

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra hospodářské úpravy lesů



**Monitoring gradace lýkožrouta smrkového moderními
metodami DPZ na území Krkonošského národního
parku – Pec pod Sněžkou**
Diplomová práce

Autor: Bc. Bedřich Vašíček
Vedoucí práce: Ing. Peter Surový, PhD.

2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bedřich Vašíček

Lesní inženýrství

Název práce

Monitoring gradace lýkožrouta smrkového moderními metodami DPZ na území Krkonošského národního parku – Pec pod Sněžkou

Název anglicky

Monitoring of spruce bark beetle gradation by modern remote sensing method in Krkonoše national park – Pec pod Sněžkou

Cíle práce

Hlavním tématem práce je ověřit možnost využití infračerveného snímkování k rekognoskaci kůrovcových ohnisek před vizuálním rozpoznáním poškození korun a kmene.

V případě potvrzení hypotézy posoudit provozní využití bezpilotního vrtulníku k snímkování ohrožených porostů.

Metodika

- Terénní pochůzkou vytypovat vhodný transekt, vyznačit v terénu pevné body a vybrat místa pro monitoring dle letových možností dronu

- Vytvoření snímků zdravých a napadených stromů jako vzoru.

- Aplikace snímků do GIS a vyhodnocení, stejná místa monitorovat pochůzkou, zaznamenat nálet a vývojové stadium kůrovce a porovnat se snímky z IR kamery. Monitoring provádět v intervalu 10 – 14 dní. Současně zaznamenávat časovou náročnost jednoho letu, celého dne monitoringu a rovněž terénní pochůzky, vyhodnotit a porovnat časovou náročnost celého období.

Vyhodnocení sledovaných lokalit, porovnání snímků se skutečností zjištěnou v terénu, vyhodnocení, zda lze rozpoznat ze snímků jednotlivá vývojová stadia kůrovce, vyhodnocení časové náročnosti a vhodnosti použití pro praxi.

Doporučený rozsah práce

50-70

Klíčová slova

lýkožrout, dálkový průzkum, infračervené snímky

Doporučené zdroje informací

- Campbell, P.E.; Rock, B.N.; Martin, M.E.; Neefus, C.D.; Irons, J.R.; Middleton, E.M.; Albrechtova, J. Detection of initial damage in Norway spruce canopies using hyperspectral airborne data. *Int. J. Remote Sens.* 2004, 25, 5557–5584
- Lausch, A.; Heurich, M.; Gordalla, D.; Dobner, H.-J.; Gwilym-Margianto, S.; Salbach, C. Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. *For. Ecol. Manag.* 2013, 308, 76–89.
- Lehmann, J.R.K.; Nieberding, F.; Prinz, T.; Knoth, C. Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry—A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests* 2015, 6, 594–612.
- Mezei, P.; Grodzki, W.; Blazenec, M.; Jakus, R. Factors influencing the wind—Bark beetles' disturbance system in the course of an *Ips typographus* outbreak in the Tatra Mountains. *For. Ecol. Manag.* 2014, 312, 67–77
- Näsi, R.; Honkavaara, E.; Lyytikäinen-Saarenmaa, P.; Blomqvist, M.; Litkey, P.; Hakala, T.; Viljanen, N.; Kantola, T.; Tanhuanpää, T.; Holopainen, M. Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sens.* 2015, 7, 15467–15493.
- Öhrn, P.; Långström, B.; Lindelöv, Å.; Björklund, N. Seasonal flight patterns of *Ips typographus* in southern Sweden and thermal sums required for emergence. *Agric. For. Entomol.* 2014, 16, 147–157.
- Ortiz, S.; Breidenbach, J.; Kändler, G. Early detection of bark beetle green attack using TerraSAR-X and RapidEye data. *Remote Sens.* 2013, 5, 1912–1931
- Schroeder, L.M. Colonization of storm gaps by the spruce bark beetle: Influence of gap and landscape characteristics. *Agric. For. Entomol.* 2010, 12, 29–39.
- Wulder, M.A.; Dymond, C.C.; White, J.C.; Leckie, D.G.; Carroll, A.L. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *For. Ecol. Manag.* 2006, 221, 27–41.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Peter Surový, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2016

Ing. Peter Surový, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 27. 02. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Monitoring gradace lýkožrouta smrkového moderními metodami DPZ na území Krkonošského národního parku – Pec pod Sněžkou vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petera Surového, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 19.4.2018

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Peteru Surovému PhD. za příkladné vedení práce, cenné rady a připomínky při jejím zpracování, dále Správě KRNAP za možnost zpracovat tuto práci právě na jejím území, zejména kolegům Ing. Přemyslu Janatovi PhD., Ing. Zdeňkovi Širokému a Janu Pačákovi, kteří se významně podíleli na monitoringu v terénu a v neposlední řadě své rodině, bez jejíž trpělivosti a tolerance by tato práce nikdy nevznikla.

Monitoring gradace lýkožrouta smrkového moderními metodami DPZ na území Krkonošského národního parku – Pec pod Sněžkou

Abstrakt:

V současné době se lesní hospodářství potýká s velkou hrozbou přemnožení kalamitního škůdce lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*), mezi lesnickou veřejností nazvaným kůrovec. Vlastníkům lesa ukládají platné právní normy učinit taková opatření, které vzniku a rozšíření těchto škůdců zabrání. I pro zkušeného lesního hospodáře je však v mnoha případech obtížné včas rozeznat kůrovcem napadené stromy od zdravých a právě v tomto rozlišení napadených stromů od zdravých by mohla pomoci moderní technologie dálkového průzkumu Země založená na spektrálních vlastnostech odrazivosti záření vegetací. Cílem této studie je potvrdit, či vyvrátit myšlenku, zda je možné rozpoznat kůrovcem napadené stromy pomocí infračerveného spektra. Snímky v této studii byly pořízeny za použití bezpilotního letounu a záznamového zařízení, které snímá odraz záření od vegetace v infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Lokalita pro studii byla vybrána v bezzásahové zóně na území Krkonošského národního parku, kde se proti kůrovci nezasahuje a je tak možné sledovat celý průběh vývoje kůrovce ve vegetačním období. V pravidelných intervalech zde byly monitorovány napadené a zdravé stromy a zároveň vyhodnocovány změny hodnot vegetačního indexu NDVI u napadených stromů. Výsledky ukázaly změnu hodnoty NDVI indexu mezi napadenými a zdravými stromy, hodnoty tohoto indexu se v průběhu vývoje kůrovce mění.

Klíčová slova:

lýkožrout smrkový, dálkový průzkum Země, monitoring UAV

Monitoring of spruce bark beetle gradation by modern remote sensing method in Krkonoše national park – Pec pod Sněžkou

Abstract:

Currently, Czech forest managers are facing a major overpopulation of spruce bark beetle (*Ips typographus*). Existing legal regulations prescribe measures preventing the spread and procreation of bark beetles to be adopted by forest owners. However, even for an experienced forest owner, it is difficult to distinguish the trees infected by bark beetles from those healthy ones. And here comes the chance for modern remote-sensing techniques to distinguish the infected trees from the healthy ones based on spectral features of vegetation reflectivity while remote sensing. The objective of this study is either to confirm or to reject the possibility of identifying bark beetle infected trees by infra-red spectrum. The pictures within this study were collected by pilot-free plane and recording device that depicts the infra-red of electromagnetic spectrum of vegetation. The studied site was located within the Krkonoše National Park, which is a bark beetle management-free area, and hence, it is possible to monitor the entire development of bark beetle during the vegetation cycle. Both inflicted and healthy trees were monitored and the deltas of NDVI vegetation index of infected trees were assessed. The results demonstrated a change between the NDVI index values of infected and healthy trees; these value change in course of bark beetle development.

Keywords:

spruce bark beetle, remote sensing, monitoring UAV

Obsah

1 Úvod.....	12
2 Cíl práce.....	14
3 Rozbor problematiky	15
3.1 Krkonošský národní park a ÚP Pec pod Sněžkou.....	15
3.1.1 Obecné informace a geografická poloha KRNAP	15
3.1.2 Geologické a půdní poměry	16
3.1.3 Klimatické poměry	17
3.1.4 Geografická poloha ÚP Pec pod Sněžkou a LÚ Obří důl.....	18
3.2 Ochrana přírody na území KRNAP	19
3.2.1 Zřízení národního parku.....	19
3.2.2 Zonace v KRNAP	19
3.2.2.1 1. zóna KRNAP	19
3.2.2.2 2. zóna KRNAP	19
3.2.2.3 3. zóna KRNAP	19
3.3 Lesní hospodářství a Plán péče na území KRNAP	20
3.3.1 Stupně přirozenosti lesních porostů	20
3.3.1.1 Les původní	21
3.3.1.2 Les přírodní	21
3.3.1.3 Les přírodě blízký.....	21
3.3.1.4 Les kulturní.....	22
3.3.1.5 Les nepůvodní	22
3.3.2 Management hospodaření na území KRNAP	22
3.4 Problematika lýkožrouta smrkového.....	23
3.4.1 Obecné informace	23
3.4.2 Popis druhu a taxonomické zařazení	23
3.4.3 Způsob života, bionomie.....	25
3.4.4 Faktory ovlivňující vývoj kůrovce, předpověď vývoje	27
3.5 Dálkový průzkum Země.....	28
3.5.1 Podstata a principy DPZ	28
3.5.2 Elektromagnetické spektrum	30
3.5.2.1 Radiové záření	30
3.5.2.2 Mikrovlnné záření	30
3.5.2.3 Infračervené záření	31

