
BEZPILOTNÍ TECHNIKA PRO ZEMĚDĚLSKOU PRAXI

Publikace vychází za podpory Ministerstva zemědělství ČR při České technologické platformě pro zemědělství

Úvod

Digitalizace je zásadní prostředek modernizace, profitability a udržitelnosti produkce zemědělství v 21. století, která má potenciál přispět k ochraně omezených zdrojů biodiverzity, půdy a vody. Nezastupitelnou roli v tomto procesu zaujímají nové technologie v podobě senzoriky, autonomní mobility a robotizace, které jsou předmětem intenzivního výzkumu a vývoje, a navazujícího transferu nových postupů a poznatků do praxe. Jedna z významných oblastí pro uplatnění automatizovaných systémů je dálkový průzkum Země s využitím bezpilotních prostředků, které nacházejí své místo nejen v praxi precizního zemědělství, ale i v široké paletě činností spojených se zemědělskou i lesnickou produkcí. Senzorické systémy nesené bezpilotními jsou vynikajícím prostředkem pro monitoring heterogenity v čase i prostoru, a to jak biotických, tak i abiotických faktorů, které jsou vzhledem ke zvyšující se četnosti extrémních meteorologických událostí stále častěji předmětem sledování a vyhodnocování. Touto zpětnou vazbou ve vztahu k pěstované komoditě, resp. prostředí přispívá zásadním způsobem k optimalizaci aktivit, procesů i opatření, o kterých se rozhoduje na základě dat a zkušeností. Kromě optimalizace nákladů podporuje udržitelnost optimálního profitabilního výnosu i kvalitu produkce. Vedlejším produktem tohoto přístupu může být i podpora biodiverzity i půdní úrodnosti s pozitivními dlouhodobými přesahy směrem ke kvalitě krajiny, potravin i zdraví.

Předkládaná publikace má za cíl seznámit zemědělskou praxi se všemi podstatnými aspekty využívání bezpilotních prostředků. Po krátkém historickém exkurzu se věnuje nejběžnějším typům UAV dostupných na trhu včetně senzorů, kterými jsou osezeny nebo je možné je dále dovybavit. Dále se zaměřuje na samotné pracovní využití, proces sběru i zpracování dat včetně konkrétního popisu využití v zemědělském podniku praktikující postupy precizního zemědělství. Důležitou součástí je i legislativní rámec vymezující používání UAV.

1. Historie dronů

1.1 Počátky konceptu

Historie dronů sahá mnohem hlouběji, než by se na první pohled mohlo zdát. Kořeny této technologie lze vysledovat již v 19. století, kdy Nikola Tesla začal experimentovat s dálkovým ovládním na bázi rádiových vln. V roce 1898 předvedl svůj legendární model lodě, který demonstroval možnost bezdrátového ovládní. Přestože tehdejší přístupy byly velmi omezené, položil Tesla významný základ pro budoucí rozvoj bezpilotních strojů.

1.2 Vojenské využití v první polovině 20. století

První světová válka přinesla snahy využít bezpilotní aparáty vojenskými silami. Americký projekt „Kettering Bug“ byl raným pokusem o letoun, který měl doručit výbušniny na nepřátelské cíle. V období druhé světové války se dále rozvinuly dálkově ovládané letouny používané jako cvičné terče pro protivzdušnou obranu. V Německu vznikly rakety V-1 a V-2, které sice nebyly dálkově ovládané v moderním smyslu, ale jednalo se o další krok k autonomii řízených střel (Obr.1).



Obr. 1:

Německé rakety V-1 (vlevo) a V2 (vpravo). Zdroj: <https://www.armyweb.cz/clanek/nadzvukove-rakety-v-2-rozsevaly-smrt-ktera-nebyla-slyset>

1.3 Studená válka a prudký technologický rozvoj

Nástup studené války odstartoval éru intenzivního výzkumu a vývoje dronů, zejména v USA a Sovětském svazu. Americký program „Firebee“ (60. léta) zahrnoval průzkumné letouny nasazené ve Vietnamu, které sbíraly zpravodajské informace pomocí kamer a senzorů. V 80. a 90. letech se do popředí dostal i Izrael, který vyvinul sofistikované bezpilotní systémy využívané v reálných konfliktech. Tyto zkušenosti byly přeneseny do vývoje amerických dronů, například Predatoru (první nasazení v roce 1995, Obr. 2).



Obr. 2: Americký dron „Predator“. Zdroj: *MQ-1 Predator Drone 3D Model \$99 - .ma .fbx .flt .3dm .3ds .cob .dae .dwg .lwo .obj .wrl .x .max - Free3D*

1.4 Moderní éra: Od armády k civilním aplikacím

Zhruba od konce 20. století se drony staly součástí standardní výbavy moderních armád (např. MQ-1 Predator či MQ-9 Reaper). Díky miniaturizaci senzorů, nižším výrobním nákladům a rozšíření GPS se však začaly objevovat i komerční a hobby drony. K masivnímu rozmachu došlo kolem roku 2010, kdy se na trh dostaly první snadno ovladatelné a cenově přístupné modely.

1.5 Model DJI Mavic Pro jako milník

Za jeden z klíčových okamžiků pro masové rozšíření dronů se považuje rok 2016, kdy společnost DJI uvedla model Mavic Pro. Skládací konstrukce, vespělá kamera s gimbalem, dlouhá výdrž baterie a jednoduché ovládání zpřístupnily tuto technologii širokému spektru uživatelů. Mavic Pro nastavil nové standardy pro civilní drony a upevnil pozici značky DJI jako lídra na trhu (Obr. 3).



Obr. 3: Drone Mavic Pro společnosti DJI. Zdroj: *DJI Mavic 3 Pro Flymore Combo With DJI RC2, Video Resolution: 5.1K at ₹ 282000 in Nagpur*

1.6 Pracovní zemědělský dron

Pro zemědělské účely se začaly objevovat první drony (nosiče) různých pevných a kapalných látek určené k plošnému nasazení (Obr. 4), následně pak k aplikacím v systému precizního zemědělství. Zde tyto drony našly skutečně bohaté využití, a to hlavně díky možnosti velmi přesného naplánování jednotlivých zásahů a aplikací, zároveň i možnosti zpětné kontroly a sběru dat pro další volbu vhodných procesů používaných v zemědělství. Důsledky zavádění principů precizního zemědělství jsou zejména:

- Snížení finančních nákladů na použité prostředky
- Snížení dopadů použití chemických látek v přírodě v důsledku menších objemů
- Snížení časové náročnosti a zjednodušení aplikačních procesů

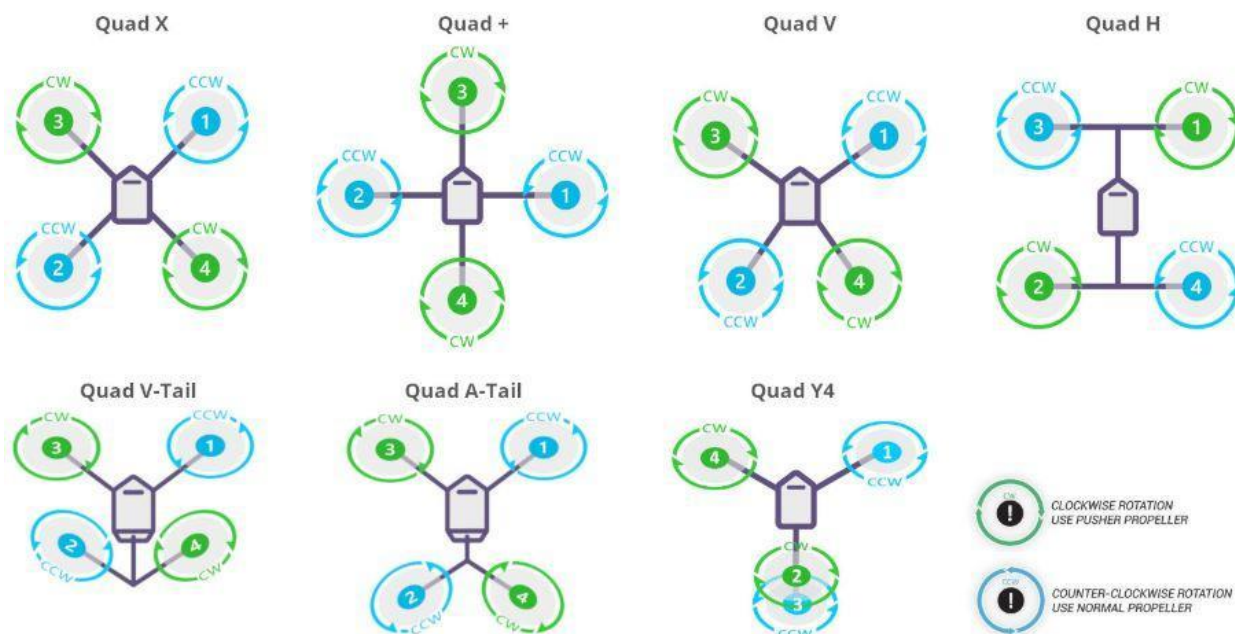


Obr. 4: Aplikační dron EFT50 Zdroj: *EFT Drone eft drone company drone frame | EFT*

2. Typologie a rozdělení pracovních dronů

2.1 Dělení podle konstrukce

- **Multikoptéry (Quadkoptéry, Hexakoptéry, Oktokoptéry)**
 - Stabilní a snadno ovladatelné, vhodné pro přesné manévry či stacionární let (inspekce, fotografování).
 - Nevýhodou je kratší doba letu a nižší rychlost oproti dronům s pevným křídlem.
 - Používají se různé typy rámců – viz Obr. 5.
 - Příklady Quadkoptéry, Hexakoptéry a Oktokoptéry jsou uvedeny na Obr.6.



Obr. 5: Typy používaných rámců s vyznačenou orientací nosné vrtule na každém rameni dronu.
 Zdroj: <https://devopedia.org/quadcopter>



Obr. 6: Typy Quadkoptéry (nahore), hexakoptera (vlevo dole) a Oktokoptera (vpravo dole).
 Zdroj: Quadcoptera: *Autonomous Drones For Mission-Critical Applications* | Flyby Robotics
 Hexacoptera: *UnmannedRC 1600 Hexacopter for Heavy Lifting 10KG 55MINS*

Octokoptera:

<https://www.facebook.com/photo/?fbid=1691538751075393&set=pb.100067144021217.-2207520000>

- **Drony s pevným křídlem**

- Konstrukce podobná letadlu, umožňující klouzavý let a delší dolet (Obr. 7 klasické letadlo a deltakřídlo).
- Vyžadují více prostoru pro vzlet a přistání, obtížněji se ovládají.
- Plně elektrický pohon (doba letu až 120 min)
- Pohon spalovacím motorem (doba letu až 15 hodin)



Obr. 7: klasické letadlo: *Airmobi F26 Fixed-wing UAV Platform*, *Skyeye 2600*, *Mugin 2600*

Deltakřídlo: <https://rumahdrone.riau.com/product/drone/>

- **Hybridní (VTOL – Vertical Take-Off and Landing)**

- Kombinují vlastnosti multikoptér a pevných křidel (Obr. 8 verze s pevnými motory a verze se sklopnými motory).
- Mohou vertikálně vzlétat i přistávat a poté přejít do horizontálního letu, čímž dosahují delšího doletu než běžné multikoptéry.
- Plně elektrické (doba letu 40–80 min)
- S hybridním pohonem pro start a přistání elektro pohonem, pro horizontální let pohon spalovacím motorem (doba letu až 8 hodin)



Obr. 8: Verze s pevnými motory: <https://ifdc.om/products/vtol-fx-m>

Verze se sklopnými motory: <https://www.aprella.com/id/uncategorized-id/survey-drones/>

2.2 Dělení podle účelu

- **Inspekční a monitorovací drony**
 - Vybaveny kamery s vysokým rozlišením, termovizí nebo LiDARem.
 - Vhodné pro kontrolu mostů, elektrického vedení a ostatních liniových staveb, stavu plodin, kalibrační verze pro letiště, monitorování pohybu zvěře, monitorování hranic a objektů atd.
- **Zemědělské drony**

- S multispektrálními senzory a postřikovacími systémy pro precizní zemědělství sledování stavu plodin. Pro distribuci granulátu se speciálním zásobníkem vybaveným rozmetadlem (Obr. 9).



Obr. 9: <https://agriculture-drone.en.made-in-china.com/product/wXKnBMTJfZYV/China-52L-Payload-High-Quality-Agriculture-Drone-Sprayer-Fumigation-Helicopter.html> IS RTK THE FUTURE OF DRONE MAPPING, RTK drone solution

- **Logistické drony**

- Specializované na převoz balíčků, zásilek či zdravotnického materiálu. Nosnost od 2 kg do 100 kg.

- **Průzkumné a mapovací drony**

- Využívají LiDAR, RTK systémy či kamerové systémy pro tvorbu 3D map. Spolupracují s online systémem zpracování obrazového záznamu ve 3D prostřednictvím 4G/5G sítě a cloudové aplikace. Bývají napojené na systém včasného varování v aplikacích jako je třeba mapování nových ložisek požárů a samovznícení v rozlehlých lesních plochách, případně rozlití vodních toků při povodních.

- **Záchranné a bezpečnostní drony**

- Obsahují termokamery, reproduktory, mohou pomáhat při pátrání a humanitárních operacích. Dále mohou nést malé medipacky, dopravit zvláštní lékařské prostředky (inzulin, krev, injekce, vakcíny atp.)

- **Průmyslové drony pro těžké práce**
 - Robustní stroje schopné nést vysokou zátěž, např. ve stavebnictví.

2.3 Dělení podle velikosti a nosnosti

- **Lehké drony (do 2 kg):** Vhodné pro hobby a menší komerční projekty.
- **Střední drony (2–25 kg):** Zahrnují většinu průmyslových dronů, s vyšším výkonem a větší nosností.
- **Těžké drony (nad 25 kg):** Pro specializované úkoly a nejnáročnější nasazení, často vyžadují specifické povolení.

2.4 Dělení podle stupně autonomie

- **Manuálně řízené:** Plná kontrola pilota, využití pro amatérské lety. Lety na přímý dohled.
 - **Poloautomatické:** Některé funkce (např. návrat domů, udržení výšky) zajišťuje palubní počítač.
 - **Autonomní:** Dron plní předem naplánovanou trasu či úkol sám, využívá pokročilé senzory a případně i AI.
-

3. Principy funkce navigace dronů

3.1 Stabilizace a řízení letu

Základem stabilního letu je IMU (Inertial Measurement Unit) kombinující gyroskopy a akcelerometry. Ty poskytují dronu informace o zrychlení a rotaci, které letový kontrolér využívá k udržení rovnováhy a směru.

3.2 Pozicování v prostoru

Nejčastěji se používá kombinace globálních navigačních satelitních systémů GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) a barometrických či ultrazvukových senzorů pro určení výšky. Autonomní drony mohou využívat optické a laserové systémy (LiDAR, VSLAM) k pohybu v prostředí bez spolehlivého satelitního signálu.

3.3 Autonomní řízení a vyhýbání překážkám

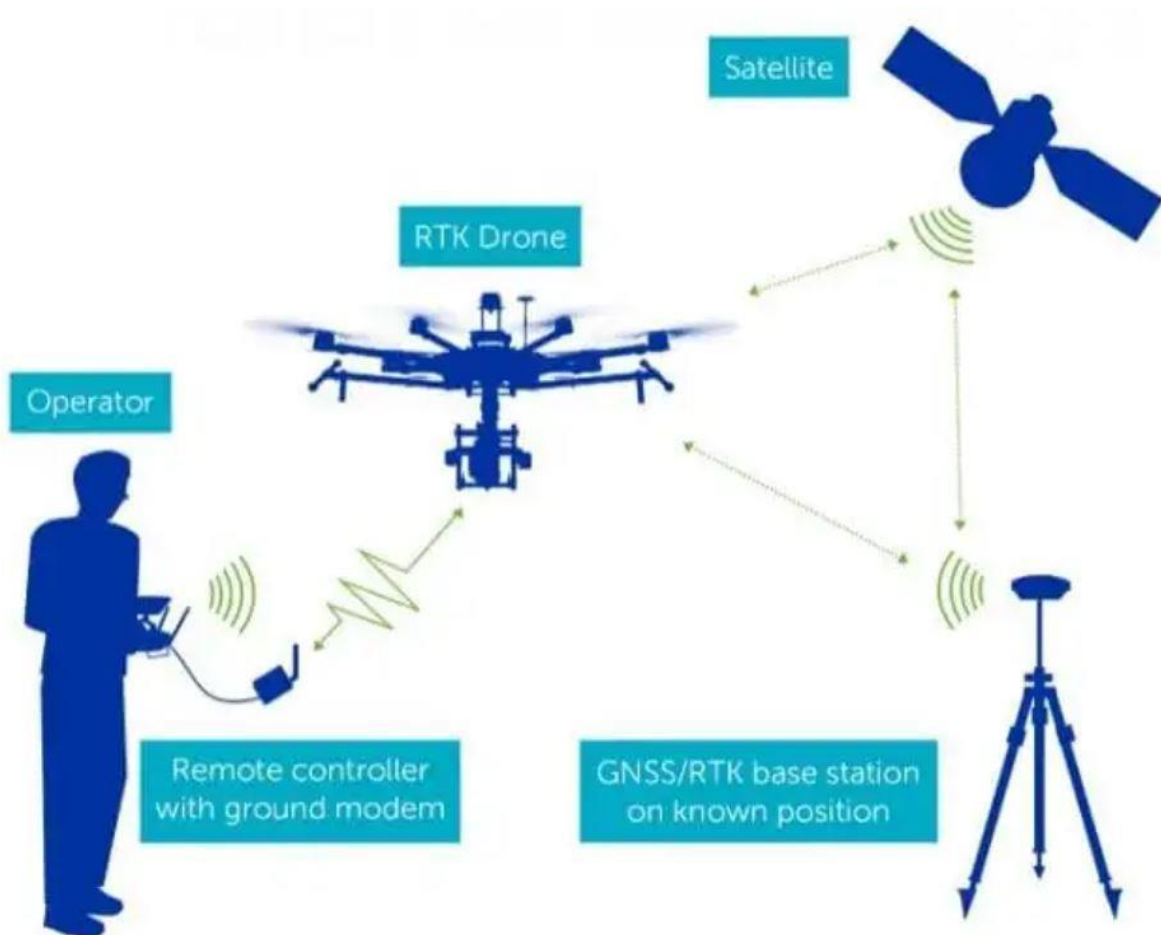
Moderní systémy dronů integrují pokročilé algoritmy umělé inteligence pro detekci překážek a volbu optimální dráhy. Snímače, jako jsou ultrazvukové a infračervená čidla, často doplňují kamery s AI pro předvídání pohybu objektů v okolí. Dále používají AI pro detekci objektu a vyhodnocení, případně porovnávací algoritmy pro vytvoření rozhodovacího kritéria nutné pro

splnění úkolu. Tato funkce se velmi často objevuje u záchranných a bezpečnostních složek. Dále tvoří pilíř autonomního ovládání u většiny vojenských dronů.

4. RTK systém (Real-Time Kinematic)

4.1 Princip

RTK umožňuje dronům dosáhnout velmi vysoké přesnosti (na úrovni centimetrů) tím, že porovnává signál z pohyblivého přijímače (na dronu) a referenční stanice na zemi. Korekční data se do dronu přenášejí v reálném čase, takže dokáže odstranit chyby způsobené atmosférickými podmínkami či nepřesnostmi v satelitním signálu. Princip fungování RTK je zobrazen na Obr. 10.



Obr. 10: <https://www.droneassemble.com/is-rtk-the-future-of-drone-mapping/>

4.2 Výhody a nevýhody

- **Výhody:** Maximální přesnost potřebná pro geodézii, stavebnictví či precizní zemědělství, kde i drobné odchylky mohou znamenat velké finanční ztráty.
- **Nevýhody:** Vyšší pořizovací náklady, nutnost stabilního datového spojení mezi dronem a referenční stanicí, komplikace při provozu v oblastech bez možnosti umístit základnovou stanicí.

4.3 Příklady využití

- **Geodézie a mapování:** Vytváření přesných 3D modelů terénu.
 - **Zemědělství:** Precizní výpočet polohy dronu pro analýzu plodin a optimalizaci zavlažování či hnojení.
 - **Stavebnictví:** Monitorování přesných objemů materiálu, kontrola výkopů či dokumentace postupu stavby.
-

5. Využití dronů v civilním a průmyslovém sektoru

5.1 Od vojenského k širokému civilnímu použití

Přestože historie dronů začíná ve vojenské oblasti, největší rozmach zaznamenaly drony v komerční sféře za posledních 10–15 let. Miniaturizace senzorů, pokles cen elektroniky a široká dostupnost GPS otevřely dveře nekonečným možnostem.

5.2 Konkrétní příklady využití

- **Zemědělství:** Monitoring plodin prostřednictvím multispektrálních kamer, postřik, optimalizace zásahů dronu v odvětví precizního zemědělství.
- **Vodohospodářské práce:** mapování části vodního toku pro detekci výpustí (Obr. 11).
- **Stavebnictví:** Tvorba 3D modelů stavenišť, kontrola konstrukcí, měření objemů materiálů.
- **Logistika:** Testy doručování zásilek (Amazon, UPS), inventarizace skladů s využitím autonomních letů.
- **Energetika a těžba:** Inspekce ropovodů, elektrického vedení, větrných turbín, monitorování těžby nerostných surovin.
- **Filmový průmysl:** Profesionální letecké záběry dříve vyhrazené pro helikoptéry se staly snadno dostupné díky dronům s 4K či 8K kamerami.
- **Bezpečnost a záchranné operace:** Hledání pohřešovaných osob, pomoc při povodních a přírodních katastrofách.



Obr. 11: Příklad užití dronu při mapování části vodního toku pro následné vytvoření 3D modelu. Zdroj: www.prolabengineering.com

5.3 Trendy a perspektivy

Komplexní nasazení dronů v průmyslovém sektoru bude pokračovat, zejména díky rostoucím možnostem autonomního řízení a integrace AI. Drony s RTK nebo LiDAREm se stanou běžným vybavením geodetů, stavebních firem a monitorovacích týmů.

6. Výrobci dronů: Porovnání světových lídrů

6.1 Hlavní hráči na trhu

- **DJI (Čína):** Největší producent civilních dronů, široká škála modelů od hobby (Mini, Mavic) až po průmyslové (Matrice). Inovace, kvalitní kamery, stabilizace a uživatelská přívětivost.
- **Parrot (Francie):** Známý svými lehkými a snadno přenosnými drony (Anafi), zaměřuje se také na termální kamery a profesionální inspekce.
- **Skydio (USA):** Vyniká pokročilou AI a autonomními funkcemi. Skydio 2+ či X2 jsou určeny pro profesionální použití, včetně bezpečnostních aplikací.
- **Autel Robotics (Čína/USA):** Konkuruje DJI zejména modelovou řadou Evo. Zaujme vysokým rozlišením kamer (8K) a dlouhou výdrží baterií.

- **Yuneec (Čína):** Nabízí cenově dostupná řešení. U modelů Typhoon H či H520 je ceněná stabilita letu a kvalita záznamu.

6.2 Vojenské a průmyslové systémy

- **Boeing Insitut (USA):** Specializace na dlouhodobé vojenské a průzkumné mise (ScanEagle).
- **AeroVironment (USA):** Vojenské drony (Raven, Puma) i tzv. „kamikadze“ systémy (Switchblade).
- **EHang (Čína):** Zaměřuje se na koncepty létajících taxi (EHang 184) a autonomní přepravu osob.

6.3 Kritéria výběru

- **Cena:** Od několika tisíc korun u mini dronů až po statisíce či miliony u průmyslových a vojenských modelů.
 - **Technologie:** AI, vyhýbání překážkám, termokamery, RTK, LiDAR.
 - **Servis a podpora:** Klíčový aspekt pro profesionální nasazení.
-

7. Finanční aspekty provozu dronů

7.1 Výhody z hlediska nákladů

- **Úspora pracovní síly:** Jediný dron může často zastat práci celého týmu, zejména při inspekcích a monitorování.
- **Efektivita a rychlost:** Inspekce elektrického vedení dronem je levnější než pronájem helikoptéry. Rychlá analýza dat snižuje prostoje.
- **Snížení rizika:** Dron nahradí člověka při nebezpečných úkolech (např. výškové práce), což redukuje náklady na bezpečnost a pojištění.

