

Mapování vodních makrofyt v řekách s využitím bezpilotního letadla

Mapping of aquatic macrophytes in rivers using an unmanned aerial vehicle

RADEK BACHAN¹, VERONIKA KALNÍKOVÁ²

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Mojžírovo nám. 16, 612 00 Brno, radek.bachan@vuv.cz

²Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Regionální pracoviště Správa CHKO Beskydy, Nádražní 36, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm, v.kalnikova@seznam.cz

Abstract: The study presents the possibility of effective mapping of aquatic macrophytes in flowing waters using an unmanned aerial vehicle. Two river sections of the Svatka River were documented using a contactless aerial photogrammetry method to spatial localization of aquatic macrophytes and verification of the possibility to identify individual taxa and differentiate them from algae and accompanying riparian vegetation. From the aerial images taken, a georeferenced orthophoto map of the specific river section was created in Agisoft PhotoScan Professional software to determine the percentage cover of the aquatic macrophytes and their distribution in the river channel. To verify results from the aerial photogrammetry, the selected river sections were also mapped in situ using the methods of mapping of aquatic macrophytes of flowing waters in the Czech Republic for the purposes of water planning.

Keywords: aerial photogrammetry, aquatic macrophytes, orthophotomap, unmanned aerial vehicle

Abstrakt: Studie představuje možnost efektivního mapování vodních makrofyt tekoucích vod s využitím bezpilotního letadla. U vybraných lokalit na řece Svatce byly pomocí bezkontaktní metody letecké fotogrammetrie zdokumentovány dva úseky toku s cílem prostorové lokalizace vodních makrofyt v zatopené části koryta toku a ověření možnosti identifikace jednotlivých taxonů a jejich odlišení od porostů řas a doprovodné říční vegetace. Z pořízených leteckých snímků byla v programu Agisoft PhotoScan Professional vytvořena georeferencovaná ortofotomapa daného úseku řeky k určení procentuální pokrývnosti toku vodními makrofyty a jejich rozmístění v korytě. Pro porovnání a verifikaci byly vybrané části řeky mapovány také in situ dle metodiky monitoringu makrofyt tekoucích vod v České republice pro účely plánování v oblasti vod.

Klíčová slova: bezpilotní letadlo, letecká fotogrammetrie, ortofotomapa, vodní makrofyty

Nomenklatura/Nomenclature: DANIHELKA et al. (2012); KUČERA et al. (2012)

Úvod

Vodní makrofyty jsou důležitou složkou vodních ekosystémů. Plní funkci substrátu i potravy pro bezobratlé živočichy, rybím jikrák a potěru poskytují ochranu proti vodnímu proudu a dospělým rybám úkryty (GRULICH & VYDROVÁ 2006, TRNKOVÁ 2008, FIGUEIREDO et al. 2015). Ovlivňují hydromorfologické funkce toku, jako je proudění, ukládání říčních sedimentů a fungují jako tzv. ekosystémoví inženýři (GURNELL et al. 2006, GURNELL 2014). Jednotlivé druhy rostlin mohou být indikátory specifického prostředí, míry trofie a antropogenního znečištění. Spolu s ostatními biologickými složkami hodnocení kvality se tak používají jako doplňková informace ke sledování a posouzení ekologického stavu vodních toků (TREMPE & KOHLER 1995, KOČÍ et al. 2011).

Vodními makrofyty jsou chápány makroskopicky pozorovatelné rostliny vyskytující se ve vodním prostředí. Mohou být ponořené, vzplývavé i plovoucí na hladině. Pro účely monitoringu makrofyt v tekoucích povrchových vodách České republiky se zde řadí jednoděložné i dvouděložné cévnaté rostliny, mechorosty a ruducha *Lemanea fluitans*. Nejsou zde řazeny nárosty makroskopických řas či sinic a dříve uváděné parožnatky, které se ve vodních tocích v našich podmínkách téměř nevyskytují (GRULICH & VYDROVÁ 2006, KOČÍ et al. 2011, MARVAN et al. 2011). Makrofyty se vyskytují převážně v úsecích vodních toků, které nejsou zastíněny břehovou vegetací nebo okolním reliéfem. Dalšími limitujícími faktory jsou nadmořská výška, trofie a hloubka vody nebo rychlost proudění. Pro jejich výskyt je důležitý také pevný a stabilní podklad vhodný k uchycení. Například snadno erodovatelný substrát může být důvodem, proč se u nás cévnaté rostliny mezi makrofyty téměř nevyskytují v řekách flyšových Karpat (KOČÍ et al. 2001).

Mapování vodních makrofyt bez přímého fyzického kontaktu umožňují metody dálkového průzkumu Země (DPZ) s využitím družicových snímků (ESPEL et al. 2020), pilotovaných letů nebo bezpilotních leteckých prostředků (BIGGS et al. 2018). K monitoringu zemského povrchu je využívána bezkontaktní metoda letecké fotogrammetrie, při níž je zájmové území snímáno z pohyblivého se nosiče (MIKHAIL et al. 2001). Výhodou oproti přímým metodám průzkumu je zmapování větší plochy území za jednotku času při neovlivnění měřeného povrchu (PAVELKA 2003). Získané letecké snímky je možné s využitím metody Structure from Motion (SfM) spojit do formy georeferencované ortofotomapy, případně trojrozměrného digitálního modelu terénu. Metoda SfM při dostatečném překryvu jednotlivých fotografií umožňuje zpracovat sadu neuspořádaných, různě se překrývajících snímků a poskytnout detailní informace o vlastnostech snímaných povrchů a objektů. Výstupy v podobě ortofotomap nebo 3D modelů terénu jsou vybaveny poměrovým měřítkem pro měření geometrie a počítání mapové algebry (SMITH et al. 2015). Lze tak určit šířku koryta v různých částech řeky, lokalizovat výskyt vegetace na březích i v korytě, posoudit pokryvnost toku vodními makrofyty, vyhodnotit výskyt mrtvého dřeva, sledovat břehovou abrazi apod.