3.5.2.4	Viditelné záření	31
3.5.2.5	Ultrafialové záření	32
3.6	Bezpilotní prostředky pro DPZ	32
3.6.1	Obecné informace, základní pojmy	32
3.6.2	Legislativní omezení	33
3.7	Využití DPZ v lesnictví a zemědělství, přehled literatury	34
4	Materiál a metodika	40
4.1	Popis sledované oblasti	40
4.1.1	Charakteristika porostní skupiny 234Dm27x dle LHK	42
4.2	Popis UAS	43
4.2.1	Bezpilotní systém Zefyros Oktos XL	43
4.3	Specifikace použitých fotografických přístrojů	44
4.3.1	Základní parametry přístroje Sony Alpha A7 ILCE-7, použitý pro snímání RGB	44
4.3.2	Základní parametry přístroje Lumix TZ7, použitý pro snímání IR	45
4.4	Spektrální chování objektů	46
4.4.1	Spektrální projevy vegetace	46
4.5	Spektrální indexy	47
4.6	Prostředky pro odchyt lýkožrouta smrkového (<i>Ips typographus</i>)	49
4.7	Sběr dat v terénu	49
4.7.1	Monitoring porostů UAV	49
4.7.2	Vizuální monitoring pochůzkou v terénu	50
4.8	Zpracování dat	50
4.8.1	Zpracování dat v programu Agisoft	50
4.8.2	Zpracování dat v programu Arcmap	51
4.8.3	Statistické vyhodnocení	52
5	Výsledky práce	54
5.1	Vyhodnocení výstupů z programu SPSS	54
5.1.1	Grafické výstupy	54
5.1.2	Anova	56
5.1.3	Post Hoc Tests	57
5.2	Výstupy z programu Arcmap	58
5.3	Monitoring porostu pochůzkou	61
5.4	Časové porovnání	62
6	Diskuze	63
6.1	Porovnání výsledků s jinými autory	63
6.2	Doporučení pro další využití	64

7 Závěr.....	66
8 Summary.....	68
9 Seznam literatury a použitých zdrojů	70
10 Seznam příloh.....	74

Seznam obrázků

Obr. 1: Bilaterální Biosférická rezervace Krkonoše/Karkonosze (Schwarz 2010).....	12
Obr. 2: Počet dnů se sněhovou pokrývkou (ČHMÚ).....	18
Obr. 3: Geografická poloha studované oblasti v rámci ČR.....	18
Obr. 4: Procentické zastoupení zón KRNAP (Schwarz 2010).....	20
Obr. 5: Morfologické znaky lýkožrouta smrkového (Zumr 1995)	25
Obr. 6: Hnědé drtinky – rozpoznávací znak kůrovcem napadeného smrku	26
Obr. 7: Elektromagnetické pole (Dobrovolný 1998)	29
Obr. 8: Elektromagnetické spektrum	30
Obr. 9: Podíl kůrovcové těžby na ÚP Pec pod Sněžkou (LHE).....	42
Obr. 10: Výřez porostní mapy 234Dm27x (GIS Správy KRNAP).....	42
Obr. 11: UAV Zyperos Oktos XL.....	44
Obr. 12: Citlivost senzoru CCD (Sandidge, 2009).....	45
Obr. 13: Odrazivost (Dobrovolný 1998)	48
Obr. 14: Funkce Image Analysis v programu Arcmap	51
Obr. 15: Funkce Join v programu Arcmap	52
Obr. 16: Atributová tabulka kůrovcem napadených stromů	52
Obr. 17: Grafický výstup hodnot NDVI z 15.6.2017	53
Obr. 18: Grafický výstup hodnot NDVI z 1.8.2017	54
Obr. 19: Grafický výstup hodnot NDVI z 30.8.2017	54
Obr. 20: Grafický výstup hodnot NDVI z 4.10.2017	55
Obr. 21: Snímek 15.6.2017	59
Obr. 22: Snímek 4.10.2017	59
Obr. 23: Snímek NDVI 15.6.2017	59
Obr. 24: Snímek NDVI 1.8.2017	60
Obr. 25: Snímek NDVI 30.8.2017	60
Obr. 26: Snímek NDVI 4.10.2017	60
Obr. 27: Závrtý a počínající matečná chodba na lapáku, foto ze dne 1.6.2017	61
Obr. 28: Zaznamenané stadium larvy, foto ze dne 22.6.2017	62

Seznam tabulek

Tab. 1: Klimatické údaje (Mikeska 2000)	17
Tab. 2: Počet dnů se sněhovou pokrývkou (ČHMÚ).....	17
Tab. 3: Výměry zón KRNAP a jeho ochranného pásma (Schwarz 2010)	20
Tab. 4: Taxonomické zařazení do systému (Křístek, Urban 2013).....	24
Tab. 5: Rozdělení infračervené oblasti spektra (Halounová 2005)	31
Tab. 6: Rozdělení UAV (zákon č. 49/1997 sb., Doplněk X)	34
Tab. 7: Přehled výměr ÚP Pec pod Sněžkou dle zón v ha (LHK)	40
Tab. 8: Přehled výše těžeb ÚP Pec pod Sněžkou 2003 – 2017 (LHE)	41
Tab. 9: Anova pro průměr hodnot NDVI	56
Tab. 10: Anova pro nejvyšší zastoupení hodnot NDVI	57

Seznam zkratk

BK	Buk lesní
CIR	Viditelné infračervené snímky (color infrared)
DPZ	Dálkový průzkum Země
IR	Infračervené pásmo (infra red)
JD	Jedle bělokorá
JR	Jeřáb ptačí
KRNAP	Krkonošský národní park
LHE	Lesní hospodářská evidence
LHK	Lesní hospodářská kniha
LHP	Lesní hospodářský plán
LVS	Lesní vegetační stupeň
NDVI	Normalizovaný diferenční vegetační index (Normalized Difference Vegetation Index)
NIR	Blízké infračervené pásmo (near infrared)
PLO	Přírodní lesní oblast
SM	Smrk ztepilý
UAS	Bezpilotní letecký systém (Unmanned Aerial Systém)
UAV	Bezpilotní letecký prostředek (Unmanned Aerial Vehicle)

1 Úvod

Přírodní poměry a podmínky se od pradávna člověk snaží maximálně využívat pro svou existenci a potřebu. V důsledku toho se samozřejmě svět okolo nás v průběhu vývoje života na Zemi výrazně změnil. Je tomu tak i v několika posledních stoletích, kdy člověk začal výrazně ovlivňovat svou činností celé ekosystémy až do dnešní podoby. Lidská činnost se tak promítla i do lesního hospodářství.

Vývoj lesů na území dnešního Krkonošského národního parku ovlivnil svým příchodem a kolonizací člověk nejvíce v průběhu 15. století. Začal zasahovat do souvislých lesních porostů a v druhé polovině 16. století s rozmachem důlního podnikání docházelo k rozsáhlým těžbám dříví pro potřebu kutnohorských dolů. V jejich důsledku byly na počátku 17. století prakticky všechny původní lesní porosty v dopravně přístupných místech odtěženy, zejména v oblasti středních a východních Krkonoš (Flousek, 2007). Došlo tím k úbytku původní přirozené skladby porostů se zastoupením buku a jedle, a lesy se začaly obnovovat z ponechaných výstavků a z porostů na nepřístupných místech, což bylo ve prospěch obnovy smrku. Změny plošné, věkové a druhové struktury lesů podmíněné rozsáhlými velkoplošnými těžbami i preferencí obnovy smrku se později projeví narušením ekologické stability lesů. Důsledkem těchto zásahů byly rozsáhlé holiny vzniklé větrnými a sněhovými kalamitami, na něž byl zpravidla vázán zvýšený výskyt hmyzích škůdců, zejména z čeledi kůrovcovitých. Na takto obhospodařovaných plochách, často obnovovaných později nevhodným ekotopem smrku, dnes můžeme vidět rozsáhlé smrkové porosty s minimálním zastoupením jiných dřevin. Velká část těchto porostů je na pokraji fyziologického stáří a v posledních letech jsou vystavovány mnoha stresovým faktorům, zejm. suchu, nedostatku živin v půdě a hmyzím škůdcům. Takto oslabené porosty se již nedokáží ubránit a jsou atraktivním lákadlem pro vývoj kalamitních škůdců, zejm. brouka lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*), mezi lesnickou veřejností zvaným kůrovec.

V současné době jsou ohroženy kůrovcem lesy v celé ČR, dle Zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2016 je podíl těžby v důsledku hmyzích škůdců 4,42 mil. m³ dříví z celkového množství 17,61 mil. m³ vytěženého dříví v ČR v roce 2016. Z této zprávy je rovněž patrná stoupající tendence podílu těžby dříví napadeného hmyzími škůdci a pro vlastníky lesů představuje tento fakt skutečnou hrozbu přemnožení kůrovce i v následujících letech. 29. října 2017 zasáhla celou ČR vichřice,

kteřá způsobila rozsáhlé škody v lesních porostech v řádu desítek tisíc m³ dříví. Tato kalamita je rovněž velkou hrozbou pro přemnožení kůrovce. V současné době je v lesním hospodářství další velice nepříjemný faktor, který může přispět k přemnožení kůrovce a to nedostatek pracovních sil v LH.

Z těchto a mnoha dalších faktorů jasně vyplývá hrozba nekontrolovatelného šíření kůrovce, pokud nedokážeme zpracovat kůrovcem napadené dříví a stojící stromy včas. Mnohdy je však i pro zkušeného lesníka velmi obtížné rozpoznat stojící, kůrovcem napadené stromy. Tento jev tzv. "Zelený útok" – nazýváme tak období, kdy stromy dosud nevykazují vizuální příznaky napadení (Abdullah 2018). A právě v tomto období, kdy je důležité včas rozpoznat zdravé stromy od napadených a tyto včas asanovat, by mohly pomoci drony, bezpilotní letouny nesoucí na sobě různá záznamová zařízení, např. v podobě fotografických přístrojů, infrakamer, multispektrálních kamer aj., sloužící pro dálkový průzkum Země.