7.2 Nevýhody a skryté náklady

- **Počáteční investice:** Profesionální drony (s RTK, termokamerou) mohou stát stovky tisíc korun.
- **Provoz a údržba:** Náklady na baterie, opravy a pravidelné kalibrace.
- **Školení a certifikace:** Profesionální provoz vyžaduje školení, pilotní zkoušky a následnou administrativu.
- **Zastarávání technologií:** Rychlý vývoj vede k pravidelným investicím do novějších modelů.

7.3 Dlouhodobé vyhlídky

Navzdory počátečním vyšším investicím mohou drony přinést značné úspory v dlouhodobém horizontu. Automatizace, přesnější data a minimalizace rizik vedou k vyšší efektivitě a lepšímu rozhodování v mnoha odvětvích.

8. Potřebné základní znalosti a dovednosti k provozování dronů

8.1 Technické předpoklady

- **Znalost aerodynamiky:** Pochopení principů letové stability a řízení.
- **Základy elektroniky a IT:** Kalibrace senzorů, aktualizace firmware, nastavení softwaru pro plánování letů.
- **Praktické dovednosti:** Bezpečný vzlet, přistání, nouzové postupy, manévry v různých povětrnostních podmínkách.

8.2 Legislativa a pravidla

- **Registrace dronů:** V EU povinná pro stroje nad 250 g nebo s kamerou.
- **Kategorie provozu:** A1, A2, A3 pro méně rizikové lety, specifická kategorie pro složitější operace.
- **Licencování a školení:** Pro profesionály je nutné absolvovat teoretické i praktické zkoušky, v ČR u Úřadu pro civilní letectví (ÚCL).

8.3 Bezpečnostní aspekty

- **Vyhýbání se překážkám:** Dodržování vzdáleností od lidí, budov a infrastruktury.
- **Znalost nouzových postupů:** Řešení selhání GPS, ztráty signálu, nízké baterie.
- **Pojištění:** Pro profesionální provoz často nutné (pojištění odpovědnosti za škody).

8.4 Specializované dovednosti

- **Fotogrammetrie:** Tvorba přesných ortofotomap a 3D modelů.
- **Geodézie:** Práce s RTK/PPK systémy, interpretace dat.
- **Pokročilá práce s daty:** Zpracování termovizních záběrů, multispektrálních snímků nebo LiDAR dat.

9. Legislativní omezení v ČR, EU a Asii – porovnání

9.1 Česká republika (v kontextu EU)

- **Registrace:** Drony nad 250 g povinně, pilot se registruje na portálu ÚCL.
- **Výška letu:** Maximálně 120 m.

- **Kategorie provozu:** A1, A2, A3 a specifické kategorie dle EASA.
- **Zvláštní povolení:** Pro lety nad lidmi, v hustě obydlených oblastech nebo v chráněných přírodních zónách.

9.2 Evropská unie (EASA)

- **Jednotný rámec:** Platí v celé EU, registrace dronu umožňuje létat i v ostatních členských státech.
- **Otevřená, specifická, certifikovaná kategorie:** Různá míra rizika vyžaduje rozdílné podmínky.
- **Standardizace:** Umožňuje rozvoj přeshraničních služeb (např. dronová logistika mezi státy).

9.3 Asie

- **Čína:** Přísná pravidla, registrace nad 250 g, poměrně striktní letové koridory v městských oblastech.
- **Japonsko:** Registrace již od 200 g, zákaz létání nad hustě obydlenými oblastmi bez speciálního povolení.
- **Indie, Singapur:** Důraz na digitální registraci, omezení výšky, místy velmi omezené zóny letu.
- **Variabilita:** V Asii neexistuje jeden univerzální rámec, proto je nutné se seznámit s předpisy konkrétní země.

10. Budoucnost dronů

10.1 Automatizace a umělá inteligence

Dalším zásadním krokem je plná autonomie dronů, kdy umělá inteligence zvládne plánovat trasy v reálném čase, vyhýbat se překážkám a předvídat nebezpečí (např. změnu počasí nebo pohyb lidí). Swarm technologie (roje dronů) nabídnou možnost současné koordinace desítek až stovek strojů.

10.2 Drony v dopravě a logistice

- **Doručování zásilek:** Rozvoj městského doručování je limitován regulacemi a bezpečnostními riziky, ale v odlehlých oblastech drony zefektivní dostupnost poštovních i zdravotnických služeb.
- **Létající taxi:** Společnosti jako EHang nebo Volocopter testují plně elektrické drony pro přepravu osob. Vize „smart city“ budoucnosti často zahrnují i autonomní letecké koridory.

10.3 Zemědělství 4.0

S rostoucími nároky na potravinovou bezpečnost a udržitelnost se drony stanou nedílnou součástí inteligentního zemědělství. Díky detailnímu sběru dat a autonomní aplikaci hnojiv či postřiků bude možné maximalizovat výnosy a minimalizovat ekologickou zátěž.

10.4 Environmentální a záchranné mise

Drony již dnes pomáhají při sledování lesních požárů či monitorování znečištění, v budoucnu však mohou hrát ještě větší roli. Lépe koordinované drony s pokročilou sensorikou dokážou rychleji reagovat na přírodní katastrofy, identifikovat nejpostiženější oblasti a doručovat životně důležitou pomoc.

10.5 Integrace do běžného života

Pokud se vyřeší otázky bezpečnosti a soukromí, můžeme se dočkat běžného využívání menších dronů k osobní asistenci, jako jsou doprovod při outdoorových aktivitách, automatické natáčení videí či dohled nad domovem v době nepřítomnosti majitele.

Závěrem

Drony mají za sebou dlouhou a pestrou historii – od armádních experimentů a průkopnických pokusů Nikoly Tesly až po masové rozšíření civilních modelů. Dnes nacházejí uplatnění v desítkách odvětví, ať už jde o zemědělství, stavebnictví, logistiku, či zábavu a média. Klíčem k jejich efektivnímu využití je nejen znalost technologií a umění pilotáže, ale i dodržování legislativních pravidel a bezpečnostních zásad.

Budoucnost slibuje další průnik umělé inteligence a robotiky do bezpilotních systémů, čímž se dříve futuristické představy – jako doručování zboží drony či letecké taxi – mohou stát realitou. Pokroky v miniaturizaci, sensorice a energetických zdrojích spolu s vyvíjející se legislativou otevřou ještě více příležitostí a aplikací. Drony mají potenciál výrazně přispět k transformaci průmyslu, služeb i každodenního života, a to s důrazem na efektivitu, bezpečnost a ochranu životního prostředí.

11. Základní typy bezpilotních systémů používaných v zemědělství

11.1. Multikoptéry

Multikoptéra je typ bezpilotního letadla s kolmým startem a přistáním, k čemuž mu slouží daný počet motorů a vrtulí. Na rozdíl od helikoptéry s jedním hlavním rotorem má multikoptéra rotorů ně- kolik (kvadrokoptéry 4, hexakoptéry 6 a oktakoptéry 8). Hlavní přednost křidel spočívá ve vyšším pracovním výkonu z hlediska výdrže ve vzduchu. Hlavní výhodou multikoptér je snadná manévrovatelnost a konfigurovatelnost vzhledem sensorovému příslušenství.

11.2. Pevná křídla

Dron typu pevné křídlo je bezpilotní letadlo, které má pevná křídla podobná tradičním letadlům. Na rozdíl od multirotorových dronů, které mají několik rotorů pro vertikální vzlet a přistání, drony s pevnými křídly vzlétají a přistávají horizontálně a jsou schopny klouzavého letu. *Díky této konstrukci mohou létat na delší vzdálenosti a s vyšší efektivitou, což je činí ideálními pro mapování, průzkum a další aplikace, kde je potřeba pokrýt velké území*

AgEagle (dříve SenseFly) eBee X

Bezpilotní systém eBee X je dron typu pevné křídlo, vyvinutá společností senseFly.

Jedná se o první bezpilotní letoun na světě certifikovaný kategorií C2 od EASA, což umožňuje s ním volně létat v blízkosti obytných, komerčních, průmyslových a rekreačních oblastí v Evropě.

Technické specifikace:

Rozpětí	116 cm
Hmotnost	1,4 kg
Motor	Elektrický bezkartáčový s nízkou hlučností
Rozsah rádiového spojení	3 km nominálně (až 8 km)
Oddělitelná křídla	Ano
Volba sensorů	senseFly S.O.D.A. 3D, senseFly Aeria X, senseFly Duet T, Duet M, senseFly S.O.D.A., senseFly koridor
Možnosti příslušenství	Rádiový vyhledávač, PingUSB (přijímač dat leteckého provozu)

Software:

Řízení letu a zpracování dat	eMotion
Kompatibilní software pro zpracování snímků	Pix4Dmapper / Pix4Dcloud / Pix4Dfields (volitelně s eBee X), Agisoft Metashape, Esri Drone2Map, DroneDeploy, Trimble Business Center, Bentley ContextCapture
Kompatibilita výstupů fotogrammetrického zpracování	AutoCAD, ArcGIS, QGIS, Trimble Business Center, Leica Geo Office, VAGNET Office Tools, ArcGIS, MicroStation a další

Provoz:

Automatické 3D plánování letu	Ano
Rychlost letu	40-110 km/h (11-30 m/s)
Odolnost proti větru	Až 46 km/h (12,8 m/s)
Max. čas letu (bez prodloužené výdrže)	59 minut
Max. čas letu s prodlouženou výdrží	90 minut
Automatické přistání	Ano
Typ přistání	Lineární, nebo příčné přistání (Přesnost 5 m, kužel s úhlem 35°)
Jsou požadovány pozemní kontrolní body (GCP)?	Ne, při použití volitelné integrované vysoké přesnosti (RTK/PPK)
Ruční vypuštění (není vyžadován katapult)	Ano

Pokrytí a přesnost:

Nominální pokrytí při 122 m	220 ha se senseFly S.O.D.A. / bez prodloužené výdrže
Max. pokrytí při 122 m	500 ha se senseFly S.O.D.A. 3D / s prodlouženou výdrží
Rozlišení snímku při letu 122 m	2,5 m/px, se senseFly Aeria X
Absolutní přesnost (s aktivovanou RTK/PPK nebo s GCP)	Do 3 cm/px

Více informací: www.sensefly.com/eBee-X

11.2.3. Kompatibilní kamery

senseFly S.O.D.A. 3D

Profesionální RGB fotogrammetrická kamera, která mění orientaci během letu a zachycuje vždy tři snímky (2 šikmé a 1 svislý) místo jednoho, pro mnohem širší zorné pole.



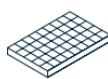
Sensor

1"
RGB



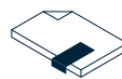
Lens

F/2.8-11,
10.6 mm (35 mm
equivalent: 29 mm)



Resolution

20 MP
5,472 x 3,648 px
(3:2)



Formats

RGB: JPEG, DNG+JPEG



Exposure compensation

±2.0 (1/3 increments)



Shutter

Global
1/30–1/2000s (sensor)
1/500–1/2000s
(user-configurable)



White balance

Auto, sunny, cloudy,
shady



ISO range

125-6400 (sensor)
125-1600
(user-configurable)



FOV

Total FOV: 154°
64° optical
90° mechanical





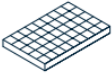
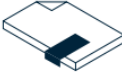






Direct In-Flight Georeferencing (DIFG)

Obr.x: Vlastnosti kamery S.O.D.A. 3D. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf

senseFly Aeria X

Kompaktní RGB fotogrammetrická kamera. Má optimalizovanou dobu expozice, která vyhovuje mnoha světelným podmínkám, včetně slabého osvětlení. Výsledkem jsou velmi ostré snímky, protože je zde zaručena minimalizace rizika šumu a rozmazání pohybem (vhodné pro mapování porostu).

Zaznamenává se přesná GPS poloha každého snímku. Je také zapotřebí menšího překrytí snímků, což umožňuje větší pokrytí letu a rychlejší zpracování snímků. Zároveň je garantováno zlepšení rekonstrukcí obrazu v náročných podmínkách, jako jsou např. voda, lesy, zemědělské plodiny (vinice, chmelnice...).

				
Sensor	Lens	Resolution	Formats	Exposure compensation
APS-C RGB	F/2.8-16, 18.5mm (28mm equivalent: 35 mm)	24 MP 6,000 x 4,000 px (3:2)	RGB: JPEG, DNG+JPEG	±2.0 (1/3 increments)
				
Shutter	White balance	ISO range	FOV	Direct In-Flight Georeferencing (DIFG)
Global /30–1/4000s (sensor) 1/500–1/2000s (user-configurable)	Auto, sunny, cloudy, shady	100-6400 (sensor) 100-3200 (user-configurable)	75° (diagonal) HFOV: 64°	




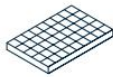

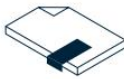
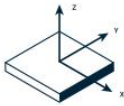


Obr. X: Vlastnosti kamery Aeria X. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf

Duet M

Jedná se o senzor kombinující kameru S.O.D.A. a Parrot Sequoia+ a zachycuje snímky plodin ve čtyřech přesně definovaných viditelných a neviditelných spektrálních pásmech plus snímky RGB během jediného letu. Podporuje vysoce přesné RTK/PPK pracovní postupy. S vestavěnou automatickou radiometrickou kalibrací, kterou je možno použít společně s Pix4Dfields nebo Pix4Dmapper, není potřeba používat kalibrační terč. Výsledkem je rychlý bezproblémový pracovní postup a konzistentní opakovatelná měření, která jsou klíčem k vysoce kvalitnímu rozhodování.

Duet T


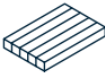
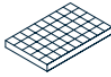
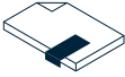

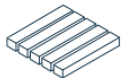

Kombinuje dvě kamery: S.O.D.A. RGB kameru a termální kameru.

				
Sensors Thermal infrared (FLIR): (10.9 mm x 8.7 mm) RGB: 1"	RGB lens F/2.8-11, 10.6 mm (35 mm equivalent: 29 mm)	Thermal lens F/1.25, 13 mm (35 mm equivalent: 40 mm)	Resolution Thermal: 640 x 512 px (5:4) RGB: 5,472 x 3,648 px (4:3)	
				
Shutter Thermal: rolling, 30 Hz RGB: Global 1/500–1/2000s	Formats Thermal: R-JPEG RGB: JPEG	IMU Synchronized IMU	Thermal FOV HFOV: 45° VFOV: 37° DFOV: 56°	RGB FOV HFOV: 64° VFOV: 37° DFOV: 74°

Obr. X: Vlastnosti kamery Duet T. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf

MicaSense RedEdge MX

Pětípásmová multispektrální kamera vhodná pro precizní zemědělství.

			
Sensor Five band multispectral sensor: 1/3"	Multispectral sensor Five-band	Single-band resolution 1.2 MP 1,280 x 960 px (4:3)	Formats TIFF
			
Shutter Global	Multispectral bands Blue (475 nm ± 20 nm) Green (560 nm ± 20 nm) Red (668 nm ± 10 nm) Red edge (717 nm ± 10 nm) Near infrared (840 nm ± 40 nm)	Single-band FOV HFOV: 47° VFOV: 37° DFOV: 58°	


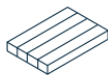
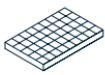
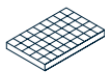
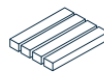




Obr. X: Vlastnosti kamery MicaSense RedEdge MX. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf



Obr. X: Kamera MicaSense RedEdge MX. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf

Parrot Sequoia+

Čtyřpásmová multispektrální kamera vhodná pro precizní zemědělství.

				
Sensors	Multispectral sensor	RGB resolution	Single-band resolution	Multispectral bands
Multispectral sensor: 1/3" RGB camera: 1/2.3"	Four-band	16 MP 4,608 x 3,456 px (4:3)	1.2 MP 1,280 x 960 px (4:3)	Green (550 nm ± 40 nm) Red (660 nm ± 40 nm) Red edge (735 nm ± 10 nm) Near infrared (790 nm ± 40 nm)
				
Single-band shutter	RGB shutter	RGB FOV	Single-band FOV	
Global	Rolling 6 Hz	HFOV: 64° VFOV: 50° DFOV: 74°	HFOV: 62° VFOV: 49° DFOV: 74°	

Obr. X: Vlastnosti kamery Parrot Sequoia+. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf



Obr. X: Kamera Parrot Sequoia+. Zdroj: https://optron.com/sensefly/wp-content/uploads/2021/03/bro_sensefly-cameras.pdf

11.3. VTOL

VTOL tedy „Vertical take-off and landing“ (vertikální vzlet a přistání) drony jsou kombinací vlastností multikoptér a pevného křídla. Existují různé podoby VTOLů založené na jejich konstrukci:

- a) Při vzletu a přistání je celý letoun otočený kolmo k zemi a v nastavené výšce se otáčí do vodorovné pozice.
- b) Otáčí se jen motory s vrtulemi.
- c) Dvě sady vrtulí pro vzlet a přistání či jiné využívání fyzikálních vlastností konstrukce pro vzlet a přistání.

Velkou výhodou této konstrukce je, že mohou dosáhnout vyšší rychlosti a jsou tedy schopny nasnímkovat větší plochy v porovnání s běžnými drony. Další výhodou je, že mohou vertikálně vzlétávat a přistávat z jednoho místa. Jelikož se jedná o velmi efektivní stroj, je jeho cena také relativně vysoká.

WingtraOne GEN II

Jedná se o mapovací dron typu letoun s vertikálním vzletem a přistáním (VTOL), vyvinutý společností Wingtra AG (Giesshübelstrasse 40 8045 Zürich, Švýcarsko).

WingtraOne GEN II je odpovídá požadavkům třídy C3 v souladu s delegovaným nařízením Evropské komise (EU) 2019. /945 o systémech bezpilotních letadel.

Výrobce garantuje 110 ha maximální pokrytí na jeden let při 1,2 cm/px, výšce 93 m a 42 MP kameře. Spolu s multifrekvenčním PPK GNSS přijímačem a 42 Mpx snímačem poskytuje WingtraOne absolutní horizontální přesnost ve své třídě, a to až 1 cm bez GCP. Tato podmínka je splněna při použití fotoaparátu Sony RX1R II a modulu PPK. Této úrovni přesnosti lze dosáhnout za optimálních podmínek, na tvrdém povrchu, s použitím dobře zavedené základnové stanice nebo korekčních dat ze sítě CORS. Výsledky lze ověřit pomocí vysoce přesných kontrolních bodů.



Obr. x: WingtraOne GEN II (Zdroj: vlastní, J. Kumhálová).

Technické specifikace:

Typ dronu	Ocasní vrtulník s vertikálním vzletem a přistáním (VTOL)
Maximální vzletová hmotnost	4,5 kg
Hmotnost (s bateriemi)	3,7 kg
Maximální hmotnost užitečného zatížení	800 g
Rozpětí křídel	125 cm
Rozměry Wingtra One	125 × 68 × 12 cm (bez středového stojanu)
Rozměry pilotní skříňky	57 × 37 × 20 cm
Kapacita baterie	Dvě baterie s kapacitou 99 Wh (nutné jako pár)
Rádiové spojení	Obousměrné 10 km (6 mil) v přímé viditelnosti, překážky snižují dosah
Vestavěná GPS	Redundantní, využívá GPS (L1, L2), GLONASS (L1, L2), Galileo (L1) a BeiDou (L1) Rozsah frekvencí: 1227.6 MHz / 1242,9375-1251,6875 MHz / 1561,098 MHz / 1575,42

	MHz / 1598,0625-1609,3125 MHz / 1602,00 MHz
--	---

Operace:

Rychlost větru	Provozní cestovní rychlost Stoupání / klesání: 16 m/s (35,8 mph) 6/3 m/s (13,4 / 6,7 mph) Stoupání / klesání ve visení: 6/2,5 m/s (13,4/5,6 mph)
Odolnost proti větru	Maximální trvalý vítr: 12 m/s (27 mph) Maximální nárazy větru: 18 m/s (40mph) Maximální trvalý vítr na zemi: 8 m/s (19mph)
Maximální doba letu	Až 59 min (záleží na letových podmínkách)
Teplota	-10 až +40 °C
Maximální výška vzletu nad hladinou moře	2500 m
Počasí	IP54, nedoporučuje se létat v mlze, dešti a sněhu
Nutné pozemní kontrolní body	Ne (s možností PPK); doporučuje se použití 3 kontrolních bodů k ověření přesnosti

11.3.1. Senzory kompatibilní s WingtraOne

Senzory RGB

Kompatibilní RGB senzory s Wingtra One jsou RGB61, MAP61, Sony a6100 a Šikmá 3D mapovací kamera Sony a6100 (viz obr. X a přehled specifikací níže).



RGB61



Sony a6100



Oblique Sony a6100

Obr. X. RGB kamery kompatibilní s WingtraOne. Zdroj: <https://wingtra.com/wp-content/uploads/Wingtra-Technical-Specifications.pdf>

RGB61

Technické specifikace	61 MP, full-frame snímač 24 mm objektiv nadir
Nejnižší možné GSD	0,7 cm/px
Horizontální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 1 cm
Vertikální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 3 cm

MAP61

Technické specifikace	61 MP, full-frame snímač 17 mm objektiv nadir
Nejnižší možné GSD	1,2 cm/px
Horizontální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 2 cm
Vertikální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 4 cm

Sony a6100

Technické specifikace	24 MP, snímač APS-C 20 mm objektiv nadir konfigurace
Nejnižší možné GSD	1,2 cm/px
Horizontální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 2 cm
Vertikální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 4 cm

Šikmá 3D mapovací kamera Sony a6100

Technické specifikace	24 MP, snímač APS-C objektiv 12 mm nízká šikmá konfigurace
Nejnižší možné GSD	1,6 cm/px
Horizontální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 2 cm
Vertikální absolutní přesnost (RMS) s PPK (bez GCP)	Do 4 cm

Systém LiDAR

Senzor	Skener Hesai XT32M2X 3 návraty Inerciální jednotka IMU společnosti Labs
Efektivní bodová hustota výsledných dat ve výšce 90 m AGL s 50 % bočním překrytím	Pevný povrch: ~110bodů/m ² (jeden návrat) Nízká vegetace: Až 220bodů/m ² (dvojitý návrat) Vysoká vegetace: Až 330bodů/m ² (trojnásobný návrat)
Absolutní vertikální přesnost až	3 cm

Multispektrální kamery

MicaSense RedEdge-P

Senzor	6 samostatných snímačů: Červená, zelená, modrá, RedEdge, blízká infračervená, panchromatická
GSD až	2,0 cm/px
Absolutní horizontální přesnost až	3 cm
Absolutní vertikální přesnost až	5 cm

MicaSense RedEdge-MX

Senzor	5 samostatných snímačů: Červená, zelená, modrá, RedEdge, blízká infračervená
GSD až	6,7 cm/px
Absolutní horizontální přesnost až	8 cm
Absolutní vertikální přesnost až	15 cm

Zdroj: <https://bezpilotne.cz/wingtraone/>

Atmos Marlyn

Tento VTOL je vyvinutý společností Atmos UAV (Molengraaffsingel 12 2629JD – Delft The Netherlands; Southern Cross Drones Pty Ltd, 100 Mount Street - Level 25 North Sydney - NSW 2060 Australia).

Jak dokládá výrobce (<https://southerncrossdrones.com/marlyn-atmosuav-vtol-drone.html>) Marlyn dokáže zmapovat 1 km² za 30 minut s GSD 3 cm. Dosah je až 60 km, je odolný proti dešti, GSD dosahuje až 1,5 cm a pro vzlet a přistání vyžaduje plochu 2 x 2 m.

