tak je nutné, aby pilot, či pilot ve spolupráci s pozorovatelem, měli co největší výhled na okolní letecký i pozemní provoz a nemohlo se stát, že nezaregistrují blížící se letadlo, automobil, anebo osobu ze směru zakrytého překážkou. Dobrý rozhled do krajiny je důležitý i pro případ nouzových situací např. v okamžiku poruchy řízení a nouzového přistání mimo plánované místo přistání. Bezpilotní prostředek se vždy musí pohybovat na přímý vizuální dohled od pilota (VLOS).

3.2. Tvorba ortomozaiky z UAV

Primárním cílem zpracování dat pořízených metodami DPZ je transformace obrazových dat, tedy jednotlivých snímků do podoby tzv. ortomozaiky, která pokrývá celé zájmové území při zachování odpovídající geometrické (neboli polohové), radiometrické (spektrální odezva) a obrazové kvality (chyby obrazu, distorze apod.). Výsledná mozaika musí splňovat požadované kvalitativní parametry tak, aby bylo následně možné data zpracovat a vyhodnotit (semi)automatickými metodami v podobě klasifikace obrazu a extrakce prvků. Vzhledem k značnému objemu digitálních dat, je klíčovým parametrem mimo jiné optimální volba metody pro mozaikování, zejména z hlediska časové náročnosti zpracování (aktuální strojový čas zpracování i požadavek na technickou infrastrukturu a HW vybavení) při zachování kvalitativních parametrů. V procesu zpracování lze rozlišit 5 základních kroků v kapitolách 3.2.1 – 3.2.5.

3.2.1 Uložení dat

Data z náletů pořízená pomocí UAV systému jsou průběžně ukládána na zálohovaném hromadném úložišti ve standardizované, předem definované adresářové struktuře tak, aby bylo umožněno jejich hromadné zpracování. Zároveň je definován obsah ukládaných výstupů, tvořících výslednou ortomozaiku ve viditelném a blízkém infračerveném spektru, digitální model povrchu a záznam o zpracování a jeho parametrizaci. Pro uživatelské využití dat je možné následně pomocí dávkového souboru exportovat do jednoúrovňové struktury vybrané výstupy (např. ortomozaiku) s jednoznačnou časovou a polohovou identifikací (datum, lokalita) např. pro zobrazení v GIS.

3.2.2 Kontrola kvality dat

V průběhu pořizování dat může docházet k výrazným změnám v:

- dlouhodobém měřítku: sezonní podmínky (roční období, výška slunce apod.)
- krátkodobém měřítku: aktuální podmínky (oblačnost, vliv větru apod.)

Výše uvedené faktory mohou negativně ovlivnit kvalitu pořízených dat, která následně může mít vliv na výslednou ortofotomozaiku. Je proto vhodné provést kvalitativní kontrolu dat a případné poškozené, nebo z jiného důvodu nevhodné snímky eliminovat ještě před procesem zpracování. Během testovacích náletů se při optimální konfiguraci platformy a náletu vyskytují podobné chyby v nepatrné míře, proto lze následné kontroly považovat za volitelné:

- automatická filtrace špatně exponovaných snímků na základě fyzické velikosti souboru
- neostrost (možnost zahrnutí externích postupů, Sieberth 2013)
- šikmé, příp. jinak poškozené snímky

Vzhledem k ojedinělému výskytu takto poškozených výstupů byla automatická možnost selektování/filtrace předběžně posouzena jako doplňková. Pro běžnou kampaň (nalétání za definovaných podmínek) je rychlá vizuální kontrola vstupů postačující.

3.2.3 Preprocessing

Výsledná navržená UAV platforma popsaná v kapitole 3.1 splňuje podmínky pro dosažení požadované kvality a přesnosti výstupů. Nicméně při použití alternativní konfigurace (především levnější kamerový a GPS systém v příp. nutnosti minimalizace nákladů) může docházet ke snížení zejména polohové přesnosti.

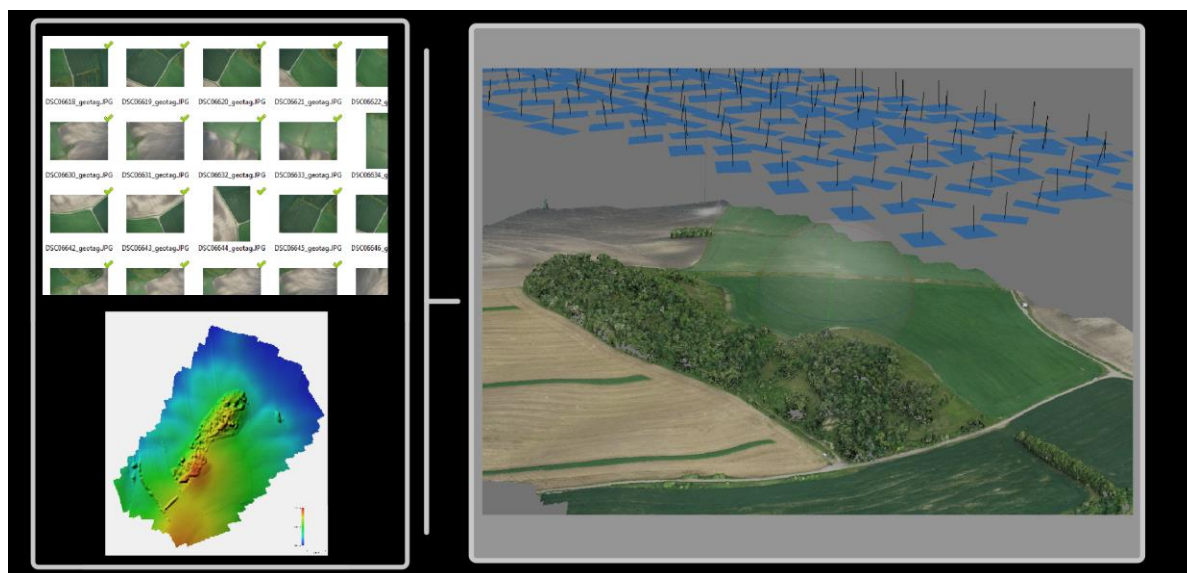
Celková polohová přesnost ortomozaik je závislá na několika faktorech včetně použité metody mozaikování. Vlčovací body zaměřené v terénu lze s výhodou využít pro zvýšení přesnosti a koregistrace pásem i snímků z různých časových období, nicméně tento přístup vyžaduje částečný vstup operátora a také časově náročné měření v terénu při snímkování. Během letu je možné zaznamenávat přesnou GPS polohu platformy s vysokou frekvencí (vyšší než frekvence snímkování). Na základě analýzy z testovacích letů byl navržen algoritmus pro re-geotaggování, neboli přepsání GPS informace jednotlivých snímků na přesnější, a to odvozením z vysokofrekvenčního záznamu

platformy namísto záznamů z GPS fotoaparátu. Tento postup lze použít i pro zvýšení přesnosti letů minulých za předpokladu, že je k dispozici zmíněný záznam z GPS měření autopilota. U náletů s použitím nové kamery tento postup umožňuje přiřazení přesné polohy v okamžiku pořízení příslušného snímku v důsledku zpoždění závěrky (reálného času pořízení snímku). Na výslednou přesnost má zřejmý vliv i zvolená metoda mozaikování (kap. 3.2.4).

Další možností zpřesnění záznamu polohy GPS je doplňková korekce na základě observací GPS modulu v průběhu letu. Tyto záznamy ve formátu RINEX lze za pomoci pozemních měření z referenčních stanic (v ČR služba ČÚZK CZEPOS) využít pro korekci záznamu poloh GPS. Korigované polohy lze následně využít pro přesnější geotaggování (přiřazení korektní GPS souřadnice středu snímku). Následně je možno hromadně převést vstupní data a referenční měření na sadu korigovaných souřadnic. Vyhodnocení vlivu korekcí v testovacích kampaních na celkovou přesnost ortomozaik se prozatím ukázalo jako nejednoznačné, což je pravděpodobně způsobeno i částečnou polohovou distorzí zvoleného mozaikovacího algoritmu (SfM). Tento postup lze proto považovat spíše za doplňkový.

3.2.4 Tvorba ortomozaiky

Výsledkem každé kampaně je sada snímků paralelně snímaných v pásmu RGB a NIR. Data jsou pořizována s cca 80% až 85% podélným i příčným překryvem, aby bylo možné provést robustní mozaikování. Tato sada je následně transformována do výsledné ortomozaiky bezešvě pokrývající celé cílové území. Mozaikování je založené na metodě SfM (Dandois & Ellis, 2010; Westoby et al., 2012) v prostředí softwaru Agisoft Photoscan Professional (obr. 11). Součástí procesu je i tvorba detailního 3D mračna bodů (Whitehead & Hugenholtz, 2014).



Obr. 11 Ukázka robustního mozaikování metodou Structure from Motion (SfM)

Skript tedy umožňuje dávkovou aplikaci definovaného zpracování na vybranou část archivu pořízených datasetů. Lokality/příslušné nálety, které nemají zpracované výstupy, jsou postoupeny

k výpočtu. Součástí dávky je konfigurační soubor (*.conf), který v přehledné formě shrnuje a umožňuje definici parametrů zpracování ortofot.

Během vývoje byla řešena celá řada nastavení, které ovlivňují kvalitu výsledných ortomozaik. Jádrem parametrizace je ve většině případů definice podrobnosti vytvářených mezivýsledků (např. digitálního modelu povrchu - DMP, hustoty sítě bodů, výsledného rozlišení apod.), kdy zároveň platí, že se zvyšující se podrobností výrazně roste výpočetní čas. Pro řadu parametrů je výhodnější méně striktní nastavení, bez vlivu na výslednou kvalitu ortomozaik a následnou přesnost klasifikace. S novou verzí Agisoft Photoscan byl do procesu začleněn prvek DMP. Pro dosažení optimálního efektu a redukci řady artefaktů a distorzí v místech náhlé změny výšky ve formě smazů (např. na hranici vyššího a nízkého porostu) nebo výrazných anomálií byla do procesu začleněno použití redukovaného prostorového rozlišení DMP pro výslednou tvorbu ortomozaiky. Tento postup umožňuje vyhlazení obrazových chyb a dosažení lepší konečné kvality obrazu.

3.2.5 Kontrola a finalizace výstupů

Závěrečný krok představuje finální kontrola výstupů a to:

- úplnost (požadované obrazové vrstvy RGB+NIR, DMP)
- kvalita obrazu (zejména vizuální kontrola)
- požadované parametry jako rozlišení, správný souřadný systém, platné hodnoty rastrů)
- závěrečné ořezání na zájmové území

3.3. Klasifikace snímků - metody DPZ

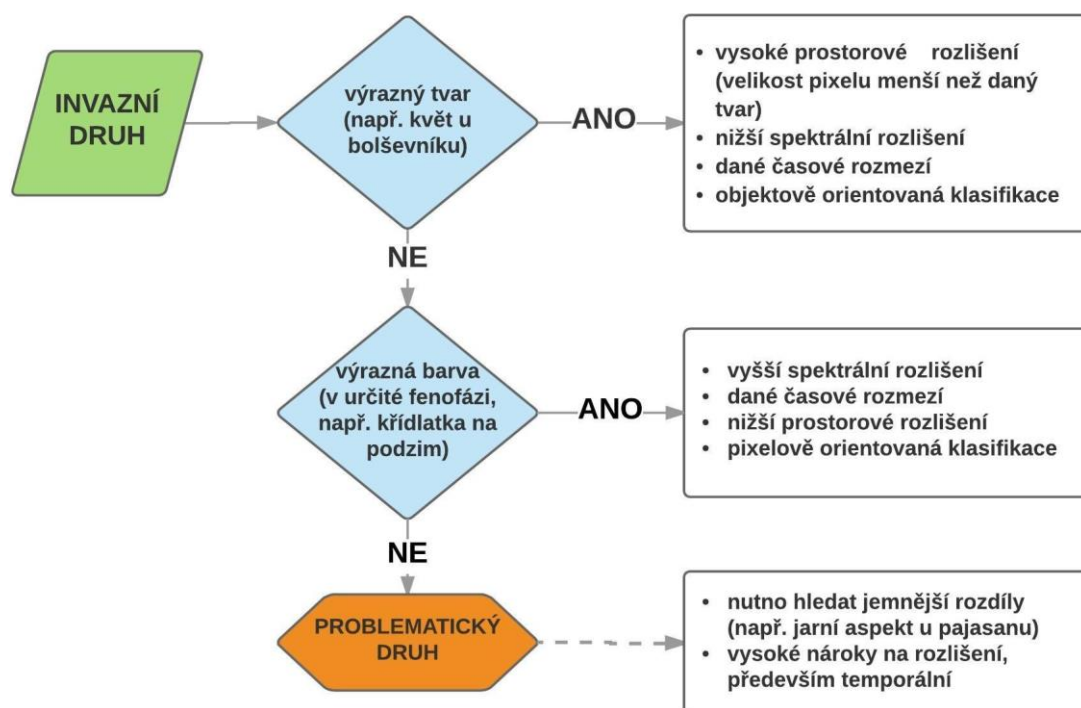
Existují dva základní přístupy ke zpracování dat DPZ - pixelově a objektově orientovaný přístup. V pixelově orientované klasifikaci je obraz analyzován pouze na základě spektrální odrazivosti v jednotlivých kanálech každého pixelu zvlášť. U objektově orientovaného přístupu je využíván kromě spektrálních hodnot pixelu i kontext. Snímek je rozčleněn (tj. segmentován) na objekty s podobnými vlastnostmi a následná klasifikace zohledňuje kromě vlastností jednotlivých objektů, jako jsou např. spektrální vlastnosti, tvar, velikost, textura či homogenita, také vztah vůči okolním objektům (Blaschke et al. 2008). Tento přístup obecně vede ke snížení efektu stínů, spektrální variability uvnitř klasifikačních tříd a posunů v registraci snímků, a je obzvláště přínosný pro druhy, které jsou výrazné tvarem a barvou, jako např. květenství bolševníku (Müllerová et al. 2017b), a pro snímky s velmi vysokým prostorovým rozlišením (Laliberte & Rango 2009). Tvorba segmentů (objektů) snižuje obrazový šum a tím zlepšuje celkovou klasifikaci. Pro segmentaci lze použít různé algoritmy, např. software eCognition nabízí mimo jiné segmentaci multiresolution a contrast split. Multiresolution segmentace postupně spojuje pixely nebo existující objekty s cílem minimalizace heterogenity, zatímco segmentace contrast split rozděluje obraz na tmavé a světlé objekty na základě hraniční hodnoty za využití edge ratio algoritmu (eCognition Developer 9.2 Reference Book 2016).