Drony zatím nejsou přímo v lesním provozu využívány. Výzkum v této oblasti se ubírá především směrem k mapování kalamit, holin, úspěšnosti zalesňování, zjišťování vertikální a horizontální struktury porostu, mapování zdravotního stavu lesa a podobně. Rovněž jsou provedeny výzkumy v oblasti zemědělství ke zjišťování stavu úrody, škod na plodinách, stavu půdy apod.

Vzhledem k tomu, že lesy pokrývají přibližně 30% rozlohy Země, může mít monitorování lesů založené na principu dálkového průzkumu Země zásadní význam pro posuzování zdravotního stavu lesů na celém světě, přičemž včasné rozhodnutí v oblasti lesního hospodářství pro sanaci vyžadují včasné odhalení poškození lesa způsobené buď přírodními, nebo antropogenními faktory.

2 Cíl práce

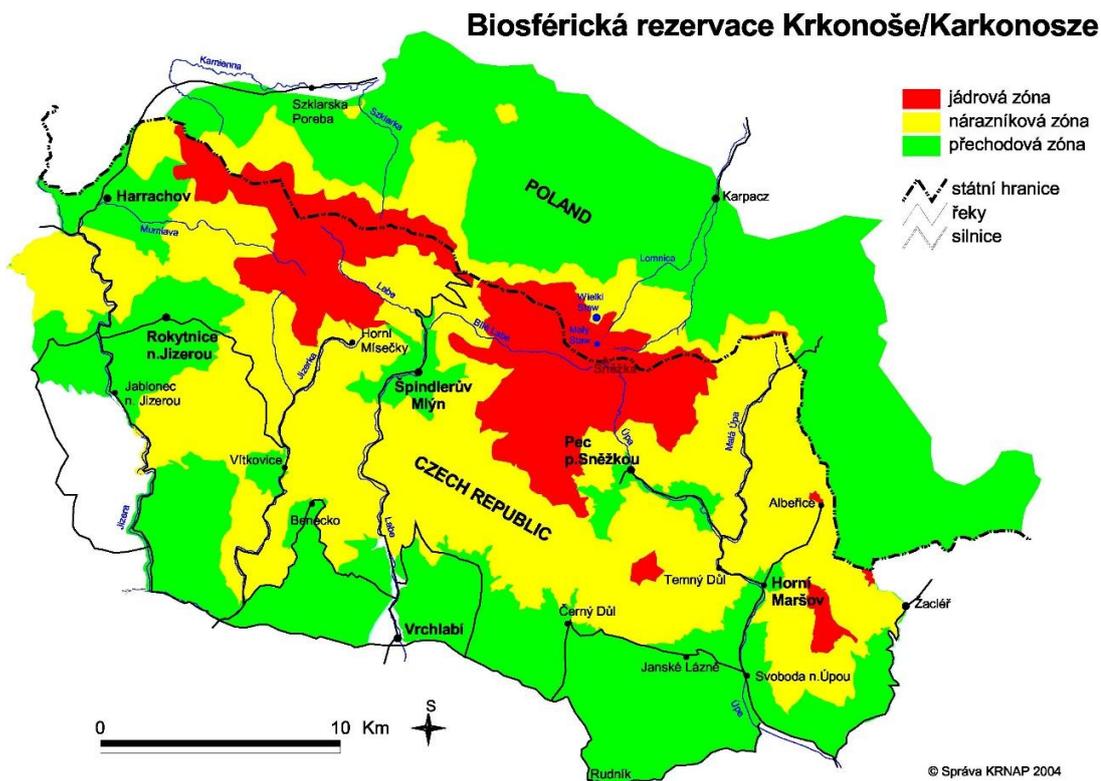
Cílem této diplomové práce je ověřit možnost využití infračerveného snímkování a následné vyhodnocení snímků k monitoringu kůrovcových ohnisek ve smrkových porostech, zda-li je možné touto metodou rozpoznat kůrovcem napadené stromy před vizuálním rozpoznáním poškození stromů při pochůzce v terénu. Pokud by se tato domněnka potvrdila, mohlo by toto včasné zmapování kůrovcových ohnisek, či jednotlivých kůrovcových stromů významně přispět v oblasti ochrany lesa proti kůrovci.

3 Rozbor problematiky

3.1 Krkonošský národní park a ÚP Pec pod Sněžkou

3.1.1 Obecné informace a geografická poloha KRNAP

Krkonoše jsou významnou přírodní a historickou oblastí na severu České republiky. V roce 1963 zde by na rozloze 36 327 ha vyhlášen Krkonošský národní park, později k němu přibýlo tzv. ochranné pásmo o výměře 18 642 ha. Plocha lesů zde zaujímá 67% výměry KRNAP. Péčí o toto území je pověřena Správa Krkonošského národního parku se sídlem ve Vrchlabí, která spravuje od 1. 1. 1994 též lesní ekosystémy (Schwarz 1997). Na severních polských svazích Krkonoš byl zřízen národní park již v roce 1959, a to na ploše 5 560 ha, Karkonoski park narodowy. Od roku 1992 jsou Krkonoše zařazeny do světové sítě biosférických rezervací UNESCO, a to v podobě bilaterální biosférické rezervace Krkonoše/Karkonosze (Flousek 1994, Schwarz 2010). Správa KRNAP se podílí na řešení dvou projektů v rámci programu UNESCO „Člověk a biosféra“ (Programme on Man and the Biosphere – MAB): MAB č. 6 „Vliv lidské činnosti na horské a tundrové ekosystémy“ a MAB č. 8 „Biosférické rezervace (ochrana přírodních oblastí a genetického materiálu, který obsahují“ (Schwarz 2010). Území KRNAP je v souvislosti s vytvářením celoevropské soustavy chráněných území soustavy NATURA 2000 byly na území KRNAP a jeho ochranného pásma vymezeny Ptačí oblast Krkonoše (Nařízení vlády č. 600/2004 Sb., ze dne 27. října 2004, kterým se vymezuje Ptačí oblast Krkonoše) a Evropsky významná lokalita Krkonoše (Nařízení vlády č. 132/2005 Sb., ze dne 22. prosince 2004, kterým se stanoví národní seznam evropsky významných lokalit) (Flousek 1994, Schwarz 2010).



Obr. 1: Bilaterální Biosférická rezervace Krkonoše/Karkonosze (Schwarz 2010)

3.1.2 Geologické a půdní poměry

Území KRNAP patří do přírodní lesní oblasti 22 Krkonoše, je to nejvyšší horská oblast České vysočiny. Území je rozděleno do dvou hlavních regionálně geologických jednotek. Jižní a východní část Krkonoš tvoří tzv. krkonošsko-jizerské krystalikum, které se vyznačují komplexy metamorfovaných hornin. Do něj později proniklo další rozsáhlé těleso granitoidů, krkonošsko-jizerský pluton. Jižní území krystalinika je překryto mladšími vulkanosedimentárními útvary, především podkrkonošským permokarbonem, který je utvořen typickými červenými klastickými sedimenty. Převládajícím geologickým podložím je krystalikum, tedy podloží poměrně kyselé, proto jsou krkonošské půdy většinou minerálně chudé. Všeobecně se jedná o půdy hlinitopísčité, místy písčitolhinité, lokálně slabě oglejené. Jsou zpravidla hodně kamenité, místy skalnaté, případně organické. Pestrá morfologie terénu a značná propustnost zvětralin omezují vytváření vodou ovlivněných půd i při vysokých srážkách. Vlhkostně jsou však díky srážkovým poměrům příznivé (Schwarz 2010).

3.1.3 Klimatické poměry

Roční úhrny srážek jsou značně rozdílné dle umístění měřicí stanice a pohybují se v rozmezí 850 mm v nižších polohách až 1405 mm v polohách vyšších a na hřebenech hor. Přehled reálných údajů o průměrné teplotě, průměrných srážkách, délce vegetační doby z klimatologických stanic na území Krkonoš udává tabulka 1.

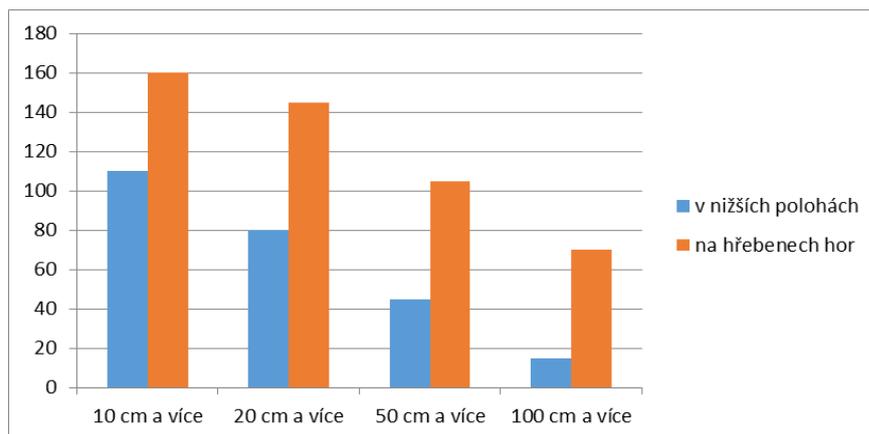
Na východním úpatí se projevuje mírný srážkový stín, v Žacléři (604 m n.m.) dosahují srážky asi 850 mm. Průměrná roční teplota se pohybuje od 6 °C v nejnižších polohách do 0 °C v polohách nejvyšších. Délka vegetační doby je v nadmořské výšce 500 m průměrně 143 dnů, v 700 m 120 dnů, v 1000 m 102 dnů, v 1500 m 15 dnů, v 1600 m zanedbatelná. Výška sněhové pokrývky dosahuje 200 – 300 centimetrů (Mikeska 2000). Sněhová pokrývky se průměrně vyskytuje od přelomu října a listopadu do poloviny dubna a ve vyšších polohách do poloviny května. Průměrný počet dnů se sněhovou pokrývkou uvádí tabulka 2 a obr. 2.