12. Monitorování vegetace a půdy pomocí UAV

Velmi zásadní roli v interpretaci stavu porostů v rostlinné výrobě hraje tzv. spektrální křivka odrazivosti, která je projevem tzv. spektrálního chování zkoumaných povrchů. Tvar křivky má velký vliv na výběr vlnové délky, ve které je vhodné data o zkoumaném objektu, či povrchu, získávat. Křivky spektrálního chování mají pro daný typ povrchu typický průběh, od kterého se mohou odchylovat v důsledku různých biotických či abiotických vlivů. Průběh spektrální křivky může ovlivňovat jak fyzikální stav zkoumaného povrchu (např. obsah vody, teplota), tak jeho chemické složení. Proto je možné ze spektrální křivky usuzovat na momentální stav zkoumaných porostů. Zde je také nutné vzít v úvahu, že průběh spektrální křivky nám může napovídat o aktuálním stavu porostu, který ještě nemusí být postižitelný lidským okem. Pro každý druh vegetačního pokryvu je typický průběh spektrální křivky, přičemž je zpravidla zachováno lokální maximum odrazivosti v zelené části spektra (cca 560 nm) a výrazný nárůst odrazivosti v oblasti blízkého infračerveného záření (cca 842 nm). Jelikož lidské oko je citlivé jen na rozsah vlnových délek v tzv. viditelné části spektra, vidí vegetaci jako zelenou (Obr. 1).

Letecké snímky jsou pořizovány zpravidla z výšky, a proto je snímán pouze povrch vegetačního pokryvu, tzn. v případě zemědělských plodin horní listy (či květenství) v závislosti na fenologické fázi porostu. Je tedy zřejmé, že k popisu spektrálních vlastností povrchu porostu se využívá především odrazových vlastností listů.

Při interpretaci odrazových vlastností, a tedy spektrální křivky, je potřeba brát v úvahu následující faktory, které mohou značně ovlivnit její průběh:

- Vnější uspořádání porostu – vnější struktura.
- Vnitřní struktura porostu – buněčný stav pletiva.

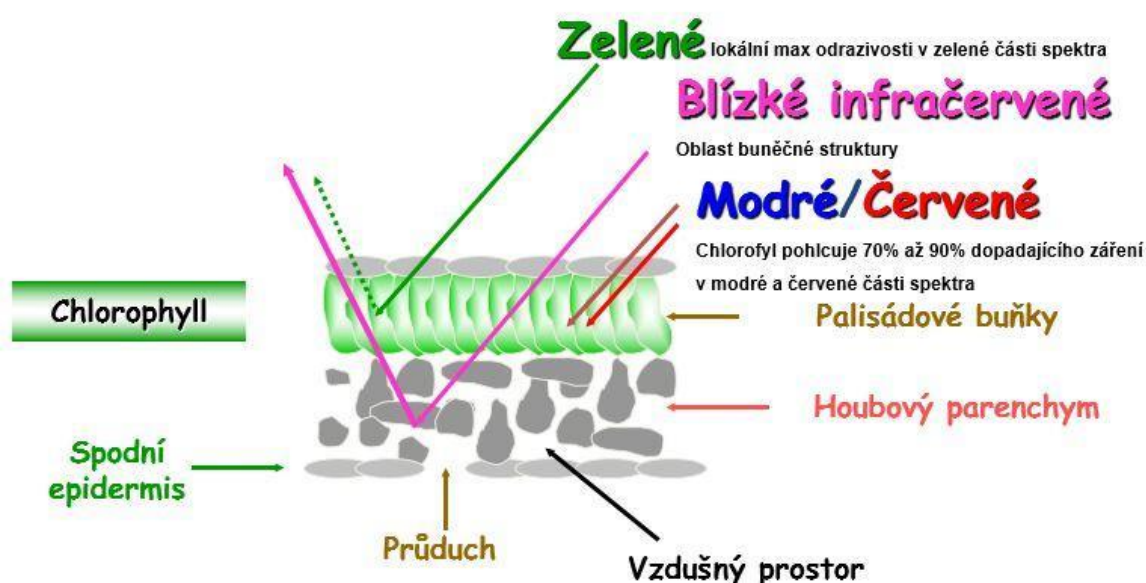
- Vodní obsah.
- Zdravotní stav.
- Vlastnosti půdního substrátu.

Schematizovaná křivka spektrálního chování vegetace se pak dělí do tří základních oblastí. Každá z těchto tří oblastí vychází z reakce části rostlin na vlnovou délku elektromagnetického záření. Tyto oblasti lze nazvat jako:

- Oblast pigmentační absorpce (400 nm – 700 nm).
- Oblast buněčné struktury (700 nm – 1300 nm).
- Oblast vodní absorpce (1300 nm – 3000 nm).

Oblast pigmentační absorpce je charakteristická tím, že zde elektromagnetické záření daných vlnových délek reaguje s pigmentačními látkami (především s chlorofylem a karoteny). Chlorofyl pohlcuje většinu záření v modré a červené části spektra, a to až 70 % až 90 % dopadajícího záření. V zelené části spektra je pak lokální maximum odrazivosti. Z tohoto důvodu vidí lidské oko zdravou vegetaci zeleně (Obr.1).

Oblast buněčné struktury je charakteristická výrazným nárůstem odrazivosti ve vlnových délkách kolem 700 nm. To, jakým způsobem a jak intenzivně je elektromagnetické záření odráženo, je způsobeno vnitřní strukturou a morfologií listu. Morfologie listů je jedním z faktorů, který je pro určité druhy plodin typickým. A právě tato oblast vlnových délek je citlivá na jakékoliv změny v rostlinách a dá se tak využít pro podrobnější interpretaci stavu porostu. Tyto vlnové délky se dají použít na snímku nejen pro odlišení jednotlivých druhů porostů díky své jedinečné struktuře (odlišení jednotlivých čeledí), ale mohou velmi dobře posloužit i k detekci zdravotního stavu porostu. Rozsah vlnových délek cca 680 nm – 780 nm se pak nazývá tzv. oblast RED EDGE, která je velmi citlivá na jakékoliv změny v buněčné struktuře porostu.



Obr. X: Vizualizace spektrální interakce „průměrného“ listu. Zdroj: Lipavský (2000), upraveno.

Oblast vodní absorpce je charakteristická absorpčními pásy vody se středy vlnových délek cca 1400 nm, 1900 nm a 2700 nm, přičemž lokální maxima odrazivosti jsou přibližně ve vlnových délkách 1600 nm a 2200 nm. Pokud je porost postižen vodním stresem, projeví se právě v těchto vlnových délkách.

Vlastnosti půdního substrátu jsou zpravidla dalším z faktorů, který má vliv na množství prvků obsažených v rostlinách a tím i na jejich spektrální vlastnosti. Například nedostatek Fe a Mg se projeví žloutnutím listů, což ve své podstatě znamená úbytek chlorofylu a poté změnu v průběhu spektrální křivky porostů. Půda je ze své podstaty velmi heterogenním povrchem. Je velmi ovlivněna biotickými a abiotickými složkami, a z toho důvodu je poměrně složité interpretovat její vlastnosti na základě spektrálních charakteristik. Spektrální křivka půd se zpravidla vyznačuje pozvolným nárůstem odrazivosti se vzrůstající vlnovou délkou. Průběh spektrální křivky půd může být ovlivněn následujícími faktory:

- Minerální složení.
- Půdní vlhkost.
- Obsah organických látek.
- Textura (drsnot) půdního povrchu.

Minerální složení půd ovlivňuje jejich celkové zabarvení, tedy tón. Tón a jas jsou vlastnosti, které jsou postižitelné lidským okem a lze je tedy velmi dobře monitorovat ve viditelné části spektra. Obecně světlejší povrchy půdy mohou indikovat půdu s menším obsahem vody, či půdu erozně ohroženou. Tmavší povrchy půdy charakterizují půdu humózní či vlhčí. Světlejší povrchy způsobují vyšší odrazivost, zatímco tmavší či vlhké povrchy odrazivost snižují. Se zvyšujícím se obsahem vody v půdě se snižuje její odrazivost. Spektrální vlastnosti půdy odrážejí její aktuální stav a mohou být ovlivněny i agrotechnickými zásahy.

Velký vliv na spektrální vlastnosti povrchů může mít i prostorové rozlišení analyzovaného snímku. U snímku z bezpilotního prostředku se pohybujeme v řádech centimetrů, je tedy možné oddělit analyzované rostliny od půdního pozadí tak, aby půda nezkreslovala získané výsledky. Nicméně pro správnou interpretaci snímků a spektrálních vlastností porostu je na místě si uvědomit, v jaké fenologické fázi se porost nachází, a co je konkrétně účelem monitorování.

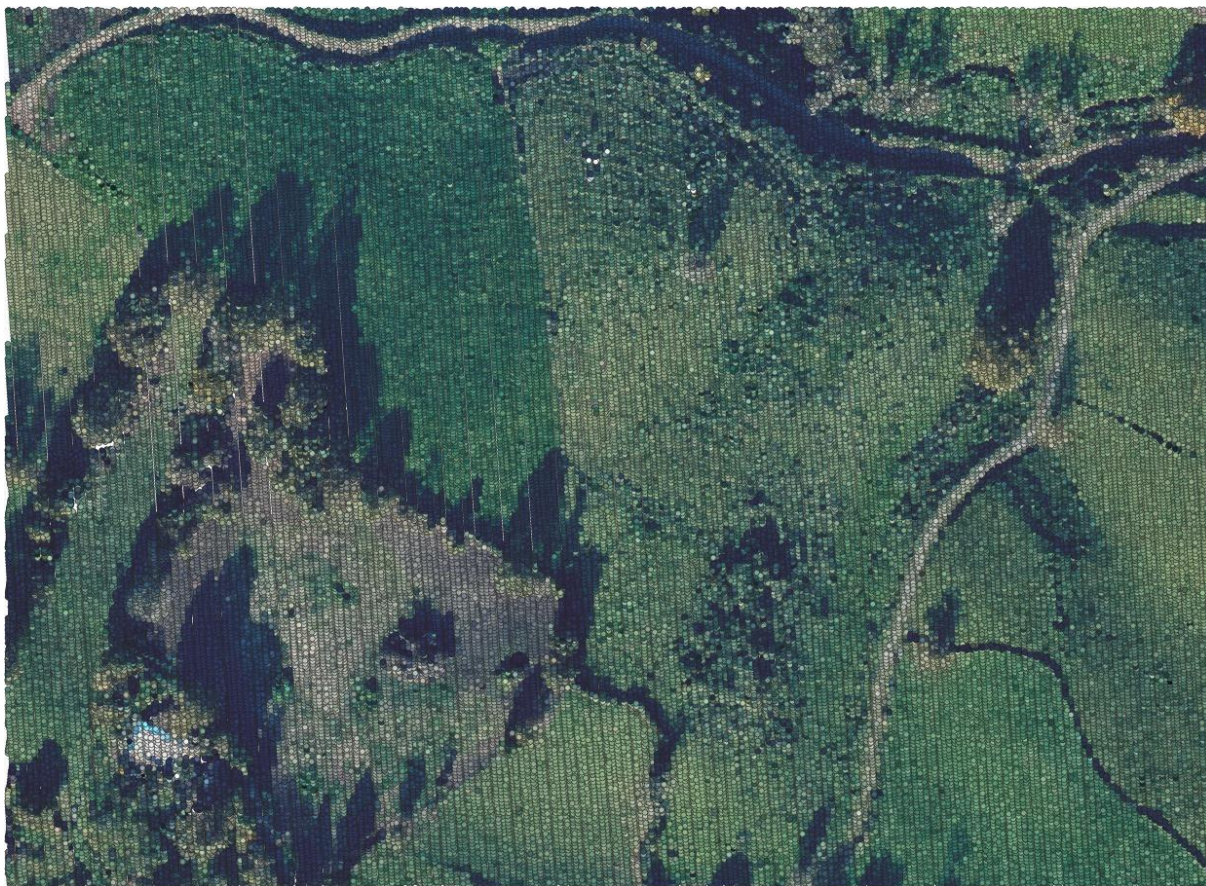
Z popsaných vlastností spektrálních charakteristik porostů lze usuzovat i na konkrétní účel využití. Mezi nejčastější účely využití patří detekce zdravotního stavu porostu, určení fenologické fáze a zapojení porostu. Půda se monitoruje především z důvodu zjištění erozního ohrožení. Snímky z bezpilotních prostředků je možné také využít pro plánování agrotechnických zásahů pro zefektivnění rostlinné produkce.

Živočišná výroba je navázána na rostlinnou výrobu. Účel využití UAV snímků v živočišné výrobě se pak může vztahovat na komplexní sledování stavu pastvin, jejich ohrožení suchem či erozí,

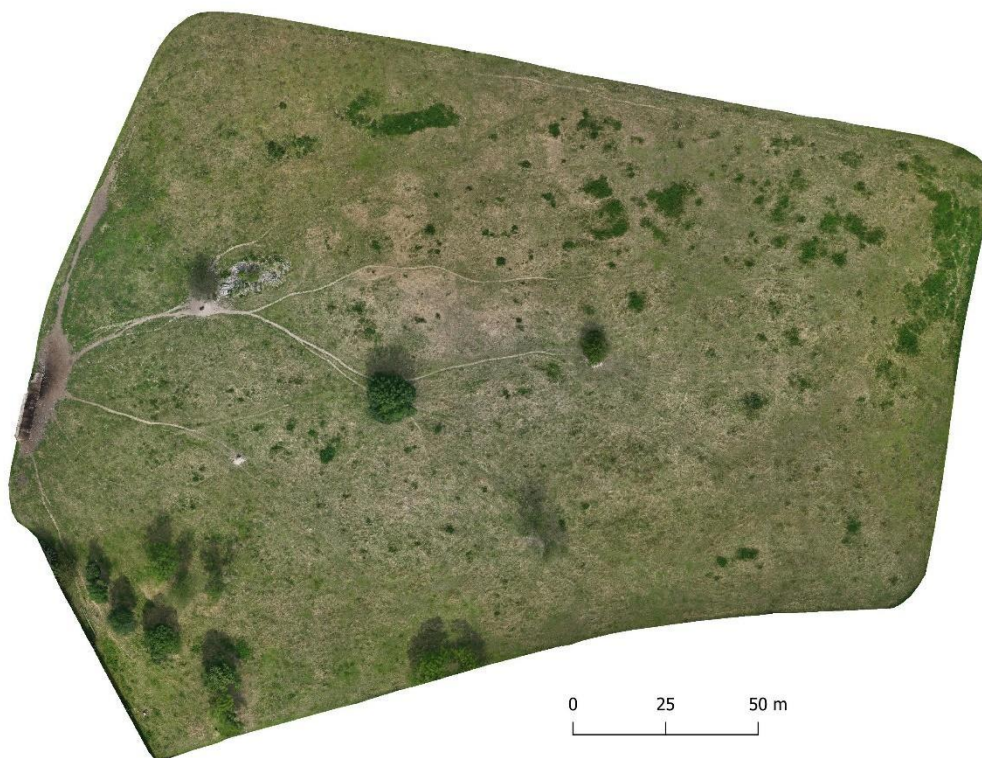
či detekci nedopasků. Z hlediska spektrálních charakteristik platí to stejné jako u zemědělských plodin.



Obr. X: Ortofoto pastvin účelově vytvořené pro detekci nedopasků, lokalita v severním Španělsku. Zdroj: vlastní, J. Kumhálová.



Obr. X: Bodové mračno skenovaných pastvin pro detekci nedopasků, lokalita v severním Španělsku. Zdroj: vlastní, M. Kohútek.



Obr. X: Ortofoto pastvin účelově vytvořené pro detekci nedopasků, lokalita v ČR. Zdroj: vlastní, J. Kumhálová.

Ortofoto mozaika (Obr. X a X) zobrazuje detailní pohled na pole vytvořený spojením desítek jednotlivých snímků pořízených dronem. Každý snímek byl zaznamenán s vysokou přesností a následně zpracován do homogenního celku, čímž vznikl obraz s konzistentním měřítkem a bez geometrických deformací. Tento proces umožňuje analýzu rozložení povrchu, identifikaci detailů a přesnou dokumentaci stavu zkoumané oblasti, což je zásadní pro vědecké i praktické aplikace v zemědělství, geodézii či environmentálních studiích.

Bodové mračno neboli „point cloud“ (Obr. x) získaný pomocí UAV zachycuje trojrozměrnou strukturu terénu a povrchu objektů prostřednictvím milionů bodů, z nichž každý obsahuje přesnou prostorovou polohu (XYZ souřadnice) a RGB hodnotu. RGB informace byla odvozena kombinací lidarových dat s barevnými snímky pořízenými kamerou, která byla synchronizována s lidarovým zařízením. Tato integrace umožňuje nejen detailní analýzu tvarů a struktury, ale také vizuální interpretaci objektů na základě jejich barevných vlastností. Z dat lze například odvodit odrazivost povrchů (intenzitu návratu signálu), což může být klíčové při určování materiálů či vegetačního pokryvu.

Využitelnost jednotlivých spektrálních pásem v zemědělské produkci

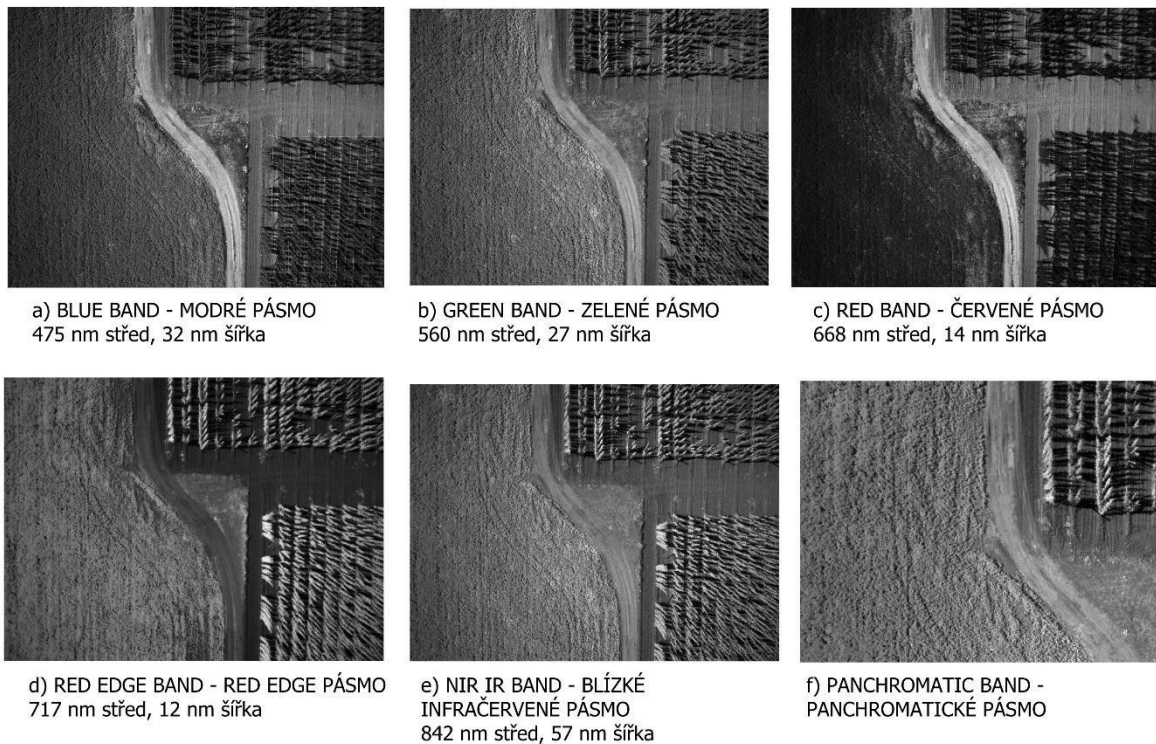
Využitelnost jednotlivých spektrálních pásem úzce souvisí s účelem jejich použití. Následující text se bude zaměřovat na obecně známé označení spektrálních pásem (BLUE, GREEN, RED, RED EDGE, NIR) bez ohledu na středy jejich vlnových délek a šířky pásem.

Spektrální pásma a jejich využití

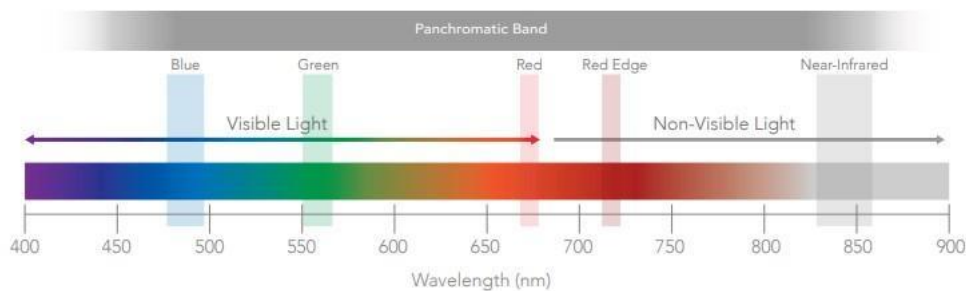
V tabulce 1 jsou uvedena spektrální pásma implementovaná v dostupných multispektrálních kamerách a uplatnitelná v zemědělství bez ohledu na příslušnost k dané značce kamery.

Tab. 1 – Využití jednotlivých spektrálních pásem.

Spektrální pásmo	Využití
BLUE	Odlišení vegetace od holé půdy
GREEN	Charakteristiky zelené vegetace, lokální maximum odrazivosti
RED	Odlišení ploch s vegetací od holé půdy, pásmo absorpce
RED EDGE	Nárůst odrazivosti u vegetace, zdravotní stav vegetace
NIR	Identifikace plodin, zdravotní stav a obsah biomasy, vlhkost půdy



Obr. X: Jednotlivá pásma multispektrální kamery MicaSense RedEdge-P s 5 spektrálními pásmy a panchromatickým modem.



Obr. X: Pozice jednotlivých pásem multispektrální kamery MicaSense RedEdge-P s 5 spektrálními pásmy a panchromatickým modem v elektromagnetickém spektru. (Zdroj: <https://ageagle.com/wp-content/uploads/2022/08/AgEagle-RedEdge-P-Brochure-EN.pdf>)

Na obrázku x a x jsou zobrazena jednotlivá spektrální pásma multispektrální kamery MicaSense RedEdge-P. Tato spektrální pásma názorně doplňují Tabulku x a demonstrují jejich využitelnost pro interpretaci stavu zemědělských plodin. Na obrázku x jsou rozlišitelné dvě odrůdy chmele, polní cesta, holá půda mezi chmelnicemi, a peluška. Modré pásmo zvýrazňuje zhuštěnou polní cestu, která je na obrázku nejsvětlejší, naopak vegetace se jeví jako hodně tmavá. Stejný trend má červené absorpční pásmo. Oproti tomu pásma zvýšené odrazivosti zelené vegetace (zelené, Red Edge a NIR pásmo) v různé míře světle zobrazují zelenou vegetaci. Elektromagnetické záření je v různé intenzitě v závislosti na vlnové délce u těchto

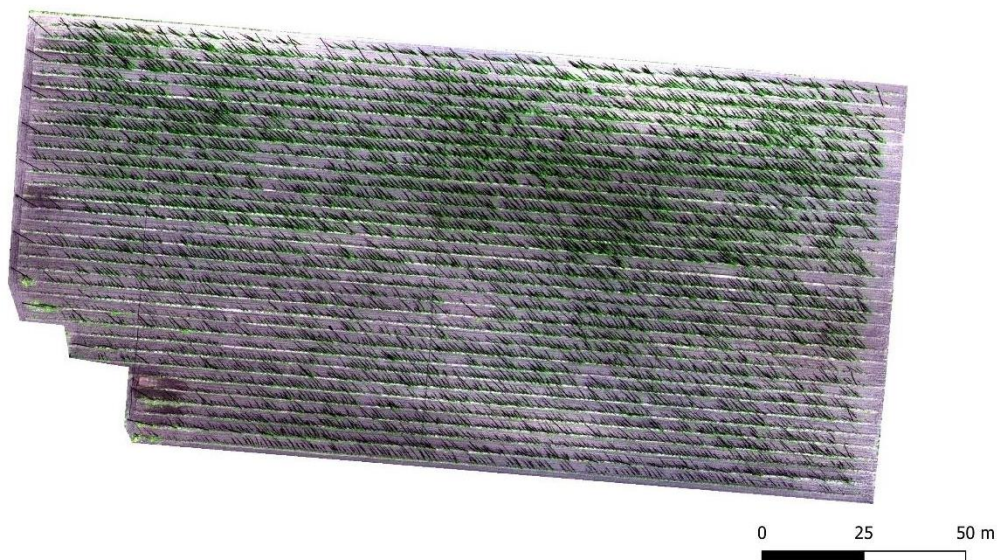
pásem odráženo zelenou vegetací (zeleným barvivem), proto se vegetace jeví jako velmi světlá v porovnání např. s holou půdou. Panchromatické pásmo s velmi vysokým prostorovým rozlišením slouží zejména pro tzv. pan-sharpening, tedy pro zvýšení finálního prostorového rozlišení obrazu (u zmíněné kamery až 2 cm při výšce snímání 60 m). Jelikož hodnocení samotného spektrálního pásma může být velmi efektivní, je vhodné pro zobrazení aktuálního stavu vegetace nespoléhat se pouze na odvozené vegetační indexy, ale zaměřit se i na jednotlivá pásma.