Mapováním ponořené vodní vegetace s využitím dálkového průzkumu Země se ve své práci zabývali například YUAN & ZHANG (2008). Autoři zkoumali možnost identifikace vegetačního pokrytí stojatých vod. Testovány byly družicové snímky ze satelitu QuickBird a vztah mezi pokryvností vybraného jezera vegetací a multispektrální odrazivostí obrazu. Vis et al. (2003) se zabývali srovnáním přímých a nepřímých postupů sledování makrofyt ve stojatých vodách a statistickým vyhodnocením přesnosti, výhod a nevýhod daných metod. Mapování vodní vegetace v proudících vodách s využitím optického dálkového snímání popisuje VISSER et al. (2003). Autoři pracovali s daty snímanými stejným fotoaparátům ze čtyř různých výškových hladin a k rozpoznání jednotlivých druhů makrofyt využívali pro ně typické formy a struktury. LEE et al. (2011) ve své práci testovali použití hyperspektrálních obrazových dat k mapování vodní vegetace. Studovali rozlišitelnost čtyř typů vegetace v malých řekách, které zahrnovaly ponořené shluky hnědých a zelených vláknitých řas. Zmíněné studie narážely na problém identifikace vodní vegetace s vzrůstající hloubkou vody, a to zejména z důvodu útlumu světla ve vodním sloupci způsobeného jeho absorpcí a rozptylem.

Cílem této studie je porovnat metodiku používanou pro monitoring vod pro účely plánování v oblasti vod v návaznosti na požadavky Rámcové Směrnice 2000/60/EU s možnostmi mapování vodních makrofyt s využitím bezpilotního letadla.

Metodika

Na středním toku řeky Svratky byly s využitím metod letecké fotogrammetrie a metodiky přímého (= in situ) odběru a zpracování vzorků makrofyt tekoucích vod (GRULICH & VYDROVÁ 2006) zaměřeny a prozkoumány dva úseky v katastrálních územích obcí Vír a Koproutice. Dno koryta tvořily různé velké valouny a balvany granitů, místy byl mezi nimi zachycen jemnější písčité sediment. Monitoring probíhal 29. července (2019), v době růstového optima vodních makrofyt (GRULICH & VYDROVÁ 2006).

Metody přímého průzkumu

Oba studované úseky byly mělké a zkoumaly se metodou brodění koryta, které bylo procházeno tam a zpět přibližně v každém desetimetrovém úseku, aby byla co nejlépe zachycena diverzita rostlin. Kvůli možnému ovlivnění podmínek pozorování a identifikace makrofyt uvolněnými sedimenty se brodílo proti proudu (GRULICH & VYDROVÁ 2006). Jen místy dosahovala hloubka vody více než 0,5 m; v těchto úsecích se ale ponořené makrofyty vlivem zhoršené dostupnosti světla již téměř nevyskytovaly. Na lokalitách byly dále popsány světelné podmínky, čistota a průhlednost vody. Součástí průzkumu byla fotodokumentace odběrového úseku. Pořízeny byly také podvodní fotografie porostlých částí koryta a detailů rostlin (pomocí Nikon Coolpix W300).

Ve vztahu k ploše celého odběrového úseku byla odhadnuta procentuální pokryvnost rostlin – dohromady pro všechny vodní makrofyty, dále pro skupiny mechorosty a cévnaté rostliny a zvlášť pro jednotlivé druhy. Druhy, hlavně mechorosty, které nebyly určeny na místě, byly sebrány pro pozdější determinaci. Vybrané cévnaté rostliny byly jako doklad uloženy v herbáři Masarykovy univerzity (BRNU). Nomenklatura byla sjednocena podle práce DANIHELKA et al. (2012) pro cévnaté rostliny a KUČERA et al. (2012) pro mechorosty. Výsledky přímého sledování dle Metodiky odběru a zpracování vzorků makrofyt tekoucích vod (GRULICH & VYDROVÁ 2006) byly zapsány do Determinačních protokolů pro analýzu makrofyt tekoucích vod a jsou společně s fotodokumentací uloženy v Oddělení hydrobiologie a laboratorním informačním systému Oddělení laboratorní VÚV T.G.M., v.v.i., pobočka Brno (VÚV 2019).

Metody letecké fotogrammetrie

Letecká fotogrammetrie umožňuje mapování vodních makrofyt bez kontaktu a ovlivnění koryta toku. Samotný postup spočívá v nasnímání řeky bezpilotním letadlem a následném spojení získaných fotografií do detailní ortofotomapy, na které lze pozorovat hladinu vody, vodní makrofyty a určit procentuální pokryvnost toku vegetací. K vlastnímu snímkování byl využit bezpilotní letecký systém složený z hexakoptéry TAROT 690 a fotoaparátu Sony Alpha 6000 (obr. 1) vybaveného polarizačním filtrem pro odstranění odlesků od vodní hladiny. Základní charakteristiky bezpilotního letadla ukazuje tabulka 1.

Tab. 1. Základní charakteristiky hexakoptéry TAROT 690.

Table 1. Basic characteristics of the TAROT 690 hexacopter.

Výška	Váha	Průměr rotoru	Letový čas	Odolnost proti větru
35 cm	4,40 kg	98,5 cm	15 min/baterie	10 m/s



Obr. 1. Hexakoptéra TAROT 690 s fotoaparátem Sony Alpha 6000.

Fig. 1. The TAROT 690 hexacopter with Sony Alpha 6000 camera.