Tab. 1: Klimatické údaje (Mikeska 2000)

<i>Stanice</i>	<i>Nadm. výška (m n.m.)</i>	<i>Průměrná teplota (°C)</i>	<i>Průměrné srážky (mm)</i>	<i>Vegetač. doba (dnů)</i>
Horní Maršov	565	-	995	-
Dolní Dvůr	666	-	1201	-
Harrachov	683	4,9	1200	122
Labská přehrada	691	4,9	1342	117
Špindlerův Mlýn	753	4,7	1322	118
Pec pod Sněžkou	812	4,7	1405	-
Malá Úpa	960	3,9	1223	99
Sněžka	1602	0,2	1227	-

Tab. 2: Počet dnů se sněhovou pokrývkou (ČHMÚ)

<i>výška sněhové pokrývky</i>	<i>počet dnů</i>	
	<i>v nižších polohách</i>	<i>na hřebenech hor</i>
10 cm a více	90 - 130	150 - 170
20 cm a více	60 - 100	130 - 160
50 cm a více	30 - 60	90 - 120
100 cm a více	10 - 20	50 - 90



Obr. 2: Počet dnů se sněhovou pokrývkou (ČHMÚ)

3.1.4 Geografická poloha ÚP Pec pod Sněžkou a LÚ Obří důl

Územní pracoviště Pec pod Sněžkou se nachází v Královéhradeckém kraji, okrese Trutnov, obci a katastrálním území Pec pod Sněžkou (obr. 3). Sledované porosty se nacházejí na lesnickém úseku Obří důl, spadajícího pod ÚP Pec pod Sněžkou, LHC Horní Maršov. LÚ Obří důl se nachází severně od Pece pod Sněžkou, hranici tvoří trasa lanové dráhy na Sněžku, tj. jihozápadní úbočí Růžové hory až k vrcholu Sněžky, jež je zároveň nejvyšším bodem LÚ (1 603 m n.m.), dále podél státní hranice s Polskem k Luční boudě, a odtud k Výrovce a Richterovým boudám, zde po hranici s LÚ Zelený potok, kterou tvoří hranice oddělení 214, 215 a 216. Nejnižším místem je porost 216 C 810 (m n.m.).



Obr. 3: Geografická poloha studované oblasti v rámci ČR

(http://www.gyvolgova.cz/pk/zemepis/foltova/slepa_mapa_cr_admin.png)

3.2 Ochrana přírody na území KRNAP

3.2.1 Zřízení národního parku

Z důvodu ochrany přírodního prostředí byl na území Krkonoš vyhlášen vládním nařízením č. 41/1963 Sb. Krkonošský národní park. Před narušením zájmu ochrany přírody z okolní intenzivní lidské činnosti bylo ještě v roce 1986 zřízeno nařízením vlády č. 58/1986 Sb. ochranné pásmo KRNAP. Celková výměra činí 36 327 ha, včetně ochranného pásma pak 54 969 ha (Schwarz 2010).

3.2.2 Zonace v KRNAP

Podle přírodní hodnoty území jsou v rámci KRNAP vymezeny 3 ochranné zóny.

3.2.2.1 1. zóna KRNAP

Do 1. zóny byla zařazena území s nejvýznamnějšími přírodními hodnotami, s výskytem jedinečných ekosystémů krkonošské alpínsko-arktické tundry, přirozené nebo minimálně pozměněné ekosystémy, kde je cílem ochrany uchovat či obnovit samořídící funkce ekosystémů a omezit lidské zásahy do přírodních procesů.

3.2.2.2 2. zóna KRNAP

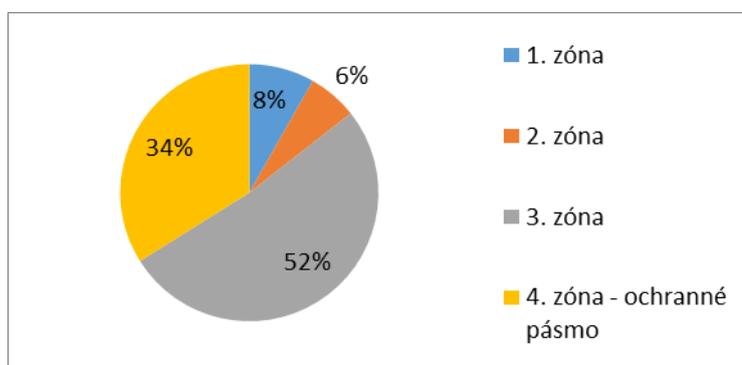
2. zónu tvoří oblast s významnými přírodními hodnotami, člověkem převážně pozměněné lesní a zemědělské ekosystémy vhodné pro omezené přírodě blízké a šetrné obhospodařování. Cílem je udržení druhové rozmanitosti, podpora přírodní rovnováhy a postupné přiblížení ekosystémů přirozenému stavu.

3.2.2.3 3. zóna KRNAP

3. zónu tvoří území člověkem značně pozměněných ekosystémů a center soustředěné zástavby. Cílem je udržet a přiměřeně podporovat využívání pro trvalé bydlení, zemědělské a lesní hospodaření, turistiku a rekreaci (Schwarz 2010).

Tab. 3: Výměry zón KRNAP a jeho ochranného pásma (Schwarz 2010)

Území	Výměra v ha
1. zóna	4503
2. zóna	3416
3. zóna	28408
ochranné pásmo	18642
Celková plocha KRNAP	36327
KRNAP + ochranné pásmo	54969



Obr. 4: Procentické zastoupení zón KRNAP (Schwarz 2010)

3.3 Lesní hospodářství a Plán péče na území KRNAP

V Krkonoších vycházejí zásady hospodaření z Plánu péče pro Krkonošský národní park a jeho ochranné pásmo z roku 2010. Protože celé území přírodní lesní oblasti tvoří lesy národního parku a jeho ochranného pásma, je třeba při realizaci managementu lesních ekosystémů dodržovat řadu požadavků ochrany přírody (Schwarz 1997). Jedná se zejména o ekosystémový přístup k lesu diferencovaně podle SLT, zón odstupňované ochrany přírody a stupňů přirozenosti lesních porostů (Vacek, 2010).

3.3.1 Stupně přirozenosti lesních porostů

Lesní porosty na území KRNAP jsou v Plánu péče a následně v platném LHP zařazeny do 5 stupňů přirozenosti, jimiž se obecně rozumí rozdíl mezi aktuální a přirozenou strukturou (věkovou, prostorovou a druhovou) lesního porostu, danou mírou jeho ovlivnění lidskými zásahy. Pro hodnocení stupně přirozenosti bylo zásadní, zda v něm byl proveden zásah člověka a zda vykazuje znaky ovlivnění tímto zásahem – a to buďto

ve struktuře či dynamice vývoje. Scwarz (2010) uvádí v Plánu péče následující charakteristiky pro jednotlivé stupně přirozenosti.

3.3.1.1 Les původní

Les původní (ozn. stupně přirozenosti A) – jedná se o člověkem velice málo ovlivněné porosty, jejichž druhová, věková a prostorová skladba odpovídají přirozené druhové a prostorové skladbě porostů a potencionální přirozené vegetaci. Za původní les lze označit i porosty, které byly v minulosti ovlivněny člověkem, ovšem zásah neměl vliv na vybočení z přirozeného vývoje. Převážně jsou to porosty kosodřeviny a azonální společenstva lavinových drah nad horní hranicí stromové vegetace v 1. zóně KRNAP. Výměra těchto porostů je 1 790,08 ha.

3.3.1.2 Les přírodní

Les přírodní (B) – mezi lesy přírodní jsou zařazeny lesní porosty vzniklé převážně přírodními procesy (záměrné obnovní zásahy v minulosti nepřesahovaly ¼ plochy), ovlivňované toulavou těžbou a pastvou v minulosti a následně ponechané cca do r. 1994 přírodními procesům. Jedná se o autochtonní klečové, smrkové, smíšené a listnaté porosty roztroušené fragmentálně nebo ve větších komplexech po celém území KRNAP, les vzniklý přírodními procesy, avšak člověkem v minulosti ovlivňovaný. Podle historického průzkumu nebyly tyto porosty založeny sadbou ani sítí. Jejich druhová, věková a prostorová skladba převážně odpovídá stanovištním poměrům, v některých případech pravděpodobně s částečně pozměněnou druhovou skladbou. V období 1994 – 2002 zde byla v 1. a 2. zóně KRNAP v rámci opatření na ochranu lesa prováděna asanace jednotlivých stromů napadených kůrovci těžbou a odkorněním s ponecháním dřevní hmoty na místě. V letech 1994 až 2002 zde byly lokálně, jako rekonstrukční opatření, provedeny podsadby autochtonními dřevinami přirozené druhové skladby. Výměra přírodních lesů činí 909,01 ha.

V současné době jsou porosty zařazené do výše uvedených stupňů přirozenosti od roku 2012 ponechány samovolnému vývoji.

3.3.1.3 Les přírodě blízký

Les přírodě blízký (C) – zde jsou zařazeny lesní porosty, které vznikaly pod vlivem člověka, dlouhodobě docházelo k usměrňování jejich vývoje, avšak v současnosti v nich

záměrné obhospodařování neprobíhá. Jedná se o lesní porosty, jejichž dřevinná skladba odpovídá převážně stanovištním poměrům, o rozsáhlejší komplexy smrkových, smíšených i listnatých lesů převážně ve 3. a 2. zóně KRNAP. Probíhalo zde lesní hospodaření (odvoz odumřelého dříví, těžba dříví, výchovné zásahy apod.). Výměra přírodě blízkých lesů činí 9 729,22 ha.