Jak v případě pixelově, tak i objektově orientovaného přístupu může být obraz klasifikován pomocí různých klasifikačních algoritmů řízené klasifikace s pomocí trénovacích ploch. Mezi tyto patří

jak klasický postup Maximum Likelihood, tak i moderní algoritmy patřící do skupiny Machine Learning, jako jsou Support Vector Machines (SVM; Vapnik, 1995) a Random Forests (RF; Breiman, 2001). V případě objektově orientované klasifikace do procesu navíc vstupují parametry charakterizující objekty, jako např. jejich geometrie (velikost, poměr délky/šířky, asymetrie, kompaktnost), texturní hodnoty (homogenita, kontrast, rozdílnost), spektrální hodnoty (průměr, minimum, maximum a směrodatná odchylka v jednotlivých kanálech, saturace a intenzita) a kontext (vztah vůči okolním objektům). U objektově orientované klasifikace je také možné sestavit vlastní algoritmus šitý na míru vlastnostem zkoumaného druhu, tzv. iterativní klasifikaci založenou na pravidlech (rule-based). Ta má výhodu, že ji lze snadno přizpůsobit snímku i rostlině, ale na druhou stranu je takový postup méně univerzální a hůře přenositelný. Další metodou je template matching, kdy jsou objekty detekovány podle předem definovaných šablon (předloh) vygenerovaných přímo ze snímku.

Jak vyplývá z výše uvedeného, najít obecný postup je prakticky nemožné. Každý přístup i zdroj dat totiž má určité výhody a naopak slabé stránky, a proto by volbě nejvhodnějšího algoritmu a zdroje dat mělo vždy předcházet testování, a především také úvaha o charakteristikách druhu, které jsou pro detekci určující (Obr. 12).

Algoritmy použité v této metodice spoléhají na komerčně licencovaný software, který je však v státní správě většinou dostupný (ArcGIS, modul Image classification). Objektová klasifikace byla prováděna pomocí komerčního software eCognition, který je však možné hradit softwarem s otevřenou licencí např. OrfeoToolbox pro QGIS, Spring nebo InterIMAGE, RSGISLib (Clewley et al. 2014).



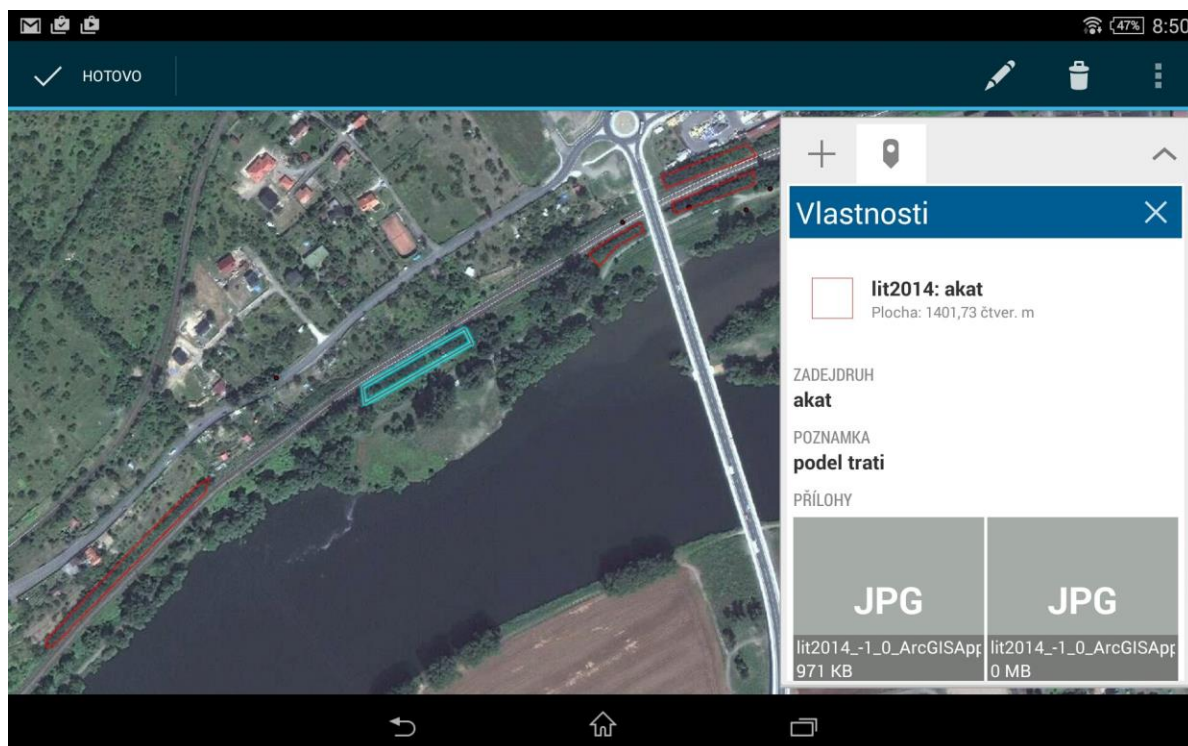
Obr. 12 Schéma rozhodovacího klíče pro volbu nejvhodnějšího postupu automatické detekce invazních rostlin z dat DPZ v závislosti na charakteristických vlastnostech druhu

3.4 Vyhodnocení přesnosti výsledků

Důležitou součástí detekce je validace výsledků. V případě dat UAV s prostorovým rozlišením v řádu centimetrů narážíme na nedostatečnou přesnost lokalizace validačních (a trénovacích) dat vzhledem k omezené přesnosti dostupných měřících přístrojů GPS. Diferenciální GPS sice požadované přesnosti dosahují, ale tyto přístroje jsou velmi nákladné a jejich využití v terénu je zdoluhavé. V případě složitějšího terénu či zalesněného území ani jejich přesnost nemusí stačit. Vhodným řešením se ukázalo využití terénního počítače/tabletu/chytrého telefonu v kombinaci s aplikací umožňující sběr/manuální zakreslování výskytu druhu pomocí podkladové ortomapy a integrované GPS (případně v kombinaci s další GPS), přičemž nejlépe se osvědčilo jako podkladovou mapu využít přímo UAV ortomozaiku. Dostupných aplikací pro sběr dat existuje celá řada (Tab. 3). V našem případě jsme využili aplikaci Collector for ArcGIS (obr. 13), která umožňuje: (i) sbírat data offline (nezávisle na dostupnosti internetu); (ii) použít vlastní podkladové ortomapy; (iii) přiložit k polygonům/bodům fotografie a další atributy; (iv) simultánně sbírat data několika uživateli do centralizované databáze; (v) použít další podpůrné datové zdroje; (vi) synchronizovat data později; a (vii) exportovat výsledky do formátu ArcGIS (včetně fotografií).

Tabulka 3. Srovnání aplikací pro sběr dat v terénu, které lze využít jako podklad pro klasifikaci a následnou validaci (adaptováno z Müllerová et al. 2017a)

Jméno	Trimble TerraSync	Trimble TerraFlex	Collector for Arcgis	NextGIS Mobile	QField, QGIS Mobile	ODK Collect	Mapper Mobile
Výrobce	Trimble	Trimble	ESRI	NextGIS	OPENGIS.ch GmbH	University of Washington	Itersoft
Operační systém	Windows Mobile	Android, iOS	Android, iOS, Windows	Android	Android	Android	Android
Použití offline	Ano		Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Vlastní podkladové mapy	Ano		Ano	Ne	Ano	Ne	
Více uživatelů	Ne	Ano	Ano		Ne	Ano	Ano
Složitost použití	Nizká		Nizká		Vysoká	Nizká	
Složitost přípravy	Nizká		Nizká	Vysoká	Vysoká	Střední	
Cena přístroje	Vysoká	Nizká	Nizká	Nizká	Nizká	Nizká	Nizká
Cena SW	Pevná	Předplatné	Zdarma s předplatným ArcGIS	Zdarma - Předplatné	Zdarma	Zdarma	Pevná
Web:	http://www.trimble.com/mappingGIS/TerraSync.aspx	http://www.trimbleinsphere.com/insphere/terraflex-data-collection	http://doc.arcgis.com/en/collector/	http://nextgis.com/nextgis-mobile/	http://www.opengis.ch/category/gis/qgis/android-qgis/qfield/	https://opendatakit.org/use/collect/	http://www.itersoft.cz/maper-mobile.html
Komentář	Um ožňuje využít přesné GNSS přístroje		Funguje na všech platformách včetně PC		Příliš složitá	Jednoduchá aplikace, vhodná pro zapojení veřejnosti, nikoliv pro profesionální využití.	Česká aplikace



Obr. 13 Mapování v programu Collector for ArcGIS na tabletu

Pro zajištění kvality výsledků je zásadní dostatečný počet trénovacích i nezávislých validačních bodů/objektů (Congalton & Green 1999), a to alespoň 200 náhodně rozložených bodů v případě jednoho zájmového druhu stratifikovaných tak, aby 50% bylo uvnitř polygonů, které byly v terénu zakresleny jako invadované. Výsledná validační matice slouží k výpočtu přesnosti uživatelské (user's accuracy - poměr správně a celkově klasifikovaných, hodnotící spolehlivost výsledků klasifikace pro uživatele) a zhotovitelské (producer's accuracy - poměr správně klasifikovaných a pozorovaných výskytů). Kappa statistika (případně kondicionální kappa index) pak vyjadřuje statistickou významnost výsledků tak, že udává do jaké míry se skutečná přesnost klasifikace liší od shody, která by vznikla čistě náhodně (Congalton & Green 1999; Foody 2002).

4. Postup mapování zájmových druhů z dat DPZ

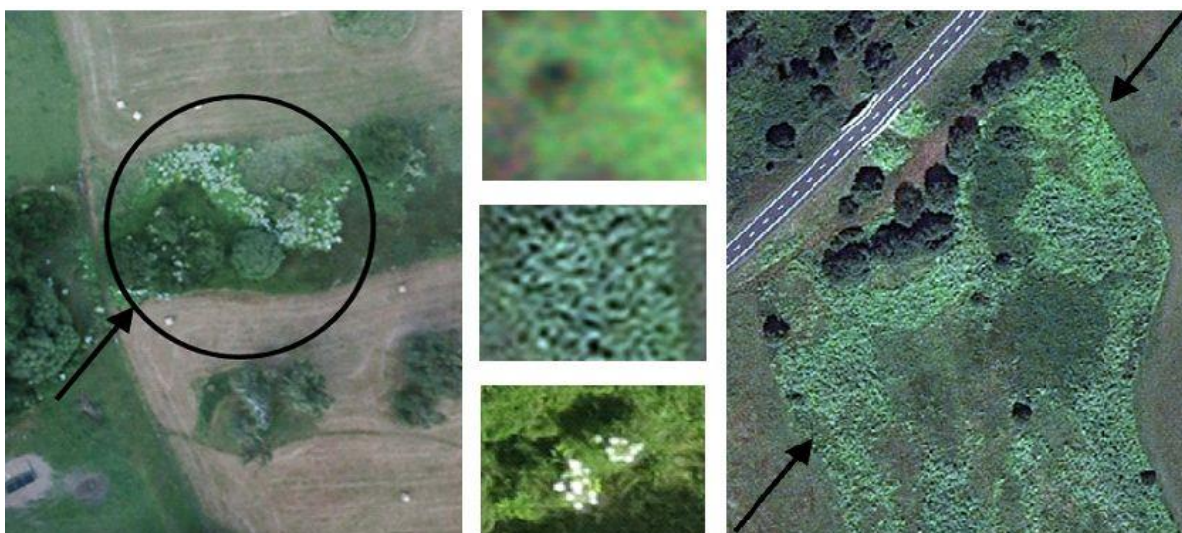
Tabulka 4. Přehled hlavních charakteristik zájmových druhů, nároky na data DPZ a nejlepší klasifikační přístup pro jejich detekci (SVM - *Support Vector Machine*, RF - *Random Forest*, ML - *Maximum Likelihood*)

Druh	bolševník velkolepý	invazní křídlatky	trnovník akát	pajasan žlázatý
struktura listů	velké, bohatě strukturované	velké	malé, složené, v létě je sklápi	velké, složené
květenství	výrazné	nevýrazné	poměrně výrazné	nevýrazné
typ invadovaného stanoviště	chladnější oblasti ČR, lada, říční břehy, okraje lesů a polí, ruderalní stanoviště	říční břehy, lada, narušované plochy, světlé lesy, městská zástavba	teplé oblasti ČR, pěstován, samovolně se šíří do stepních trávníků, narušených ploch, okolí cest a železnic, výhledových prudkých svahů	teplé oblasti ČR, vinice, zástavba, rumiště, narušené plochy, okolí cest
optimální fenofáze pro detekci	vrchol květu	žloutnutí	vrchol květu	jarní zbarvené listy či jarní přemrznutí
optimální doba pořízení dat	2. pol. června až 1. polovina července	konec října - začátek listopadu	vegetační sezóna	květen
úspěšnost detekce	vysoká	střední	střední	střední až vysoká
testovaná data DPZ	UAV (5 cm, RGB+modif. NIR), barevná ortofota (25 cm, RGB), Pleiades 1B (0,5 m pan sharpened, R/G/B/NIR)	UAV (5 cm, RGB+modif. NIR), Pleiades 1B (0,5 m pan sharpened, R/G/B/NIR)	UAV (5 cm, RGB+modif. NIR), WorldView-2 (0,5 m pan sharpened, R/G/B/NIR)	UAV (5 cm, RGB+modif. NIR), Pleiades 1B (50 cm)
požadované rozlišení dat	prostorové	5-50 cm	5-50 cm	5-50 cm
	spektrální	nízké	střední (nutné NIR)	střední (nutné NIR)
	časové	vysoké (1 měsíc)	vysoké (1 měsíc)	nízké
optimální klasifikační přístup	objektově-orientovaný (SVM, RF)	pixelově-orientovaný (ML, RF)	pixelově-orientovaný (SVM, ML)	pixelově-orientovaný (SVM, ML)

4.1 Detekce bolševníku velkolepého

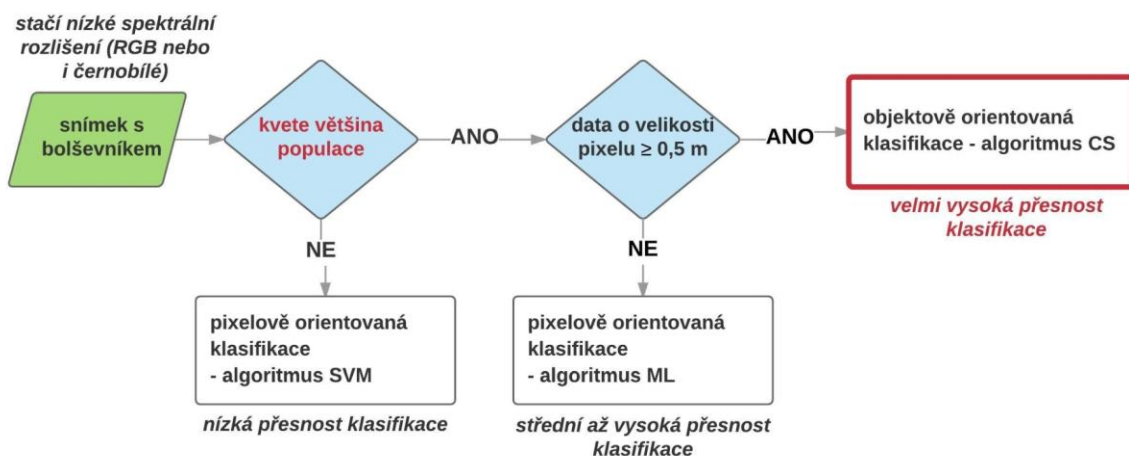
4.1.1 Bolševník - doba snímkování

Pro detekci a monitoring pomocí DPZ jsou důležité biologické vlastnosti bolševníku (Tab. 4). Jak již bylo popsáno výše, je to výrazná rostlina, která dorůstá až 5 m s velkými přízemními listy (až 200 cm dlouhé) a především výrazným bílým květenstvím složených okolíků o celkovém průměru až 1 m. Díky těmto výrazným květenstvím formujícím jasně definované objekty (Obr. 14) je dobře rozpoznatelný i na leteckých či satelitních snímcích poskytujících dostatečné prostorové rozlišení (velikost pixelu menší než jednotlivá květenství). Naproti tomu, vzhledem k výrazné barvě květenství kontrastujícímu s okolím v době květu, nejsou kladeny velké nároky na spektrální rozlišení snímků. Zásadní je však správné načasování pořízení snímků. V ČR bolševník kvete obvykle od poloviny června do konce července, ale v raných a pozdních stádiích květu přesnost detekce klesá (Příloha 2). U satelitních snímků, vzhledem k omezenému archivu a časté oblačnosti, je někdy těžké získat snímky ze správného časového období, nehledě na vysokou pořizovací cenu dat s vysokým prostorovým rozlišením (VHR). Prostorové rozlišení zdarma dostupných satelitních dat (Landsat, Sentinel) není dostačující.