Vybraný úsek toku bylo potřeba před vlastním sběrem dat vyznačit vlčovacími body (GCP – ground control points), pro které bylo nutné pomocí geodetických přístrojů získat přesné polohopisné a výškopisné souřadnice. Ty sloužily k následnému georeferencování výsledné ortofotomapy a ke korekci nepřesností jednotlivých snímků (UHROVÁ et al. 2018). Vstupní data, v podobě sady digitálních na terén kolmých fotografií, dosahovala minimálně 60% překryvu. Vysoký překryv získaných snímků byl důležitý pro korektnost a dobré spojení fotografií do finální ortofotomapy. Snímky s kolmým průmětem byly pro přehlednost a lepší orientaci doplněny o rámcovou fotografii zájmové oblasti (obr. 2c). V terénu získaná data byla zpracována specializovaným softwarem Agisoft PhotoScan Professional, který dokáže identifikovat polohy, směry a náklony fotoaparátu umístěného na bezpilotním letadle. Software využívá metodu Structure from Motion, kde množina různých se překrývajících fotografií je spojena do jednotného výsledku v podobě digitálního 3D modelu, panoramatického snímku, ortofotomapy apod. (AGISOFT 2020). Výsledný výstup je možné v různých formátech exportovat a dále zpracovávat v grafických a geoinformačních softwarech. K měření a analýze vytvořených ortofotomap vybraných úseků řeky byl použit grafický software PhotoFiltre Studio X (PHOTOFILTRE 2020) a geoinformační software ArcMap 10.7 určený k zobrazení, analýze a zpracování geografických dat (ESRI 2020). Využitím a kombinací funkcí těchto programů bylo možné v digitálním prostředí detailně prozkoumat koryto řeky Svatky, měřit parametry koryta a určovat pokryvnost toku vodní vegetací. Pro lepší určení procentuální pokryvnosti byly ověřeny různé formy zobrazení obrazu. Testováno bylo použití pravých a nepravých barev nebo přidávání grafických filtrů. Průzkum a sledování vodních makrofyt pomocí bezpilotního letadla byl podrobně popsán ve výzkumné zprávě (VÚV 2019), fotodokumentace a vytvořené ortofotomapy sledovaných úseků řeky Svatky jsou uloženy na interních datových serverech VÚV TGM, v.v.í.

Tab. 2. Základní charakteristiky snímaných úseků řeky Svatky v katastrálním území obcí Vír a Koroužné.

Table 2. Basic characteristics of the photographed Svatka sections in the cadastral area of Vír and Koroužné municipalities.

Souřadnice měřeného úseku toku	Vír	49°33'5.108"N, 16°19'52.253"E – 49°33'20.868"N, 16°19'31.773"E
	Koroužné	49°31'47.562"N, 16°21'0.424"E – 49°31'53.202"N, 16°21'8.883"E
Délka zaznamenaného úseku	Vír	620 m
	Koroužné	230 m
Šířka koryta	Vír	15–25 m
	Koroužné	15 m
Hloubka vody	Vír	20–60 cm
	Koroužné	15–60 cm
Náletová výška	Vír	45–50 m
	Koroužné	35–40 m
Letový čas	Vír	36 min
	Koroužné	17 min
Počet fotografií	Vír	386
	Koroužné	172
Pozemní rozlišení	Vír	1,42 cm/pix
	Koroužné	1,09 cm/pix