3.3.1.4 Les kulturní

Les kulturní (D) – mezi lesy kulturní jsou zařazeny lesní porosty založené umělou nebo kombinovanou obnovou. Jejich druhová skladba stanovištním poměrům sice převážně odpovídá, ale často chybí druhy v přirozené skladbě méně zastoupených dřevin. Tyto porosty vznikaly a vznikají pod vlivem člověka. Jedná se o porosty, v kterých jsou prováděny obvyklé hospodářské činnosti jako například pěstební práce, výchova, případně obnova porostů. Převažují ve 3. zóně národního parku a v jeho ochranném pásmu, ale jejich významná část je i v 1. a 2. zóně národního parku, například uměle založené porosty kosodřeviny nevhodného a nebo nejistého původu. Výměra porostů kulturních činí 23 975,93 ha.

3.3.1.5 Les nepůvodní

Les nepůvodní (E) – les, jehož dřevinná skladba převážně neodpovídá poměrům stanovištním. Jedná se o porosty založené umělou obnovou, často geneticky nevhodné a nepůvodní (fenotypová kategorie D). Převážná část lesů nepůvodních je ve 2. a 3. zóně KRNAP, nepatná část se však vyskytuje i v 1. zóně. Většina lesních porostů, splňujících podmínky na zařazení do lesů nepůvodních, je v národním parku v různých fázích rekonstrukce a známky obhospodařování jsou tedy patrné. Výměra nepůvodních porostů je 44,20 ha (Schwarz 2010).

3.3.2 Management hospodaření na území KRNAP

Hospodaření v lesích se provádí dle platného LHP. Součástí LHP jsou rámcové směrnice hospodaření v nichž stanovena pěstební a těžební opatření zásadní pro hospodaření v lesích vycházející ze současného platného Plánu péče o NP. Pro každou porostní skupinu je v LHK mj. definován tzv management hospodaření, který přímo určuje, či omezuje některé činnosti prováděné v rámci péče o lesní ekosystémy, tzv. managementová opatření.

3.4 Problematika lýkožrouta smrkového

3.4.1 Obecné informace

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* (Linné, 1758)) patří mezi nejvýznamnější hospodářské škůdce kulturních porostů s převahou smrku v Eurasii, zejména pro svou schopnost exponenciálně se množit v příhodných potravních a klimatických podmínkách. Z hlediska velikosti těla se řadí mezi naše největší kůrovce. Za normálních podmínek napadá především stromy oslabené, jejichž schopnost úspěšně se bránit náletu kůrovců je značně snížena, dále pak preferuje kalamitou poškozené stromy, zlomy a vývraty. Větrné kalamity a pozdní zpracování jejich následků ve spojení se suchem a slunečným a teplým počasím tak představují ideální podmínky pro jeho přemnožení, během něhož již brouci napadají i stromy zdravé. Lýkožrout smrkový se pak může stát významným činitelem způsobujícím nejen odumření jednotlivých stromů, ale i rozsáhlých komplexů smrkových porostů (Kindlmann 2012).

3.4.2 Popis druhu a taxonomické zařazení

Lýkožrout smrkový náleží do čeledi kůrovcovití (*Scolytidae*, *Coleoptera*) a do rodu *Ips*, kam byl přeřazen Reitterem v roce 1894. Tomu však předcházela řada nomenklatorických změn. Podle Pfeffera (1995) čeleď kůrovcovití (*Scolytidae*) zahrnuje více než 5000 druhů, faunu středo a západopalearktických kůrovců tvoří 308 druhů (53 rodů), přičemž je potravně k rodu *Picea* vázáno 56 druhů, z nichž 39 druhů napadá smrk ztepilý (*Picea abies*). Ze 111 druhů kůrovců potvrzených v ČR (Jelínek 1993) může být 31 zástupců zaznamenáno na smrku ztepilém (Pfeffer 1995). Lýkožrout smrkový se obvykle vyvíjí téměř výhradně na smrku ztepilém (*Picea abies*). Výskyt lýkožrouta smrkového souvisí s přirozeným areálem jeho živných dřevin (*Picea*, *Pinus*, *Abies*); výjimečně napadá i modřín opadavý (*Larix decidua*, Mill.) a pouze velmi vzácně také borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.).

Tabulka 4 uvádí systematické zařazení druhu *Ips typographus* do taxonomického systému, tak jak je zařadili Křístek, Urban (2013).

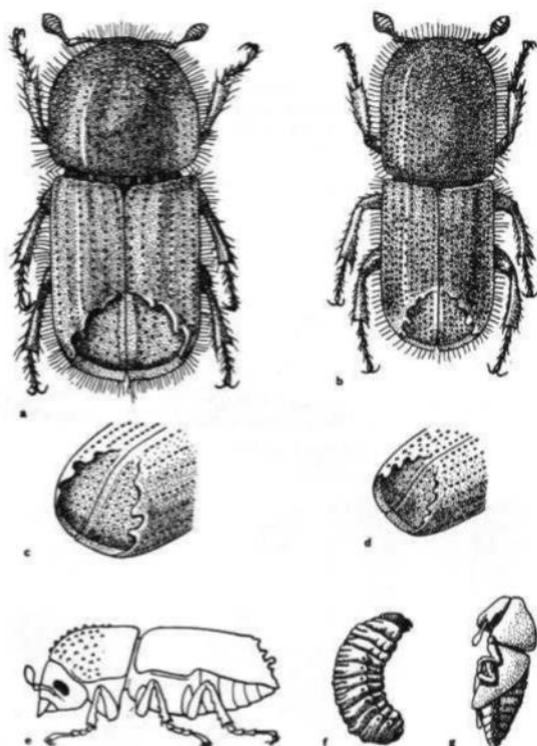
Tab. 4.: Taxonomické zařazení do systému (Křístek, Urban 2013)

TŘÍDA	<i>INSECTA</i>
PODTRÍDA	<i>PTERYGOTA</i>
ŘÁD	<i>COLEOPTERA</i>
PODŘÁD	<i>POLYPHAGA</i>
NADČELEĎ	<i>CURCULIONOIDEA</i>
ČELEĎ	<i>SCOLYTIDAE</i>
PODČELEĎ	<i>IPINAE</i>
ROD	<i>IPS</i>
DRUH	<i>IPS TYPOGRAPHUS</i>

Následující text popisuje morfologické znaky a bionomii lýkožrouta smrkového tak, jak je uvádí Kula (2014).

Dospělý brouk lýkožrouta smrkového má lesklé tělo válcovitého tvaru, dorůstá velikosti 4,2 – 5,5 mm, šířky 1,9 mm. Zbarven je do tmavohnědé až černohnědé barvy. Zbarvení vylíhlého jedince je bílé a následně žlutne a postupně tmavne až do černé barvy. Svrchní i boční strana těla je pokryta dlouhými, zlatavými chloupky. Tykadla jsou žlutavá, lomená, zakončená kulovitou paličkou tvořenou třemi články. Štít je válcovitý nevýrazně delší než širší, v předu hrbolekovaný a vzadu jemně tečkovaný. Krovky jsou válcovité, málo sbíhavé, charakteristicky v řádcích hluboce tečkované, silně lesklé, čímž se liší od příbuzných druhů. Zadní část krovek je matná, na konci na obvodu opářená čtyřmi páry zoubků. Jednotlivé páry leží ve stejné vzdálenosti, přičemž zoubky 1. a 4. páru jsou drobné, zoubky 2. páru jsou při základu ztlustlé a třetí pár má zoubky největší a protažené, u samečků knoflíčkovitě rozšířené. Počet a tvar zoubků je jedním z hlavních rozlišovacích znaků jednotlivých druhů. Podle celkového počtu zoubků je v němčině nazýván „Achtzahnigen Fichtenborkenkäfer“ (osmizubý kůrovec) nebo „Der Buchdrucker“ (knihtiskař), v angličtině „The Spruce Bark Beetle“.

Pohlavní dimorfismus: samička má pod ústním ústrojím vytvořeny rýhy, samci mají výraznější hrbolek nad zadní částí hlavy a dále výrazně zvětšený třetí zub v zadní části krovek.



Obr. 5: Morfologické znaky lýkožrouta smrkového (Zumr 1995)

- a - lýkožrout smrkový má na krovkách mezirýží hladké a paličku tykadlovou se zřetelně prohýbanými švy
- b - lýkožrout menší má mezirýží řídkce tečkované a paličku tykadlovou s rovnými švy
- c, d - zadečky jsou shodné v počtu čtyř zoubků, z nichž třetí je největší
- e - pohled na imago z boku, štít vpředu hrbolkovaný, vzadu jemně tečkovaný
- f - larva
- g – kukla, na níž jsou patrný všechny orgány dospělé

3.4.3 Způsob života, bionomie

Lýkožrout smrkový má v podmínkách ČR zpravidla dvě pokolení, za příznivých podmínek však může mít i tři pokolení. V nižších polohách pahorkatin (do 400 m n. m.) se začíná rojit zpravidla koncem dubna až začátkem května, ve středních polohách, vlastních chlumech zpravidla v polovině května a v podhorských a horských oblastech nad 600 m n. m. v druhé polovině května až do poloviny června v závislosti na průběhu počasí. Jarní rojení zpravidla trvá 10 – 20 dní, pokud poletující brouci nejsou pohlavně vyspělí, prodělávají ještě jeden až dva týdny zralostní, úživný žír. Brouci, kteří dokončí zralostní žír na podzim, přistupují po opuštění zimovišť k rozmnožování (Křístek, Urban 2013).