Obr 14 Kvetoucí bolševník velkolepý na snímku z bezpilotního letounu (vlevo) a na snímku z družice Pleiades (vpravo). Uprostřed jsou detaily na kvetoucí bolševník (odspoda nahoru) z bezpilotního letounu (rozlišení 5 cm), družice Pléiades (rozlišení 2,5 m) a družice RapidEye (rozlišení 6,5 m)

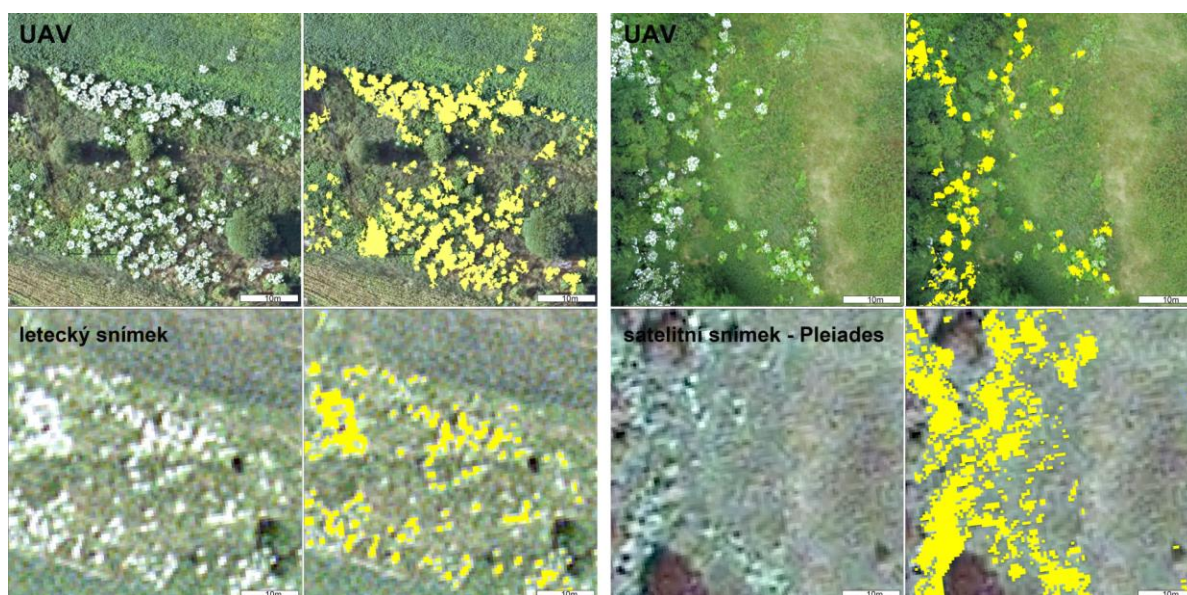
4.1.2 Bolševník - klasifikační přístup a typ dat



Obr. 15 Schématické znázornění rozhodovacího klíče pro automatickou detekci bolševníku velkolepého v závislosti na fenofázi rostliny a použitých datech DPZ (SVM = Suport vector machines, ML = Maximum likelihood, CS = segmentace Contrast split následovaná rule-based klasifikací)

Přesnost detekce i vhodná metoda výrazně závisí na fenofázi rostliny (viz schéma na obr. 15). Kvetoucí neobhospodařovaný bolševník je v případě dat s dostatečným prostorovým rozlišením nejlépe detekován pomocí objektově orientované klasifikace a to dokonce i na leteckých snímcích s nízkým spektrálním rozlišením (Obr. 16, Müllerová et al. 2013, 2017b). Z testovaných metod (segmentace multiresolution a contrast split, a klasifikační algoritmy - iterativní rule-based, SVM, RF a template matching; viz popis v kapitole 3.3) se jako nejúčinnější ukázala objektově orientovaná

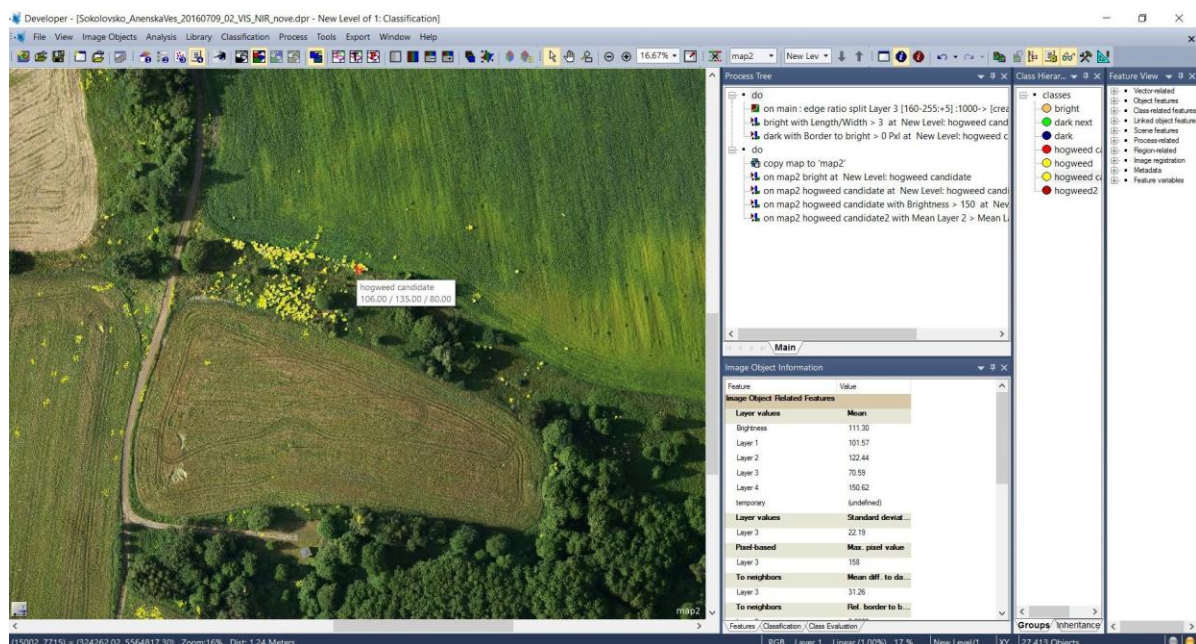
segmentace contrast split založená na modrém kanále (Obr. 17). Tato metoda dokáže velmi dobře odlišit bílé objekty (květenství) na snímcích, avšak sama neumožňuje jejich odlišení od jiných - velmi světlých - objektů na snímku (např. některé umělé povrchy či sklizená pole). Tyto objekty je nutné posléze odfiltrovat pomocí rule-based klasifikace s použitím těchto parametrů objektů - velikost, poměr výšky a šířky, jas, poměr G a NIR kanálu a okolní světlé objekty. Pomocí této kombinace bylo v naší studii dosaženo téměř úplné přesnosti u dat UAV dat (99 a 100%) a 42% zhotovitelské a 100% uživatelské přesnosti u leteckých snímků. Contrast split segmentace ovšem nedetekuje bolševníkové listy kolem květenství či zeleno-hnědé zrající (odkvétající) okolíky bolševníku, a vzhledem k velmi vysokému detailu UAV snímků může vytvářet mezery v klasifikaci bolševníku, reflektující prostor mezi jednotlivými okolíky složeného květenství.



Obr. 16 Detail bolševníku ve fenofázi květu zachycený na různých snímcích a výsledek nejlepší klasifikace pro každý snímek. Surové snímky (UAV 15. 7. 2015 a 9. 7. 2016, letecký 8. 7. 2008, satelitní - Pléiades 1B 17.7. 2015) jsou vždy vlevo a výsledek klasifikace s bolševníkem vyznačeným žlutě vpravo. UAV a letecké snímky byly klasifikovány objektovým přístupem pomocí contrast split segmentace s následnou rule-based klasifikací, satelitní snímky pak algoritmem Maximum Likelihood - řízené pixelově orientované klasifikace (adaptováno z Müllerová et al. 2017b)

U VHR satelitních snímků (testována data družice Pléiades 1B, Obr. 14 a 16) není prostorové rozlišení 2,5 m dostatečné pro odlišení jednotlivých menších květenství, proto je zde vhodnější použít pixelově orientovanou klasifikaci, algoritmus řízené klasifikace Maximum Likelihood (viz popis v kapitole 3.3). Je potřeba zadat dostatečné množství trénovacích množin (míst s výskytem bolševníku). I s těmito hrubšími snímky lze dosáhnout poměrně dobrých přesností klasifikace (86% zhotovitelské a 94% uživatelské přesnosti). Pixelově orientovaný přístup je ve srovnání s objektovou klasifikací u bolševníku obecně méně přesný, ale zase méně náročný na expertní znalost a specializovaný software. Na druhé straně nekvetoucí, plodící, stříkané, sekané či pasené rostliny, stejně jako listy obklopující květenství jsou pro detekci mnohem složitější vzhledem k jejich

podobnosti s okolní vegetací. V tom případě je úspěšnější aplikace pixelově orientované klasifikace (Müllerová et al. 2017b).



Obr. 17 Objektová klasifikace UAV snímku pomocí software eCognition - výsledek contrast split segmentace a následné rule-based klasifikace umožňující odlišit květenství bolševníku od jiných bílých objektů

4.2 Detekce křídlatek

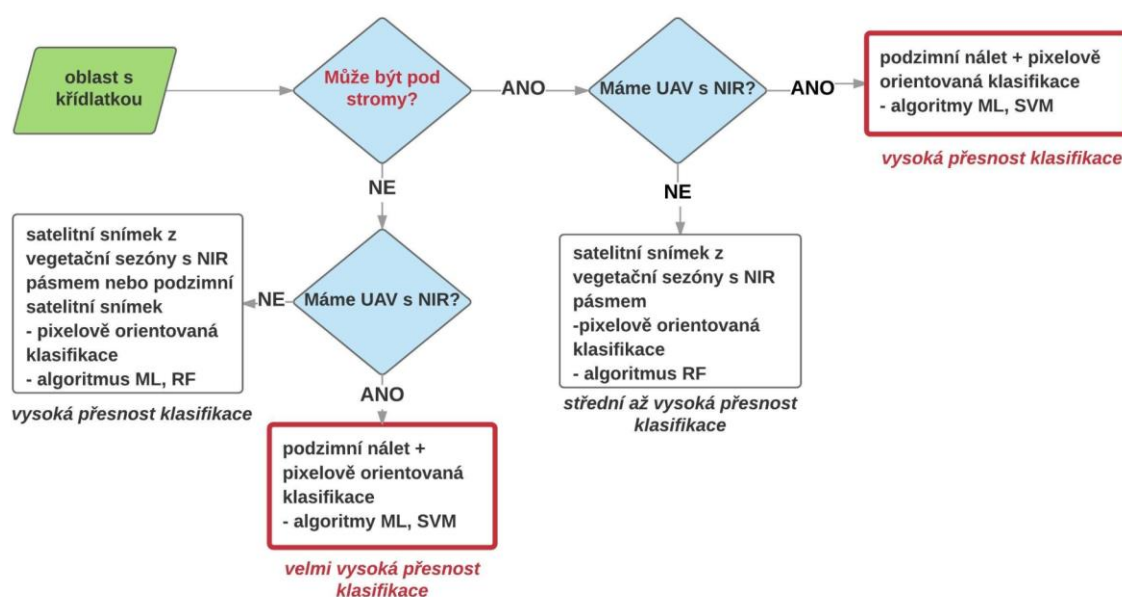
4.2.1 Křídlatky - doba snímkování

Křídlatky nevytváří výrazné útvary jako bolševník, ale jsou odlišné svojí celkovou fenologií v průběhu roku. Spektrální příznaky se v průběhu roku výrazně mění a od okolní vegetace se nejvíce odlišují v době podzimního usychání (Obr. 3). Jejich detekci shora komplikuje častý výskyt pod stromy kolem řek (vrby, topoly, olše) i tak je však možné je relativně spolehlivě detekovat za použití snímků ze správné roční doby.

V jarních měsících mají jedny z největších listů, často dříve než okolní porosty včetně stromů. Některé trsy však ještě nemusí mít listy a jsou vidět pouze ložské lodyhy. To se hodí pro pozemní průzkum, detekci z dálkového průzkumu to však komplikuje. Během vrcholu vegetační sezóny jsou díky rychlému růstu výrazně odlišitelné v infračervené části spektra (NIR). Mnohé jsou však již skryté pod korunami stromů, což snižuje celkovou úspěšnost detekce. Nejlepší období na snímkování je pozdní podzim. Usychající a uschlé vzrostlé stonky křídlatek setrvávají téměř do zimy a mají výrazně žlutou až rezavou barvu a je možné je odlišit i pod porostem listnatých stromů (Obr. 3). V tuto dobu jsou časté mlhy a oblačnost a získat satelitní snímek ve vysokém rozlišení je problematické, využití UAV je však jednodušší. To potvrzuje jednu z hlavních výhod UAV – flexibilitu a schopnost snímat i v době s vysokou oblačností.