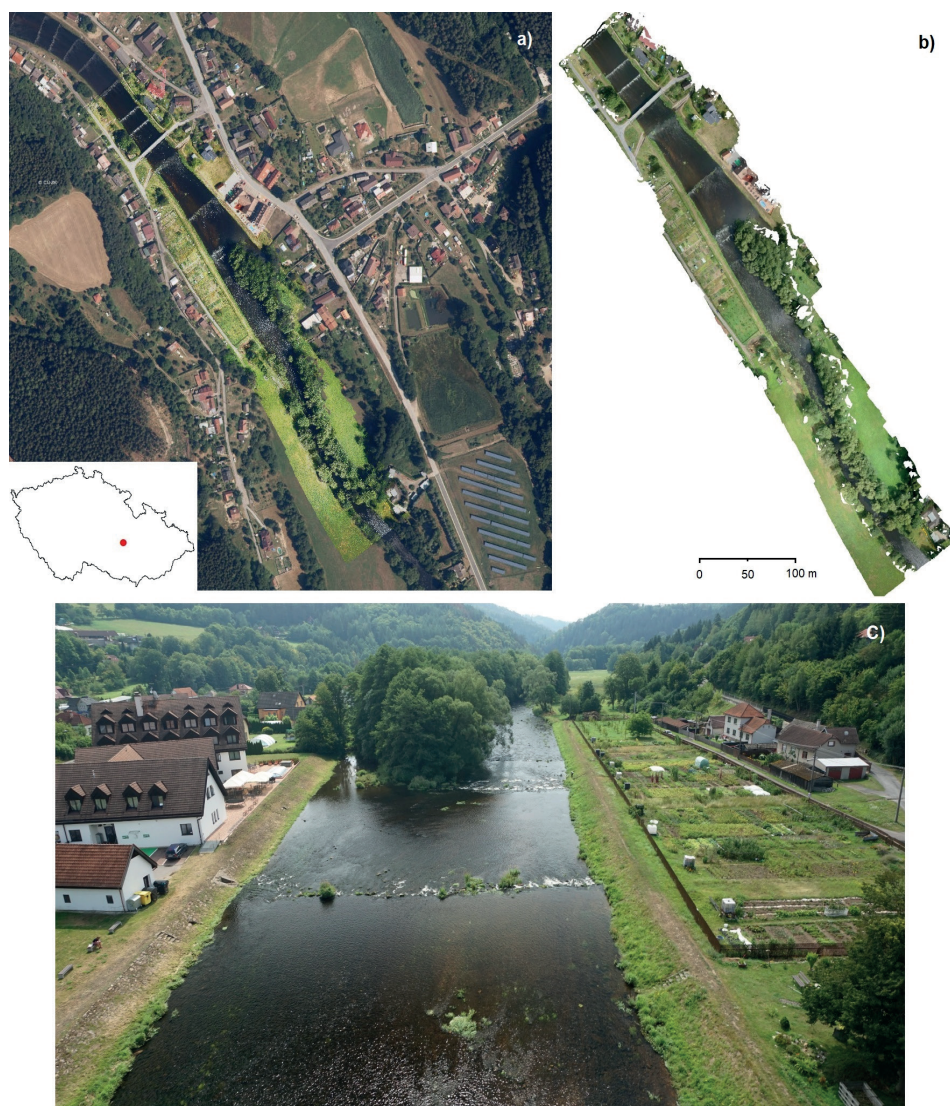
Výsledky

Lokalita Vír

V katastru obce Vír byl bezpilotním letadlem z náletové výšky 50 metrů zaznamenán výskyt vodních makrofyt v úseku toku o délce 620 m (tab. 2, obr. 2a). Vybraná část koryta řeky se nachází mezi vodními nádržemi Vír I a Vír II a je možné ji rozdělit na dvě části. Horní část, bez zastínění břehovou vegetací a dolní část s relativně vysokým zastíněním keřovými porosty a korunami stromů (obr. 2b). V části toku stíněném břehovými porosty nebylo možné na základě leteckých snímků lokalizovat a určit pokryvnost vodní vegetací. Tyto části řeky byly z hodnocení pokryvnosti vyloučeny. V nezastíněných úsecích byla identifikace výskytu a rozmístění vodní vegetace poměrně jednoznačná. Vlastní rozpoznání jednotlivých druhů vodních makrofyt však bylo z leteckých fotografií prakticky nemožné. Situaci komplikoval často souběžný výskyt s řasami, které mezi vodní makrofyty nepatří. Rozlišení fotografií pořízených z náletové výšky 50 metrů nebylo dostatečně podrobné, a tak byl původně zamýšlený odhad pokryvnosti makrofyt v toku vztažen na širší skupinu vodní vegetace (vodní makrofyty, řasy a sinice). Dalším úkolem bylo odlišení vodní vegetace od náplavů a trsů rostlin (často dominantní *Phalaris arundinacea*). Pro zpřesnění odhadu pokryvnosti bylo v kombinaci s digitálními snímky využito přidaných fotografických filtrů a zobrazení v pravých a nepravých barvách (obr. 3). Detekce vodní vegetace proběhla na jednotlivých fotografiích i na souhrnné ortofotomapě vybavené poměrovým měřítkem (obr. 2b).

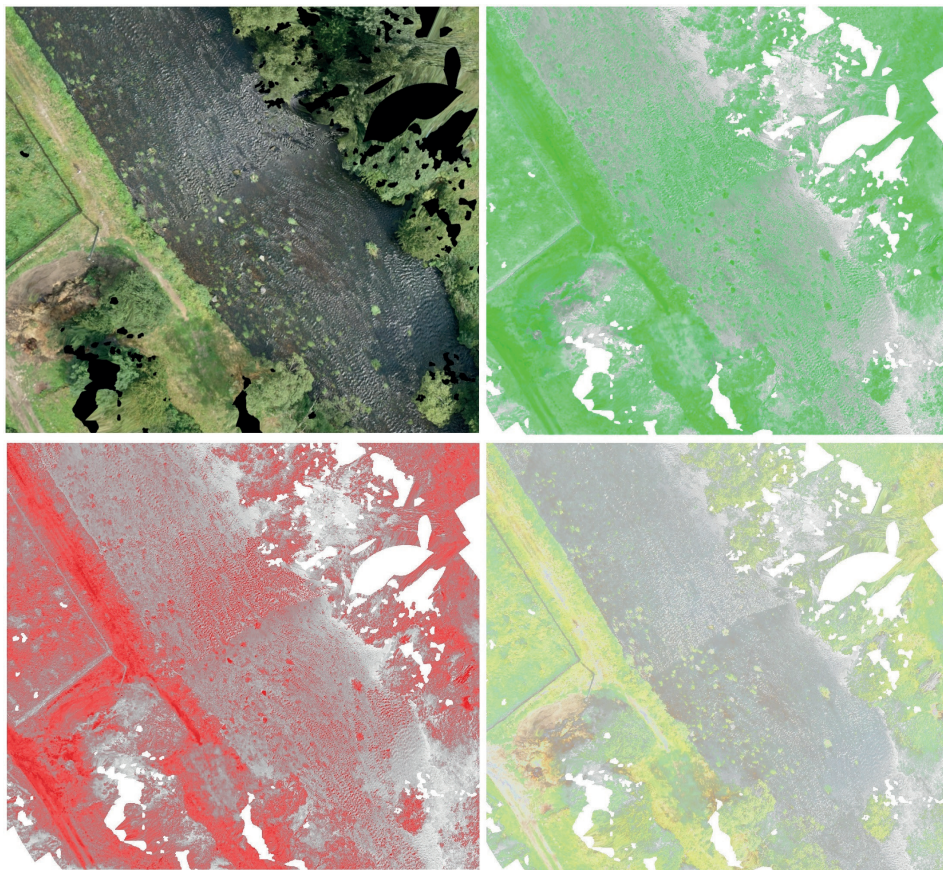
Pro přímý terénní průzkum panovaly v úseku přes částečné zastínění dobré světelné podmínky, voda byla čistá a nezakalená. Hladina řeky byla mírně zvýšená, některé druhy rostlin za normálního vodního stavu rostoucí na vyvýšených částech koryta (na drobných náplavech a balvanech; obr. 5a) byly pod vodou – např. *Agrostis stolonifera*, *Lythrum salicaria*, *Phalaris arundinacea*, *Sagina procumbens*, *Veronica anagallis-aquatica* a *V. beccabunga*. Z cévnatých druhů vodních makrofyt byly v úseku zaznamenány hlavně *Batrachium peltatum* (kromě druhu *B. peltatum* se ve Svatce vyskytuje také kříženec *B. peltatum* × *B. trichophyllum*, ten však nebyl ve studii rozlišován) a *Callitriche hamulata*. Z mechorostů převládaly *Amblystegium fluviatile*, *Fontinalis antipyretica* a *Hygrohypnum ochraceum*. Porosty mechorostů na balvanech dosahovaly velkých pokryvností, více jich ale rostlo nad vodou a byly vodou jen omývány. Pod vodou byly hojné dlouhé vláknité řasy (pravděpodobně řádu *Cladophorales*), které prorůstaly a různé překrývaly polštáře cévnatých makrofyt a mechorostů (obr. 5c).