Barevné syntézy a jejich využití

Barevné syntézy neboli kombinace spektrálních pásem, umožňují pohled na snímek v jiných kompilacích spektrálních pásem, než to lidské oko dovoluje, tedy v nastavení RGB (viditelné části spektra). Mnohé barevné syntézy tak dovedou zvýraznit na snímku informace, které nejsou v tzv. pravých barvách vidět. Následující přehled barevných syntéz neobsahuje všechny možné kombinace, pouze jejich výběr.

RED-GREEN-BLUE

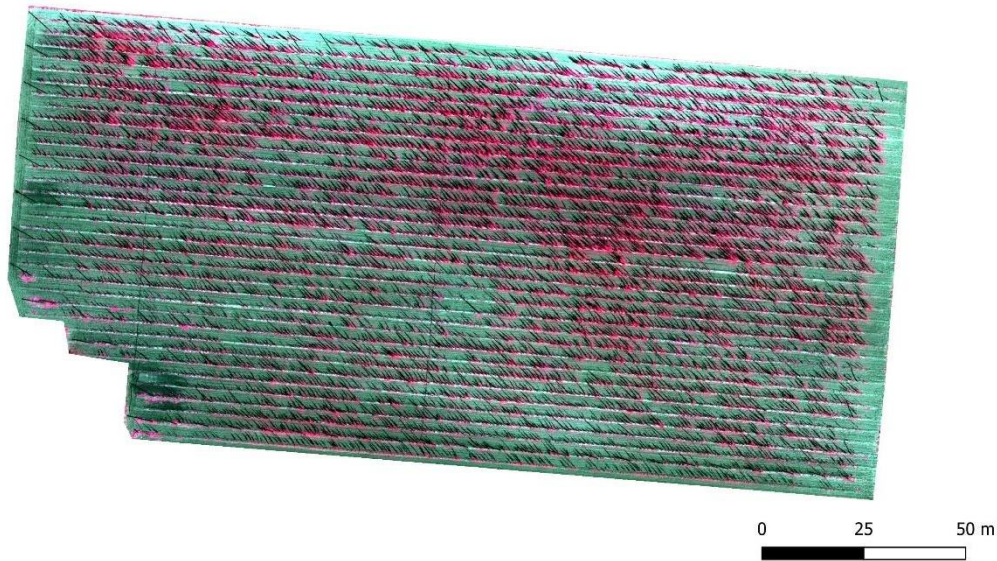
Jedná se o syntézu v pravých barvách tak, jak vidí svět lidské oko. Vegetace, na obrázku x chmelnice, se zde jeví v zelených odstínech, holá půda v odstínech hnědé. Kombinace těchto pásem někdy ztěžuje odlišitelnost objektů. Je vhodná především pro rychlý náhled stavu včetně velikosti objektu. Půda se může jevit heterogenně v závislosti na jejich vlastnostech, např. vlhkosti.



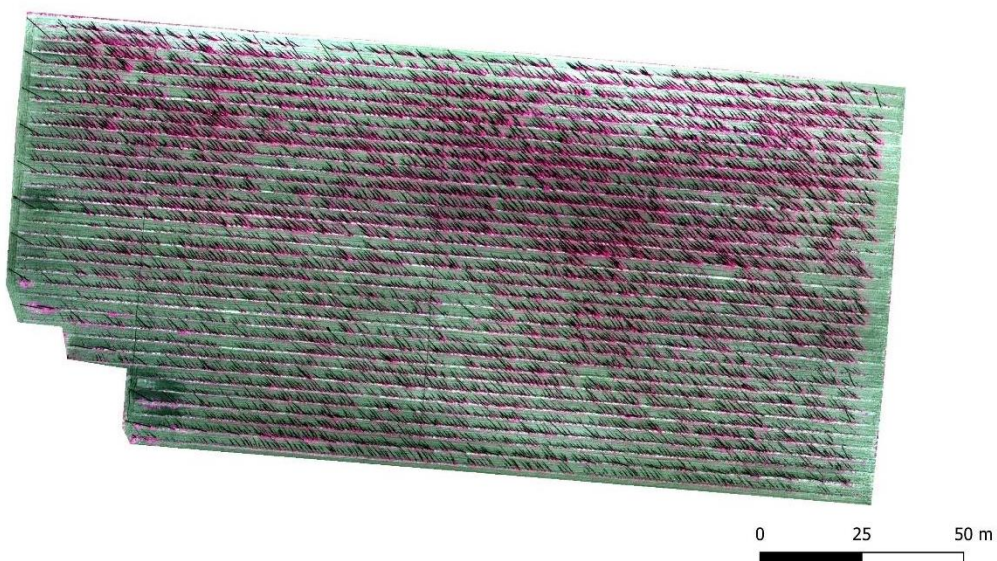
Obr. X: Syntéza v pravých barvách (RGB, viditelná část spektra). Snímek chmelnice je pořízen kamerou MicaSense RedEdge-P umístěnou na WingtraOne GEN II.

NIR-RED-GREEN

Jedná se o klasickou syntézu v nepravých barvách, skládající se ze dvou viditelných spektrálních pásem a pásma v blízké infračervené části spektra. Vegetace se zobrazuje v odstínech červené, protože právě NIR část spektra je pro vegetaci charakteristická výrazným nárůstem odrazivosti. Holá půda je v odstínech hnědo-zelené. Tato kompilace je vhodná především pro zjištění stavu vegetace, ať již zdravotního, tak i určení fenologických fází, včetně velikosti pozemků s pěstovanou plodinou, strukturu a zapojení porostu, nebo detekci jedinců. Stejně tak může posloužit barevná syntéza v nepravých barvách, kde figuruje místo NIR – RED EDGE pásmo (Obr.x).



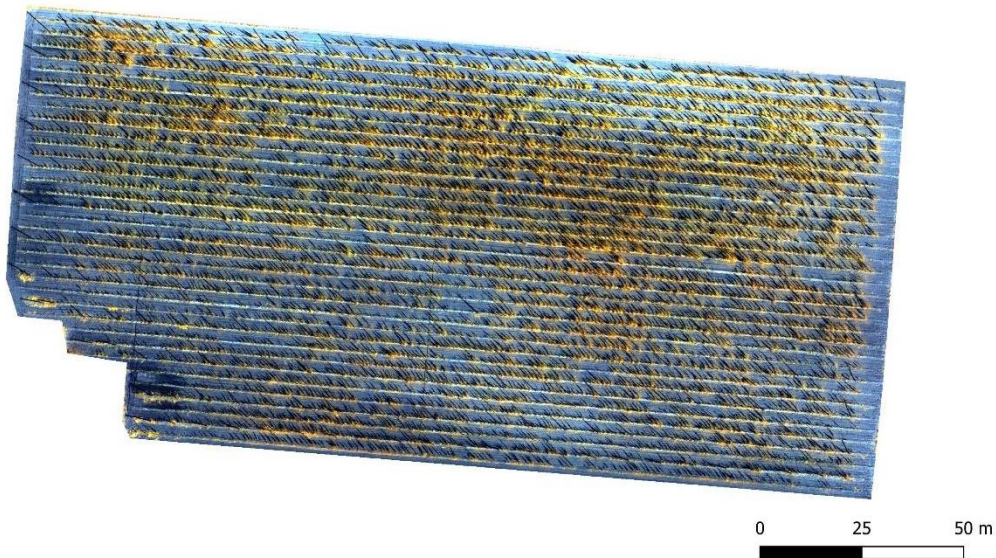
Obr. X: Syntéza v nepravých barvách (NIR-RED-GREEN). Snímek chmelnice je pořízen kamerou MicaSense RedEdge-P umístěnou na WingtraOne GEN II.



Obr. X: Syntéza v nepravých barvách (RED EDGE-RED-GREEN). Snímek chmelnice je pořízen kamerou MicaSense RedEdge-P umístěnou na WingtraOne GEN II.

Další příkladové barevné syntézy v nepravých barvách

NIR-RED EDGE-RED



Obr. X: Syntéza v nepravých barvách (NIR-RED EDGE-RED). Snímek chmelnice je pořízen kamerou MicaSense RedEdge-P umístěnou na WingtraOne GEN II.

RED-RED EDGE-NIR



Obr. X: Syntéza v nepravých barvách (RED-RED EDGE-NIR). Snímek chmelnice je pořízen kamerou MicaSense RedEdge-P umístěnou na WingtraOne GEN II.

Spektrální indexy a jejich využití

RGB kamery

Spektrální indexy, které lze vypočítat pro hodnocení fyziologických či strukturálních parametrů plodin, závisí především na počtu pásem, které jsou k dispozici na příslušné kameře. Na základě toho můžeme odvodit tzv. RGB indexy (z pásem ve viditelné části spektra) či indexy odvozené z multispektrální kamery. Tabulka x dává přehled o možných RGB indexech. Spektrální indexy nám stejně jako barevné syntézy či individuální pásma mohou poskytnou informace především o fyziologických a strukturálních parametrech porostu mezi které například patří zdravotní stav, kondice, vitalita a zapojení porostu; poškození biotickými i abiotickými faktory, počet jedinců a další.

Tabulka x. Přehled vybraných „RGB“ indexů využitelných v zemědělské praxi.

RGB index	spektrální	Algoritmus	Reference
Green Index	Percentage	$G\% = \frac{G}{R + G + B}$	Richardson a kol. 2007
Excess Green		$ExG = 2 \times g - r - b$	Woebbecke a kol. 1995
Excess Excess Red	Green-	$ExG - ExR$	Meyer & Neto, 2008
Green Leaf Index		$GLI = \frac{(G - R) + (G - B)}{2G + R + B}$	Gobron a kol. 2000; Hunt a kol. 2013

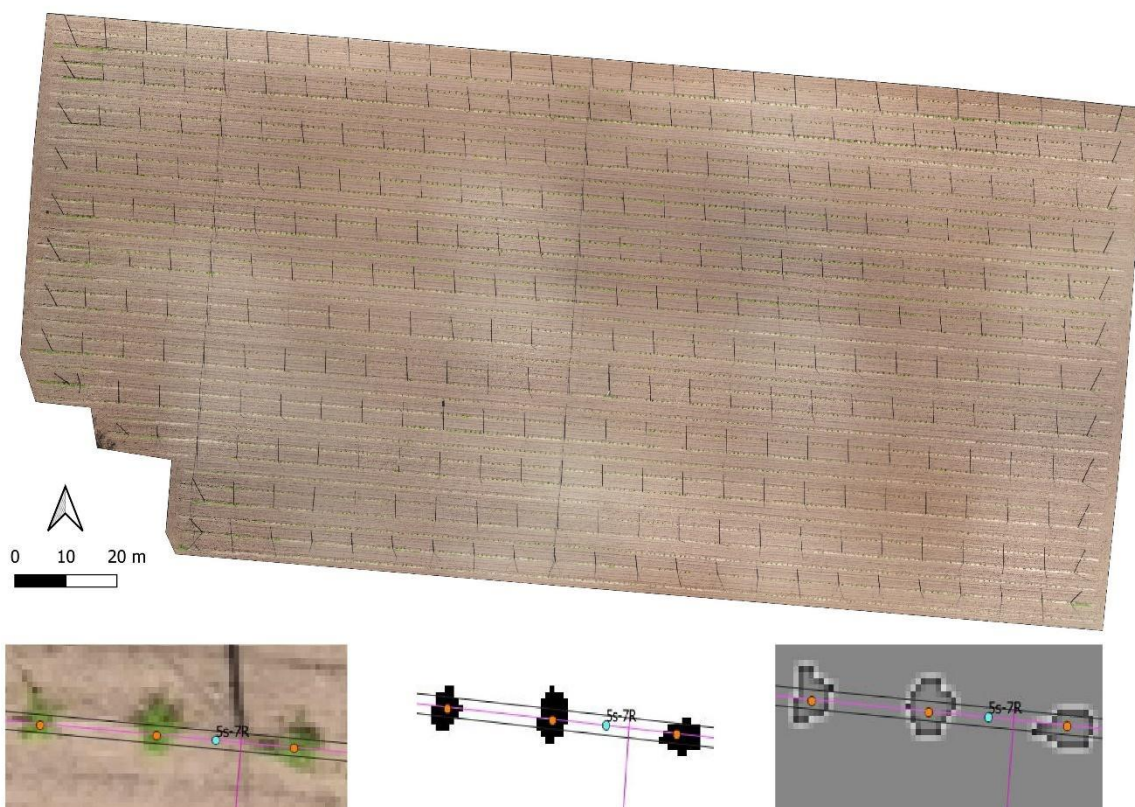
Red Green Blue Vegetation Index	$RGBVI = \frac{G2 - (B \times R)}{G2 + (B \times R)}$	Bendig a kol. 2015
Visible Atmospherically Resistant Index	$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$	Gitelson a kol. 2002
Normalised Green Red Difference Index	$NGRDI = \frac{G - R}{G + R}$	Falkowski a kol. 2005; Gitelson a kol. 2002; Kawashima & Nakatani 1998; Tucker 1979
Triangular Greenness Index	$TGI = G - 0.39 \times R - 0.61 \times B$	Hunt a kol. 2013

kde $g=G/(R+G+B)$; $b=B/(R+G+B)$; $r=R/(R+G+B)$; a green (G), red (R) a blue (B) jsou odrazivosti spektrálních pásem

RGB indexy je vhodné použít tam, kde není k dispozici tradiční a praxí prověřený normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI), který je postaven na odrazivosti NIR a RED pásma, či nějaká jeho alternativa. Z RGB indexů se nejvíce využívá Triangular Greenness Index (TGI) či Excess Green (ExG). Výsledná škála hodnot se hůře interpretuje v absolutních hodnotách, nicméně pro zjištění kvality porostu se lze celkem dobře spokojit s relativní škálou hodnot.

Tyto indexy je také možné použít pro tzv. prahování hodnot, kdy nastavíme kategorie například pro plochu vegetace a půdy. Zpravidla se používají binární modely (hodnoty 0 a 1 dle kategorie). Mezi nejčastěji používané patří Otsuova metoda (Otsu, 1979). Tato neparametrická metoda je založena na automatickém výběru prahu pro segmentaci obrazu, kdy např. hodnota 0 je rovna holé půdě a hodnota 1 představuje vegetaci. Výsledné binární rastry mohou být poté převedeny na vektorový model (polygony) pro výpočet plošných charakteristik, např. plocha zelené vegetace při abiotickém či biotickém poškození porostu, pomocí jednoduchého nástroje zonální statistiky. Výhodou je, že všechny výpočty je možné dělat ve volně dostupném SW QGIS.

Prahované RGB indexy je také možné využít pro ohraničení jedinců pro účely zjištění počtu rostlin. Na obrázku x je zobrazeno takovéto vymezení na příkladu chmelnice. Ve volně dostupném SW QGIS existují nástroje či pluginy zabývající se segmentací jedinců.



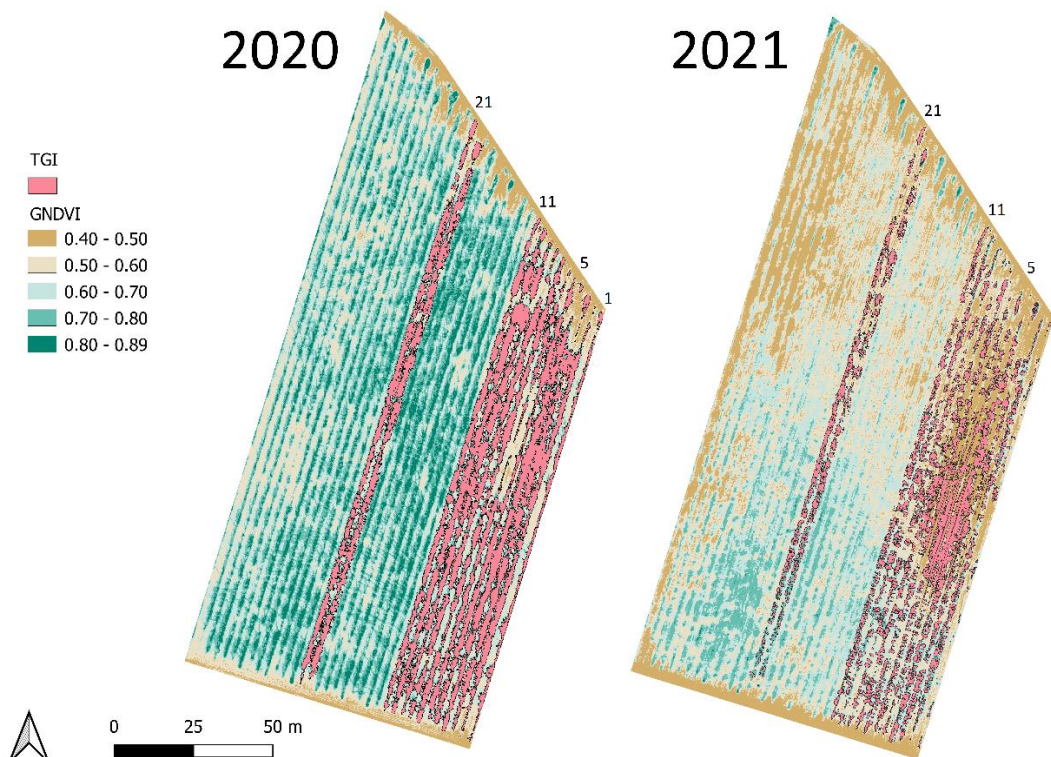
Obr. X: Zjišťování mezerovitosti porostu na organické chmelnici (Zdroj: vlastní).

Multispektrální kamery

Tak jako obyčejná nízkonákladová kamera může sloužit jako cenný zdroj informací minimálně pro zjištění plochy zelené vegetace, bezpilotní prostředky vybavené multispektrálními kamerami s blízkými infračervenými spektrálními pásmy (NIR a RED EDGE) mohou sloužit jako velmi cenný zdroj informací pro sledování vitality a struktury porostu až do úrovně jednotlivých rostlin (viz tabulka x). Vegetační indexy s NIR a RED EDGE pásmy jsou schopny zaznamenat drobné změny v kvalitě porostu napříč pozemkem. V tabulce Pro odvození aplikační mapy je opět vhodné použít metodu tzv. prahování hodnot, např. v rámci NDVI indexu nastavit několik kategorií podle škály absolutních hodnot indexu.

Spektrální index	Algoritmus	Využití	Reference
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Biomasa, vitalita	struktura, Rouse et al. (1974)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$	Chlorofyl	Gitelson et al. (1996)

Indexy z RGB a MS kamery lze vzájemně kombinovat v tom smyslu, že nejprve je možné vypočítat vegetační index např. pro zjištění obsahu chlorofylu a poté odseparovat zelenou vegetaci od půdního podkladu (viz Obr. x). Stejně tak lze pro prahování (stanovení kategorií) použít vegetační index NDVI, kategorie odseparovat (např. 0,3 – 0,6; 0,6 a výše) a počítat jiný vegetační index zvlášť pro každou kategorii.



Obr. X: Vymezení řad v chmelnici v letech 2020 a 2021, hodnocení pomocí indexů GNDVI a TGI. TGI index zde slouží jako zdroj binárního modelu, kde jsou definovány dvě třídy – zelená vegetace a půda (Zdroj: vlastní, J. Kumhálová).

Termální kamery

Více než 90 % vody absorbované plodinami je spotřebováno transpirací. Sledování transpirace plodin je důležité nejen z hlediska sledování dynamiky fyziologických procesů rostlin, ale hraje klíčovou roli v procesu řízení závlah a v kontextu hospodaření s omezenými zdroji. Termální infračervené (TIR) snímky pořízené z bezpilotních nebo pozemních platforem mají dostatečně vysoké rozlišení pro použití v precizním zemědělství. V současné době se většinou používají k

plošnému hodnocení nedostatku vody plodin právě UAV platformy, které mají vysoký výkon a dokáží v krátké době analyzovat rozsáhlé plochy.

Termální kamery na bezpilotních prostředcích se dají využít jak při senoseči pro záchranu narozených srnčat, tak i pro zjištění termální bilance porostu. Právě povrchová teplota porostu je základem pro výpočet tzv. Indexu vodního stresu rostlin (CWSI-crop water stress index).

Teplota povrchu rostlin je užitečná jako nástroj pro řízení zavlažování, protože souvisí se stavem vody jak v rostlině, ta i v půdě, a lze ji měřit neinvazivně pomocí dálkového průzkumu Země. Při transpiraci rostlin se při odpařování vody změnou skupenství (z kapalného na plynné) spotřebovává tepelná energie, která snižuje teplotu listů. Odpařující se voda odvádí teplo z rostlin, a to má za následek ochlazovací účinek. Snižováním evapotranspirace (ET) například vyčerpáním půdní vody se sníží rychlost odvádění tepla, což má za následek zvýšení teploty porostu. Tento proces spojuje teplotu porostu s vodním stresem plodin a evapotranspirací. Zjištění vodního stresu porostu a ET umožňuje racionální načasování zavlažování a také množství aplikované vody, což může zvýšit výnosnost, snížit vyplavování vody a živit mimo kořenový systém a zkrátit dobu potřebnou pro zavlažování.

Měření teploty porostu je možné pomocí radiometrů (senzorů) pracujících v tepelném infračerveném záření (8 až 14 μm). Protože všechny povrchy vyzařují tepelné záření, lze měřit teplotu na ploše od několik cm^2 až po několik km^2 . Tyto vlastnosti mohou přinášet výhody oproti senzorům, které vyžadují fyzický kontakt s rostlinou, a které často odebírají vzorky z plochy nebo objemu nedostatečně velkého na to, aby byly reprezentativní pro získání využitelných výsledků.

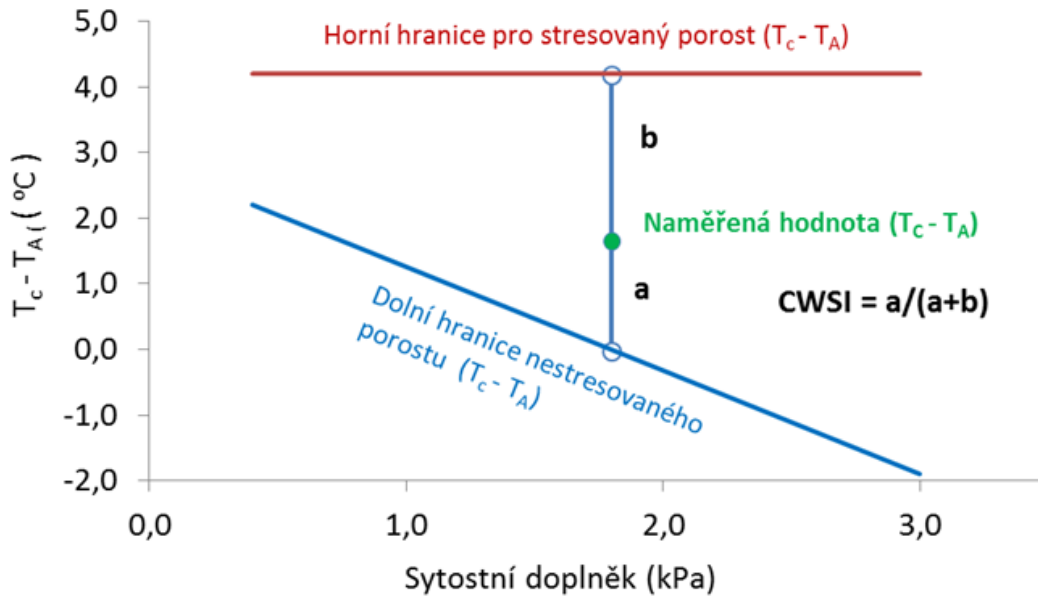
Teplota porostu je součástí energetické a vodní bilance komplexu „voda-rostlina-atmosféra“ a je výsledkem složitých interakcí se stavem vody, v půdě a v rostlinách, fenologií a mikroklimatem v porostu. Z tohoto důvodu jediné měření teploty porostu nevyovídá mnoho o stavu vody v rostlinách. Proto byly vyvinuty algoritmy, které různými způsoby integrují teplotu porostu s fyzikálním prostředím. Jedním z nich je „Index vodního stresu rostlin“ (*Crop Water Stress Index – CWSI*).