4.2.2 Křídlatky - klasifikační přístup a typ dat

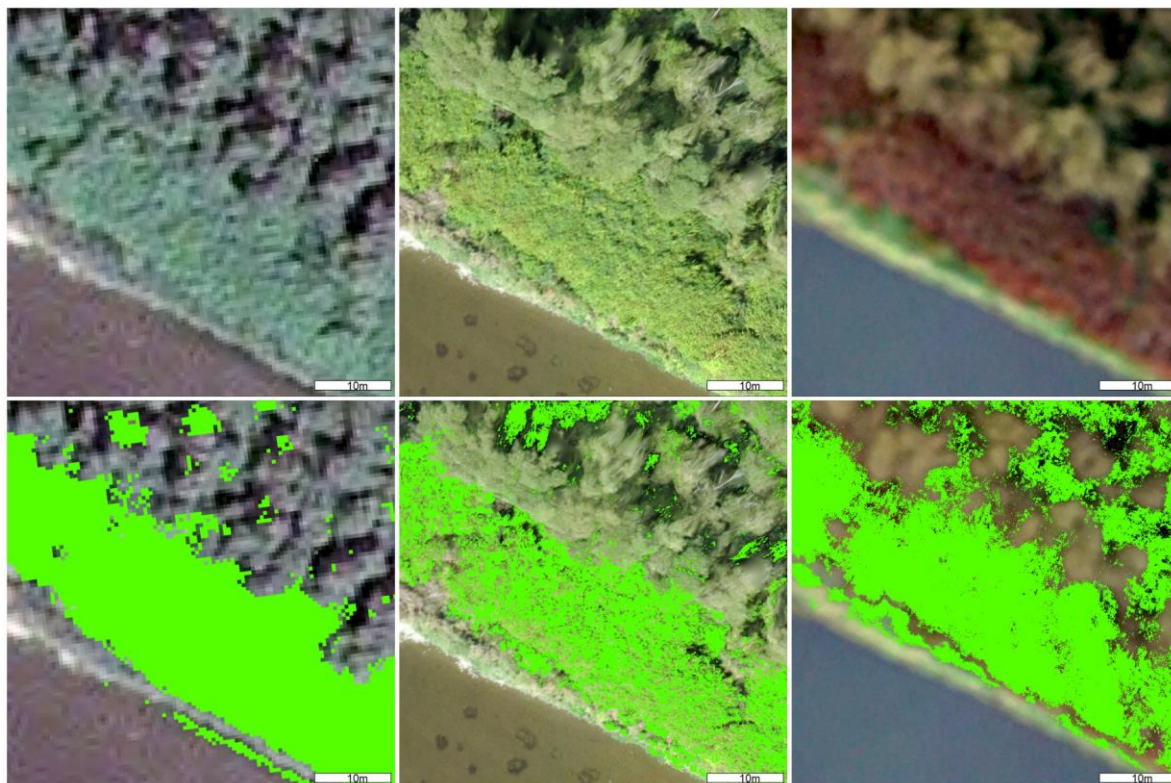
Vzhledem ke své struktuře křídlatka nevytváří dobře definované objekty, jako třeba bolševník, ale spíše různě hustý porost, a proto nelze spoléhat na objektově orientované techniky a je výhodnější použít výpočetně jednodušší klasifikaci jednotlivých pixelů (Obr. 18). Pro jejich detekci je tedy více než prostorové rozlišení zásadnější načasování snímků a rozlišení spektrální, jelikož křídlatky jsou dobře odlišitelné od ostatní vegetace v NIR oblasti spektra. I při UAV snímání s rozlišením 0,5 m lze dosáhnout uspokojivých výsledků za podmínky kombinace běžného a upraveného fotoaparátu schopného snímat v NIR. Je možné využít i satelitní data s velmi vysokým rozlišením (VHR, např. satelity Pléiades). Pro klasifikaci VHR satelitních dat jsou vhodné algoritmy ML nebo RF. Jak již bylo řečeno, nejlepších výsledků klasifikace lze obecně dosáhnout při použití podzimních snímků, díky kontrastnímu zbarvení usychající křídlatky. Opět stačí rozlišení 0,5 m, přičemž ale vyšší prostorové rozlišení zvyšuje úspěšnost klasifikace jedinců mezi korunami stromů. Nejvhodnějším postupem pro UAV je běžný ML algoritmus (případně SVM) za použití trénovacích množin, které obsahují i vizuálně podobné porosty vrb, které jsou jinak často mylně klasifikovány jako křídlatky. K záměně dochází také s dalším invazním druhem slunečnice topinambur (*Helianthus tuberosus*), což naznačuje, že rychle rostoucí invazní druhy sdílí mnohé spektrální znaky.



Obr. 18 Schématické znázornění rozhodovacího klíče pro automatickou detekci křídlatek v závislosti na vlastnostech lokality a dostupných prostředcích DPZ (SVM = Suport Vector Machines, ML = Maximum Likelihood, RF = Random Forest)

Na testovacích územích se nám za použití podzimních snímků podařilo dosáhnout 78% uživatelské a 80% zhotovitelské přesnosti pomocí ML algoritmu, přestože 50% validačních bodů bylo skryto pod korunami stromů. Pro pixelově založenou metodu jde o dobrý výsledek; i nejmenší výskyty křídlatek jsou výrazně větší než jednotlivé pixely a pravděpodobnost kompletního opomenutí populace je tak velmi nízká (Obr. 19).

Při použití letních satelitních snímků s kvalitními NIR daty (např. satelitu Pléiades s NIR pásmem v rozsahu 750-950 nm a téměř konstantní citlivostí) lze dosáhnout ještě vyšší uživatelské přesnosti (95% na stejné testovací lokalitě), ale výrazně nižší přesnosti zhotovitelské (74%). Zde již v kombinaci s nižším rozlišením může docházet k opomenutí některých menších výskytů. Modifikovaný NIR snímač našeho UAV pokrývá sice podobný rozsah vlnových délek (720-950 nm), ale citlivost je proměnlivá a rychle klesá směrem k delším vlnovým délkám (Obr. 9). Tento rozdíl hraje významnou roli především u snímků ze stejného období. Ze získaných zkušeností se též ukazuje, že je lepší snímkovat s UAV v době s konstantní oblačností, jelikož ve stínech během slunečného nebo polojasného dne úspěšnost klasifikace i kvalita ortofota klesá.



Obr. 19 Křídlatky v různých fenofázích a výsledky klasifikace (křídlatky svítivě zelenou v dolní řadě). Zleva Random Forest pro Pleiades ze 7. 7.2015, Support Vector Machines pro UAV z 27. 8. 2016 a Maximum Likelihood pro UAV z 8. 11. 2016, zachycující pozdní fenofázi křídlatky, kdy se lodyhy zbarvují nápadně do rezava. Přestože mělo toto snímkování nižší ostrost v důsledku chyby snímače, byly výsledky nejlepší díky výrazně odlišné fenologii křídlatek v tuto roční dobu (adaptováno z Müllerová et al. 2017b)

4.3 Detekce pajasanu žláznatého

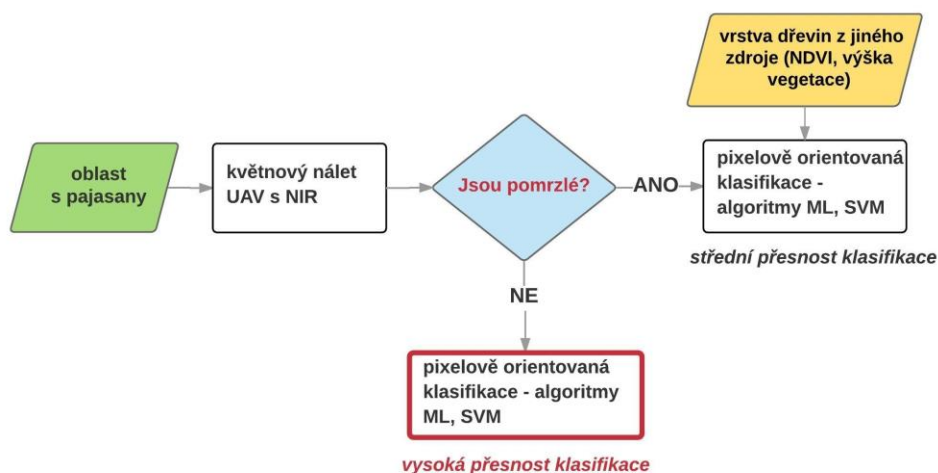
4.3.1 Pajasan - doba snímkování

Pajasan žláznatý se v ČR vyskytuje především v teplých klimatických oblastech a je citlivý na jarní mrazy. Na jaře je sice výrazně zbarven, a tím je snadno odlišitelný vizuálně i pomocí DPZ, ale často

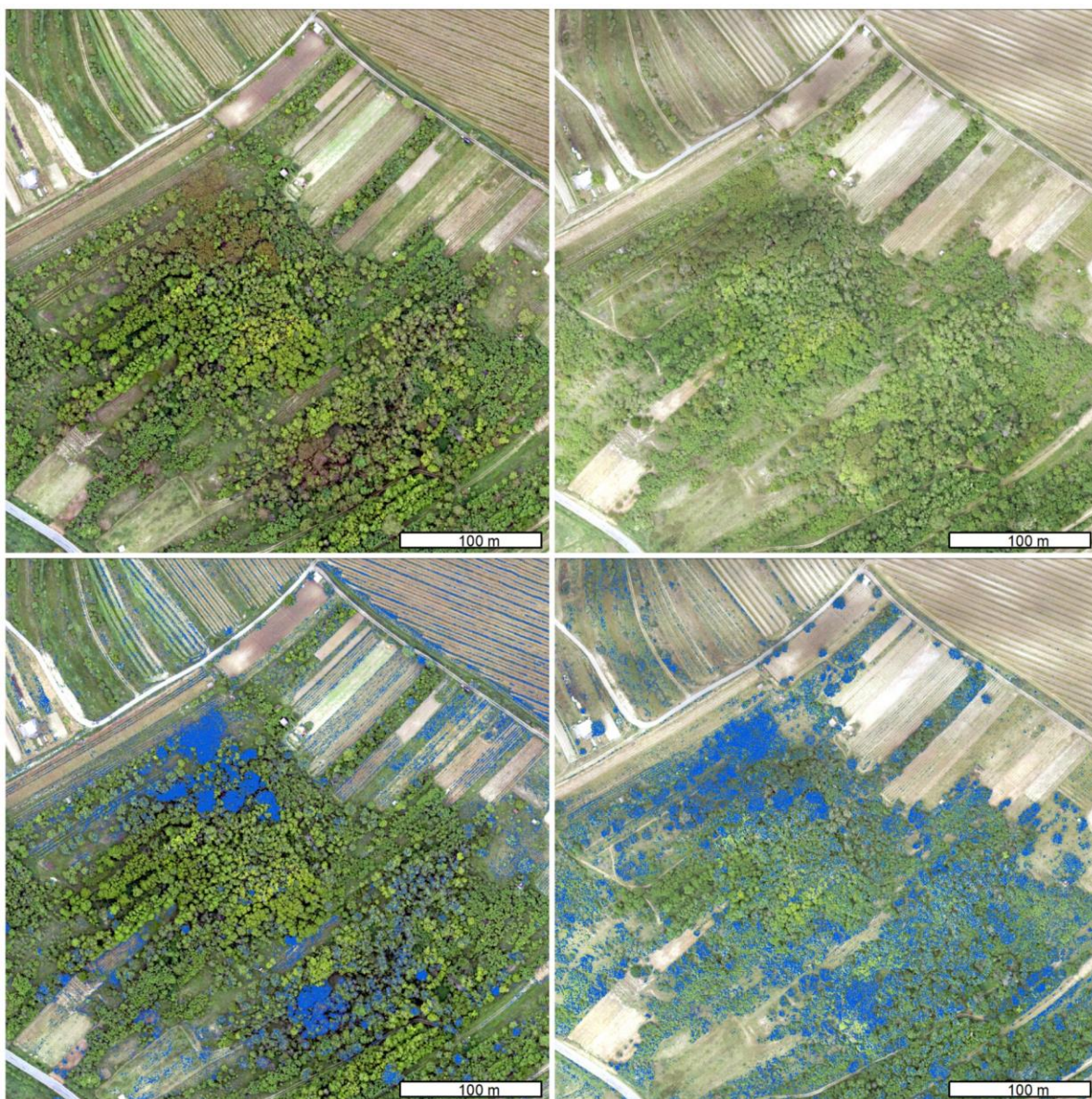
v této době listy pomrznou. Ušchlé stromy je sice také možné odlišit, ovšem pak dochází k záměnám s vinicemi či dalšími krajinnými prvky a je třeba využít další zdroj dat pro jejich vyloučení, například masku porostu stromů vytvořenou z jiného snímku pomocí normalizovaného vegetačního indexu (NDVI), případně využít výšku vegetace vytvořenou rozdílem DMP z UAV a digitální modelu reliéfu (např. DMR 5G od ČÚZK). To je možné pouze za předpokladu dostatečné polohové přesnosti a podrobnosti obou modelů. Stanovit ideální dobu náletu je tudíž velmi složité a je dobré ji opřít o terénní pozorování vybraných jedinců, především v místech, kde dochází k jarním mrazům. Druhou komplikací je fakt, že pajasan u nás málokdy vytváří kompaktní jednodruhovité porosty a volba trénovacích množin je tudíž omezená. Celkově se u nás pajasan vyskytuje (kromě jižní Moravy) především v okolí lidských sídel, kde je lépe chráněn právě před jarními mrazíky. V těchto územích jsou však možnosti létání s UAV velmi omezené, jak již zmíněno v kapitole 1.

4.4.2 Pajasan - klasifikační přístup a typ dat

Vzhledem k charakteru korun a bujnému plošnému zmlazení je opět vhodnější pixelově orientovaná klasifikace, je však vhodné ji doplnit maskou odlišující pole a jiné porosty, u nichž hrozí záměna (např. aktivně využívané vinice, příp. LPIS). Nejlepších výsledků lze dosáhnout s použitím květnových náletů UAV obsahujících modifikované NIR pásmo (Obr. 20). Pokud jedinci nepřemrzli, je možné dosáhnout vysoké úspěšnosti. Místy může docházet k falešným detekcím na vinicích, ale v případě aktivní vinice je poměrně nepravděpodobné, že by se zde pajasany opravdu vyskytovaly. Naopak v prostorách opuštěných vinic se pajasan vyskytuje velmi často. Jednotlivé falešné detekce lze odfiltrovat převzorkováním výsledků, jelikož v případě použití UAV dat s rozlišením 5 cm jsou jedinci vždy větší než jeden izolovaný pixel. Pokud k přemrznutí došlo, je ořez na potenciální lokality ještě důležitější. V tomto případě je poměrně obtížné vyhnout se nesprávné identifikaci jiných přemrzlých dřevin (Obr. 21).