Pomocí leteckých snímků pořízených bezpilotním letadlem byla pokryvnost vodní vegetace v zájmovém úseku toku v katastrálním území obce Vír určena na 32 %. Zjištěná hodnota se blíží celkové odhadnuté pokryvnosti určené přímým terénním průzkumem, která činila 40 % (mechorosty 35 % a cévnaté rostliny 5 %).



Obr. 2. a) Zaznamenaný úsek toku na katastrálním území obce Vír; b) výsledná ortofotomapa zájmového úseku toku sloučená z jednotlivě pořízených snímků; c) pohled na snímkané koryto řeky Svatky.

Fig. 2. a) The tracked section in the cadastral area of the Vír municipality; b) final orthophotomap of the river section merged from individually taken images; c) view of the photographed Svatka River channel.

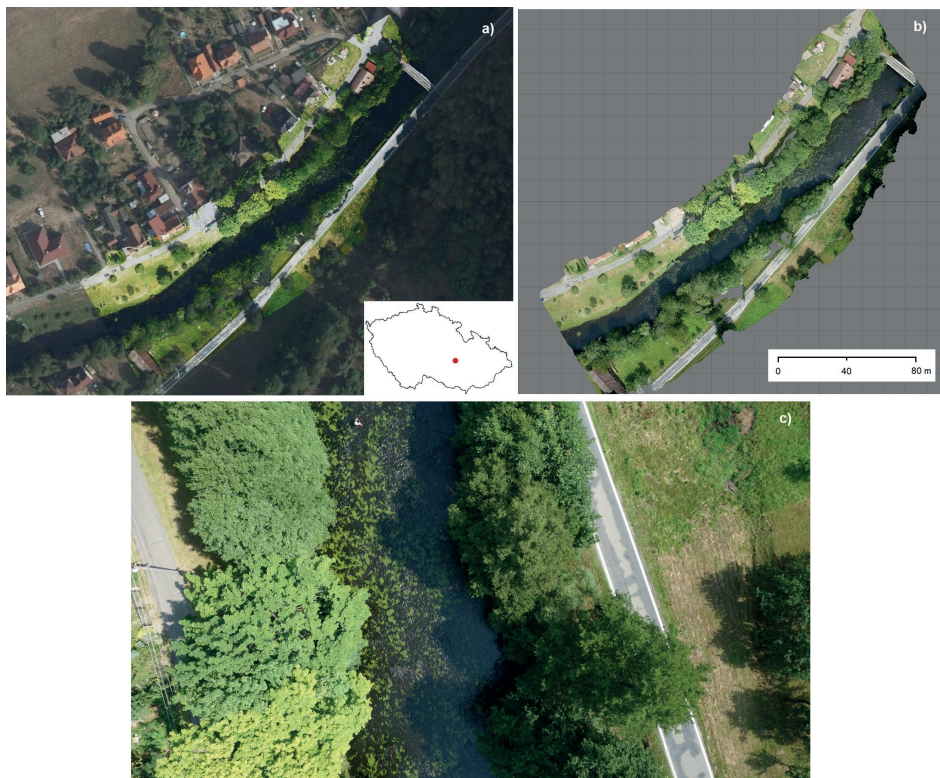


Obr. 3. Výřez části toku a jeho zobrazení v pravých a nepravých barvách na lokalitě Vír.

Fig. 3. Part of the river displayed in true and false colours in the Vír locality.

Lokalita Koroužné

Druhý úsek řeky Svratky v katastrálním území obce Koroužné byl bezpilotním letadlem nasnímán v délce toku 230 metrů z výšky přibližně 35 metrů (tab. 2, obr. 4a). Nižší vzrůst břehové vegetace umožnil snížení letové hladiny, a tím i zvýšení rozlišení výsledné ortofotomapy na 1,09 cm/pix. Břehová vegetace, podobně jako v případě první lokality, způsobila zastínění části koryta. Ta musela být z hodnocení výskytu a pokryvnosti řeky vodní vegetací vyloučena, a nebylo tak možné úsek toku vyhodnotit v plném rozsahu.



Obr. 4. a) Zaznamenaný úsek toku v katastrálním území obce Koroužné; b) výsledná ortofotomapa zobrazená v pracovním prostředí programu Agisoft PhotoScan Professional; c) vodní vegetace v řece Svratce.

Fig. 4. a) The tracked river section in the cadastral area of the Koroužné municipality; b) final orthophotomaps displayed in Agisoft PhotoScan Professional workspace; c) aquatic vegetation in the Svratka River.

Pro průzkum in situ byly světelné podmínky v úseku velmi dobré, voda čistá a nezakalená. Hladina řeky byla také mírně zvýšená, ale přepravené suchozemské druhy se zde spíše nevyskytovaly. V úseku se neusazovaly náplavy, ani na něm nebyly ostrůvkovité výskyty *Phalaris arundinacea* vklíněné mezi balvany, jak tomu bylo na předešlé lokalitě. Bylo zaznamenáno více druhů cévnatých makrofyt, převládaly opět druhy *Batrachium peltatum* a *Callitriche hamulata* (obr. 5d). Dále se místy vyskytovala ruducha *Lemanea fluitans* a vzácně *Potamogeton crispus*. Z vodních mechorostů zde rostly druhy *Amblystegium fluviatile* a *Fontinalis antipyretica*. Porosty mechorostů na balvanech dosahovaly velkých pokryvností, více jich ale opět rostlo nad vodou a byly vodou jen omývány. Pod vodou se více vyskytovaly dlouhé vláknité řasy (pravděpodobně řádu *Cladophorales*), které jako v předešlém úseku prorůstaly cévnaté makrofyty a mechorosty (viz obr. 5c).