Slovo stres je v kontextu pěstování rostlin velmi široký pojem, který se používá k popisu určitého typu nepříznivého stavu, který může při delším trvání vést ke snížení výnosu. Vodní stres pak popisuje stav, kdy zásoba vody v listech rostlin brzdí fotosyntézu a dýchání. Nedostatek vody může být způsoben abiotickými stresy (tj. v důsledku vyčerpání vody) nebo biotickými stresy (tj. v důsledku škůdců nebo chorob, které brání přísunu vody do listů).

V podmínkách vodního stresu je transpirace snížena, což vede k přeměně většího množství dostupné energie na povrchu porostu na citelné teplo ve srovnání s podmínkami bez vodního stresu. Výsledkem je, že teplota povrchu porostu (tj. souboru listů) se zvýší oproti teplotě, která by byla výsledkem při nedostatku vody.

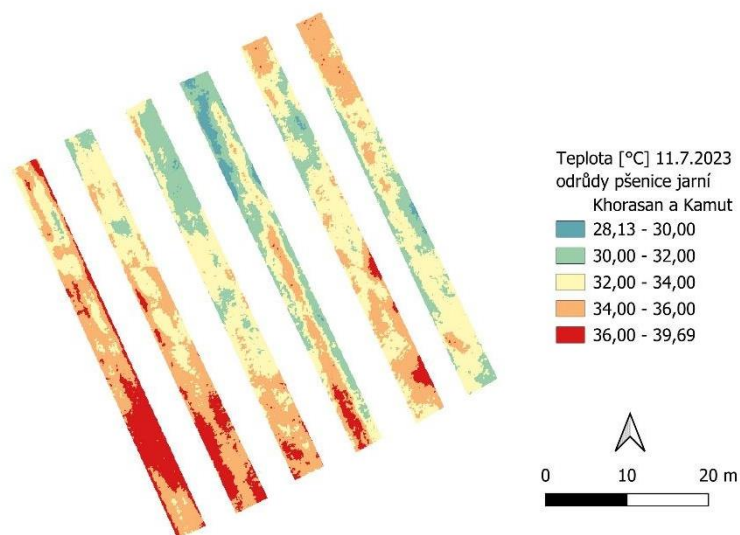
Index vodního stresu rostlin je nejčastěji využívaným indexem pro zjišťování vodního stresu a dá se vypočítat i pomocí volně dostupného SW QGIS pokud jsou k dispozici všechny vyžadované parametry. Je odvozen z energetické bilance, kde pro daný soubor meteorologických podmínek existuje rozsah rozdílů teplot porostu a vzduchu, který je

ohraňován dolní hranicí (žádný vodní stres) a horní hranicí (úplný vodní stres, kdy nedochází k ET). Naměřený rozdíl teplot porostu a vzduchu by měl spadat do těchto dolních a horních mezí a je normalizován jako index, kde hodnota nula znamená žádný vodní stres a hodnota jedna znamená úplný vodní stres (obr. x)

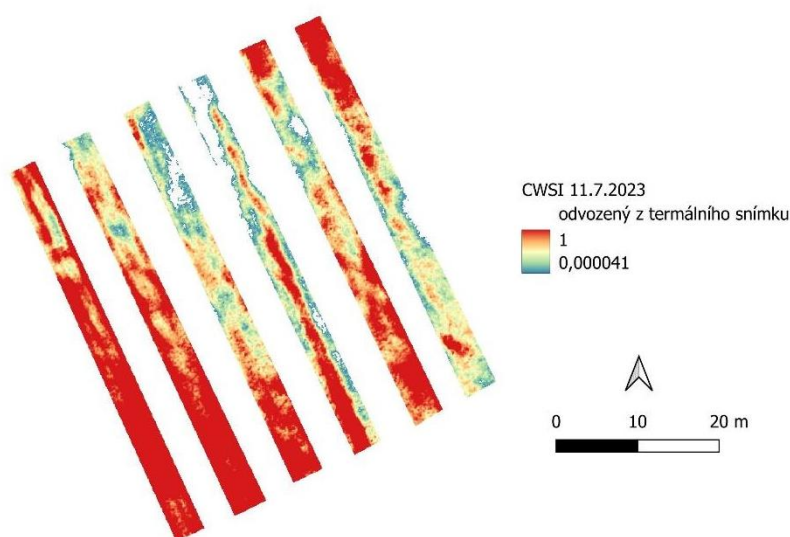


Obr. x Schématické znázornění výpočtu stresového indexu CWSI (podle Idso, 1981). T_C – teplota porostu, T_A - teplota vzduchu.

CWSI méně reaguje ve vlhkých podmínkách. Naopak nejlepší výsledky jsou dosaženy za jasné oblohy a v odpoledních hodinách. Závažným omezením CWSI a dalších algoritmů založených na teplotě porostu může být také neúplné pokrytí porostu. Teplota suché, sluncem osvětlené půdy může být o 30 °C vyšší než teplota zelené transpirující vegetace. Proto může být teplota porostu značně nadhodnocena, což vede také k nadhodnocení CWSI, pokud se v záběru radiometru objeví půda. Teplota zastíněné půdy se také obvykle liší od teploty vegetace, což může rovněž vnášet chyby do výpočtů CWSI. Pohled na vegetaci lze maximalizovat a půdu minimalizovat tím, že půdu odfiltrujeme a hodnotíme pouze zelenou plochu porostu.



Obr. X: Příklad termálního snímku z kamery Duet T umístěné na eBeex na parcelových odrůdových pokusech s pšenicí jarní (Zdroj: vlastní).



Obr. X: Příklad Crop Water Stress Indexu (CWSI) odvozeného z termálního snímku z kamery Duet T umístěné na eBeex na parcelových odrůdových pokusech s pšenicí jarní (Zdroj: vlastní).

Kromě využití vodního stresového indexu CWSI, je možné termografická data zpracovávat do podoby teplotních indexů i dalšími postupy (např.: DeJonge et al. 2015, Han et al. 2016, Ihuoma & Madramootoo, 2017, Gago et al. 2015).

$$1/ T_c - T_a$$

$$2/ D_{ANS}(h) = T_c(h) - T_{cNS}(h)$$

$$3/ TTT = \sum_{h=0}^{24} (h) \text{ kde } T_c > T_{critical}$$

$$4/ DACT = \max [0, (T_c - T_{critical})]$$

$$5/ iDANS = \int_{h=0}^{24} (T_c - T_{cNS}) dh = \sum_{h=0}^{24} ([T_c(h) - T_{cNS}(h)]) \quad 6/ iDACT = \int_{h=0}^{24} \max [0, (T_c - T_{critical})] dh = \sum_{h=0}^{24} \max [0, T_c - T_{critical}] \quad 7/ K_s = T_c \text{ ratio} = \frac{T_{cNS}}{T_c}$$

T_c = teplota povrchu rostlin (porostu) °C

T_a = teplota vzduchu °C

$T_{critical}$ = kritická fyziologická teplota porostu °C

T_{cNS} = teplota nestresovaného porostu °C

Další využitelné produkty fotogrammetrického zpracování snímku

Při managementu zemědělského pozemku se zpravidla reaguje na lokální rozdílnosti, které v jeho rámci mohou být a jak se ukazuje, zpravidla také bývají. Správným vyhodnocením vstupních dat a následně i vhodným obděláváním pozemku se dá dosáhnout jak ekologických, tak i ekonomických výhod. Významný vliv na výnosy zemědělských plodin má bezesporu také reliéf pozemku. Právě tvorba modelů topografických charakteristik je nezbytná ke správné predikci výnosů, k tvorbě lokálně specifických zón pro aplikaci hnojiv a chemických ochranných prostředků a také pro zmírnění erozní činnosti na pozemku. Topografie ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy erozními a naplavovacími procesy, obsahem organické hmoty a ze všeho nejvíce dostupností vody. Základem pro veškerá topografická modelování je tzv. digitální výškový model (*digital elevation model* – DEM nebo *digital terrain model* – DTM = *digitální model terénu*) pro analýzu terénu. Z těchto DTM jsou odvozeny některé topografické parametry, které jsou pak použity v analýze variability výnosu. Topografické parametry je možné rozdělit do dvou kategorií: 1. primární atributy, vypočítané přímo z DTM a 2. sekundární neboli složené atributy, vypočítané kombinací primárních atributů. Tyto sekundární atributy jsou fyzikálně založené nebo empiricky odvozené indexy, které mohou charakterizovat specifické procesy působící v krajině. Mnohé z nich popisují hydrologické procesy související s topografií, a jsou často označeny jako hydrologické atributy. Nejběžnější primární atributy jsou nadmořská výška, sklon reliéfu, orientace, zakřivení (horizontální i vertikální), délka toku a sběrná plocha odtoku. Podobně nejvíce používanými sekundárními atributy jsou směr odtoku, akumulace odtoku, index vlhkosti, index proudové síly, index

transportu sedimentů (*sediment transport index* – STI) nebo DFL index (vzdálenost od linií akumulace odtoku).

Bezpilotní prostředky umožňují naskenovat pozemky v takovém detailu, že je možné ze snímků fotogrammetrickým zpracováním vypočítat DTM ve velmi vysokém rozlišení až v řádu centimetrů či milimetrů. Takovéto modely nám mohou poskytnout informace o mikroprocesech, které ovlivňují např. distribuci vody na pozemku a významně tak mohou ovlivnit i výsledný výnos pěstované plodiny. Ve vědecké literatuře se velmi často uvádí vliv topografie na výnos. Zejména jsou zmiňovány vyšší výnosy v nižších pozicích terénu a široké spektrum hodnot výnosů v průměrných a vyšších nadmořských výškách v průměrných až suchých klimatických podmínkách, ale nižší výnosy byly naměřeny v nižších nadmořských výškách pozemku ve vlhčích letech. V letech, kdy byl objem srážek pod úrovní potřeby rostlin, se předpokládalo, že nižší místa pozemku by měla mít vyšší výnos. Voda má tendenci se akumulovat v konkávních místech a nižších pozicích terénu a lepší dosažitelnost vody vede k vyšším výnosům. Vlivy erozních efektů a vlastností terénu na půdní vlastnosti mohou ovlivnit vsakování vláhy a její uložení v půdě, proto je vhodné mapovat DTM velmi detailně. Analýza geomorfometrických parametrů může nejenom zlepšit pochopení vlivu topografie na růst plodin a jejich výnos, ale také na prostorovou variabilitu chorob, plevelů, kvality porostu atd. V rámci precizního zemědělství se sbírá velké množství dat, nicméně přeměnit tyto informace na rozhodovací procedury může být stále problém, jehož řešení vyžaduje množství zkušeností a může tak být bariérou k jejich zavedení do praxe zemědělského podniku. Nicméně existují SW (i volně stažitelné), které pracují s nástroji pro odvození topografických atributů jako se základními prvky výbavy, a stačí tak jen naskenovat pozemek a odvodit velmi přesný DTM.

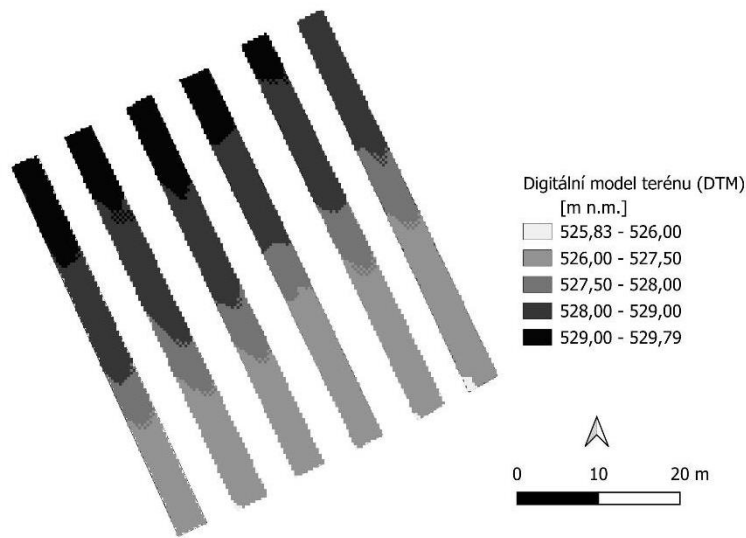
Z hlediska fotogrammetrických výstupů je DTM model (obr. X) mapované oblasti po odfiltrování objektů, jako jsou např. budovy. Lze jej exportovat také ve formátu rastrového souboru GeoTIFF. Každý pixel rastrového souboru obsahuje informace (X,Y,Z).

Proti tomu digitální model povrchu (*digital surface model* – DSM, obr. x) je model mapované oblasti i s objekty. Lze jej exportovat jako dva různé typy souborů:

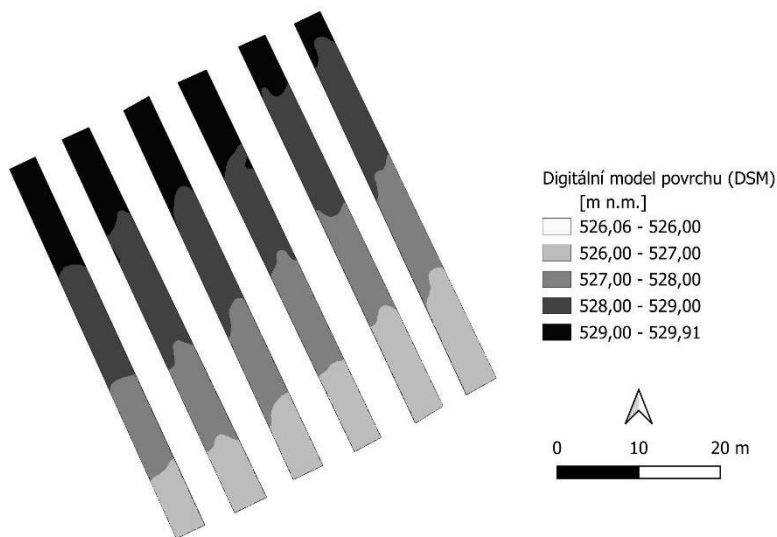
- Rastrový GeoTIFF.
- Mračno bodů (.xyz, .las, .laz).

Každý pixel rastrového souboru geotiff a každý bod mračna bodů obsahuje (X, Y, Z) informace.

Při použití přesné RTK korekce je možné na základě rastrové analýzy (DSM – DTM) vypočítat výšku objektů, např. stromů, porostu, keřů, plevelů na pastvině atd.



Obr. X: Digitální model terénu (DTM) – v případě zemědělského pozemku povrch holé půdy (Zdroj: vlastní, J. Kumhálová).



Obr. X: Digitální model povrchu (DSM = Digital Surface Model) – v případě zemědělského pozemku povrch porostu (Zdroj: vlastní, J. Kumhálová).

Literatura:

Bendig, J., Kang, Y., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L. & Bareth G. 2015. Combining UAV-Based Plant Height from Crop Surface Models, Visible, and near

- Infrared Vegetation Indices for Biomass Monitoring in Barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **39**, 79–87.
- Falkowski, M. J., Gessler, P. E., Morgan, P., Hudak, A. T. & Smith, A. M. S. 2005. Characterizing and Mapping Forest Fire Fuels Using ASTER Imagery and Gradient Modeling. *Forest Ecology and Management* **217**, 129–146.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **58(3)**, 289-298.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R. & Rundquist, D. 2002. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. *Remote Sensing of the Environment* **80**, 76-87.
- Gitelson, A. A., Viñã, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., Arkebauer, T.J. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters* **32**, L08403.
- Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M. M. & Widlowski, J. L. 2000. Advanced Vegetation Indices Optimized for up-Coming Sensors: Design, Performance, and Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **38(6)**, 2489–2505.
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M. & Akhmedov, B. 2013. A Visible Band Index for Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content at the Canopy Scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **21**, 103–112.
- Kawashima, S. & Nakatani M. 1998. An Algorithm for Estimating Chlorophyll Content in Leave Using a Video Camera. *Annals of Botany* **81(1)**, 49–54.
- Květener, G.E. & Neto, J.C. 2008. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and electronics in agriculture* **63**, 282-293.
- Lipavský, J. (2000). Precizní zemědělství ve světě a v České republice. In: Uplatňování precizního zemědělství v České republice. MJM Group a.s., Olomouc, 8-14.
- Otsu, N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **9(1)**, 62-66.
- Richardson, A. D., Jenkins, J. P., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V. & Smith, M.-L. 2007. Use of Digital Webcam Images to Track Spring Green-Up in a Deciduous Broadleaf Forest. *Oecologia* **152(2)**, 323–334.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S. C., Mercanti, E. P., Becker, M. (Eds.), Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1: Technical Presentations, NASA SP-351. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, pp. 309-317.
- Segarra, J., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. 2022. Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **107**, 102697.

Woebbecke, D.M., Meyer, G.E., Vonbargen, K. & Mortensen, D.A. 1995. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Trans. ASAE*, **38**, 259–269.

13. Sběr a zpracování dat

Pro sběr dat spektrální senzorovou technikou z UAV je nezbytné optimalizovat celý sled kroků s cílem získu maximálně kvalitních dat pro další zpracování, interpretaci a rozhodnutí. Kritickým faktorem pro provoz UAV jsou, kromě technické funkčnosti systémů, znalostí a schopností

provozu UAV, v praxi především meteorologické podmínky: 1/ vítr, 2/ teplota, 3/ osvětlení, 4/ vlhkost. Každý bezpilotní prostředek má definovanou limitní hranici provozní bezpečnosti ve vztahu k síle větru (např. 10m/s), která je specifická danému typu a konstrukci. V této souvislosti je podstatný i charakter vzdušného proudění - převládající směr větru, pravidelnost / nárazy. Vysoké letní teploty nad 30°C jsou nebezpečné z hlediska přehřívání celé soustavy nejen z hlediska samotné teploty, ale vzhledem k tomu, že teplý vzduch má nižší hustotu, což v případě multikoptér způsobuje zkrácení provozní doby (stejně jak vyšší rychlost větru). Nízké teploty (pod nulou či v okolí bodu mrazu) rovněž způsobují zkrácení provozu, zároveň mohou zbránit provozu UAV, když je teplota baterií příliš nízká. Kombinace teplot pod bodem mrazu a určité vlhkosti může způsobit námrazu vrtulí a znefunkčnění celé letecké soustavy. Osvětlení je kritickým faktorem jak z hlediska intenzity, tak úhlu dopadajícího světla, který je ve vztahu k času v průběhu roku proměnlivý. Nízká hladina osvětlení vyžaduje přizpůsobení rychlosti pohybu UAV vůči snímanému povrchu tak, aby byla zajištěna ostrost snímků. Ostrý nebo naopak příliš tupý úhel dopadajícího světla může degradovat kvalitu snímků do takové podoby, že není použitelná pro další zpracování v procesu ortorektifikace ani vyhodnocení samostatných snímků. S osvětlením souvisí i oblačnost, její charakter příp. absence, teplota světla. Optimální je difuzní charakter osvětlení, který zajišťuje rovnoměrně zatažená obloha v případě, že je zajištěna dostatečná světelná intenzita. Bezmráčná obloha je vhodná v případě, kdy je dodržena podmínka úhlu dopadu světla, které degraduje rovnoměrnost snímků. Obloha s proměnlivou oblačností je problematická vzhledem k potenciálním průmětům stínů oblak do snímků.

Nedílnou součástí sběru prostorových dat pomocí bezpilotních prostředků je osobní prohlídka zájmového. Při ní je zhodnocen stav a parametry pole, pro které je potřeba získat letecké snímky. Velmi podstatné je vyhodnocení svažitosti a potenciálních překážek jako je například elektrické vedení, vysoké stromy či ochranná pásma. Dále jsou potřeba vyřídít veškerá potřebná povolení k letu, která se týkají ochranných pásem letišť, chráněných oblastí a liniových staveb. Je potřeba začít včas, vyřizování povolení může trvat i několik týdnů. K vyhodnocení výše zmíněných rizik pomáhají online mapové služby, z nich si může uživatel udělat celkovou představu o zájmovém území ještě v předstihu. Pro základní informace o prostředí dostatečně poslouží Mapy.cz. Pro více podrobné znalosti prostředí je potřeba navštívit specializované geoportály. Takovými mohou být například geoportál ČUZK s katastrální mapou či Droneview od ŘLP, ve kterém uživatel najde podmínky k letu v dané oblasti. Nesmí se zapomínat na majitele pozemku, který zná specifika zájmového pole.

13.1 Vlícovací body

Při návštěvě zájmového území je možné zaměřit vlícovací body. Vlícovací bod je konkrétní bod na zemském povrchu se známými zeměpisnými souřadnicemi, který se používá jako referenční

bod v různých mapovacích a měřických aplikacích a aplikacích dálkového průzkumu Země. Tyto body slouží jako referenční značky pro georeferencování nebo rektifikaci leteckých nebo družicových snímků a zajišťují přesné prostorové umístění a vyrovnání. Takové objekty mohou být meliorační skruže, hydranty, rohy zdí nebo liniové značení na silnicích. Počet vlíčovacích bodů potřebných pro přesné georeferencování nebo rektifikaci závisí na několika faktorech, včetně velikosti mapované oblasti, požadované úrovně přesnosti a vlastností terénu. Obecně platí, že vyšší počet dobře rozmístěných vlíčovacích bodů povede k vyšší přesnosti, ale neexistuje pevný "optimální" počet použitelný pro všechny situace. Jako pravidlo platí, že pro malé až středně velké projekty je běžné použít alespoň tři až pět dobře rozmístěných vlíčovacích bodů. U větších projektů nebo v případech, kdy je vyžadována vyšší přesnost, mohou odborníci použít deset nebo více vlíčovacích bodů. Cílem je zajistit, aby vlíčovací body pokrývaly celou zájmovou oblast a reprezentovaly rozsah přítomných terénních prvků. Kromě toho je zásadní kvalita vlíčovacích bodů. Ke stanovení přesných souřadnic každého vlíčovacího bodu by měly být použity přesné měřické metody, jako je diferenciální GPS nebo měření totální stanicí.

13.2 Výběr senzoru bezpilotního prostředku

Na základě požadavků na výsledky analýzy se vybere dron nesoucí vhodný sensor. Nejčastěji je zájmové území snímáno multispektrální a termální kamerou dronů DJI Enterprise. Tyto typy kamer, pokud jsou integrovány s bezpilotními letouny, rozšiřují možnosti leteckých platform pro širokou škálu aplikací. Zatímco kamery RGB jsou skvělé pro vizuální kontrolu, multispektrální a termální kamery nabízejí další informace pro specializované úlohy, jako je precizní zemědělství a termální analýza. RGB sensory snímají obraz ve viditelném světelném spektru, podobně jako lidské oko. Vytvářejí plnobarevné obrazy s červeným, zeleným a modrým kanálem. Multispektrální kamery zachycují světlo ve více pásmech, včetně těch mimo viditelné spektrum, jako je infračervené. Mohou mít dvě nebo více samostatných pásem, z nichž každé poskytuje jedinečné informace. Termokamery detekují infračervené záření vyzařované objekty a převádějí je na údaje o teplotě. Vizualizují spíše teplotní rozdíly než tradiční barvy.

13.3 Plánování mise

Po získání potřebných povolení je naplánována mise. Mise se plánuje přímo v ovladači DJI RC Pro Enterprise. Do ovladače se importuje geometrické zakreslení zájmového území, tzv. polygon z LPIS, případně se manuálně zakreslí. Optimalizace parametrů mise dronu v přesném zemědělství zahrnuje zvážení různých faktorů, které zajistí přesný sběr a analýzu dat.