Obr. 20 Schématické znázornění rozhodovacího klíče pro automatickou detekci pajasanu žláznatého v závislosti na klimatu daného roku a dostupných prostředcích DPZ (SVM = *Support Vector Machines*, ML = *Maximum Likelihood*)



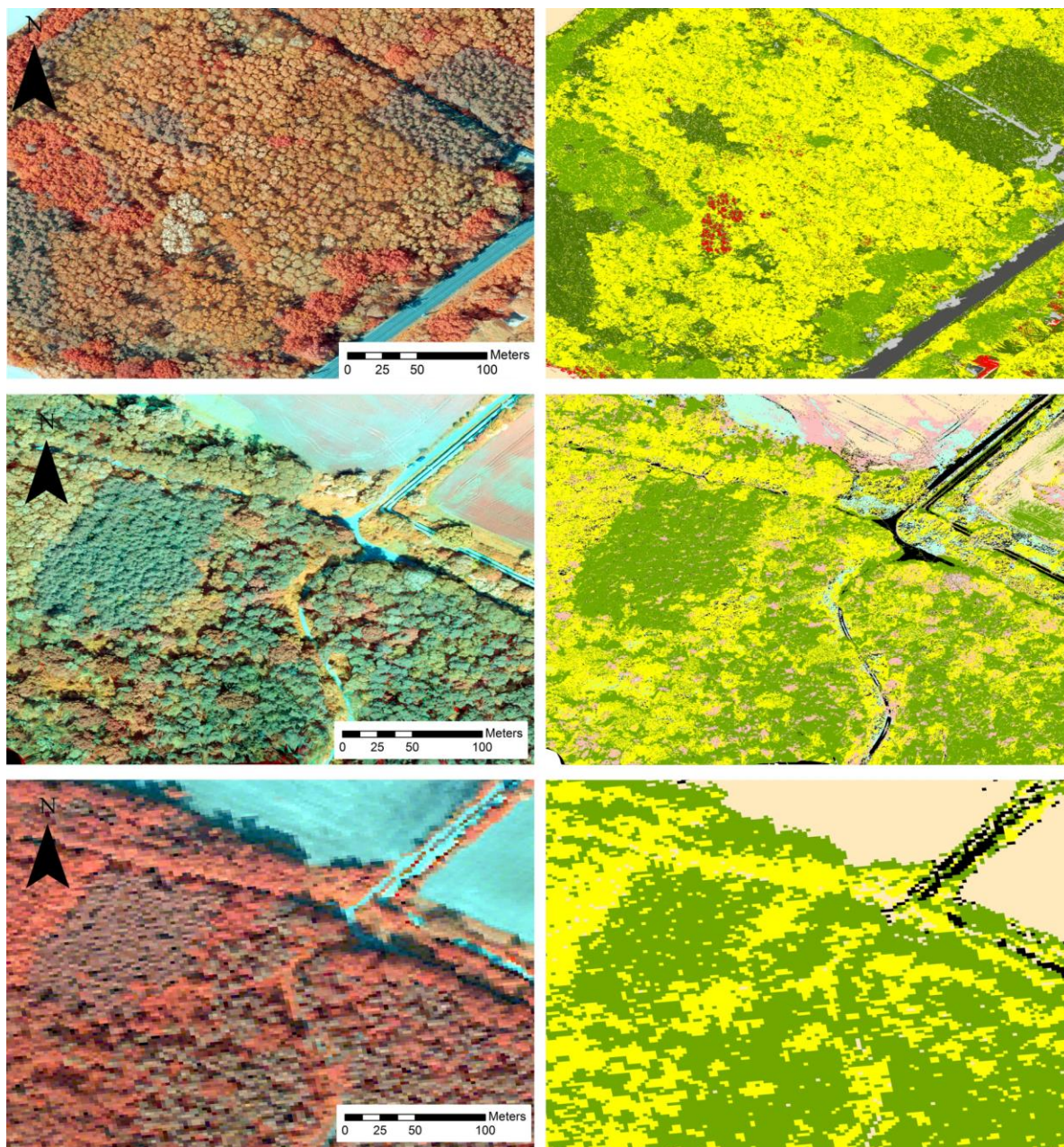
Obr. 21 Klasifikace pajasanu žlaznatého z bezpilotních snímků. Na levé části obrázku je snímek z 19. 5. 2016, kdy byly listy pajasanu výrazně zbarvené do hněda, klasifikace metodou ML správně detekuje pajasany a jednotlivé body v polích nebo kusy vinic. Snímek vpravo z 25. 5. 2017, kdy listy pajasanu před snímkováním pomrzly. Výsledná klasifikace metodou ML má mnoho falešných pozitivních nálezů jak na polích, tak i mezi dalšími dřevinami

4.4 Detekce trnovníku akátu

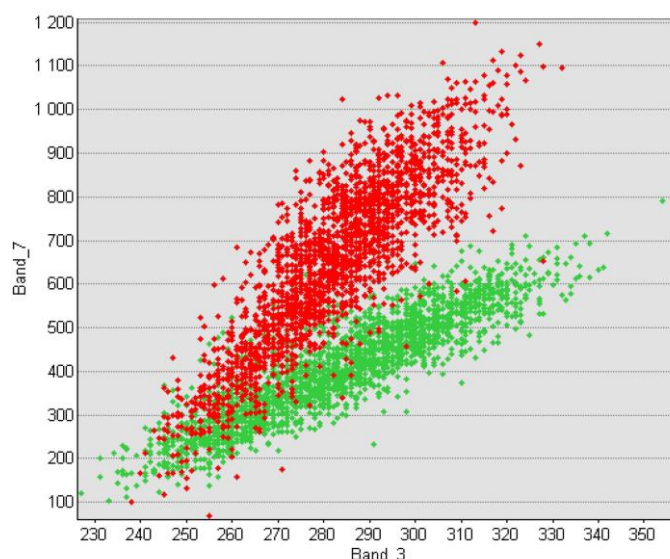
4.4.1 Akát - doba snímkování

Trnovník akát výrazně bílé květy, pro detekci pomocí DPZ však nejsou květenství příliš vhodná z několika důvodů. Jednak proto, že jsou převíslá, a tudíž méně viditelná shora. Dalším důvodem je fakt, že jedinci akátu v porostu většinou nekvetou zároveň (Obr. 22 v horním řádku), a celkově je fáze

květu poměrně krátká a těžko předvídatelná. Naštěstí lze akát s poměrně vysokou úspěšností odlišit od ostatních dřevin i mimo fázi plného květu, pokud je k dispozici spektrální pásmo NIR (Obr. 22). UAV data s vysokým prostorovým rozlišením (5 cm) poskytují vyšší přesnost klasifikace, ale i hrubší data o velikosti pixelu 0,5 m mohou poskytnout poměrně dobré výsledky, pokud je dostupné pásmo NIR, které je pro detekci druhu zásadní (Obr. 23). Pro tyto účely postačí levné řešení modifikovaného pásma NIR (viz kap. 3.1 a obr. 9).

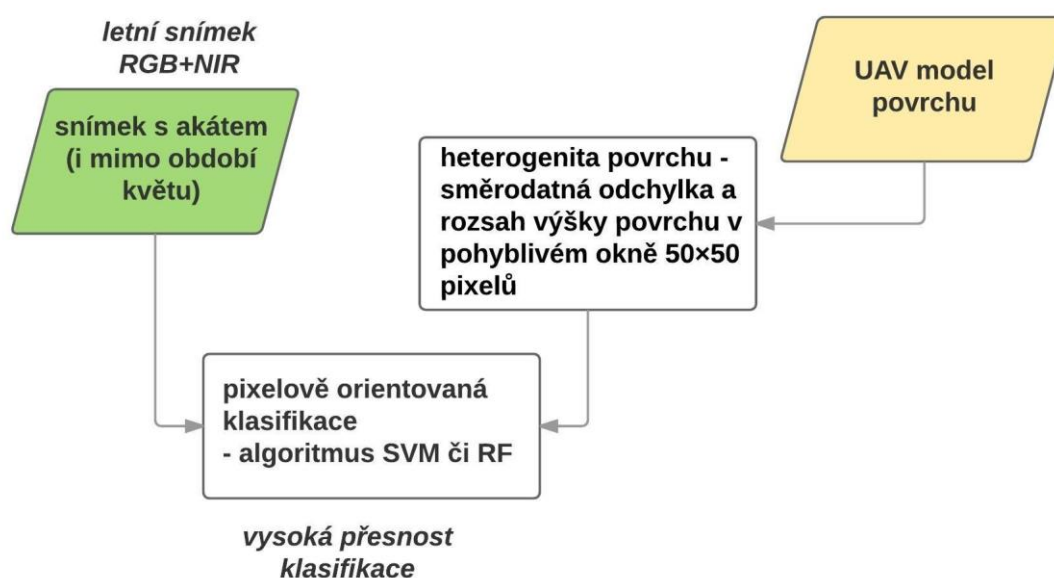


Obr. 22 Klasifikace akátu z UAV snímků (6. 7. 2015; horní a střední řádek) a WV-2 satelitního snímku (30.7.2013; dolní řádek). V levém sloupci je kompozice nepravých barev původního snímku (NIR-G-B) a v pravém je výsledek klasifikace algoritmem Support Vector Machines. Akát je označen žlutě, kvetoucí červeně, další dřeviny zeleně, bezlesí béžově, stíny šedě a cesty černě (adaptováno z Müllerová et al. 2017a)



Obr. 23 Separabilita tříd (akát mimo fázi květu je červeně, ostatní dřeviny zeleně) ukázaný na korelačním diagramu zeleného (Band_3) a NIR 1 kanálu (Band_7) satelitu WV-2 (převzato z Müllerová et al. 2017a)

4.4.2 Akát - klasifikační přístup a typ dat



Obr. 24 Schématické znázornění rozhodovacího klíče pro automatickou detekci trnovníku akátu. Model povrchu vzniká automaticky při tvorbě ortomozaiky z UAV (SVM = Support Vector Machines)

Vzhledem k tomu, že druh nevytváří jasné definované objekty (podobně jako výše zmíněná křídlatka), se jako nejvhodnější způsob klasifikace ukazuje pixelově orientovaná klasifikace za pomoci algoritmů SVM a ML (Obr. 22 a 24, Müllerová et al. 2017a), přičemž SVM je robustnější vůči distorzním artefaktům v UAV ortomozaice. I když je pixelově orientovaná klasifikace nejefektivnější, v některých

případech je těžké rozlišit akátiny od polí. V tom případě lze s úspěchem využít parametr textury (heterogenity) povrchu vygenerovaný na základě modelu povrchu vznikajícího jako vedlejší produkt ortorektifikace bezpilotních dat. Před vlastní klasifikací obrazu se pomocí pohyblivého okna o velikosti 50×50 pixelů (např. v prostředí ArcGIS) vypočítá směrodatná odchylka a rozsah výšky povrchu (byly testovány i velikosti okna 5×5, 10×10, a 100×100 pixelů, Müllerová et al. 2017a). Tato informace je následně zahrnuta do klasifikace jako další vrstva. Samozřejmě lze tento krok celkem snadno nahradit ruční editací po proběhlé řízené klasifikaci či využitím přídatných dat o využití krajiny, např. dat LPIS). Přesná výška vegetace vypočítaná odečtem TMP od modelu terénu by se dala také využít. To je však možné pouze v případě dostupného modelu terénu s podobně vysokou přesností, a přesného umístění UAV modelu povrchu, což by vyžadovalo náročný sběr terénních vlíčovacích bodů v průběhu UAV kampaně. Alternativně k tomuto přístupu by se dala využít i objektově-orientovaná klasifikace, ale vzhledem k značně vyšším nárokům na expertní znalost a specializovaný software upřednostňujeme metodu jednodušší (pixelově orientovanou), která v tomto případě postačuje.

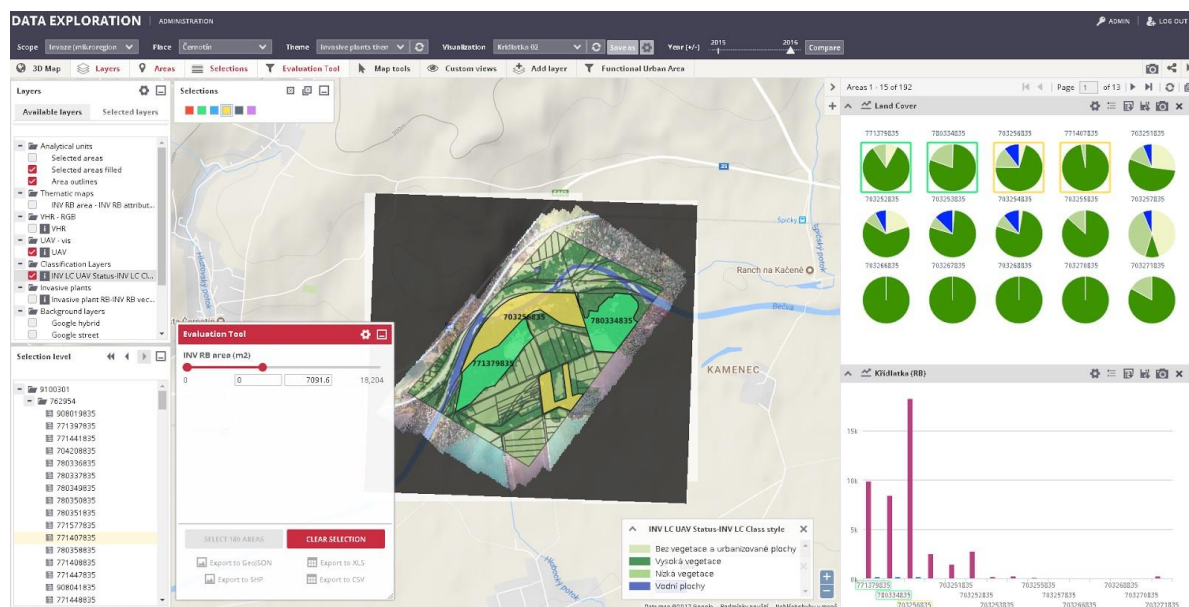
5. Rozšíření zájmových druhů

5.1 Geoportál

Cílem geoportálu, vytvořeného v rámci zmiňovaného projektu TAČR, je poskytnutí platformy a nástroje pro shromáždění a management dat včetně analýzy a vizualizace pro likvidátory a jako podklad pro rozhodování (příp. získání) příspěvku na likvidaci v procesu operačního mapování. Pro stanovení obsahové podoby geoportálu se uskutečnilo několik konzultací s potenciálními uživateli služby v oblasti územní správy a sdružení pro místní rozvoj s cílem identifikovat stav, požadavky a připravenost potenciálních budoucích cílových uživatelů spolu s obsahovou definicí náplně a využití geoportálu. Na jejich základě byl pak geoportál vytvořen.

Základní primární funkcí geoportálu je především interaktivní vizualizace rozšíření a výskytů invazních druhů v podobě mapové aplikace s tematickým obsahem podpořené zdroji dat DPZ (UAV data, družicová data apod.). Definovaný požadavek lze tedy charakterizovat jako prostředí pro evidenci výskytů s případnou možností zapojení širší veřejnosti pro podporu mapování v podobě možnosti záznamu výskytu definovaných invazních druhů.