Ani nižší letová hladina a dobré povětrnostní podmínky vedoucí k vyššímu rozlišení leteckých fotografií i výsledné ortofotomapy nebyly dostačující k určení a rozpoznání jednotlivých druhů vodních makrofyt a jejich odlišení od řas. Proto, stejně jako v případě lokality Vír, bylo posouzení procentuální pokrývnosti řeky vztaženo na širší skupinu vodní vegetace (vlastní vodní makrofyty a řasy). Po detailním zaměření, využití grafických filtrů a zobrazení v pravých a nepravých barvách byla zjištěna až 80% pokrývnost toku vodní vegetací v částech koryta s vhodnými podmínkami (obr. 4c). Celkově se vodní vegetace pouze v měřeném úseku vyskytovala na 48% plochy koryta. Hodnota poměrově odpovídá procentuální pokrývnosti toku zjištěné při přímém terénním průzkumu, kdy celková odhadnutá pokrývnost makrofyt činila 50 % (mechorosty 20 % a cévnaté rostliny 30 %; obr. 5b).



Obr. 5. a) Ostrůvky vegetace (dominanta *Phalaris arundinacea*) na vyvýšených místech v toku Svratky a zachycené větve, které mohou zkreslovat vyhodnocení pokrývnosti vodních makrofyt pomocí analýzy leteckých snímků z bezpilotního letadla; b) v některých úsecích pokrývaly makrofyty na lokalitě Koroužné až 50 % plochy říčního dna; c) pohled na jeden z druhů cévnatých vodních makrofyt (*Callitriche hamulata*) porostlý vláknitými řasami; d) rozdíl v barevnosti *Callitriche hamulata* (vlevo) a *Batrachium peltatum* (vpravo), kdy *Batrachium* s převládajícím morfolofem úzkých nitovitých listů vypadá hodně tmavě a na první pohled tak může splývat s mechorosty nebo řasami.

Fig. 5. a) Islands of vegetation dominated by *Phalaris arundinacea* and trapped branches which could complicate the results of aerial photogrammetry; b) in some sections of Koroužné locality the macrophytes covered up to 50% of the area of the river channel; c) view on the *Callitriche hamulata* species overgrown by filamentous algae; d) difference in colour between *Callitriche hamulata* (on the left) and *Batrachium peltatum* (on the right) when *Batrachium* can look very dark and blend with bryophytes or algae if a morphotype of narrow filiform leaf type prevails.

Diskuze

Využitelnost bezpilotních letadel pro monitoring vodních makrofyt

Techniky a metody měření vodní vegetace použité v dřívějších studiích se potýkají především s problémem její identifikace s vzrůstající hloubkou vody, a to zejména z důvodu útlumu světla ve vodním sloupci způsobeného jeho absorpcí a rozptylem (YUAN & ZHANG 2008, LEE et al. 2011). Obecně lze metody dálkového průzkumu Země dobře využít k monitoringu rozložení vodních makrofyt v mělkých vodách (< 1 metr) a v blízkosti vodní hladiny (např. VISSER et al. 2003, BIGGS et al. 2018). Nicméně KISLIK et al. (2020) ve své práci ukázali, že při souběhu vhodných podmínek – průzračná, nezakalená voda, klidná hladina a dobré světelné podmínky – je možné identifikovat vodní vegetaci i v relativně hlubokých řekách, a to až do hloubky 2,75 metru. V případě sledovaných úseků řeky Svratky se hloubka vody pohybovala většinou nad 0,5 metru, a tak nebyla limitujícím faktorem pro mapování vodní vegetace pomocí leteckých snímků. Rozložení a procentuální pokryvnost řeky vodní vegetací byla na jednotlivých fotografiích dobře patrná a při srovnání s přímým průzkumem vykázala metoda leteckého snímkování velmi přesné výsledky. Naopak detekce a rozlišení jednotlivých druhů vodních makrofyt a jejich odlišení od řas a náplav trsů rostlin je z fotografií pořízených bezpilotním letadlem prakticky nemožné. A to i v případě barevně kontrastních druhů jako je světle zelené *Callitriche hamulata* vs. tmavě zelené *Batrachium peltatum*.

Využití bezpilotních letadel lze vidět především v detekci výskytu vodní vegetace v hůře dostupných lokalitách nebo u řek bez výrazné břehové vegetace. Metoda je vhodná pro určení procentuální pokryvnosti vodní vegetací u říčních koryt mělkých toků nebo hlubších řek s velmi čistou vodou (KISLIK et al. 2020). Letecká fotogrammetrie je dobrým doplňkem, případně alternativou k přímému průzkumu a je efektivní technikou pro kvantifikaci vodní vegetace ve větších prostorových měřítcích. Časová náročnost sběru dat je výrazně nižší než v případě kontaktních metod a je dosaženo spojitého modelu, případně georeferencované ortofotomapy zájmového úseku toku. Letecké snímkování zprostředkuje záznam řeky i v nepřístupných a nebroditelných částech a umožňuje tak získat ucelený obraz koryta toku. Nespornou výhodou je možnost relativně levného a rychlého opakovaného měření a následného retrospektivního sledování změn v množství a rozložení vodní vegetace v řece.