Lýkožrout smrkový potřebuje k životu, vzhledem ke své velikosti, dostatečně silnou vrstvu lýka, proto nejlepší prostředí nalézá pod kůrou 60 – 100 letých stromů pod

korunou na hranici suchých a zelených větví, odkud se postupně rozšiřuje po kmeni nahoru i dolů. Na místech závrťů jsou během prvních týdnů napadení na kmeni patrné hnědé drtinky, nejčastěji ve formě malých hromádek u závrťu, nebo v místech za rozpraskanými šupinami borky (obr. 5.), později jsou napadené živé stromy identifikovatelné díky nápadnému výronu pryskyřice.



Obr. 6.: Hnědé drtinky – rozpoznávací znak kůrovcem napadeného smrku

Sameček lýkožrouta smrkového pronikne přes kůru do lýka, kde vyhlodá snubní komůrku. Zde samci vylučují sexuální feromony, které přilákají samičky a dochází ke kopulaci, většinou se dvěma až pěti samičkami. Samičky následně vyhloubí matečné chodby, v nichž do zářezů postupně nakladou vajíčka ve vzdálenosti 1 – 10 mm. Matečné chodby jsou tedy v požerku patrné jako rovnoběžně s osou kmene vyhlodané přibližně 10 – 12 cm dlouhé chodby. Samička naklade zpravidla 1 – 2 vajíčka denně, v průběhu života naklade celkem mezi 20 a 100 vajíčky, nejčastěji 60 vajíček (Křístek, Urban 2013). Většinu vajíček nakladou během 1. náletu, pak prodělávají krátký regenerační žír a zakládají tzv. sesterské pokolení buď v prodloužených matečných chodbách na stávajícím kmeni, nebo se většinou vyrojí a zakládají sesterské pokolení na vhodných stromech v okolí. Vajíčko je jediným vývojovým stádiem u kůrovců, které nezimuje (Kula 2014).

Z vajíček se po 1 – 2 týdnech vylihnuou bělavé larvy, menší než 2 mm, které hlodají v lýku chodby na obě strany, u víceramenných požerků pouze na jednu stranu, kolmo od matečné chodby. Larva v průběhu vývoje prochází 4 – 5 instary, kdy se svléká, čímž se larvální chodba nápadně rozšiřuje, na konci chodby se tak utváří v kuklovou kolébkou, zde se larva zakuklí.

Délka vývoje larvy má velký rozptyl (6 – 50 dní), protože je ovlivněna klimatickými podmínkami, kvalitou potravy, parazitací (Quaschik 1953). Volná kukla lýkožrouta smrkového je bílá, 5–6 mm dlouhá, s viditelnými vnějšími orgány. Kukla je uložena v kuklové kolébce vytvořené larvou v lýku po dobu 6–17 dní. Zpravidla nad kuklovou kolébkou bývá výletový otvor. Počet výletových otvorů nemusí odpovídat počtu imag s dokončeným vývojem, protože část jedinců využije již vyhlodaného otvoru. Celková délka vývoje jednotlivých stádií je až na vajíčka poměrně proměnlivá a souvisí i s tím, zda dané stádium zimuje (Kula 2014).

3.4.4 Faktory ovlivňující vývoj kůrovce, předpověď vývoje

Jak je již uvedeno v předchozí kapitole, velký vliv na vývoj lýkožrouta smrkového má teplota a vlhkost vzduchu. Na optimum těchto parametrů reaguje zkrácením vývoje a zvýšením počtu pokolení (generací) během roku. Zásadním faktorem je teplota, která určuje celkovou délku doby vývoje lýkožrouta smrkového na 6 – 10 týdnů. Kladení vajíček začíná u lýkožrouta smrkového při teplotě 12 – 33 °C (optimum 29 °C). Minimální teplota pro vývoj vajíčka 7,9 °C, larev 8,7 °C, kukel 1,6 °C a celkový preimaginální vývoj 5,8 °C. Při teplotním rozpětí 15 – 29 °C se vývoj s vzrůstající teplotou urychluje (vývoj vajíčka 3 – 12 dní, vývoj larev 11 – 30 dní, stádium kukly trvá 2 – 11 dní). Prahová teplota pro vývoj, příjem potravy a pohybovou aktivitu se dle různých autorů odlišuje v rozmezí 5 – 12 °C. Spodní hranice délky vývoje je dosažena při působení optimální teploty 29 °C a nejdéší při chladném průběhu počasí v blízkosti spodní hranice aktivního pohybu kůrovce (14 °C) (Kula 2014).

Pro předpověď počtu generací byl vyvinut fenologický model PHENIPS. Zde právě byly použity limitní hodnoty pro vývoje jednotlivých stadií. Obecný princip modelu je následující: limit maximální denní teploty určuje začátek vývoje škůdce na jaře. Vývoj jednotlivých vývojových stadií je následně určován teplotou kůry. Rychlost a ukončení vývoje jednotlivých stadií jsou určeny na principu kumulace tzv. stupňodní (degree-days).

Pro ukončení vývoje jedné generace je zapotřebí suma 557 stupňodní. Celkové ukončení vývoje v rámci roku je určováno délkou fotoperiody 14,5 dne (Baier a kol. 2007).

Podobný princip využívá předpovědní model TANABBO vyvinutý pro hodnocení dynamiky přemnožení lýkožrouta smrkového. Jedná se jeden z prvních systémů včasného varování před napadením 1. smrkovým, využívající dálkového průzkumu země (DPZ) a GIS nejen v České republice, ale obecně pro podmínky smrkových ekosystémů (Jakuš et al. 2017).

3.5 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum můžeme definovat jako metodu pro bezkontaktní získávání informací o různých objektech a jevech pomocí moderních technologií. Pro tento výraz existuje velká řada definic, např.: Dálkový průzkum Země je věda i umění získávat užitečné informace o objektech, plochách či jevech prostřednictvím dat měřených na zařízení, která s těmito zkoumanými objekty, plochami či jevy nejsou v přímém kontaktu. (Lillesand, Kiefer 1994). Kolář (1989) zmiňuje fyzikální základy DPZ definicí: Dálkový průzkum Země je založen na poznatku, že pro každý fyzikální objekt a jeho stav je charakteristický způsob, jakým ovlivňuje okolní silová pole. Měřením charakteristik polí lze zpětně zjistit údaje o objektu bez toho, abychom se s ním dostali do přímého kontaktu.

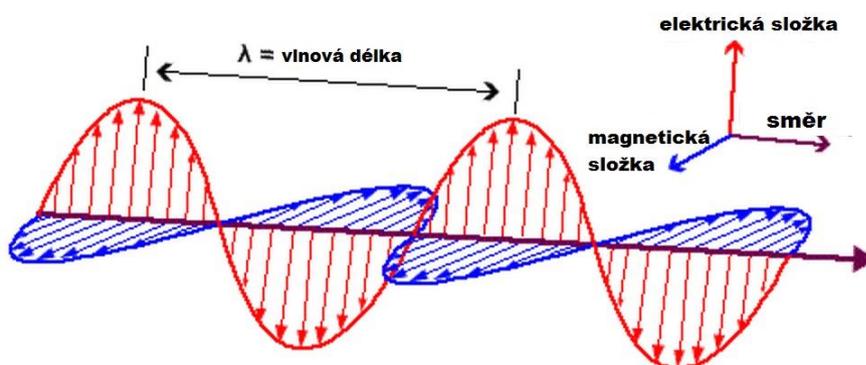
Dálkový průzkum je v anglicky psané literatuře znám jako remote sensing. Řadíme ho mezi tzv. geoinformační technologie, tedy technologie, které umožňují o daném objektu získávat informace, dále je ukládat následně zpracovat, analyzovat a vyhodnotit.

3.5.1 Podstata a principy DPZ

Podstatou pro získávání dat o objektech nebo jevech v DPZ je elektromagnetické záření. Toto záření se šíří prostorem ve tvaru tzv. elektromagnetické vlny. Elektromagnetická vlna se skládá ze dvou částí tzv. elektrického a magnetického pole (viz obr. 7). V homogenním izotropním prostředí jsou na sebe tato pole kolmá, ve směru šíření jsou rovnoběžná a šíří se rychlostí světla (c). Elektromagnetickou vlnu můžeme charakterizovat vlnovou délkou (λ) a frekvencí (ν). Vlnová délka je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny, frekvence je charakterizována jako počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času. Vlnová délka se měří v metrech (m) nebo

jednotkách odvozených, frekvence se měří v Hertzech (Hz). Vztah mezi frekvencí a vlnovou délkou tvoří nepřímá úměra $\lambda = c / \nu$ (Dobrovolný 1998).

Elektromagnetické záření jsou schopny pohlcovat nebo odrážet všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula ($-273,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Zdrojem tohoto záření mohou být Slunce nebo Země. To, jak záření vypadá, charakterizují základní zákony záření. Zdroj měřeného záření lze rozdělit na aktivní nebo pasivní. Aktivní záření využívá umělého zdroje záření, tento princip se využívá především u radarů, v menší míře u laserů. Pasivní metodou rozumíme měření přírodního záření, tj. tepelné záření emitované objektem nebo odražené sluneční záření (Kolář 1989).