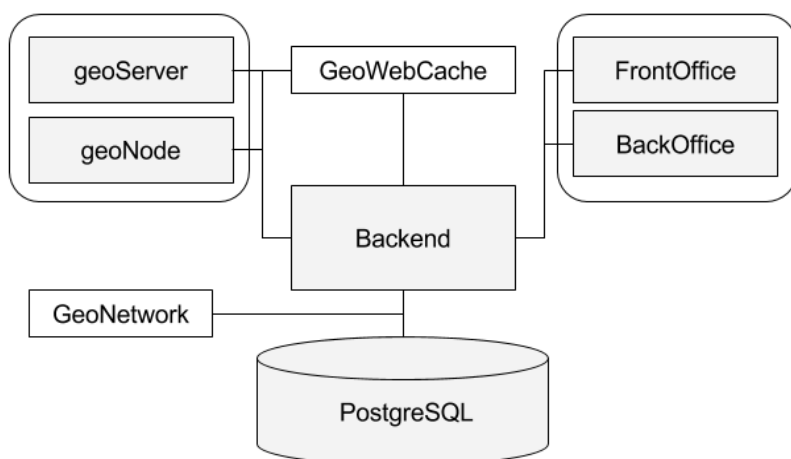
Pro prezentaci jsou podporovány všechny druhy rastrových i vektorových dat použitých pro vizualizaci výsledků, jmenovitě ortomozaiky, tematické klasifikace, družicová data, DMP a vektorová doplňková data jako vymezení zájmových oblastí, případně záznamy výskytů z terénu v podobě polygonů či bodových záznamů, anebo záznamy v textovém formátu s příslušnou strukturou a prostorovou informací (Obr. 25).



Obr. 25 Náhled geoportálu pro okolí obce Čertotín

Platforma se skládá z několika technologií nasazených s příslušnou infrastrukturou tak, aby splňovala primární účel portálu v podobě vizualizace prostorových dat a jejich závislostí ve formě přístupné i uživateli bez expertní znalosti v oblasti GIS a DPZ (Obr. 26). Jádrem architektury tvoří sada hlavních komponent Front Office, Back Office a Backend. Front Office představuje samotné rozhraní

pro uživatele a umožňuje interaktivní prohlížení datových vrstev dle definovaných potřeb. Část Back Office tvoří administrační prostředí a slouží pro správu datových vrstev, jejich nahrávání a mapování na příslušný metadatový koncept pro Front Office. Obsluha této části již vyžaduje pokročilejší expertní znalost. Backend je pak interní komponenta zabezpečující obsluhu obou zmíněných součástí vyvíjená v prostředí JavaScript na platformě Node.js. Kromě konceptu datových vrstev je možné systém doplnit sadou analytických jednotek rozšiřujících nástroje pro vyhodnocení požadovaných obsahových témat. Součástí konceptu je také definice šablon, umožňující efektivní mapování fyzických datových vrstev příp. sdílení pro tematicky příbuzná data. Pro správu uživatelů a nahrávání datových vrstev je využita aplikace GeoNode. Pro publikaci dat a práci s nimi v prostředí webu slouží aplikace GeoServer s integrovanou knihovnou OpenLayers.



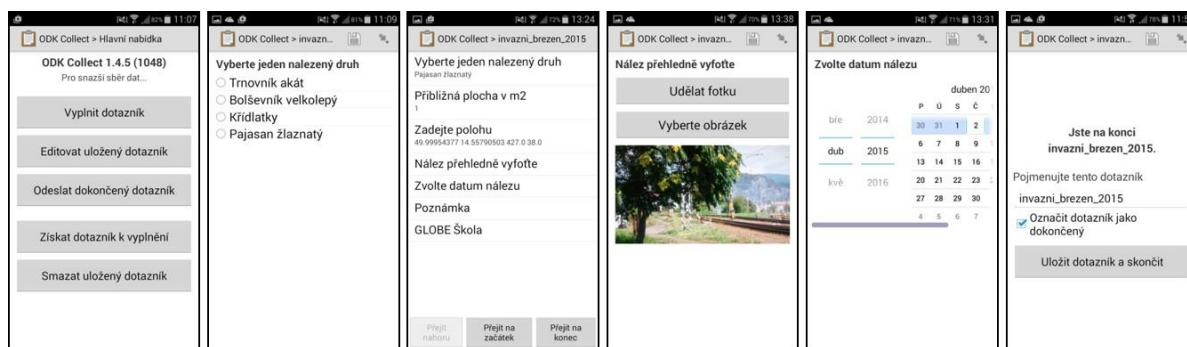
Obr. 26 Základní schéma struktury geoportálu

5.2 Zapojení veřejnosti

Veřejnost je důležitým hráčem v místní ochraně přírody a její zapojení může být pro monitoring invazních druhů velmi přínosné, jelikož lze s nízkými náklady získávat včasné upozornění na výskyt sledovaných druhů od dobrovolníků. Navíc informovanost obyvatel může snížit riziko budoucích invazí dalších druhů např. ze soukromých zahrad. Tzv. citizen science, čili občanská věda, kdy výzkum provádějí zcela nebo alespoň částečně amatéři nebo neprofesionální vědci, získává stále větší pozornost ve světě i u nás. Při úvaze o zapojení veřejnosti do sběru dat je třeba uvažovat i o motivaci dobrovolníků. Materiální motivace může vést k snížení kvality údajů, zapojení škol naopak přináší velké množství dat od studentů za poměrně nízkého komunikačního úsilí, a zároveň seznamuje studenty s přírodou ve svém okolí a fungování vědecké práce obecně. V našem projektu se nám tato spolupráce osvědčila, základní a střední školy monitoring zahrnuly do výuky o problematice invazí a studentům v terénu ukázaly, kde lze druhy najít. Studenti pak sami docházeli k otázkám o dalším postupu výzkumu.

Sbírání informací o výskytu může v nejjednodušší formě fungovat přes zasílání fotografií s GPS souřadnicemi. Sofistikovanějším způsobem je pak konfigurace otevřené aplikace, která umožní sběr dat přímo v terénu pomocí mobilního telefonu nebo tabletu. Zde můžeme doporučit

opensource platformu Open Data Kit (ODK; <https://opendatakit.org>), kterou lze snadno a zdarma podle návodu zprovoznit na Google Cloud Platform a pomocí aplikace ODK Collect sbírat data (Obr. 27), která se následně shromažďují na serveru umožňujícím vizualizaci (interní a případně i veřejnou) a základní analýzu. Aplikace využívá interní GPS zařízení a poloha tedy chráněna před chybou zadavatele dat. Data lze následně exportovat pro použití v GIS nebo například na geoportálu. Podobně lze použít aplikaci AOPK BioLog (BioLog <http://biolog.nature.cz/cz/Article/AboutApp>). Více informací o našich aktivitách sloužících k zapojení veřejnosti do problematiky monitoringu invazních druhů lze najít na webových stránkách našeho projektu <http://www.invaznirosliny.cz/>.



Obr. 27 Aplikace ODK Collect umožňuje snadné vytvoření dotazníku na míru, který pak dobrovolníci mohou v terénu vyplnit, přidat svou aktuální polohu a fotografii

5.3 Další zdroje

- AOPK ČR - stránka věnovaná invazním druhům <http://invaznidruhy.nature.cz/>
- Vrstva mapování biotopů AOPK, která mj. zahrnuje i výskyty invazních druhů (http://portal.nature.cz/publik_syst/ctihtmlpage.php?what=1035)
- BioLog - aplikace AOPK pro zaznamenání výskytu druhů <http://biolog.nature.cz/cz/Article/AboutApp>
- DAISIE - evropská databáze invazních druhů (<http://www.europe-aliens.org>)
- EOS Land Viewer - uživatelsky přívětivá platforma pro prohlížení a stahování dat satelitů Landsat a Sentinel <https://lv.eosda.com/>
- Webové stránky našeho projektu Detekce a monitoring invazních rostlin metodami dálkového průzkumu Země <http://www.invaznirosliny.cz/>
- Projekty likvidace invazních druhů
 - <http://bolsevník.eu/>
 - <http://gis.kr-karlovarsky.cz/heracleum-public/>
 - <https://life-moravka.msk.cz/>
 - <http://salamandr.info/rubrika/projekty/>
- AisView - přehled využití vzdušného prostoru <http://aisview.rlp.cz/>
- Aktuální zprávy METAR a TAF <http://meteo.rlp.cz/>
- Plán využití vzdušného prostoru AUP <http://aup.rlp.cz/>

- Legislativa pro bezpilotní systémy - Předpis L2, doplněk X
<https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- Předpověď počasí pro sportovní létání <http://portal.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/letecke/sportovni-letani>
- Numerické předpovědní modely <https://www.yr.no/> a <https://www.windy.com/>

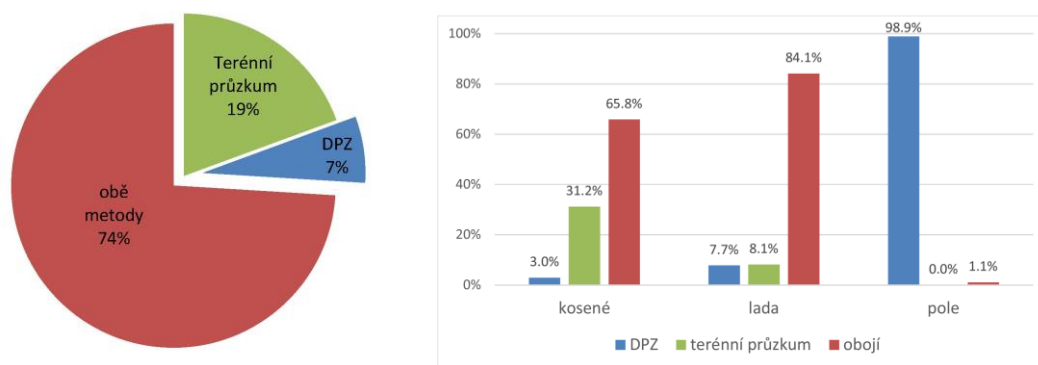
6. Uplatnění metodiky

Jak již bylo řečeno, rostlinné invaze v současné době představují aktuální problém v ochraně přírody a krajiny, a pro účinná opatření proti nim jsou potřebné nové metody umožňující rychlý a účinný monitoring. Naše metodika poskytuje návod pro monitoring velmi problémových invazních druhů, a to jak bylin, tak i dřevin. Poskytuje základy k pochopení problematiky, specifikuje požadavky na typ a kvalitu dat DPZ (s ohledem na fenofázi rostliny) jako podklad k jejich vlastnímu snímkování pomocí UAV, případně pro objednávky snímkování specializovanou firmou, a popisuje postup jejich zpracování a vyhodnocení. Představuje levné a operativní řešení pomocí UAV, které je zvláště vhodné pro cílený monitoring zaměřený např. na zvláště chráněné lokality, lokality NATURA 2000, místa náchylná k invazi nebo jako kontrola ošetřených území, ale zmiňuje i další zdroje dat DPZ (satelitní data s vysokým prostorovým rozlišením), která lze pro detekci s větším či menším úspěchem použít pro mapování větších území.

Metodika je cílena na instituce či soukromé vlastníky zabývající se údržbou krajiny, především na místní orgány ochrany přírody, ale i např. na krajské a místní úřady, Ředitelství silnic a dálnic nebo na Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, které o metodiku projevily předběžný zájem. Vzhledem k nedávnému zakotvení zákonné povinnosti prevence a regulace zavlékání či vysazování a šíření invazních nepůvodních druhů (Evropská komise 2014) a očekávané aktualizaci národní legislativy ve vazbě na implementaci nařízení se téma regulace šíření invazních druhů stává aktuální pro stále větší okruh vlastníků a správců krajiny.

7. Srovnání s jinými metodami mapování

Pro úspěšná opatření proti šíření invazních druhů je nezbytná přesná znalost jejich rozšíření v krajině, tradičně zajišťovaná rozsáhlým terénním průzkumem. Takovéto mapování je velmi náročné logisticky i finančně, a je zatížené značnou chybou v závislosti na preciznosti a přístupu mapovatele. Navíc některá území jsou pro mapovatele těžko přístupná a jsou tudíž často vynechána. Přitom pro šíření invazních druhů mohou být právě nové či zapomenuté enklávy ohniskem dalšího masivního šíření. Na druhou stranu terénní mapování (za předpokladu, že je provedeno precizně) je vždy přesnější než metody distanční. Obr. 28 přináší srovnání pozemního a distančního mapování bolševníku velkolepého, v tomto případě pomocí leteckých snímků. Především v případě, že rostliny jsou obhospodařované (např. posekané či postříkané herbicidy), je těžké je z distančních dat automatickými metodami rozlišit (obr. 28). Naopak v místě, kde je mapovatel nečeká, např. na osamoceném neobhospodařovaném ostrůvku nebo na mýtině uprostřed lesa, je najde distanční mapování s vyšší úspěšností, jelikož prohledává celou oblast systematicky. V případě složitější detekce pak mohou data s vysokým prostorovým rozlišením (UAV) poskytnout přídatné informace.



Obr. 28 Srovnání terénního průzkumu a mapování pomocí leteckých snímků. Procenta udávají úspěšnost detekované plochy bolševníku vůči referenčnímu mapování

Vzhledem k náročnosti terénního mapování je téměř nemožné zajistit pravidelně opakované šetření většího území např. jako kontrolu po likvidačních zásazích. Dálkový průzkum Země naproti tomu představuje řešení jak pro těžko přístupná území, tak pro opakované průzkumy (především v případě flexibilního UAV). Využití DPZ obecně, a navrhované řešení nízkonákladového UAV obzvláště výrazně zrychluje a zlevňuje detekci ve srovnání s pozemním mapováním, zároveň však je třeba zohlednit jeho limity (Obr. 28). Automatické zpracování UAV dat, které umožní rychlou aplikaci metody na větších územích, či její opakované použití, není zatím příliš prozkoumané. Co se týče konkrétně našich zájmových druhů, existuje několik odborných studií DPZ detekce pro bolševník, křídlatku a jedna pro akát; pajasane se zatím nikdo nezabýval. Kromě prací autorského týmu (Müllerová 2005, 2008, 2013 a 2017a,b) jsou to práce využívající snímky hyperspektrální (Lorencs et al. 2014), satelitní a letecké (Jones et al. 2011, Dorigo et al. 2012, Somodi et al. 2012), či UAV (Michez et al. 2016). V některých těchto pracích však bohužel chybí validace (Jones et al. 2011) či je neúplná (Michez et al. 2016), takže se výsledky nedají úplně porovnávat. Stejně tak zatím nebyla vytvořena metodika ani pro využití UAV dat obecně, ani konkrétně pro zmíněné druhy. Předkládaná metodika tedy představuje nové řešení mapování invazí, přispívá k poznání vhodných postupů detekce i získání dat pomocí bezpilotního prostředku, které zatím nebyly popsány a vyzkoušeny, a napomáhá k jejich zavedení do praxe.