Výška:

Optimální výška snímání nad povrchem (AGL-above ground level) závisí na požadovaném výsledném pozemním rozlišení a typu použitého senzoru. Vyšší hodnota AGL může zajistit pokrytí větší plochy, zároveň může vést ke snížení prostorového rozlišení. Hodnotu AGL je nezbytné zvážit i vzhledem k času potřebnému k nasnímaní zájmové plochy ve vztahu k aktuální meteorologické situaci, proměnlivosti větru, světelných podmínek i dostatečnému počtu baterií, případně možnostmi operativního dobíjení.

Dopředný a boční překryv:

Dopředný překryv se týká procenta překrytí snímků ve směru dráhy letu, zatímco boční překryv je překrytí mezi sousedními letovými liniemi. Vyšší překryv zajišťuje více redundantních dat, potřebných pro tvorbu přesných map a modelů. Obvyklé hodnoty jsou v rozmezí 75-85 % pro dopředný i boční překryv. Vyšší hodnoty jsou žádoucí zejména v případě snímání multispektrálním, hyperspektrálním senzorem a termálním senzorem. U RGB senzoru je možné využívat nižší překryv

Rozlišení pozemního pixelu :

Rozlišení pozemního pixelu (GSD - ground sample distance) je vzdálenost mezi středy pixelů na zemi. Menší hodnoty GSD (např. 1cm/px) generují vyšší prostorové rozlišení, ale mohou vyžadovat létání v nižších výškách. GSD se automaticky odvozuje z letové výšky ve vztahu k fyzickému rozlišení senzoru a ohniskové vzdálenosti objektivu. Vyšší hodnoty GSD (např. 10cm/px) znamenají nižší výsledné prostorové rozlišení snímků resp. výsledné ortofotomosaiky

Rychlost letu:

Rychlost letu ovlivňuje dobu potřebnou k pokrytí zájmové oblasti a může ovlivnit kvalitu obrazu nežádoucí pohybovou neostrostí. Pro pořízení vysoce kvalitních snímků se obecně doporučuje střední a stálá rychlost, kde do úvahy zároveň vstupují světelné podmínky, které operátor nebo automatika expozimetru senzoru v parametrech citlivost (ISO), clona, rychlost závěrky.

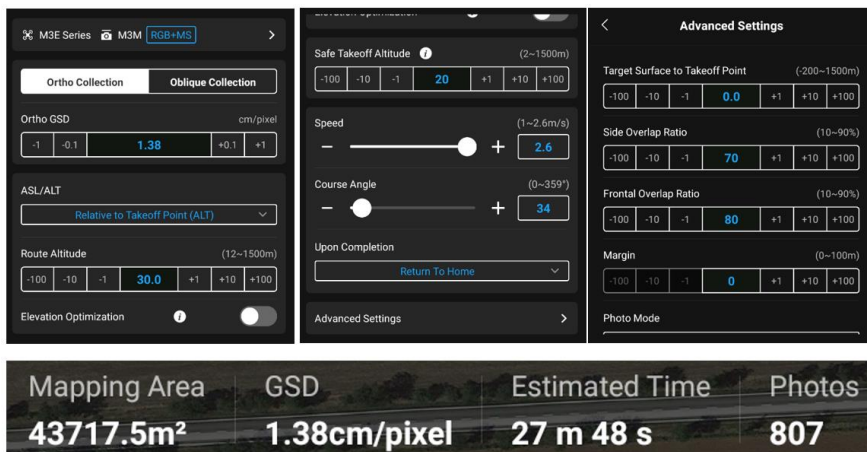
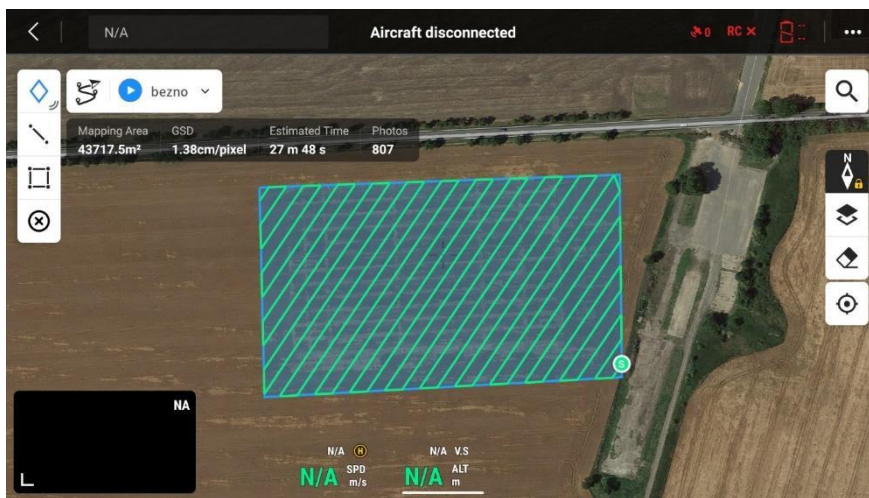
Povětrnostní podmínky:

Je nutné létat za vhodných povětrnostních podmínek a vyhnout se silnému větru, dešti nebo nepříznivému počasí, které může ovlivnit stabilitu dronu a kvalitu sběru dat. Meteorologické podmínky je vhodné nezbytně průběžně sledovat a vyhodnocovat nejen s ohledem na kvalitu sběru dat, ale i potřeby zajištění bezpečnosti provozu. V této souvislosti je nezbytné si uvědomit, že rychlost větru s letovou výškou stoupá. Je-li v hraničních hodnotách při zemi, zcela jistě bude kritická až ohrožující ve vyšších letových hladinách. Nejkomplikovanější situace bývá při nárazovém větru. I při podmínkách umožňující provoz je vždy nezbytné v místě

vyhodnotit, zda pohyb snímaného porostu není takový, který by negativně ovlivnil výsledné spektrální informace.

Přesnost GPS:

Systém GPS dronu musí poskytovat přesné údaje o poloze. To je zásadní pro správné georeferencování a zarovnání snímků. Před započítím i během každé mise je vhodné kvalitu signálu a kontektivitu sledovat, jakkoliv moderní systémy jsou v tomto procesu již automatizované a defekty signalizují.



Po nastavení všech parametrů se provede odhad délky mise a počtu pořízených snímků.

13.4 Předletová kontrola

Před každým letem dronu je nutné provést důkladnou předletovou kontrolu, zkontrolovat fyzický stav dronu, zkontrolovat stav baterie a připojení a zajistit správnou funkčnost dálkového ovladače. Je potřeba ověřit sílu signálu GPS a kalibraci kompasu dále otestovat senzory, kamery a gimbal. Dále musí pilot zvážit povětrnostní podmínky, nouzové postupy a faktory prostředí, jako jsou překážky. Vždy je povinnost dodržovat místní letecké předpisy a používat systematický kontrolní seznam před letem, aby byla zajištěna bezpečná a úspěšná mise.

13.5 RTK

Pro zpřesnění polohy dronu je vhodné využívat RTK. RTK (Real-Time Kinematic) v dronech zvyšuje přesnost GPS na centimetrovou úroveň v reálném čase. Funguje tak, že využívá pozemní základnovou stanici k přenosu korekčních signálů do dronu, což snižuje běžné chyby GPS a zvyšuje celkovou spolehlivost dat. Drony vybavené RTK umožňují efektivní sběr dat, optimalizují využití zdrojů v zemědělství a poskytují okamžité, vysoce přesné určování polohy pro úkoly vyžadující okamžité výsledky. I když to může znamenat vyšší složitost a náklady, zvýšená přesnost ospravedlňuje její použití v profesionálních aplikacích s drony, kde je přesnost nejdůležitější. V České republice provozuje síť referenčních míst ČÚZK pod názvem CZEPOS.

13.6 Realizace snímání

Při průběhu mise je pilot stále zodpovědný za chování dronu a nese následky v případě nehody. Je tedy nezbytné, aby v průběhu mise měl neustálý oční kontakt s dronem, tzv. VLOS. Bližší informace o všech povinnostech pilota dronu jsou k nalezení na webu Úřadu pro civilní letectví www.caa.cz. V případě nenadálé situace je povinen misi přerušit. Dále je povinen hlídat stav baterie. Ty jsou sice nastavené tak, aby se dron při poklesu napětí pod určitou mez vrátil na místo vzlet, nicméně se stále jedná pouze o techniku, která se může chovat nestandardně. Snímky jsou průběžně ukládány na SD kartu umístěnou přímo v dronu.

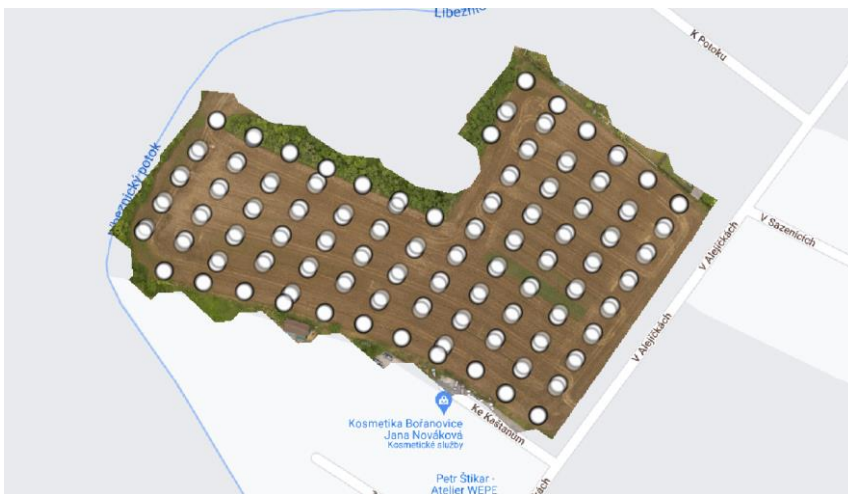
Péče o baterie je klíčová pro zajištění bezpečných podmínek provozu. Účinná správa baterií dronů zahrnuje předletové kontroly nabití a fyzického stavu, sledování teploty baterií, používání schválených nabíječek a skladování baterií v doporučených teplotních rozmezích. Zásadní význam má zamezení přebíjení a úplnému vybití baterií a zohlednění životního cyklu baterií. Pravidelné kontroly, výměna poškozených nebo stárnoucích baterií a vhodné skladování náhradních dílů zajišťují bezpečný a spolehlivý provoz dronů.

13.7 Zpracování dat

Po návratu z terénu nastává fáze zpracování dat. Snímky jsou staženy z SD karty do počítače a uloženy do předem strukturovaných složek. Efektivní správa dat fotografií z dronů zahrnuje vytvoření uspořádané struktury souborů s konzistentním pojmenováním, využití metadat pro další informace, zavedení spolehlivých zálohovacích postupů a zajištění bezpečnosti dat pomocí šifrování. Měla by být prováděna kontrola kvality s cílem vyloučit duplicity nebo nerelevantní snímky. Dále je třeba zvážit kompresi snímků pro efektivitu. Zásadními aspekty jsou také dodržování právních a regulačních požadavků, systematická archivace starších datových sad a vedení podrobné dokumentace pro budoucí použití a analýzu.

13.8 Software

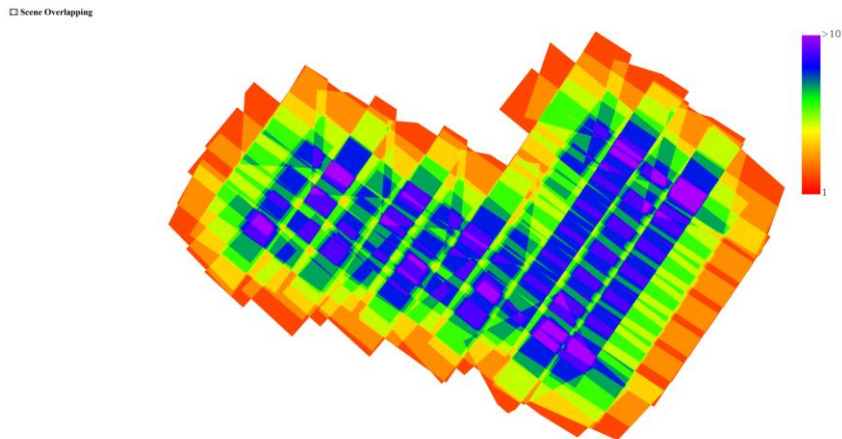
Jednotlivé snímky je potřeba spojit do jedné mosaiky. K tomu slouží námi využívaný software DJI Terra nebo Pix4D Fields. Vytvoří se nový projekt, do kterého se naimportují veškeré pořízené snímky. SW umí rozlišit jednotlivá pásma od sebe a bude vytvářet pro každé pásmo vlastní mosaiku.



Body na snímku zobrazují pozici snímání jednotlivých fotek.

V případě snímkování pomocí dronu značky DJI není třeba provádět radiometrické korekce, neboť drony disponují vlastním senzorem, který koriguje každý snímek již při pořízení. V DJI Terra je celý proces zautomatizovaný. Uživatel nastavuje jen kvalitu požadovaného výstupu případně redukci potenciálních obrazových vad. Po doběhnutí procesu tvorby mosaiky se vygeneruje quality report, který je podstatný pro zhodnocení přesnosti spojení snímků a

odhalení možných chyb. Požadovaná přesnost je často dána zadávací dokumentací. Je proto dobré si všimnout hlavně parametrů Georeferencing RMSE a Reprojection error RMS. Na obrázku níže je vidět příčný a podélných překryv pořádaných snímků. Čím více snímků zachycuje jeden bod, tím přesnější výsledek uživatel dostane. Samotná přesnost bez využití RTK a vlíčovacích bodů je pak znázorněna v tabulce Reconstruction Accuracy.



☰ Reconstruction Accuracy

Connected Components	1
Max Components Images	97
Projections	141566
Tie Point	47830
Reprojection Error RMS	0.627 px
Georeferencing RMSE	0.143 m

Výsledné mosaiky jsou uloženy jako geoTiff pro následující zpracování či výpočty vegetačních indexů. Práce s rastry probíhá ve specializovaných GIS programech jako je například QGIS nebo pomocí skriptů napsaných v jazyce R.

14. Legislativa UAS

Legislativní vymezení bezpilotních leteckých systémů (UAS)¹ vychází z regulačního rámce Evropské unie², který zajišťuje základní pravidla pro provoz ve všech zemích EASA (EU, Lichtenštejnsko, Švýcarsko, Norsko a Island). Provozovatel a pilot dronu musí také zohlednit lokální pravidla, resp. národní legislativu. V rámci ČR mluvíme o Zákonu o civilním letectví (Zákon č. 49/1997 Sb.), opatřeních obecné povahy (OPP – LKR10-UAS), ale také o využívání digitální mapy geozón (DronView). Vzhledem ke komplexnosti a rozsahu legislativy budou v této kapitole psány základní části, které se vztahují k provozu UAS pro využití v zemědělství.

Provoz UAS je rozdělen do kategorií otevřená „Open“ (dále dělena do podkategorií A1, A2 a A3), specifická „Specific“ a certifikovaná „Certified“. Základně lze bezpilotní prostředky do dané provozní kategorie rozdělit dle štítku (C0-C6), kterým musí být UAS od 1.1.2023 označován výrobcem. Označení C5 a C6 označuje kategorie, které spadají do provozu specifické kategorie podle pravidel „U-space“. Váhové kategorie (Tab. 1) podléhají povinné registraci provozovatele na ÚCL. Na základě váhové a provozní kategorie lze stanovit požadovanou způsobilost a minimální věk pilota.

Tab. 1: Kategorie C0-C6

Kategorie	Maximální vzletová hmotnost ³
C0	MTOW < 250 g
C1	MTOW < 900 g
C2	MTOW < 4 kg
C3 a C4	MTOW < 25 kg
C5 a C6	MTOW > 25 kg

Zdroj: Vlastní zpracování z regulačního rámce Evropské unie

Provozovatel⁴ je povinen označit přiděleným registračním číslem (např. CZE0zvg5hrmuvc8w-XXX⁵) všechna jím provozovaná bezpilotní letadla. Zároveň je registrační číslo používáno i pro e-identifikaci, pokud je jím UAS vybaveno. Dále je třeba vypracovat písemné provozní

¹ „Bespilotním systémem“ bezpilotní letadlo a vybavení pro jeho řízení na dálku

² Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139, Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2020/639, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2020/746, Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2020/1058, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2021/664, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2021/665, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2021/666, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2021/1166, Prováděcí nařízení Komise (EU) 2022/425

³ Včetně paliva a užitého zatížení

⁴ Provozovatel dronu je osoba (fyzická/právnícká), která vlastní dron(y) nebo si dron pronajímá.

⁵ CZE jako kód členského státu, následovaný 12 alfanumerickými znaky generovanými systémem, kontrolním součtem a třemi neveřejnými znaky (citlivý údaj – neposkytovat dalším osobám).

postupy⁶. Důležité je také ověřit, že v oblasti provozu není rádiové rušení, které by mohlo ovlivnit spojení C2 (command and control) dronu. Pro každý jednotlivý let je třeba jmenovat dálkově řídicího pilota, aby bylo jasné, kdo je odpovědnou osobou za let. Dálkově řídicí pilot a podpůrný personál provozu dronu by měli být seznámeni s uživatelskou příručkou a postupy provozovatele dronu, mít odpovídající odbornou způsobilost a mít k dispozici relevantní informace týkající se jakékoli zeměpisné zóny publikované státem. Dále je nezbytné zajistit, aby mapy v systému „geo-awareness“ dronu byly aktuální, pokud nelétáte v zeměpisné zóně, kde se geo-awareness nepožaduje. Pokud nepoužíváte soukromě zhotovený dron, je nutné mít prohlášení o shodě s označením CE a dron musí být opatřen štítkem třídy (C0 až C4), není-li dron uveden na trh před aplikací příslušných nařízení EU. Osoby zapojené do provozu dronu jsou si vědomy rizik spojených s provozem v podkategoriích A2 a A3.

V případě specifické kategorie lze zmínit dále povinnost uchovávat záznamy o provozu UAS, zajistit že pilot a odpovědný personál splňují podmínky předepsané touto kategorií, poskytnout pilotovi pokyny k minimalizaci obtíží působené hlukem a emisemi, zajistit opatření na ochranu před protiprávními činy a neoprávněným přístupem.

Od roku 2023 je také nezbytnou součástí pojištění odpovědnosti, které slouží k zajištění náhrady za případné škody způsobené provozem dronu, ať už se jedná o náklady spojené s opravou nebo náhradou poškozeného majetku, léčebnými náklady, odškodněním za způsobené zranění nebo náhradou za škody na životním prostředí.

⁶ Pokud provozovatel dronu zaměstnává více než jednoho dálkově řídicího pilota, tyto postupy musí být písemné. V případě, že dálkově řídicí pilot je pouze jeden, postačí, pokud dodržuje postupy stanovené výrobcem v uživatelské příručce.

Tab. 2: Pojištění odpovědnosti

Kategorie provozu	Otevřená			Specifická
	A1	A2	A3	
Povinné pojištění odpovědnosti	Ne	Ano	Ano, pokud MTOW je větší než 4 kg	Ano
Možnost hromadného pojištění	Ano			Ne
Výše limitu pojistného plnění	Ne	1 mil. Kč/událost	MTOW od 4 kg do 20 kg vč. – 1 mil. Kč/událost MTOW nad 20 kg – přes 20 mil Kč/událost	MTOW do 0,91 kg včetně – 2 mil. Kč/událost MTOW od 0,91 kg do 7 kg včetně – 5 mil. Kč/událost MTOW od 7 kg do 20 kg včetně – 10 mil. Kč/událost MTOW od 20 kg – přes 20 mil. Kč/událost

Zdroj: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/pojisteni-odpovednosti/>

Otevřená kategorie

Otevřená kategorie provozu je určena pro UAS, která mají označení štítkem C0-C4; soukromě zhotoveny (MTOW je nižší než 25 kg); nemají štítek s označením třídy „C“ (zakoupeny před 1.1.2024). Provoz UAS je dále omezen dle podkategorií A1, A2, A3 a zároveň je nutné dodržovat maximální letovou výšku 120 metrů nad úrovní terénu (AGL)⁷; provoz pouze ve vizuálním dohledu (tzv. VLOS) nebo lze využít pozorovatele UA; nesmí být prováděn let nad zásahy IZS, shromážděním osob a nezapojenými osobami⁸; nesmí probíhat přeprava nebezpečného zboží⁹ a shazování jakéhokoli materiálu. V případě, že UAS nemá štítek¹⁰ s označením třídy „C“, tak lze využít podkategorii provozu A1 v případě, že MTOW je menší

⁷ V případě přeletu umělé překážky (vyšší než 120 m) je nutný souhlas vlastníka překážky (15 m nad výškou překážky, nejvýše 50 m horizontálně od překážky).

⁸ Nezapojené osoby – výjimkou je štítek C0, C1 a individuálně postavený dron či bez štítku do MTOW 250 g – ve všech případech je nutné dobu přeletu co nejvíce zkrátit a postupovat s mimořádnou opatrností.

Štítek C2 – pravidlo 1:1 (např. výška 50 m nad zemí, místo provozu musí mít hranice alespoň 50 m ve všech směrech), v případě „low-speed mode“ se lze přiblížit na vzdálenost 5 m, jinak 30 m.

⁹ „Nebezpečné zboží“: výbušniny (nebezpečí masivního výbuchu, nebezpečí tlakové vlny nebo zasažení částicemi, menší nebezpečí tlakové vlny, velké nebezpečí požáru, trhaviny, výbušniny s extrémně nízkou citlivostí); plyny (hořlavý plyn, nehořlavý plyn, jedovatý plyn, kyslík, nebezpečí vdechnutí); hořlavé kapaliny (hořlavé kapaliny; palivový, topný olej, benzin); hořlavé tuhé látky (hořlavé tuhé látky, samozápalné pevné látky, nebezpečné za vlhka); oxidanty a organické peroxidy; toxické a infekční látky (jedy, biologické nebezpečí); radioaktivní látky; žíravé látky;

¹⁰ Není nutné dodatečné vybavení/nálepky

než 250 g. Všechna ostatní zařízení (MTOW menší než 25 kg) spadají do podkategorie provozu A3.

Zařízení, která jsou označena štítkem C0, jsou legislativně „nejvolnější“, jelikož podléhají pouze registraci provozovatele a zároveň je u pilota (bez věkového omezení) vyžadována znalost uživatelské příručky. U ostatních štítků (C1-C4) je kromě provozní příručky požadováno úspěšné absolvování online školení a testu pilota¹¹, ale pouze v případě podkategorie provozu A1 a A3. V případě provozu UAS v podkategorii A2 je vyžadováno, kromě úspěšného absolvování A1 a A3, deklaráce praktického výcviku formou samostudia, složení zkoušky z teoretických znalostí zajišťované Úřadem pro civilní letectví v jeho školicích prostorách. Cílem zkoušky je posouzení znalostí dálkově řídicího pilota z oblasti technických a provozních opatření ke zmírnění rizik na zemi, meteorologie a provádění letů bezpilotních letadel. V Tab. 2 je uveden základní přehled podkategorií provozu.