Zjištěné limity, jejich možné řešení a vize dalších metod

Obecným limitujícím faktorem pro práci s bezpilotním letadlem jsou nevyhovující povětrnostní podmínky, mezi které patří mrholení, sněžení, déšť, rychlost větru nad 10 m/s a teplota nižší než -10°C (KOCI et al. 2017). Při samotném sběru dat je pak důležité dbát na dostatečnou hustotu pořízených snímků. Pro optimální spojení a vytvoření digitální ortofotomapy je nutný minimálně 60% překryv jednotlivých fotografií (PAVELKA 2003). Při nízkém překryvu může docházet k nedostatečné korelaci. Spojení snímků komplikuje i výskyt homogení plochy (vodní hladina, souvislá sněhová pokrývka apod.) a vysokých na terén kolmých předmětů (sloupy vysokého napětí, stavby, stromy apod.). Dostatečný překryv fotografií výrazně snižuje chybovost modelu a minimalizuje zkreslení výsledné ortofotomapy (MIKHAIL et al. 2001).

V případě měření zájmových úseků na řece Svratce panovaly ideální povětrnostní podmínky pro let bezpilotního letadla, překryv jednotlivých snímků dosahoval téměř 80% a koryto toku nebylo tak široké, aby docházelo ke komplikacím při spojení snímků z důvodu výskytu homogení plochy v podobě klidné vodní hladiny. Tento problém je častější u velmi širokých řek a zejména pak u jezer a vodních nádrží (PAVELKA 2003). Komplikací při letovém záznamu tak bylo především zastínění částí toku břehovou vegetací, které znemožňovalo kolmý pohled na hladinu vody. Zastíněné části koryta do hodnocení procentuální pokryvnosti toku na základě leteckých fotografií nevstupovaly. Potenciální průlet korytem řeky pod korunami stromů se nedoporučuje z hlediska bezpečnosti a možného rizika havárie při nárazu bezpilotního letadla do břehového porostu. Ani případné rizikové snímkování pod vzrostlou vegetací nezajistí z důvodu snížené letové hladiny stoprocentní pokrytí daty v celé ploše koryta řeky.

Do mapování vodních makrofyt se kromě ruduch rodu *Lemanea* nezahrnují porosty řas a sinic (GRULICH & VYDROVÁ 2006, KOČÍ et al. 2011), ty se ale ve zkoumaných úsecích vyskytovaly často. Určení jednotlivých druhů cévnatých rostlin a mechorostů a jejich odlišení od porostů řas nebo sinic je v případě fotografií pořízených ze zvolených letových hladin (35 a 50 m) velmi komplikované, ne-li nemožné. Řasy, ze zkušeností z přímého průzkumu, vlastní makrofyty různě prorůstaly a překrývaly a bylo obtížné je během odhadu pokryvnosti od sebe na první pohled odlišit. Rozlišovat od sebe z leteckých snímků ještě i mechorosty a cévnaté rostliny by bylo podobně obtížné. Dobře lze hodnotit pouze pokryvnost koryta toku vodní vegetací jako celku. Další komplikace při vyhodnocení pokryvnosti makrofyt z leteckých snímků způsobovaly záměny s vegetací na říčních náplavech nebo ostrůvky a trsy rostlin zachycené mezi balvany v korytě. K jejich rozlišení od vodní vegetace se vedle zobrazení v RGB spektru využily grafické filtry a zobrazení v nepravých barvách.

Dalším krokem v potenciálním sledování vodní vegetace pomocí bezpilotního letadla je možnost využití termokamery a infračerveného snímkování. Metody spojené s mapováním vegetace v infračervené části spektra se běžně využívají v precizním zemědělství. Nejčastěji dochází k monitoringu vodního stresu rostlin, sledování vegetačních indexů nebo kultivaci a fenotypování obilovin (MESSINA & MODICA 2020). V případě vodní vegetace by termografické snímkování umožnilo lépe rozlišit zeleň nad a pod vodní hladinou. Opět by ale nastal problém se zastíněním koryta řeky břehovými porosty.

Závěr

Výskyt vodních makrofyt poukazuje na ekologický stav vodních ekosystémů. Sledování jejich výskytu a druhového složení představuje jednu z dílčích možností určení znečištění toku a jeho celkové ekologické hodnoty. Pro mapování vodních makrofyt se běžně využívá přímá metoda jejich odběru a vyhodnocení. V článku jsou popsány přednosti a omezení bezkontaktního sledování vodní vegetace v řekách metodami letecké fotogrammetrie s využitím bezpilotního letadla.

Dvě vybrané lokality na řece Svratce byly mapovány přímou i nepřímou metodou a byla otestována možnost rozpoznání jednotlivých druhů rostlin. Srovnání výsledků ukázalo, že metody letecké fotogrammetrie mohou v řece relativně dobře odhalit výskyt vodní vegetace jako celku a odhadnout její procentuální pokryvnost. Vlastní identifikace jednotlivých druhů je z leteckých fotografií velmi komplikovaná a vyžaduje přímou, kontaktní metodu mapování. Sběr dat pomocí bezpilotního letadla je efektivní, flexibilní, ekologický i ekonomický. Nevýhodou je slabá výdrž aktuálně dostupných baterií a s tím spojený omezený dolet stroje, a také značná závislost na momentálních povětrnostních podmínkách (UHRVÁ et al. 2018).

Conclusion

The presence of aquatic macrophytes reflects the ecological condition of aquatic ecosystems. Monitoring of their occurrence and species composition in river channels represents one of the sub-options for determining river pollution and overall ecological value. The direct method of field sampling and evaluation is used for aquatic macrophytes mapping. The paper describes the advantages and limitations of contactless monitoring of aquatic vegetation in rivers with aerial photogrammetry methods using an unmanned aerial vehicle.

Two selected localities of the Svratka River were mapped by both direct and indirect methods and the possibility of identifying individual plant species was tested. The comparison of the first results showed that the methods of aerial photometry can reveal the presence of aquatic vegetation in the river as well as its percentage cover quite well. The individual species identification itself is very complicated from aerial photographs and requires a direct field mapping method.