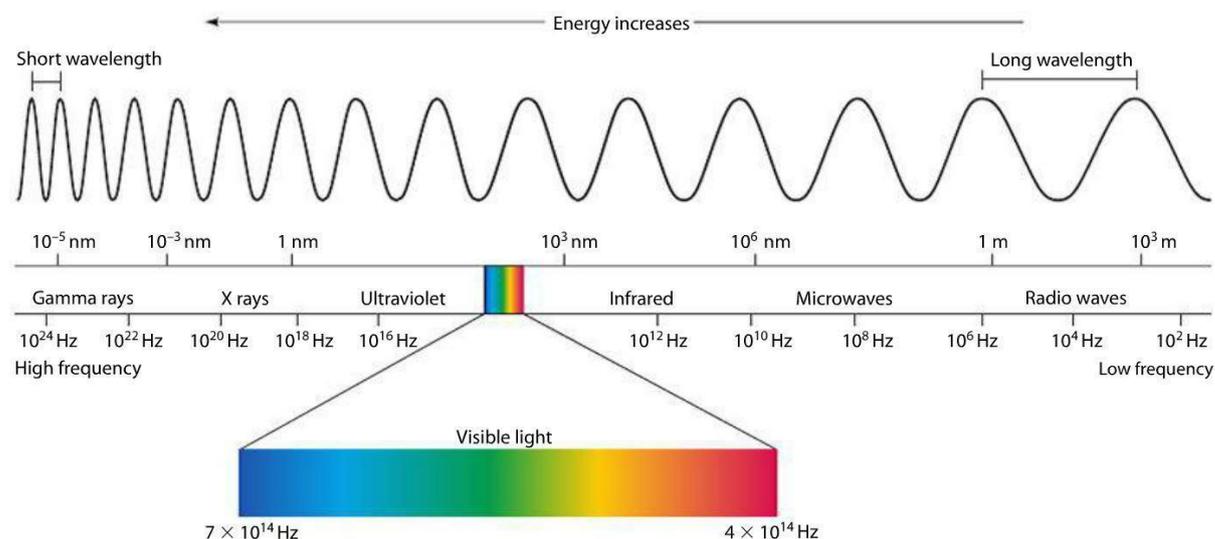


Obr. 7: Elektromagnetické pole (Dobrovolný 1998)

Předtím, než záření použité pro DPZ dosáhne povrchu Země, musí projít atmosférou. Částice a plyny v atmosféře mohou procházející záření ovlivnit. Tyto jevy jsou způsobeny mechanismy rozptylu a pohlcování. Rozptyl se objevuje, když částice nebo větší molekuly plynu přítomné v atmosféře ovlivňují elektromagnetické záření a odkloní ho od původní cesty. Vliv rozptylu záleží na vlnové délce záření, množství plynů a vzdálenosti, kterou záření prochází. Pohlcování je druhým hlavním mechanismem ovlivňujícím elektromagnetické záření procházející atmosférou. Na rozdíl od rozptylu je zde energie záření pohlcována molekulami. Nejvýznamnější absorbenty jsou ozón (O_3), který absorbuje UV záření, a oxid uhličitý (CO_2), který způsobuje tzv. skleníkový efekt, protože silně absorbuje záření v infračerveném spektru (Dobrovolný 1998).

3.5.2 Elektromagnetické spektrum

Celý rozsah vlnových délek elektromagnetického záření se označuje jako elektromagnetické spektrum, to je rozděleno do několika skupin, které jsou graficky znázorněné a popsané na obr. 8.



Obr. 8: Elektromagnetické spektrum

<https://i1.wp.com/czechmag.cz/wp-content/uploads/2017/10/electromagneticspectrum.jpg?fit=1393%2C617>

3.5.2.1 Radiové záření

Radiové záření pokrývá rozsah vlnových délek větších než 10 cm až do vlnové délky 3 km. Tento vlnový rozsah používají zobrazující radary, altimetry a v menší míře i pasivní radiometry. Je vytvořeno uměle pohybem elektronů v anténě, jenž je vynucen změnou přiváděného elektrického napětí.

3.5.2.2 Mikrovlnné záření

Mikrovlnné záření pokrývá rozsah od 1 mm do 1 m a je tvořeno umělým způsobem. V obou případech vzniká záření s několikanásobně vyšší intenzitou, než je záření stejné vlnové délky produkované přírodními zdroji. Tento rozsah vln je využívají mikrovlnné radiometry a spektrometry a radarové systémy.

3.5.2.3 Infračervené záření

Infračervené záření (IR – infrared) zaujímá rozsah vlnových délek v rozmezí od 1 mm do 0,72 μm . IR záření bývá rozděleno do 4 pásek, jež uvádí tabulka 5 (Halounová 2005).

Tab. 5: Rozdělení infračervené oblasti spektra (Halounová 2005)

Pásmo	Vlnový rozsah (μm)
blízké IR	0,72 - 1,3
střední IR	1,3 - 4
daleké IR = teplotní	4 - 25 (~300)
submilimetrové vlny	> ~ 100

Oblast blízkého IR záření je pokračováním viditelné části spektra a chová se velmi podobně. Není již tolik pohlcováno a rozptýlováno atmosférou. Lze je zaznamenávat konvenčními metodami, fotograficky i elektronicky. Tyto vlnové délky jsou důležité především pro studium vegetace v lesnictví a zemědělství.

Oblast středního IR záření má dvě atmosférická okna se středy okolo 1,5 a 2,2 μm . V prvním okně lze dobře rozlišit např. druhy vegetace, hodí se k rozpoznání sněhu a ledu, zdravotního stavu vegetace.

Oblast teplotního IR záření má dvě atmosférická pásma v rozsahu 3 μm – 5 μm a 8 μm – 12 μm . V tomto rozsahu lze přesně kalibrovanými senzory sledovat tepelnou bilanci objektů, např. zjišťování povrchové teploty oceánů (Dobrovolný 1998).

Záření vlnové délky větší než 25 μm je velmi silně v atmosféře pohlcováno, proto se v DPZ nepoužívá. Rozsah těchto vlnových délek je používáno ve spektrometrech, radiometrech, polarimetrech a laserech (Halounová 2005).

3.5.2.4 Viditelné záření

Viditelné záření charakterizuje rozsah vlnových délek v rozmezí 380 nm – 720 nm. Schematicky lze rozdělit viditelné záření na část modrého světla 0,4 μm – 0,5 μm zeleného světla 0,5 μm – 0,6 μm a červeného světla 0,6 μm – 0,7 μm . V suché a čisté

atmosféře je záření ovlivňováno poměrně málo, výrazněji je však rozptylováno a pohlcováno různými aerosoly a neprochází tedy mlhou nebo oblačností. Zdrojem viditelného záření je Slunce. Cracknell (1993) uvádí, že modré světlo může pronikat v čisté vodě oceánů až do hloubky 20 – 30 m, zatímco v červené části viditelného spektra je záření vodou poměrně silně pohlcováno, čehož lze využít při studii fyzikálních a biologických vlastností objektů. V oblasti viditelného záření pracují všechny konvenční metody pro získávání obrazových dat, také většina družicových systémů poskytuje informace ve viditelné části spektra (Dobrovolný 1998).

3.5.2.5 Ultrafialové záření

Ultrafialové záření (UV) je v rozsahu vlnových délek 30 nm – 380 nm a vyznačuje se tím, že velká část tohoto záření je pohlcována atmosférou. UV část spektra je velmi zajímavá pro geologické aplikace, mnoho minerálů vydává záření v těchto vlnových délkách a lze je snadněji identifikovat. Např. Legg (1994) s UV laserem zkoušel identifikovat ložiska zlata.

3.6 Bezpilotní prostředky pro DPZ

3.6.1 Obecné informace, základní pojmy

Pojem bezpilotní prostředky (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) pro DPZ zahrnuje velmi rozsáhlý výčet různých typů letadel, vrtulníků, vzducholodí a balónů, které jsou schopny letu bez člověka na palubě, jsou ovládány na dálku. Obecně lze bezpilotní prostředky zařadit do mnoha kategorií podle různých kritérií. Ve své diplomové práci Řehák (2012), kde se zabývá bezpilotními prostředky využitelné ve fotogrametrii, shrnuje nejčastější rozdělení bezpilotních prostředků na lehčí a těžší než vzduch, dále pak na stroje s pevným, rotačním, či stavitelným křídlem, bez pohonu nebo s pohonem, a v neposlední řadě dle velikosti. Podobně dělí UAV Eisenbeiß (2009), mezi tyto kategorie můžeme zařadit nejrůznější bezpilotní prostředky, jako jsou balóny, draci, letadla, vrtulníky atd. Tato práce se zabývá konkrétně bezpilotním vrtulníkem oktokoptérou Zyferos Oktos XL, který je dále popisován v kapitole 4.2.1.

Mezi základní pojmy, které jsou dále používány i v legislativě, patří pojem bezpilotní letadlo a bezpilotní systém. Definice dle doplňku X: Bezpilotní systém (UAS) se

skládá z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypouštění a návrat. Bepilotních letadel, řídicích stanic, nebo zařízení pro vypouštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více. Bepilotní letadlo (UAV) je letadlo určené k provozu bez pilota na palubě.

3.6.2 Legislativní omezení

V ČR se řídí provoz UAV platnými legislativními nástroji, a sice zákonem č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a zákonem č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. V souladu s těmito zákonnými normami vydalo Ministerstvo dopravy letecký předpis L2 Pravidla létání, jehož součástí je Doplněk X, který upravuje pravidla pro používání bezpilotních systémů. Zde je stanoveno základní rozdělení dle váhy UAV do 0,91 kg, 0,91 – 7 kg, 7 – 20 kg a nad 20 kg, a účelům, k jakým je používán buď k rekreačně sportovním nebo k výdělečným, experimentálním či výzkumným. V tabulce č. 6 jsou uvedeny další požadavky na pilota či UAV na základě výše uvedeného rozdělení.

Dalším legislativním omezením je zákon č 114/1992 sb. o ochraně přírody a krajiny, který v §16 zakazuje: létání v rozporu s podmínkami stanovenými v opatření obecné povahy vydaném podle jiného právního předpisu, kromě letů pro zajištění bezpečnosti státu, ochrany osob, majetku nebo veřejného pořádku, a letů pro potřeby orgánů ochrany přírody. Na základě tohoto legislativního omezení bylo nutné požádat k provádění monitoringu UAV na území KRNAP odbor státní správy.