Tab. 3: Přehled podkategorií v kategorii provozu „Otevřená“

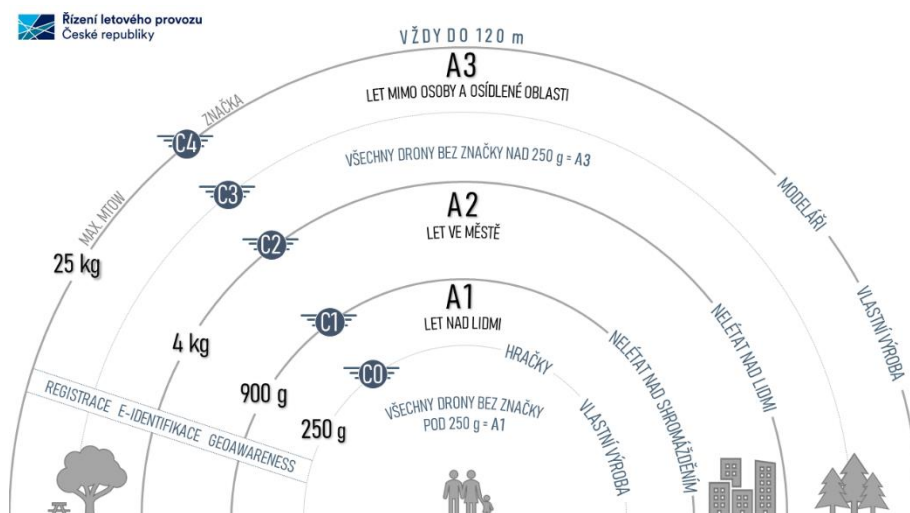
UAS		Provoz	
Třída	MTOW	Provozní omezení	Podkategorie
Soukromě zhotovené, bez štítku „C“	< 250 g	<ul style="list-style-type: none"> • lze létat nad nezapojenými osobami (vyhýbat se těmto situacím) • zákaz letů nad shromážděními osob 	A1 (let nad lidmi a ve městě)
C0			
C1	< 900 g	<ul style="list-style-type: none"> • žádné plánované lety nad nezapojenými osobami (pokud se tak stane, měly by být minimalizovány) • zákaz letů nad shromážděními osob 	A3 (let mimo osoby a osídlené oblasti)
C2	< 4 kg	<ul style="list-style-type: none"> • žádné lety nad nezapojenými osobami • A2 – udržování vodorovné vzdálenosti 30 m od nezapojených osob (může být sníženo na 5 m, je-li aktivována nízkorychlostní funkce) 	A2 (let ve městě) A3
C3 a C4	< 25 kg	<ul style="list-style-type: none"> • lety daleko od lidí • lety mimo urbanistickou oblast (vzdálenost 150 m) 	A3
Soukromě zhotovené, bez štítku „C“			

¹¹ Minimální věk pilota – 16 let.

Zdroj: Převzato a upraveno z: https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2024/08/FAQ-DRONES_CS.pdf

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že v případě UAS, které má štítek C2 je možné s licenci, kterou lze absolvovat online, realizovat provoz pouze v podkategorii A3. Oblastí A3 se rozumí taková oblast, která je vzdálena minimálně 150 metrů od urbanistické oblasti a lidí. V tomto prostoru (pracovním okruhu) očekáváme, že nebudou ohroženy nezapojené osoby. V případě, že je nutné se urbanistické oblasti přiblížit je povinná atestace pro podkategorii A2.

Obr. 1: Otevřená kategorie "Open"

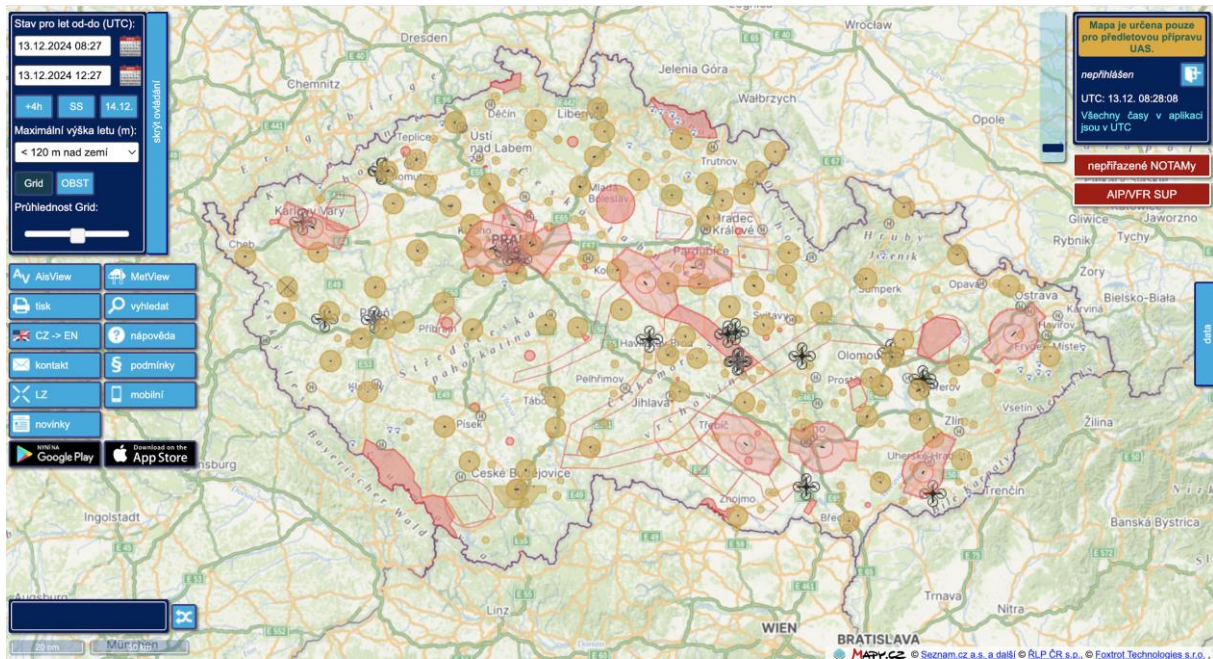


Zdroj: https://letejtezodpovedne.cz/content/img/clanky/otevrena_se_stitkem.png

Kromě znalosti pravidel jednotlivých podkategorií provozu (A1, A2 a A3), je zásadní z hlediska bezpečného provozu a předletové přípravy znalost zeměpisných zón. V rámci České republiky je vhodné využít webovou aplikaci Řízení letového provozu, s.p., <https://dronview.rlp.cz/>. V následném textu budou popsány již zmíněné zeměpisné zóny, resp. letové činnosti v omezeném prostoru LKR 10 – UAS, nikoliv popis funkcionalit¹² této webové aplikace (Obr. 1).

¹² Popis funkcionalit – tlačítko „Nápověda“ (https://dronview.rlp.cz/doc/mapa_help_dronview_cz.pdf)

Obr. 2: DronView



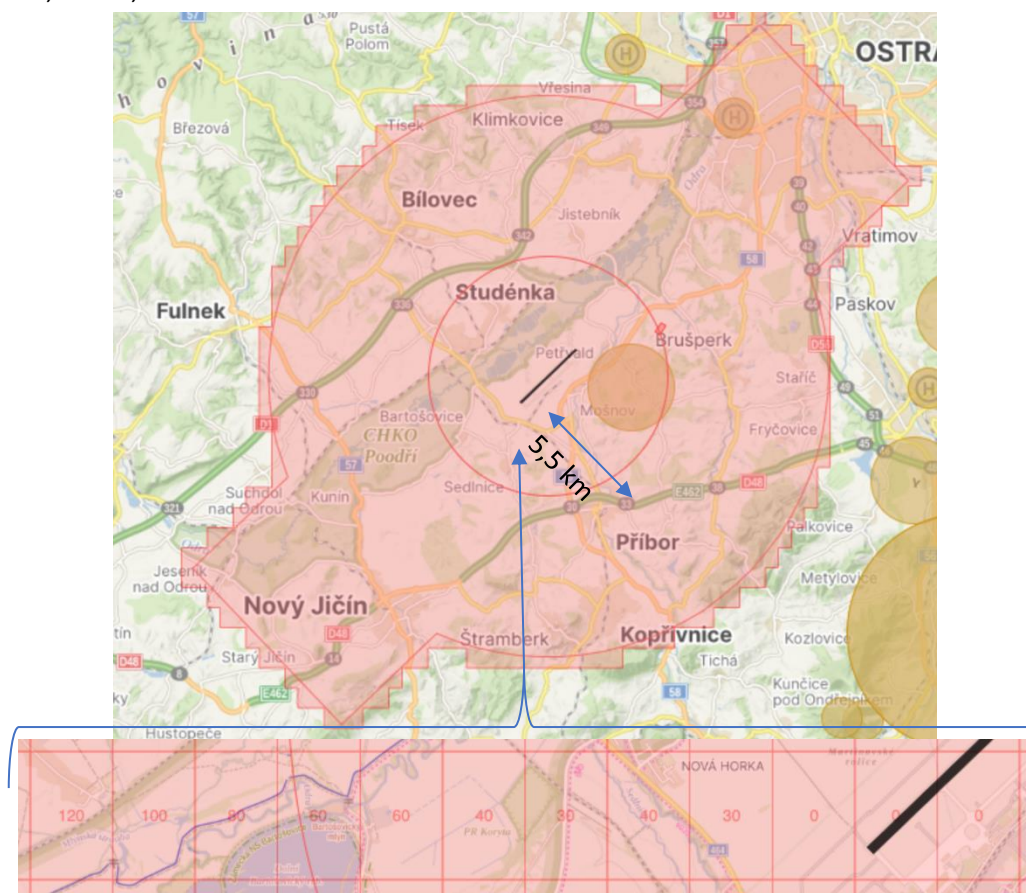
Zdroj: Screenshot z dronview.rlp.cz

Provoz bezpilotního letadla (Obr. 2) v řízeném okrsku (CTR a MCTR)¹³ je povolen pouze za přesně definovaných podmínek. Lety jsou možné v horizontální vzdálenosti větší než 5 500 metrů od vztažného bodu řízeného letiště a do výšky nepřesahující hodnotu uvedenou v gridu¹⁴. Pokud let probíhá ve větší výšce, než je hodnota uvedená v gridu, je nutné provést koordinaci s příslušným stanovištěm řízení letového provozu. V případě potřeby překročení hodnoty v gridu, ale i 120 m (AGL) bude UAS spadat do kategorie provozu „Specific“ s nutností koordinace s ŘLP.

¹³ CTR – Control Zone, např. CTR Praha (LKPR) – Letiště Václava Havla Praha, MCTR – Military Control Zone, např. MCTR Čáslav (LKCV) – Vojenské letiště Čáslav.

¹⁴ Gridem se rozumí místo provozu příslušný segment mřížkové mapové vrstvy Grid v DronView

Obr. : CTR, MCTR, GRID



Zdroj: Vlastní zpracování na základě dronview.rlp.cz

Pro lety ve vzdálenosti menší než 5 500 metrů od vztažného bodu řízeného letiště je vyžadována koordinace s příslušným stanovištěm řízení letového provozu a provozovatelem letiště. Výjimku tvoří bezpilotní letadla s maximální vzletovou hmotností odpovídající třídě C1 nebo letadla spadající pod C0, CE a bez štítku (max MTOW 250 g). Tyto lety, pokud probíhají do výšky nepřesahující hodnotu uvedenou v gridu, mohou být prováděny bez nutnosti koordinace¹⁵. V případě potřeby překročení hodnoty v gridu, ale i 120 m (AGL) bude UAS spadat do kategorie provozu „Specific“ s nutností koordinace s ŘLP.¹⁶

Provoz UAS v **letištní provozní zóně (ATZ) neřízeného letiště** je provoz možný pouze na základě splnění podmínek stanovených provozovatelem letiště. A to, s koordinací s letištní letovou informační službou (AFIS) nebo stanovištěm poskytujícím informace známému provozu, není-li AFIS nebo poskytování informací známému provozu zajištěno. Pokud není stanoveno jinak, provoz bezpilotního letadla v ATZ ve výšce větší než 120 m nad zemí je

¹⁵ Při letech v této části CTR, kde koordinace není vyžadována, nenesou příslušné stanoviště řízení letového provozu odpovědnost za poskytování informací o provozu, ani za předcházení srážkám ve vzduchu mezi bezpilotními a pilotovanými letadly nebo mezi bezpilotními letadly navzájem. Zabránění srážkám je v těchto případech plně v odpovědnosti dálkově řídicího pilota.

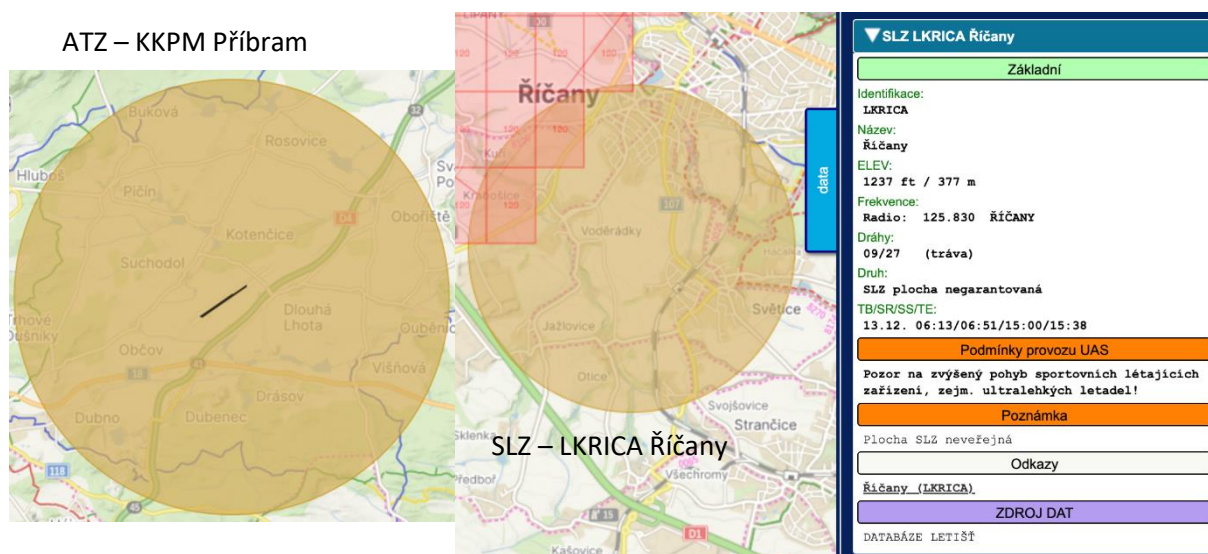
¹⁶ Pokud provoz bezpilotního letadla přesahuje stanovené limity výšky nebo vzdálenosti, je na uvážení příslušného stanoviště řízení letového provozu, zda bude požadovat splnění dalších podmínek.

povoleno pouze v případě, že je zajištěna AFIS nebo poskytování informací známému provozu. Let bezpilotního letadla s maximální vzletovou hmotností nepřesahující limit platný pro třídu C1 může být prováděn v ATZ bez koordinace, ale pouze do výšky nad zemí, která nepřekračuje výšku uvedenou v gridu nebo v případě, že grid není zřízen, do výšky odpovídající ochranným pásem s výškovým omezením staveb daného letiště, nebo 100 m nad zemí, podle toho, co je nižší. Provoz v okolí **registrované plochy pro sportovní létající zařízení (SLZ)** je možný pouze na základě splnění podmínek stanovených provozovatelem této plochy SLZ. Tito piloti jsou povinni provádět lety takovým způsobem, aby nedocházelo k ohrožení letů pilotovaných letadel, včetně letů na SLZ.

Zdroj: Screenshot z dronview.rlp.cz

V rámci předletové přípravy je nutné zkontrolovat, zda se v oblasti nenachází prostory, jako LKR (omezený prostor), LKP (zakázaný prostor)¹⁷, LKD (nebezpečný prostor), TSA (dočasně vyhrazený prostor), TRA (dočasně vymezený prostor), které zakazují (Obr. 4) nebo upravují provoz UAV. Let je v uvedených prosterech povolen pouze v případě s příslušným Oprávněním Specific nebo Oprávněním k letu. V rámci uvedených prostor je vhodné vždy kontrolovat vertikální hranici, platnost/dobu aktivace a podmínky provozu UAS. Provoz bezpilotního letadla v omezeném prostoru LKR9¹⁸ je možný bez oprávnění Úřadu, pokud jsou dodrženy podmínky provozu v CTR, v hustě osídleném prostoru, případně i podmínky jiných prostorů

Obr. : ATZ a SLZ

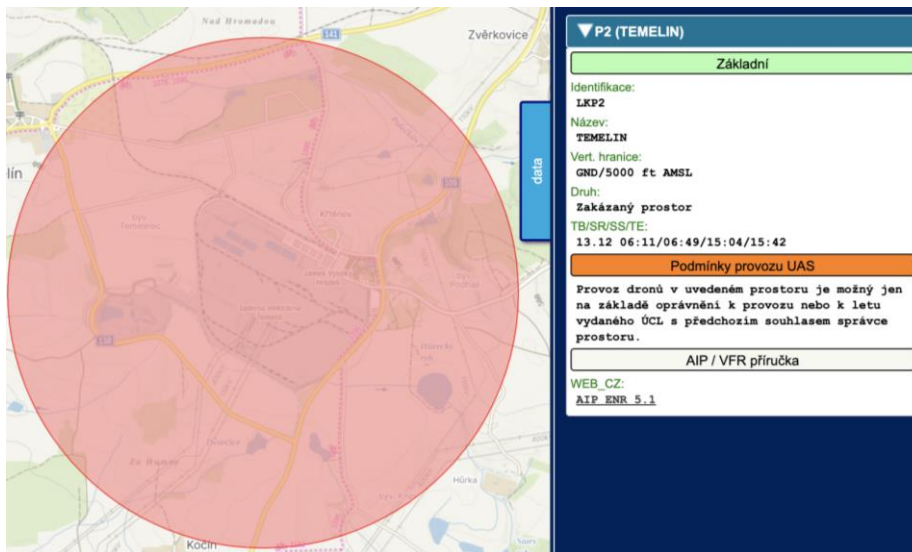


v dané oblasti.

¹⁷ Například Temelín, Pražský hrad

¹⁸ LKR9 – Praha (centrum)

Obr. 5: Zakázaný prostor LKP



Zdroj: Screenshot z dronview.rlp.cz

Hustě osídleným prostorem se rozumí prostor ve městě nebo jiné obci, který se převážně využívá k bydlení, obchodním činnostem nebo rekreaci. Provoz bezpilotního letadla v těchto hustě osídlených prostorech je zakázán. Výjimky, kde je provoz povolen:

- UAS, který nepodléhá registraci (hračka, UAS bez kamery do MTOW 250 g).
- Štítek C0, C1 – dodržení pravidla 1:1, provoz¹⁹ nebude veden nad nezapojenou osobou²⁰ - v případě neočekávaného přeletu je povinností pilota co nejvíce zkrátit dobu přeletu. Plánovaný let musí být vyznačen v digitální mapě (DronView).
- Štítek C2 – dodržení pravidla 1:1, provoz musí být veden pouze nad osobami²¹ (zapojené osoby), které jsou součástí předmětného provozu. Plánovaný let musí být vyznačen v digitální mapě (DronView).
- Ostatní – pouze v případě certifikované kategorie provozu, nebo ve specifické kategorii za podmínky Oprávnění Specific vydaného Úřadem.

Provoz bezpilotních letadel v ochranných pásmech²² je možný pouze na základě Oprávnění k letu nebo Oprávnění Specific vydaného Úřadem s předchozím souhlasem příslušného

¹⁹ Zhodnocení situace by mělo být provedeno s přihlédnutím k uspořádání místa provozu (např. výskyt silnic, ulic, pěších či cyklistických stezek), možnostem zabezpečení místa a denní době.

²⁰ Osoba nenachází se v oblasti, kde bezpilotní letadlo provozuje svou činnost a není seznámena s provozem a jeho riziky. Za nezapojenou osobu je považována také osoba, nacházející se v prostředku (např. automobilu) nebo za okny budovy.

²¹ Za zapojenou osobu je považována také osoba, nacházející se v prostředku (např. automobilu) nebo za okny budovy. Prostor musí být zabezpečen proti vstupu nezapojených osob.

²² Podél nadzemních dopravních staveb, tras nadzemních inženýrských sítí, tras nadzemních telekomunikačních sítí. Uvnitř zvláště chráněných území. V okolí vodních zdrojů a objektů důležitých

správního orgánu či oprávněné osoby. Provoz bezpilotního letadla ve čtvrté zóně chráněné krajinné oblasti (CHKO) je možný bez oprávnění Úřadu, za podmínky, že činností nebudou rušeny chráněné druhy živočichů.

Specifická kategorie provozu

Provoz UAS spadá do kategorie „specifická“ v případě, že plánovaný provoz nespadá do kategorie „otevřená“, tedy nesplňuje některé z obecných kritérií (např. provoz mimo vizuální dohled – BVLOS nebo provoz 10 kg UA v blízkosti lidí). Výcvik pro provoz ve „specifické“ kategorii závisí na plánovaném typu činnosti. Pokud provoz nespadá mezi standardní scénáře, je třeba po bezpečnostním posouzení navrhnout příslušnému národnímu leteckému úřadu vhodný výcvikový kurz. Tento kurz následně vyhodnotí národní úřad (v ČR Úřad pro civilní letectví), a pokud jej schválí jako součást oprávnění k provozu, stane se závazným.

Pro standardní scénáře musí mít dálkově řídící pilot osvědčení o teoretických znalostech a akreditaci pro praktické dovednosti podle konkrétního scénáře (například STS-01). K získání těchto kvalifikací je nutné absolvovat výcvikový kurz a složit zkoušku. Tyto dokumenty může vydat příslušný národní úřad nebo jím pověřený subjekt. Platnost osvědčení je 5 let. Pro jeho prodloužení lze absolvovat seminář pořádaný národním úřadem nebo jinou schválenou institucí, případně znovu prokázat způsobilost.

Pokud provoz spadá do standardního scénáře a dron splňuje podmínky příslušné třídy (C5 nebo C6), stačí předložit prohlášení národnímu úřadu, který následně potvrdí jeho přijetí a úplnost. V ostatních případech je nutné získat oprávnění k provozu, a to na základě:

- Oprávnění na základě posouzení rizik (SORA): Provozovatel vypracuje analýzu rizik pomocí metodiky SORA (Specific Operation Risk Assessment), která identifikuje úroveň rizika a stanoví opatření pro zajištění bezpečnosti. Po předložení výsledků národnímu úřadu může být oprávnění k provozu vydáno.
- Oprávnění na základě předdefinovaného posouzení rizik (PDRA): Pro časté provozy připraví EASA předdefinovaná riziková hodnocení, která zjednoduší proces. Provozovatel musí splnit stanovené požadavky a požádat o oprávnění.
- Osvědčení provozovatele lehkých UAS (LUC): Jedná se o dobrovolnou certifikaci, která umožňuje provozovateli získat určitá práva, jako například schvalovat vlastní provoz bez nutnosti žádat o povolení. Po posouzení provozní praxe a organizace může národní úřad vydat osvědčení, které uděluje práva podle úrovně vyzrálosti provozovatele. Práva spojená s LUC zahrnují možnost provádět standardní scénáře bez podání

pro obranu státu. Provoz bezpilotního letadla nad těmito ochrannými pásmy musí probíhat způsobem, který vylučuje jejich narušení za běžných i mimořádných okolností

prohlášení, schvalovat provozy pokryté PDRA nebo schvalovat veškeré provozy bez potřeby dalšího povolení.

Jako nejvyšší úroveň specifické kategorie je osvědčení LUC, které je možné získat po dosažení jisté provozní praxe a na základě úrovně vyzrálosti. Hlavním předpokladem získání LUC je prokázání schopnosti posuzovat riziko provozu v rámci své organizace. Osvědčení je poskytnuto ze strany ÚCL a umožňuje provozovateli dle uděleného práva a kompetencí schvalovat provoz bez žádosti schválení. Udělená práva se mohou týkat jak provozu v rámci STS a PDRA, tak jakéhokoli zamýšleného provozu.