Data collection using a UAV is efficient, flexible, ecological, and economical. A disadvantage is the low lifespan of currently available batteries and the associated limited flight time of the machine, as well as a high dependence on actual weather conditions (UHRVÁ et al. 2018).

Poděkování

Za pomoc s determinací mechorostů bychom chtěli poděkovat Janě Tkáčikové. Za ověření determinace cévnatých rostlin a jejich uložení v herbáři děkujeme Hance Galuškové a Vítu Grulichovi. Za přínosné recenzní připomínky vděčíme Zdeňku Kaplanovi a Janu Prančlovi.

Literatura

- AGISOFT (2020): About. – URL: <http://www.agisoft.com/>.
- BIGGS H. J., NIKORA V. I., GIBBINS C. N., FRASER S., GREEN D. R., PAPADOPOULOS K. & HICKS D. M. (2018): Coupling Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and hydraulic surveys to study the geometry and spatial distribution of aquatic macrophytes. – *Journal of Ecohydraulics* 3: 45–58.
- DANIHELKA J., CHRTEK J. jun. & KAPLAN Z. (2012): Checklist of vascular plants of the Czech Republic. – *Preslia* 84: 647–811.
- ESPEL D., COURTY S., AUDA Y., SHEEREN D. & ELGER A. (2020): Submerged macrophyte assessment in rivers: An automatic mapping method using Pléiades imagery. – *Water Res.* 186: 116353.
- ESRI (2020): About ArcGIS. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>.
- FIGUEIREDO B. R. S., MORMUL R. P. & THOMAZ S. M. (2015): Swimming and hiding regardless of the habitat: prey fish do not choose between a native and a non-native macrophyte species as a refuge. – *Hydrobiologia* 746: 285–290.
- GRULICH V. & VYDROVÁ A. (2006): Metodika odběru a zpracování vzorků makrofyt tekoucích vod. – VÚV TGM, Praha.
- GURNELL A. (2014): Plants as river system engineers. – *Earth Surf Proc Land*. 39: 4–25.
- GURNELL A., VAN OOSTERHOUT M., DE VLIET B. & GOODSON J. (2006): Reach-scale interactions between aquatic plants and physical habitat: River Frome, Dorset. – *River Res. Appl.* 22: 667–680.
- KISLIK C., GENZOLI L., LYONS A. & KELLY M. (2020): Application of UAV imagery to detect and quantify submerged filamentous algae and rooted macrophytes in a non-wadeable river. – *Remote Sensing* 12: 3332.
- KOCI J., LEON J. X., JARIHANI B., SIDLE R. C., WILKINSON S. N. & BARETLEY R. (2017): Strengths and limitations of UAV and ground-based structure from motion photogrammetry in a gullied savanna catchment. – Preprints: 2017070030.
- KOČÍ M., GRULICH V., OPATŘILOVÁ L. & HORKÝ P. (2011): Metodika hodnocení ekologického stavu útvárů povrchových vod tekoucích pomocí biologické složky makrofyty. – MŽP, Praha.
- KUČERA J., VÁŇA J. & HRADÍLEK Z. (2012): Bryophyte flora of the Czech Republic: updated checklist and Red List and a brief analysis. – *Preslia* 84: 813–850.
- LEE B. S., MCGWIRE K. C. & FRITSEN C. H. (2011): Identification and quantification of aquatic vegetation with hyperspectral remote sensing in western Nevada rivers, USA. – *Int. J. Remote Sens.* 32: 9093–9117.
- MARVAN P., OPATŘILOVÁ L., HETEŠA J., MACIAK M. & HORKÝ P. (2011): Metodika hodnocení ekologického stavu útvárů povrchových vod tekoucích (kategorie řeka) pomocí biologické složky fyto-bentos. – MŽP, Praha.
- MESSINA G. & MODICA G. (2020): Application of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. – *Remote Sensing* 12: 1491.
- MIKHAIL E. M., BETHEL J. S. & MCGLONE J. C. (2001): Introduction to Modern Photogrammetry. – Wiley, New York.
- PAVELKA K. (2003): Fotogrammetrie 10. – České vysoké učení technické v Praze, Praha.
- PHOTOFILTRE (2020): Presentation. – URL: <http://www.photofiltre-studio.com/pf7-en.htm>.
- SMITH M. W., CARRIVICK J. L. & QUINCEY D. J. (2015): Structure from motion photogrammetry in physical geography. – *Prog. Phys. Geog.* 40: 1–29.
- TRUMP H. & KOHLER A. (1995): The usefulness of macrophyte monitoring-systems, exemplified on eutrophication and acidification of running waters. – *Acta Bot. Gall.* 142: 541–550.

- TRNKOVÁ K. (2008): Makrofyta jako indikátor kvality tekoucí vody. – Ms. [Bakalářská práce; Depon. in: Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Brno.]
- UHROVÁ J., BACHAN R. & ŠTĚPÁNKOVÁ P. (2018): Stanovení odnosu půdy z rýhové eroze metodou digitální fotogrammetrie a metodou volumetrické kvantifikace. – VTEI 60: 34–38.
- VIS C., HUDON C. & CARIGNAN R. (2003): An evaluation of approaches used to determine the distribution and biomass of emergent and submerged aquatic macrophytes over large spatial scales. – *Aquat. Bot.* 77: 187–201.
- VISSE F., WALLIS C. & SINNOTT A. M. (2003): Optical remote sensing of submerged aquatic vegetation: Opportunities for shallow clearwater streams. – *Limnologia* 43: 388–398.
- VÚV (2019): Výzkumná zpráva z mapování makrofyt na řece Svratce s využitím UAV. – Ms. [Závěr. zpr.; depon. in: VÚV TGM, Brno.]
- YUAN L. & ZHANG L. Q. (2008): Mapping large-scale distribution of submerged aquatic vegetation coverage using remote sensing. – *Ecol. Inform.* 3: 245–251.