8. Závěr

V metodice jsme se pokusili komplexně shrnout problematiku mapování invazních druhů pomocí metod DPZ a poskytnout podrobný návod postupu při mapování vybraných problémových druhů rostlin s pomocí bezpilotního systému (případně družicových či leteckých snímků). Představená metodika tedy poskytuje a demonstruje ucelený rámec pro praktické nasazení v procesu mapování tak následném začlenění a využití získaných dat pro příp. management těchto porostů.

S rozvojem výpočetního výkonu a miniaturizací běžně dostupného hardwaru je dnes možné analyzovat rozsáhlá a objemná data s velmi vysokým prostorovým rozlišením na standardním počítači, navíc dostupný software dovoluje vysoký stupeň automatizace většiny úkolů. S využitím geoportálu je pak možné získaná data přehledně zpřístupnit i uživatelům (příp. širší veřejnosti) bez nutné odborné znalosti metod DPZ nebo GIS. Celý proces je tudíž mnohem uživatelsky přívětivější. Proto věříme, že si monitoring invazních rostlin pomocí metod DPZ najde nové uživatele a doufáme, že tento materiál napomůže k zavedení metod DPZ do praxe v ochraně přírody i údržbě krajiny a přispěje k omezení problému rostlinných invazí v ČR.

9. Poděkování

Děkujeme odborným recenzentům a všem kolegům, kteří nám s prací pomohli, jmenovitě Zdeňce Konopové a Lucii Šmejdové, stejně jako dalším kolegům z našich institucí. Metodika byla zpracována za finanční podpory TA ČR (www.tacr.cz; projekt TA04020455) a výzkumného záměru RVO 67985939 (AV ČR).

10. Seznam použité literatury

- Bailey, J. P., Conolly, A. P. (2000): Prize-winners to pariahs: A history of Japanese Knotweed s. l. (Polygonaceae) in the British Isles. *Watsonia* 23: 93–110.
- Barták, R., Konupková Kalousová, Š., Krupová, B. (2010): Metodika likvidace invazních druhů křídlatek (*Reynoutria* spp.). Morav.-slezs. kraj ve spolupráci s ČSOP Salamandr za fin. podpory EU: 1–34.
- Bímová, K., Mandák, B., Pyšek, P. (2003): Experimental study of vegetative regeneration in four invasive *Reynoutria* taxa (Polygonaceae). *Plant Ecology* 166: 1–16.
- Bímová, K., Mandák, B., Kašparová, I. (2004): How does *Reynoutria* invasion fit the various theories of invasibility? *Journal of Vegetation Science* 15: 495–504.
- Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (eds.) (2008): Object-based image analysis: Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. Springer, Berlin.
- Bory, G., Clair-Maczulajty, D. (1980): Production, dissemination and polymorphism of seeds in *Ailanthus altissima*. *Revue générale de botanique* 88(1049/1051): 297–311.
- Breiman, L. (2001): Random forests. *Mach. Learn.* 45: 5–32.
- Clewley, D., Bunting, P., Shepherd, J., Gillingham, S., Flood, N., ... Moghaddam, M. (2014) A python-based open source system for Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) utilizing raster attribute tables. *Remote Sensing*, 6, 6111–6135.
- Colomina, I., Molina, P. (2014): Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92: 79–97.
- Congalton, R. G., and Green, K. (1999): Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. New York, NY: Lewis Publishers.
- DAISIE (2012). European Invasive Alien Species Gateway. Available online at: <http://www.europe-aliens.org/>
- Dandois, J. P., and Ellis, E. C. (2010). Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sens.* 2, 1157–1176. doi: 10.3390/rs2041157
- Dorigo, W., Lucieer, A., Podobnikar, T., Čarni, A. (2012): Mapping invasive *Fallopia japonica* by combined spectral, spatial, and temporal analysis of digital orthophotos. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 19: 185–195.
- eCognition Developer 9.2 Reference Book (2016): Trimble Germany GmbH.
- Evropská komise (2008): Plán strategie EU pro invazní druhy. COM 789. Brussels: EC.
- Evropská komise (2014): Nařízení o prevenci a regulaci zavlékání či vysazování a šíření invazních nepůvodních druhů. COM 1143/2014. Brussels: EC.
- Evropská komise (2017): Prováděcí nařízení komise (EU) 2017/1263. Brussels: EC.
- Foody, G. M. (2002): Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80: 185–201.
- Hejda, M., Pyšek, P., Jarošík, V. (2009): Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of Ecology* 97:393–403.
- Hulme, P. E., Pyšek, P., Nentwig, W., Vilà M. (2009): Will Threat of Biological Invasions Unite the European Union? *Science* 324: 40–41.
- Huntley, J.C. (1990): *Robinia pseudoacacia* L. black locust. – In: Burns, R.M. & Honkala B.H. (eds.). *Silvics of North America 2. Hardwoods, Agric. Hand.* 654:755–761.
- Chytrý, M., Pyšek, P., Tichý, L., Knollová, I., Danihelka, J. (2005): Invasions by alien plants in the Czech Republic: a quantitative assessment across habitats. *Preslia* 77: 339–354.
- Jones, D., Pike, S., Thomas, M., Murphy, D. (2011): Object-based image analysis for detection of Japanese Knotweed s.l. taxa (Polygonaceae) in Wales (UK). *Remote Sens.* 3: 319–342.

- Karlovarský kraj (2015): Metodiky likvidace invazních druhů rostlin. Karlovarský kraj, projekt CZ.1.02/6.2.00/12.17406 Omezení výskytu invazních druhů rostlin v Karlovarském kraji (http://apdm.cz/www/wp-content/uploads/IR_metodika_prirucka_blok-k3.pdf)
- Kowarik, I. (2008): On the role of alien species in urban flora and vegetation. In: Urban Ecology, eds J. Marzluff, E. Shulenberger, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, C. ZumBrunnen, U. Simon (New York, NY: Springer), p. 321–338.
- Křivánek, M. (2006): *Ailanthus altissima* (Miller) Swingle 1916. In: Mlíkovský, J. & Stýblo, P. (eds.). Nepůvodní druhy fauny a flóry ČR. ČSOP, Praha: 39–40.
- Laliberte, A. S., and Rango, A. (2009): Texture and scale in object-based analysis of sub-decimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 47: 761–770.
- Lawrence, J. G., Colwell, A., Sexton, O. J. (1991): The ecological impact of allelopathy in *Ailanthus altissima* (Simaroubaceae). American journal of Botany 78(7): 948–958.
- Lorencs, A., Mednieks, I., Sinica-Sinavskis, J. (2014): Simplified classification of multispectral image fragments. Elektronika ir Elektrotechnika 20(6): 136–139.
- Lvončík, S., Nováková J., Kapitola P. (2010): Bolševník velkolepý *Heracleum mantegazzianum*. Ministerstvo zemědělství a Státní rostlinolékařská správa (http://eagri.cz/public/web/file/94842/bolsevník_velkolepy.pdf).
- Mandák, B., Pyšek, P., Bímová, K. (2004): History of the invasion and distribution of Reynoutria taxa in the Czech Republic: a hybrid spreading faster than its parents. Preslia 76: 15–64.
- Michez, A., Piégay, H., Jonathan, L., Claessens, H., Lejeune, P. (2016): Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. 44: 88–94.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Moravcová, L., Pyšek, P., Pergl, J., Perglová, I., Jarošík, V. (2006): Seasonal pattern of germination and seed longevity in the invasive species *Heracleum mantegazzianum*. Preslia 78: 287–301.
- Müllerová, J., Pyšek, P., Jarošík, V., Pergl, J. (2005). Aerial photographs as a tool for assessing the regional dynamics of the invasive plant species *Heracleum mantegazzianum*. Journal of Applied Ecology 42 (6): 1–12.
- Müllerová, J., Pyšek, P., Pergl, J., Jarošík, V. (2008). Dlouhodobá dynamika šíření bolševníku velkolepého (*Heracleum mantegazzianum*) v krajině: využití leteckých snímků. Zprávy ČBS 43(Mater. 23): 91–102.
- Müllerová, J., Pergl, J., Pyšek, P. (2013): Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: testing the effects of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 25: 55–65.
- Müllerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J., Dvořák, P., Vítková, M. (2017a): Unmanned aircraft in nature conservation – an example from plant invasions. International Journal of Remote Sensing 38 (8–10): 2177–2198.
- Müllerová, J., Brůna, J., Bartaloš, T., Dvořák, P., Vítková, M., Pyšek, P. (2017b): Timing is important: unmanned aircraft versus satellite imagery in plant invasion monitoring. Frontiers in Plant Science 8 (887).
- Nielsen, C., Ravn, H. P., Cock, M., Nentwig, W. (eds.) (2005): Bolševník velkolepý: Praktická příručka o biologii a kontrole invazního druhu. Forest & Landscape Denmark, Hoersholm, 44 pp.
- Pergl, J., Sádlo, J., Petrusek, A., Laštůvka, Z., Musil, J., Perglová, I., Šanda, R., Šefrová, H., Šíma, J., Vohralík, V., Pyšek, P. (2016a): Black, Grey and Watch Lists of alien species in the Czech Republic based on environmental impacts and management strategy. NeoBiota 28: 1–37.

- Pergl, J., Perglová, I., Vítková, M., Pocová, L., Janata, T., Šíma, J. (2016b): Likvidace vybraných invazních druhů rostlin; Standardy péče o přírodu a krajinu. Management of Selected Alien Plant Species. AOPK ČR & Botanický ústav AV ČR: Praha, Průhonice: 1–22.
- Perglová, I., Pergl, J., Pyšek, P. (2006): Flowering phenology and reproductive effort of the invasive alien plant *Heracleum mantegazzianum*. *Preslia* 78: 265–285.
- Pluess, T., Cannon, R., Jarošík, V., Pergl, J., Pyšek, P., Bacher, S. (2012): When are Eradication Campaigns Successful? A Test of Common Assumptions. *Biological Invasions* 14: 1365–1378.
- Pyšek, P., Prach, K. (1993): Plant invasions and the role of riparian habitats – a comparison of four species alien to central Europe. *J. Biogeogr.* 20: 413–420.
- Pyšek, P., Brock, J. H., Bímová, K., Mandák, B., Jarošík, V., Koukolíková, I., Pergl, J., Štěpánek, J. (2003): Vegetative regeneration in invasive Reynoutria (Polygonaceae) taxa: the determinant of invasibility at the genotype level. *Amer J Bot* 90: 1487–1495.
- Pyšek, P., Cock, M. J. W., Nentwig, W., Ravn, H. P. (eds) (2007): Ecology and management of giant hogweed (*Heracleum mantegazzianum*) Wallingford, UK: CABI, xvii + 324 pp.
- Pyšek, P., Jarošík, V., Müllerová, J., Pergl, J. & Wild, J. (2008): Comparing the rate of invasion by *Heracleum mantegazzianum* at continental, regional, and local scales. *Diversity and Distributions* 14: 355–363.
- Pyšek, P., Richardson, D. M. (2010): Invasive Species, Environmental Change and Management, and Health. *Annual Review of Environment and Resources* 35: 25–55.
- Pyšek, P., Chytrý, M., Pergl, J., Sádlo, J., Wild, J. (2012a): Plant invasions in the Czech Republic: current state, introduction dynamics, invasive species and invaded habitats. *Preslia* 84: 576–630.
- Pyšek, P., Danihelka, J., Sádlo, J., Chrtěk, J. Jr., Chytrý, M., Jarošík, V., Kaplan, Z., Krahulec, F., Moravcová, L., Pergl, J., Štajerová, K., Tichý, L. (2012b): Catalogue of alien plants of the Czech Republic (2nd edition): checklist update, taxonomic diversity and invasion patterns. *Preslia* 84: 155–255.
- Rejmánek, M., Richardson, D. M. (1996): What attributes make some plant species more invasive? *Ecology* 77/6: 1655–1661.
- Rocchini, D., Andreo, V., Förster, M., Garzon-Lopez, C. X., Gutierrez, A. P., Gillespie, T. W., et al. (2015): Potential of remote sensing to predict species invasions: a modelling perspective. *Progr. Phys. Geogr.* 39: 283–309.
- Sádlo, J., Vítková, M., Pergl, J., Pyšek, P. (2017): Towards site-specific management of invasive alien trees based on the assessment of their impacts: the case of *Robinia pseudoacacia*. *NeoBiota* 35: 1–34.
- Sheppard, A.W., Shaw, R.H., Sforza, R. (2006): Top 20 environmental weeds for classical biological control in Europe: a review of opportunities, regulations and other barriers to adoption. *Weed Research* 46:93–117.
- Shouse, M., Liang, L., Fei, S. (2013): Identification of understory invasive exotic plants with remote sensing in urban forests. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 21: 525–534.
- Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J., H. (2013): Automatic isolation of blurred images from UAV image sequences. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W2.
- Somodi, I., A. Čarni, D. Ribeiro, T. Podobnikar (2012): Recognition of the Invasive Species *Robinia pseudoacacia* from Combined Remote Sensing and GIS Sources. *Biological Conservation* 150: 59–67.
- Šrubař, M., Albín, R. (2005): Jak "beskydský postup" likvidace křídlatek šetří nejen přírodu. *Ochrana přírody* 60(3): 82–84.
- Vapnik, V. (1995): The Nature of Statistical Learning Theory. New York, NY: Springer-Verlag.
- Vítková, M. (2011): Péče o akátové porosty. *Ochrana přírody* 6: 7–12.
- Vítková, M., Kolbek, J. (2010): Vegetation classification and synecology of Bohemian *Robinia pseudoacacia* stands in a Central European context. *Phytocoenologia* 40: 205–241.

- Vítková, M., Tonika, J., Müllerová, J. (2015): Black Locust-Successful Invader of a Wide Range of Soil Conditions. *Science of the Total Environment* 505: 315–328.
- Vítková, M., Müllerová, J., Sádlo, J., Pergl, J., Pyšek, P. (2017): Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: A story of an invasive tree in Central Europe. *Forest Ecology and Management* 384: 287-302.
- Weber, E. (2003): *Invasive plant species of the world: a reference guide to environmental weeds*. CABI Publishing, Oxon: 548 pp.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., and Reynolds, J. M. (2012): Structure-from-motion photogrammetry: a lowcost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.
- Whitehead, K., Hugenholtz, C. H. (2014): Remote Sensing of the Environment with Small Unmanned Aircraft Systems (UASS), Part 1: A Review of Progress and Challenges 1. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2 (3): 69–85.
- Whitehead, K., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga A., Barchyn, T. E., Moorman, B., Eaton, B. (2014): Remote Sensing of the Environment with Small Unmanned Aircraft Systems (UASS), Part 2: Scientific and Commercial Applications 1. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2 (3): 86–102.
- Zweig, C. L., Burgess, M. A., Percival, H. F., Kitchens, W. M. (2015): Use of Unmanned Aircraft Systems to Delineate Fine-Scale Wetland Vegetation Communities. *Wetlands* 35: 303–309.