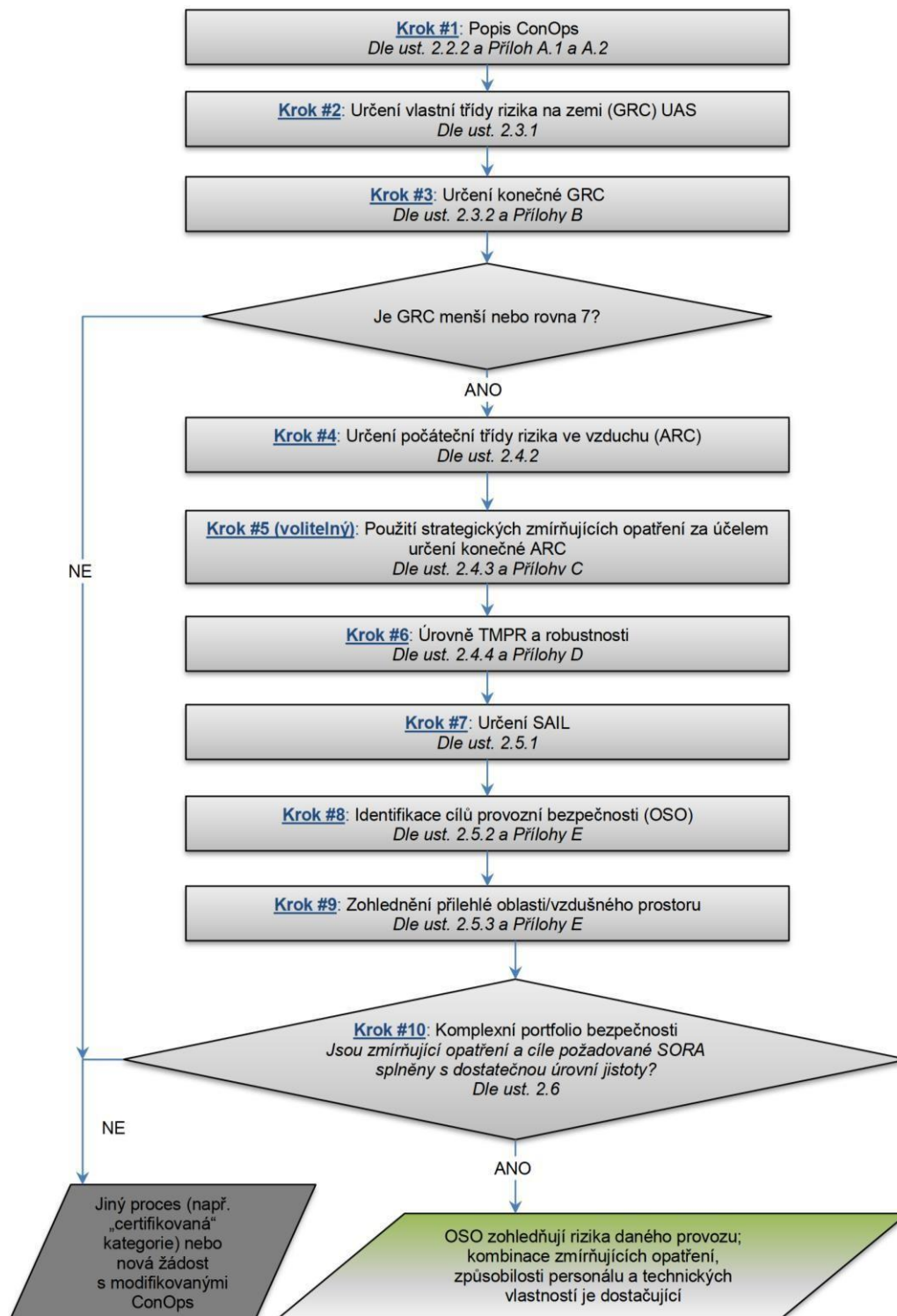
V praktické rovině osvědčení LUC znamená vysokou a prověřenou provozní úroveň provozovatele získanou konkrétním provozem UA ve specifické kategorii. Provozní praxi lze získat na základě provozu v souvislosti s STS a PDRA, nebo prostřednictvím vlastního provozního scénáře v rámci SORA. V současné době je uplatnění SORA vyžadována ze strany ÚCL pro získání oprávnění k provozu UA ve specifické kategorii v rámci úrovně SAIL I a SAIL II (specifická úroveň zabezpečení a integrity, Specific Assurance and Integrity Level).

Posouzení rizika specifické kategorie Metodika SORA představuje základní kámen specifické kategorie umožňující provoz UA nad rámec otevřené kategorie. Na základě metodiky SORA jsou vypracovány také STS a PDRA. Samotná metodika byla vypracována JARUS (Sdružení úřadů pro předpisovou činnost v oblasti bezpilotních systémů, Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems) a dále schválena EASA jako přijatelný prostředek pro splnění požadavků evropských nařízení. Jedná se o vícestupňový proces hodnocení rizik zaměřený na analýzu určitých provozů UA a současně definování nezbytných zmírňujících opatření. Metodika SORA je dostupná v rámci dokumentu EASA eRules a slouží pro jednodušší orientaci v evropské regulaci. Charakteristickým znakem SORA je její metodický model posuzování, který je založen na bezpečnostním riziku celkového systému, tedy vyhodnocení rizik týkající se konkrétního provozu UA. Na základě charakterizace všech nebezpečí, příslušné koncepce a navržených provozních zmírňujících opatření může SORA vyhodnotit případná rizika a stanovit hranice nezbytné pro bezpečný provoz.

Hlavní součástí SORA je determinace GRC (třída rizika na zemi, Ground Risk Class) a ARC (třída rizika ve vzduchu, Air Risk Class). Tyto dva parametry utváří základ pro stanovení úrovně SAIL, který představuje úroveň jistoty, že provoz UA zůstane pod kontrolou zamýšleného provozu. V SAIL jsou úrovně jistoty aktuálně charakterizovány od úrovně I do úrovně VI s tím, že pro každou úroveň jsou stanoveny OSO (cíl provozní bezpečnosti, Operational Safety Objective). Obecně platí, že čím je vyšší úroveň SAIL, tím se zvyšují požadavky na OSO. Metodika SORA umožňuje využívat zmírňující opatření ke snížení GRC a ARC, a tím ke snížení SAIL.

Z výše uvedeného popisu hlavních součástí metodiky SORA je zřejmé, že jejím hlavním cílem je kvalifikovat rizika na zemi a ve vzduchu a dále navrhnout zmírňující opatření, které umožní provádět provoz UA s přijatelnou úrovní rizika. Tento předpoklad lze naplnit na základě deseti kroků viz Obr. 5.

Obr. 5: Proces SORA



Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Prvním krokem metodiky SORA je popis ConOps (provozní koncepce, Concept of operations). ConOps lze charakterizovat jako dokument, který zahrnuje veškeré informace o zamýšleném provozu. Součástí ConOps je popis každého aspektu provozu, jako je například charakterizace

organizace, odpovědnosti, výcviku, údržby nebo dále komplexní popis UA, letového prostoru UA, vzdušných prostorů obecně, druhu provozu VLOS/BVLOS, včetně popisu standardních postupů, zavedených bezpečnostních opatření, nouzových postupů a provozních limitů.

Dalším krokem metodiky SORA je určení vlastního GRC (Obr. 6), tedy rizika že osoba v rámci provozu bude zasažena UA. Stanovení vlastního GRC vyžaduje charakteristický rozměr UA a znalost zamýšleného provozního scénáře. Pro stanovení charakteristického rozměru UA je možné využít rozpětí křídel, průměr listů u vrtulníku nebo maximální rozměr multikoptéry.

Obr. 6: Vlastní třída GRC

Vlastní třída rizika na zemi UAS				
Max. charakteristický rozměr UA	1 m / cca 3 ft	3 m / cca 10 ft	8 m / cca 25 ft	> 8 m / cca 25 ft
Očekávaná specifická kinetická energie	< 700 J (cca 529 ft lb)	< 34 kJ (cca 25 000 ft lb)	< 1 084 kJ (cca 800 000 ft lb)	> 1 084 kJ (cca 800 000 ft lb)
Provozní scénáře				
VLOS/BVLOS nad kontrolovanou pozemní plochou ¹⁸	1	2	3	4
VLOS nad řídicí zalidněnou oblastí	2	3	4	5
BVLOS nad řídicí zalidněnou oblastí	3	4	5	6
VLOS nad zalidněnou oblastí	4	5	6	8
BVLOS nad zalidněnou oblastí	5	6	8	10
VLOS nad shromážděním lidí	7			
BVLOS nad shromážděním lidí	8			

Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Pro přehlednost je zde uvedena definice pojmu zalidněná oblast, která dle dokumentu eRules je definována jako hustě osídlený prostor (HOP). Pro rozšířený pojem řídicí obydlené prostředí není v dokumentu eRules definice, která by podrobněji charakterizovala prostor. Nicméně v obecné rovině je možné tento pojem charakterizovat jako prostor, který zahrnuje nižší hustotu zalidnění, než v případě obydleného prostředí nebo dále shromáždění osob.

Po určení vlastní GRC lze přejít k třetímu kroku zahrnujícímu postupy pro určení konečné GRC (Obr. 7). Určení konečné GRC je založeno na robustnosti zmírňujících opatření, které svou charakteristikou mohou snížit vlastní GRC. Úroveň robustnosti je dosažena na základě úrovně integrity, tedy zvýšení bezpečnosti každým zmírňujícím opatřením, a dále úrovně jistoty, tedy zabezpečením, ověřením nebo důkazem.

Obr. 7: Určení konečné GRC a určení úrovně robustnosti

Sled zmírňujících opatření	Zmírňující opatření rizika na zemi	Robustnost		
		Nízká/žádná	Střední	Vysoká
1	M1 – Strategická zmírňující opatření rizika na zemi ²¹	0: žádná -1: nízká	-2	-4
2	M2 – Jsou zmírněny následky nárazu na zem ²²	0	-1	-2
3	M3 – Je zaveden pohotovostní plán (ERP), provozovatel UAS je ověřený a efektivní	1	0	-1

	Nízká jistota	Střední jistota	Vysoká jistota
Nízká integrita	Nízká robustnost	Nízká robustnost	Nízká robustnost
Střední integrita	Nízká robustnost	Střední robustnost	Střední robustnost
Vysoká integrita	Nízká robustnost	Střední robustnost	Vysoká robustnost

Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Zmírňující opatření na zemi jsou rozdělena do tří kategorií M1, M2 a M3 s tím, že pro každou kategorii lze přiřadit určitou úroveň robustnosti. V případě kategorie M1 se jedná o posuzování snížení počtu osob vystavených riziku na zemi v rámci dvou kritérií:

1. stanovení rezervy pro pokrytí rizika na zemi (například pravidlo 1:1),
2. vyhodnocení osob vystavených riziku (hustota osob ze směrodatných údajů).

Naopak cílem kategorie M2 je stanovit zmírňující opatření, které zmírňuje následky nárazu na zem po ztrátě řízení letu. Příkladem může být padák, jehož pomocí je řešeno zmírnění následků dynamiky nárazu UA. Zmírňující opatření je zde posuzováno v rámci tří kritérií:

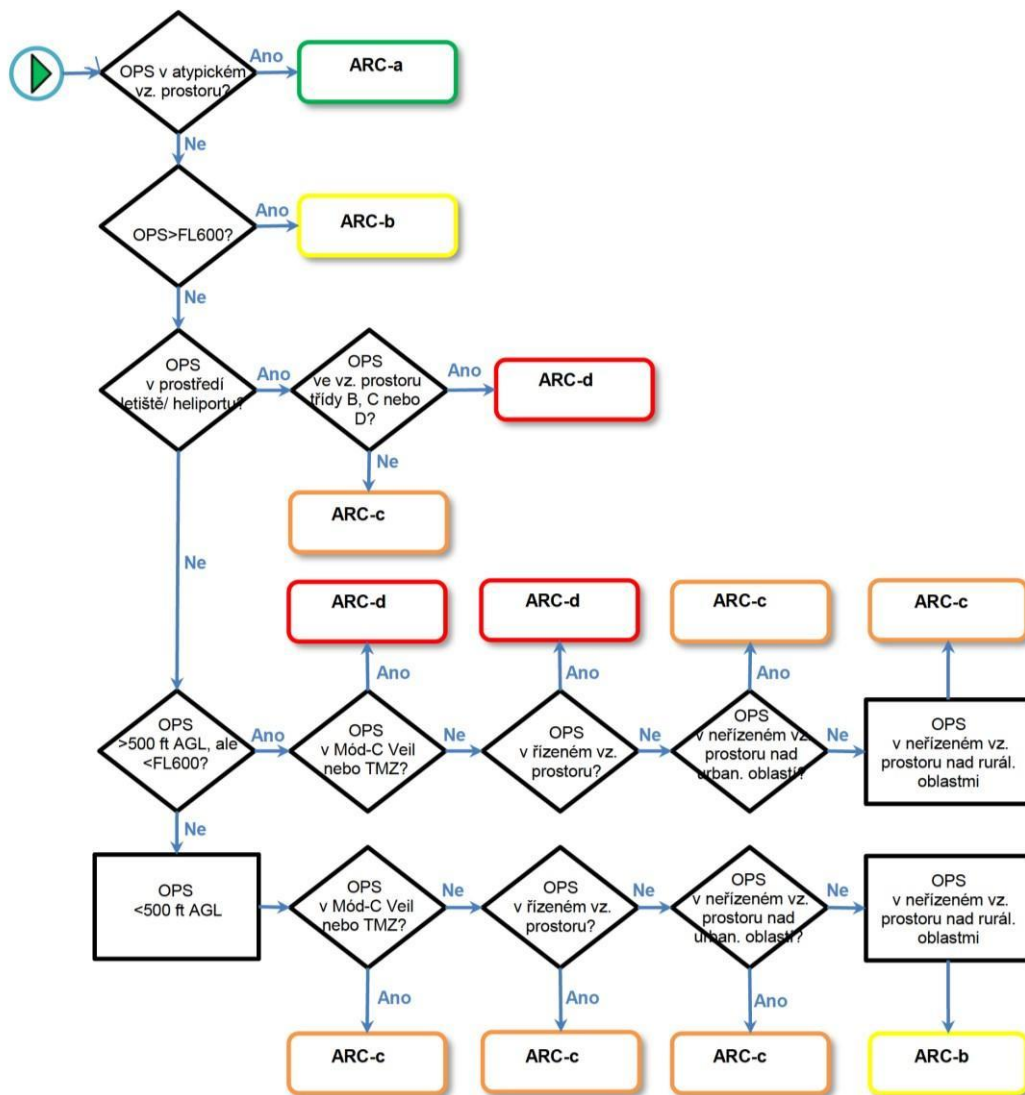
1. technický návrh (nouzový systém využívající padák s automatickou aktivací),
2. postupy (nouzový systém je zastavěn a udržován s pokyny výrobce),
3. výcvik (určený personál je vyškolen pro údržbu nouzového systému).

Poslední kategorie M3 je posuzována z hlediska pohotovostního plánu (ERP – Emergency Response Plan). Tento plán zahrnuje nouzové situace, kdy let UA se nachází v takovém stádiu, že není možné získat potřebnou kontrolu. Součástí ERP jsou situace, kdy jejich výsledek nelze jednoznačně určit, nebo kdy hrozí nebezpečí smrtelných zranění. Plán se musí lišit od zavedených nouzových postupů a stanovuje, jak účinně omezit stupňující se následky havárie a dále podmínky, kdy upozornit složky ŘLP.

V případě stanovení případných rizik ve vzdušném prostoru využívá metodika SORA určení počáteční ARC, což je čtvrtý krok metodiky. Obecně lze ARC definovat jako pravděpodobnost

setkání UA s pilotovaným letadlem v civilním vzdušném prostoru. Na základě rozhodovacího stromu viz Obr. 14 níže lze určit počáteční ARC.

Obr. 8: Určení ARC

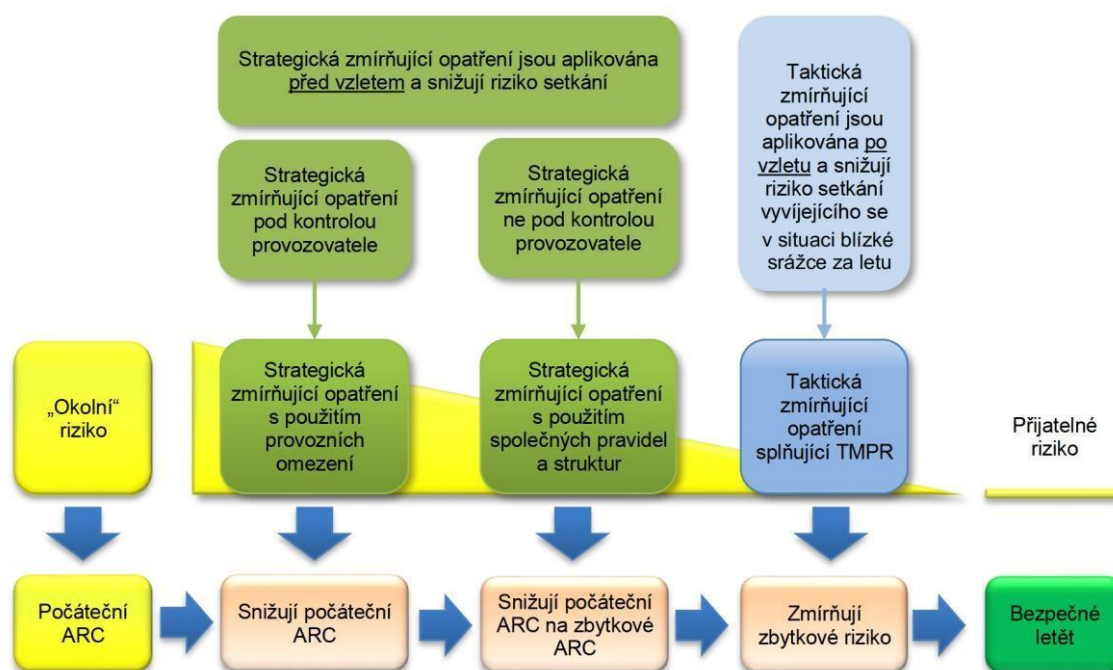


Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Úroveň ARC je stanovena na základě čtyř kategorií, přičemž ARC-a představuje vzdušný prostor s nejnižším rizikem srážky mezi UA a pilotovaným letadlem. Zatímco ARC-b a výše jsou považovány za vzdušné prostory s rostoucím rizikem srážky. Počáteční ARC lze snížit v pátém volitelném kroku metodiky SORA v rámci určení zbytkové ARC.

Ačkoli je ARC přiděleno na základě základní charakteristiky vzdušných prostorů, specifická charakteristika daných vzdušných prostorů může mít riziko srážky odlišné. Pro snížení počáteční ARC lze použít strategická zmírňující opatření.

Obr. 9: Zmírnění rizik ve vzdušném prostoru



Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

V obecné rovině metodika SORA nabízí strategická zmírňující opatření vycházející z provozních omezení pod kontrolu provozovatele a dále strategická zmírňující opatření pomocí společných pravidel a struktur. V případě provozních omezení se jedná o opatření omezující geografický prostor pro provoz a opatření omezující časový rámec provozu. Příkladem obou opatření může být provoz UA na okrajích vzdušného prostoru třídy B v nočních hodinách. Naopak opatření pomocí společných pravidel představují kooperaci všech uživatelů vzdušného prostoru, jako je například pravidlo přednosti či identifikační systém. V případě společných struktur může být opatřením například letové tratě nebo uspořádání toku letového provozu.

Úroveň ARC může být snížena na základě specifické charakterizace daného vzdušného prostoru. Příkladem může být koncepce, kdy provoz UA je zamýšlen do výšky 400 ft nad zemí v neřízeném vzdušném prostoru nad urbanistickou oblastí, což odpovídá podle Obr. 8 úrovni ARC-c. Úroveň ARC-c může být snížena na ARC-b, pokud provozovatel UA prokáže, že místní hustota ve vzdušném prostoru odpovídá nižšímu stupni hustoty, což ve výsledku znamená i nižší riziko střetu. Konečné stanovení úrovně zbytkové ARC ovšem náleží na rozhodnutí ÚCL.

Šestým krokem SORA je zmírnění jakéhokoli zbytkového rizika srážky ve vzdušném prostoru použitím taktických zmírňujících opatření v rámci úrovně TMPR (požadavky na výkonnost taktických zmírnění, Tactical Mitigation Performance Requirement) a dále robustnosti. Taktická zmírňující opatření mají být založena na koncepci „vidět a vyhnout se“, což je znakem provozu VLOS, nebo případně formou „detekovat a vyhnout se“, což spadá zejména do provozu BVLOS. Samotný provoz VLOS je podle metodiky SORA považován za přijatelné taktické zmírňující opatření, tudíž nemusí splňovat TMPR a požadavky na robustnost. Naopak v případě provozu BVLOS jsou ovšem tyto požadavky vyžadovány a jejich určení vychází ze zbytkové ARC (Obr. 10).

Obr. 10: Úroveň TMPR a robustnosti

Zbytková ARC	TMPR	Úroveň robustnosti TMPR
ARC-d	Vysoké	Vysoká
ARC-c	Střední	Střední
ARC-b	Nízké	Nízká
ARC-a	Žádný požadavek	Žádný požadavek

Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Pro vzdušný prostor v rámci ARC-a není vyžadována určitá úroveň TMPR, jelikož riziko srážky mezi UA a pilotovaným letadlem je mimořádně nízké. V případě ARC-b jsou již vyžadovány TMPR, které zahrnují zejména detekující technické vybavení, nicméně s konstrukcí dle nižších standardů. Vyšší úrovně ARC představují tak vysoké riziko srážky, že jsou zde vyžadovány postupy i systémy používané v obecném letectví, zejména pak v případě ARC-d.

Další krok metodiky SORA zahrnuje určení parametru SAIL, který slučuje dohromady konečný GRC a zbytkový ARC (Obr. 11). Výsledkem je určitá úroveň SAIL představující určitou úroveň jistoty, že zamýšlený provoz UA bude pod kontrolou vymezeného rámce ConOps.

Obr. 11: Určení úrovně SAIL

Určení SAIL				
Konečná GRC	Zbytková ARC			
	a	b	c	d
≤2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
>7	Provoz kategorie C			

Zdroj: EASA eRules pro bezpilotní systémy (UAS): nařízení (EU) 2019/947 a (EU) 2019/945.

Na základě určení úrovně SAIL lze pomocí osmého kroku metodiky SORA identifikovat potřebné OSO. Samotné OSO je možné definovat jako bezpečnostní bariéry, které jsou klasifikovány v rámci úrovně robustnosti. Metodika SORA poskytuje seznam OSO, které vznikly na základě provozních zkušeností. Pro určitou úroveň SAIL může však ÚCL definovat další OSO s ohledem na zamýšlený provoz. Příkladem OSO z hlediska úrovně robustnosti může být údržba UA odborně způsobilým subjektem. V případě SAIL I a II je vyžadována nízká úroveň, zatímco u SAIL III a IV je již vyžadována střední úroveň a v rámci SAIL V a VI je vyžadována vysoká úroveň.

Závěrečným krokem je zohlednění přilehlé oblasti z hlediska rizika ztráty řízení letu UA. Jedná se o bezpečnostní požadavky s ohledem na zamýšlený provoz a jeho přilehlých prostorů. Podle metodiky SORA by mělo být prokázáno, že selhání nebo porucha UA a jeho součástí nevede k letu mimo vymezený provozní prostor. Dále by UA mělo být navrženo na základě standardů považovanými ÚCL za dostatečný.

Jako konečným výsledkem procesu metodika SORA by mělo být komplexní portfolio bezpečnosti, jehož součástí je řada zmírňujících opatření a také bezpečnostních cílů zajišťujících adekvátní úroveň bezpečnostní jistoty v rámci zamýšleného provozu.

Souhrn

V rámci nejen otevřené kategorie, lze shrnout úkony pilota před a během letu. **Před letem** je nutné absolvovat výcvik a složit zkoušku požadovanou pro druh provozu. Zajistit relevantní a aktuální informace týkající se zeměpisných zón, které jsou publikovány příslušným národním leteckým úřadem (DronView). Záznam plánovaného letu do webové aplikace DronView. Dále je třeba provést kontrolu překážek a přítomnosti osob nezapojených do provozu. Nezbytnou součástí je kontrola způsobilosti a UAS pro let a provoz. Provéřít, že dálkové ovládání funguje správně, pokud je jím říditelné. V případě užitého zatížení realizovat kontrolu hmotnosti, zda je v mezích kategorie nebo podkategorie zamýšleného provozu.

Během letu je nezbytné dodržovat omezení daných zeměpisných zón; uživatelskou příručkou výrobce, a případné postupy provozovatele. Provoz UAS pouze VLOS – na viditelnou vzdálenost. V případě použití FPV (first person view) je nutný pozorovatel UA, který sleduje vzdušný prostor. Pozorovatelé UA musí být vždy vedle pilota, aby mohli okamžitě komunikovat (podávat instrukce k okamžitému přisání) v případě možné potenciální kolize. Letadlo s pilotem na palubě má vždy přednost a pilot je povinen udržovat bezpečnou vzdálenost. Řízení UAS není možné, pokud není pilot způsobilý, ať už kvůli konzumaci psychoaktivních nebo halucinogenních látek, alkoholu, nebo pokud se necítí dobře z důvodu nemoci. Zcela zásadním pravidlem je nelétat tam, kde probíhají záchranné práce.