11. Vysvětlení termínů a zkratek

Agisoft Photoscan Professional - software na tvorbu ortomozaik z UAV snímků

AGL - above ground level - výška nad povrchem země

antropogenní - člověkem ovlivněná

AOPK - Agentura ochrany přírody a krajiny ČR

ArcGIS - komerční software pro práci s prostorovými daty

Collector for ArcGIS - aplikace umožňující sběr dat v terénu

contrast split segmentace - rozděluje obraz na tmavé a světlé objekty na základě hraniční hodnoty za využití edge ratio algoritmu

DAISIE - evropská databáze problematických invazních druhů (<http://www.europe-aliens.org>)

dormantní semena - živá semena, která neklíčí

DMP - digitální model povrchu

DPZ - Dálkový průzkum Země

CHDK - Canon hacker's development kit - rozšířený firmware pro fotoaparáty Canon

eCognition - komerční software umožňující objektově orientovanou klasifikace obrazových dat

fenofáze - stádium vývoje rostliny, např. rašení, kvetení, zrání atp.

furanokumariny - fenolické glykosidy obsažené v bolševníku, které po potřísnění pokožky či pouhým dotykem a po následnou aktivaci UV paprsky způsobují závažné zdravotní komplikace - popáleniny

geotagging - neboli geocoding je přiřazování GPS souřadnic snímkům podle přesného času záznamu snímku

GFC - glass fibre composite - kompozit využívající jako výztuhu skleněná vlákna

GSD - ground sampling distance - vzdálenost v terénu zachycená na 1 pixelu snímku

HW - hardware

introdukce - první zavlečení nepůvodního druhu na nové území

invazní druh - nepůvodní druh, který se nekontrolovaně šíří v krajině

IR filtr - filtr omezující průnik záření do snímače na infračervenou oblast spektra

IR-cut filtr - filtr zabraňující průniku infračerveného záření do snímače

kappa statistika (případně kondicionální kappa) - vyjadřuje statistickou významnost výsledků, udává do jaké míry se skutečná přesnost klasifikace liší od shody, která by vznikla čistě náhodně

koregistrace – vlíčování různých dat tak, aby na sebe přesně polohově navazovala (týká se např. jednotlivých pásem či snímků z různého časového období)

LAA - Letecká amatérská asociace ČR

Landsat - program multispektrálních družic NASA fungující nepřetržitě od roku 1972, data jsou dostupná zdarma

LPIS - veřejný registr půdy

multiresolution segmentace - postupně spojuje pixely nebo existující objekty s cílem minimalizace heterogenity

ML - Maximum Likelihood - klasifikační algoritmus

modifikovaný NIR snímač - upravená kamera s odstraněným IR filtrem

naturalizace - rozšíření nepůvodního druhu do volné přírody
 NDVI - normalizovaný vegetační index
 NIR - near infra red - spektrální pás v blízkém infračerveném pásu světla
 NOTAM - Notification to Airmen - významné zprávy o mimořádném použití vzdušného prostoru atp.
 neofyt - nepůvodní druh
 objektově orientovaná klasifikace - OBIA - klasifikace obrazu po segmentech využívající nejen spektrální charakteristiky, ale i texturu a vztahy mezi objekty
 opensource software - s otevřeným zdrojovým kódem, většinou zdarma
 ortomozaika - ortofoto - bežešvá mapa sestavená z jednotlivých snímků s přesnou lokalizací
 pixelově orientovaná klasifikace - obraz je analyzován pouze na základě spektrální odrazivosti v jednotlivých kanálech
 PLEIADES - komerční multispektrální satelit se 4 spektrálními pásmy a vysokým prostorovým rozlišením 0,5/2,8 m
 PPK - Post processing kinematics - metoda přesného měření polohy pomocí GNSS přijímače a korekčních dat, uskutečněná v rámci dodatečného zpracování naměřených dat
 primární areál výskytu - přirozený výskyt druhu
 propagule - část organismu sloužící k šíření a reprodukci
 QGIS - Opensource software pro práci s prostorovými daty
 radiometrický - spektrální
 RapidEye - komerční multispektrální družice s 5 kanály a prostorovým rozlišením 6,5 m
 RAW - formát ukládání surových obrazových dat fotoaparátu (přípona se liší dle výrobce)
 RF - Random Forest - klasifikační metoda strojového učení (v ArcGIS implementována pod názvem Random Trees)
 RGB - Red Green Blue, tj. červený, zelený a modrý pás spektra
 RTK - Real time kinematics - metoda přesného měření polohy pomocí GNSS přijímače a korekčních dat přijímaných v reálném čase
 RTK GPS - polohový měřicí přístroj umožňující korekci GPS souřadnic v reálném čase
 rule-based - algoritmus klasifikace založený na vlastních pravidlech
 ŘLP - Řízení Letového Provozu ČR
 segmentace - snímek je rozčleněn (tj. segmentován) na objekty s podobnými vlastnostmi
 sekundární areál invazního druhu - oblast, do níž byl druh zavlečen
 Sentinel-2 - nová multispektrální družice ESA se 13 kanály a prostorovým rozlišením 10/20/60 m, snímky jsou zdarma
 SfM - Structure From Motion algoritmus na tvorbu ortomozaik
 stratifikace semen - semena musí být určitou dobu vystavena chladu, aby vyklíčila
 sukcese - přirozený vývoj a změny ve složení společenstev v ekosystému
 SVM - Support Vector Machines, klasifikační metoda strojového učení
 template matching - klasifikační algoritmus využívající šablon (vzorových objektů) zvolených v analyzovaném snímku
 UAV - Unmanned Aerial Vehicle - bezpilotní letecký prostředek (užívá se také označení UAS - Unmanned Aerial System, RPAS - Remotely Piloted Aerial System nebo Dron)

uživatelská přesnost - user's accuracy, poměr správně a celkově klasifikovaných výskytů, hodnotící spolehlivost výsledků klasifikace pro uživatele

VHR - data vysokého rozlišení; v oblasti satelitních snímků jde o data s prostorovým rozlišením řádku jednotek metrů

vlíčovací body - body se zaměřenou polohou sloužící k tvorbě ortomozaiky

VLOS - Visual line of sight - v přímém vizuálním dohledu pilota ... podmínka pro provoz UAV

WV-2 - WorldView-2 komerční multispektrální satelit se 4-8 spektrálními pásmy a vysokým prostorovým rozlišením 0,5/1,84 m (panchromatický/multispektrální kanály)

zhotovitelská přesnost - producer's accuracy, poměr správně klasifikovaných a pozorovaných výskytů

Přílohy

1. Tabulka S1. Přesnost nejlepší klasifikace pro jednotlivé druhy a testované zdroje dat
2. Seznam souvisejících publikací autorského kolektivu, které předcházely metodice
3. Oponentní posudky

Tabulka S1. Přesnost nejlepších klasifikací pro jednotlivé druhy a testované zdroje dat (detaily viz Müllerová et al. 2017a, b, výsledky pro pajasan zatím nebyly publikovány)

bolševník velkolepý			přesnost klasifikace zájmového druhu	
zdroj dat	datum náletu	typ klasifikace	uživatelská	zhotovitelská
UAV	9.7.2016	CS	100	99
UAV	4.9.2014	SVM	66	45
letecké snímky	8.7.2008	CS	100	42
družice Pléiades 1B	17.7.2015	ML	94	86
křídlatky				
UAV	8.11.2016	ML	78	80
UAV	8.11.2017	SVM	95	54
družice Pléiades 1B	7.7.2015	RF	95	74
pajasan žláznatý				
UAV	19.5.2016	ML	89	66
UAV	25.5.2017	ML	97	60
trnovník akát				
UAV (lokalita 1)	6.7.2015	SVM	92	75
UAV (lokalita 2)	6.7.2016	ML	81	92
družice WV-2	30.7.2013	SVM	81	61

Související publikace autorského kolektivu, které metodice předcházejí

- Dostál, P., Müllerová, J., Pyšek, P., Pergl, J., Klinerová, T. (2013). The impact of an invasive plant changes over time. *Ecology Letters* 16: 1277–1284.
- Dvořák, P., Müllerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J. (2015). Unmanned aerial vehicles for alien plant species detection and monitoring. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. (XL-1/W4)*: 83-90.
- Dvořák, P.; Pejchar, J.; Zikmund, P. (2013). Overview of Unmanned Aerial Systems Developed at the Institute of Aerospace Engineering. In *New Trends in Civil Aviation 2013 conference proceedings*. Brno: CERM, 2013. s. 16-21. ISBN: 978-80-7204-843- 4.
- Jandová, K., Klinerová T., Müllerová J., Pyšek P., Pergl J., Cajthaml, T., Dostál P. (2014). Long-term impact of *Heracleum mantegazzianum* invasion on soil chemical and biological characteristics. *Soil Biology & Biochemistry* 68: 270–278.
- Kolbek, J., Vítková, M., Větvíčka V. (2004): Z historie středoevropských akátin a jejich společenstev. *Zprávy Čes. Bot. Společ.* 39:287–298.
- Müllerová, J., Pyšek, P., Jarošík, V., Pergl, J. (2005). Aerial photographs as a tool for assessing the regional dynamics of the invasive plant species *Heracleum mantegazzianum*. *Journal of Applied Ecology* 42 (6): 1-12.
- Müllerová, J., Pyšek, P., Pergl, J., Jarošík, V. (2008). Dlouhodobá dynamika šíření bolševníku velkolepého (*Heracleum mantegazzianum*) v krajině: využití leteckých snímků. *Zprávy ČBS* 43(Mater. 23): 91–102.
- Müllerová, J., Pergl, J., Pyšek, P. (2013): Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: testing the effects of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 25: 55–65.
- Müllerová, J., Brůna, J., Dvořák, P., Bartaloš, T., Vítková, M. (2016). Does the data resolution/origin matter? Satellite, airborne and UAV imagery to tackle plant invasions. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B7*, 903-908.
- Müllerová, J., Bartaloš, T., Brůna, J., Dvořák, P., Vítková, M. (2017a): Unmanned aircraft in nature conservation – an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing* 38 (8-10): 2177-2198.
- Müllerová, J., Brůna, J., Bartaloš, T., Dvořák, P., Vítková, M., Pyšek, P. (2017b): Timing is important: unmanned aircraft versus satellite imagery in plant invasion monitoring. *Frontiers in Plant Science* 8 (887).
- Nehrbass, N., Winker, E., Müllerová, J., Pergl, J., Pyšek, P. & Perglová, I. (2007): A simulation model of plant invasion: long-distance dispersal determines the pattern of spread. *Biol. Invasions* 9: 383-395.
- Nielsen, C., Ravn, H. P., Cock, M., Nentwig, W. (eds.) (2005): Bolševník velkolepý: Praktická příručka o biologii a kontrole invazního druhu. *Forest & Landscape Denmark, Hoersholm*, 44 pp.

- Pergl, P., Müllerová, J., Perglová, I., Herben, T. & Pyšek, P. (2011): The role of long-distance seed dispersal in the local population dynamics of an invasive plant species. *Diversity and Distributions* 17: 725–738.
- Pergl, J., Perglová, I., Vítková, M., Pocová, L., Janata, T., Šíma, J. (2016) Likvidace vybraných invazních druhů rostlin; Standardy péče o přírodu a krajinu. Management of Selected Alien Plant Species. AOPK ČR & Botanický ústav AV ČR: Praha, Průhonice: 1–22.
- Pyšek, P., Müllerová, J. & Jarošík, V. (2007): Historical dynamics of *Heracleum mantegazzianum* invasion on regional and local scales. In: Pyšek P., Cock M.J.W., Nentwig W. & Ravn H.P. (eds.), *Ecology and Management of Giant Hogweed (Heracleum mantegazzianum)*, CAB International, pp. 42–54.
- Pyšek, P., Jarošík, V., Müllerová, J., Pergl, J. & Wild, J. (2008): Comparing the rate of invasion by *Heracleum mantegazzianum* at continental, regional, and local scales. *Diversity and Distributions* 14: 355–363.
- Pyšek, P., Pergl, J., Jahodová, Š., Moravcová, L., Müllerová, J., Perglová, I. & Wild, J. (2010): The Hogweed Story: Invasion of Europe by Large *Heracleum* Species. In: Settele J. et al. (eds.) *Atlas of Biodiversity Risk*. Pensoft.
- Sádlo, J., Chytrý, M., Vítková, M., Petřík, P., Kolbek, J., Neuhäuslová, Z. (2013): Mezofilní a suché křoviny a akátiny. Mesic and xeric scrub and *Robinia* groves. In: Chytrý, M. (ed): *Vegetace České republiky. 4. Lesní a křovinná vegetace. Vegetation of the Czech Republic 4., Forest and scrub vegetation*. Academia, Praha: 73–156.
- Sádlo, J., Vítková, M., Pergl, J., Pyšek, P. (2017a): Towards site-specific management of invasive alien trees based on the assessment of their impacts: the case of *Robinia pseudoacacia*. *NeoBiota* 35: 1–34.
- Sádlo, J., Vítková, M., Pergl, J., Pyšek, P. (2017b): Ekologická rizika zalesňování zemědělských půd nepůvodními dřevinami - invazní akát jako modelový druh. In: Prknová H. (ed): *Zalesňování zemědělských půd - produkční a environmentální přínosy II*. ČZU, Praha: 20–23.
- Vítková, M., Tonika, J., Vitek, O. (2004): Stanovištní charakteristika akátových porostů na území Čech. *Zprávy Čes. Bot. Společ.* 39, 139–153.
- Vítková, M. (2011): Péče o akátové porosty. *Ochrana přírody* 6: 7–12.
- Vítková, M. (2014): Management akátových porostů. Management of black locust stands. *Životné prostredie* 48: 81–87.
- Vítková, M., Kolbek, J. (2010): Vegetation classification and synecology of Bohemian *Robinia pseudacacia* stands in a Central European context. *Phytocoenologia* 40: 205–241.
- Vítková, M., Tonika, J., Müllerová, J. (2015): Black Locust-Successful Invader of a Wide Range of Soil Conditions. *Science of the Total Environment* 505: 315–328.
- Vítková, M., Pergl, J., Sádlo, J. (2016): Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.): from global ecology to local management – a case study from the Czech Republic. In: Krumm, F., Vítková, L., eds. *Introduced Tree Species in European Forests: Challenges and Opportunities*; European Forest Institute, Freiburg. pp. 290–302.

Vítková, M., Müllerová, J., Sádlo, J., Pergl, J., Pyšek, P. (2017): Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: A story of an invasive tree in Central Europe. *Forest Ecology and Management* 384: 287-302.

Vítková, M., Sádlo, J., Pergl, J., Pyšek, P. (in press): Die Robinie als gefährliche invasive Art oder nützlicher Forstbaum: Kann man beide Extreme vereinbaren? Black locust as both a dangerous invader and useful forest tree: can the two approaches be reconciled? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*.