Tab. 6: Rozdělení UAV (zákon č. 49/1997 sb., Doplněk X)

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální hmotnost	< 0,91 kg		0,91 kg a < 7 kg		7 – 20 kg		> 20 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	oprávnění k provádění LP a LČPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID šlítek / ID šlítek + pozn. Značka	ne / ne	ano / ne	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004	ne/ 1	dle nař. č. 785/2004	ne/3	dle nař. č. 785/2004	dle nař. č. 785/2004		dle nař. č. 785/2004
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano

3.7 Využití DPZ v lesnictví a zemědělství, přehled literatury

K výraznějšímu rozvoji DPZ s využitím UAV došlo na přelomu 20. a 21. století nejen v lesnictví, ale i ostatních oborech. William M. Ciesla vydal v roce 2002 svou publikaci určenou především pro odborníky v oblasti lesnické biologie, kde se zabývá sledováním lesních porostů mírného pásma Severní Ameriky a opírá se o data získaná pomocí DPZ, kdy škody na lesních porostech, které jsou předmětem největšího zájmu specialistů na ochranu lesa, se obvykle objevují jako změna barvy na celé nebo části

koruny stromu. Proto jsou pro monitoring poškození třeba barevné, CIR nebo multispektrální snímky, na místo černobílých panchromatických obrazů. V práci jsou publikovány postupy pro hodnocení chorob lesních porostů, stavů hmyzích škůdců a dlouhodobějších klimatických změn (Ciesla 2000).

Dalším autorem, který se zabýval včasnou předpovědí pro ochranu lesa před kůrovci, byl Lausch a kol. (2013), jehož studie analyzovala hypotézu, že vitalita smrkových porostů je již před napadením kůrovci změnou klimatu nebo působením emisí do určité míry snižena, takže následné napadení porostů kůrovci je pouze sekundárním jevem. Byly použity technologie s pomocí dálkového snímání k detekci změn v biochemických a biofyzikálních vlastnostech smrkových porostů. Studie probíhala v národním parku Bavorský les v Německu. Pro tuto studii bylo analyzováno a porovnáno z hlediska přesnosti jejich klasifikace několik spektrálních pásem, vegetačních indexů a specifických kombinací spektrálních pásem hyperspektrálních dat. V této studii byly zjištěny jasné spektrální rozdíly mezi skupinou smrků, které byly ještě zelené, avšak se sníženou vitalitou (možná první etapy napadení kůrovcem, Lausch et al. tento jev nazývá jako zelený útok) a zdravými smrkovými stromy. Předpověď pozorovaných vlivů z této studie patrná s přesností 64% se však v lesnických praxi považuje za nedostatečnou (Lausch et al. 2013).

Studii počátečního poškození porostů smrku ztepilého pomocí metod DPZ se v oblasti Krušných hor zabýval Campbell et al. (2004). Bylo zde sledováno 23 oblastí kolem gradientu znečištění ovzduší imisemi. Smrkové porosty této oblasti zaznamenávaly dramatický pokles růstu v důsledku vysoké úrovně znečištění ovzduší (výrazné koncentrace SO_2 , NO_x), které začalo přibližně v roce 1965. Znečištění ovzduší změnilo následně podmínky v celém ekosystém této oblasti, dalším souvisejícím faktorem byla acidifikace půdy (Kubíková 1991). Krušné hory tak nabízejí jedinečnou příležitost ke studiu, kde je patrný celý rozsah podmínek poškození porostů v rámci jednoduchého, homogenního celku. Byly zde sledovány rozdíly v struktuře korun stromů, množství jehlic a listových složek, koncentrace chlorofylu a karotenoidu v rámci jednoho druhu. Tyto koncentrace typicky klesají v reakci na stres a naznačují rozdíly ve zdravotním stavu lesa, zatímco další listové sloučeniny se mohou hromadit uvnitř listů. Takové změny ovlivňují spektrální vlastnosti vegetace. Fyziologický stav lesa byl hodnocen pomocí metodiky pro hodnocení stavu jednotlivých korun stromů upravené pro použití s barevným infračerveným fotografováním. Tato studie demonstruje, že hyperspektrální data mohou

poskytnout zlepšené možnosti rozdělení poškození lesa. Ve viditelné a okraji červené oblasti spektra byl detekován obecný trend, kdy v korunách stromů smrku ztepilého s rostoucí intenzitou zákalu stoupá úroveň poškození, zatímco v blízké infračervené oblasti byl zřejmý opačný spektrální trend - zdravé stromy vykazovaly nejvyšší reflektance. Nejspolehlivějším indikátorem poškození lesa bylo množství zachovaných (množství klesá se zvyšující se úrovní poškození) jehlic, což ukazuje, že je důležité, aby se při monitorování zdravotního stavu lesa aplikovaly takové spektrální metody, které hodnotí změny v množství listů a biofyzikálních vlastnostech (Campbell et al. 2004).

Detekce napadení škůdci je důležitým aspektem v lesním hospodářství. V dalším případě poškození lesních porostů se zabýval J. R. K. Lehmann (2015). Studii provedl nedaleko města Soest, Northrhine Westfalia v severozápadním Německu na dubových porostech (*Quercus robur*), které byly napadeny škůdcem *Agrillus biguttatus*. Postižené duby (*Quercus sp.*) vykazují vysoký stupeň defoliace. V této studii byl použit mikro UAS vybavený kompaktním digitálním fotoaparátem, který byl kalibrován a upraven tak, aby zaznamenal nejen vizuální, ale i blízký infračervený odraz (NIR), ve kterém byl odstraněn filtr "hot mirror" před snímacím CCD senzorem. Schopnost přizpůsobit zachycené snímky různými kombinacemi filtrů umožňuje velmi flexibilní přizpůsobení nastavení kamery konkrétním případům použití a zkoumaným oblastem. Vzhledem k tomu, že infekce brouků může být fyzicky zjištěna z průhledné koruny s několika listy na přežívajících větvích, doprovázené poklesem infračervené odrazivosti listů způsobených stresovými podmínkami, lze tyto charakteristiky identifikovat za použití CIR snímků. Z důvodu vysokého prostorového rozlišení obrazů získaných pomocí UAS (~ 2 cm) byly úrovně napadení identifikovány na úrovni větví. To je důležité, protože jednotlivé duby mohou mít současně zdravé, infikované a mrtvé větve v závislosti na postupu napadení. Výsledky studie prezentují velmi dobrou schopnost rozlišit napadené větve od zdravých, či mrtvých. Pro studovanou plochu A byla přesnost pro rozlišení korun 97,8%, 89,8% pro ostatní vegetaci, 85,5% pro zdravé větve, 71,4% pro mrtvé větve a 68,8% pro infikované větve. Pro studovanou plochu B dosáhla přesnost 89,1% u zdravých větví, 83,3% u zamořených větví, 78,6% u mrtvých větví. Studie se podrobněji dále zabývá rozlišením druhů vegetace, jejího poškození, není však reálná možnost odhalit zde příčinu poškození. Identifikace infikovaných nebo mrtvých dubových větví je tedy obecně možná a umožňuje první

posouzení míry poškození v lesním porostu, nicméně nejde o diagnostický nástroj poskytující informace o příčinách stresu (Lehmann et al. 2015).

Velice zajímavou studii kůrovcem poškozených stromů publikuje Näsi et al. (2015) na základě mapování lesních porostů pomocí UAV nesoucí hyperspektrální a RGB kamery. Studovaná oblast zahrnuje městské lesy o výměře cca 5 000 ha ve městě Lahti v jižním Finsku, které poškozují kůrovec již od roku 2010. Byly zde založeny 2 monitorovací oblasti s 9 zkusnými plochami, na kterých v horní etáži porostů dominoval z 90 – 95% smrk ztepilý (*Picea abies*). V tomto výzkumu byl použit nový miniaturizovaný hyperspektrální snímač pro identifikaci dospělých smrků napadených kůrovcem. Bodové rozlišení snímků umožnily extrakci jednotlivých stromů s přesností 74,7%. Výsledkem bylo zařazení stromů do klasifikačních tříd zdravých, napadených a mrtvých stromů. Rozdělení zdravých a mrtvých stromů poskytlo přesnost 90%. Autoři zde očekávají, že vyvinutá technologie snímání bude mít v budoucnu velkou hodnotu pro identifikaci poškození stromů, dále pro zkoumání spektrálních charakteristik příznaků poškození od raného napadení až po smrt stromu (Näsi et al. 2015).

Monitorováním napadených borových porostů v severní Americe lýkohubem *Dendroctonus ponderosae* (mountain pine beetle) se ve své publikaci zabývá Wulder et al. (2006). V některých částech státu Colorado se rezavějí celé svahy hor. Ode dna údolí až ke hranici lesa jsou téměř všechny borovice zahubeny. V kanadské provincii Britská Kolumbie byly borové lesy v posledních 15 letech napadeny v různém stupni na rozloze zhruba 180 000 km², což je přes dvojnásobek rozlohy České republiky. V publikaci z r. 2005 se zabývá přehledem doposud vydaných doporučení nejen pro dálkové snímání rozsahu těchto škod a jejich vyhodnocování a mapování. V další publikaci z r. 2006 se zabývá potenciálem a limity dálkově snímatelných dat pro detekci a mapování napadení tímto lýkohubem. Dalším cílem této práce je zdůraznit ty metody nebo zdroje dat, které mají v současné době provozní potenciál. Výsledkem jsou doporučení pro budoucí výzkum a návrhy na provozní standardy, které by vedly k používání dálkově snímatelných dat pro monitoring napadení borových lesů tímto lýkohubem. (Wulder et al. 2005, Wulder et al. 2006).

Studii poškození porostů v době, kdy probíhala kůrovcová kalamita ve Vysokých Tatrách na Slovensku v oblasti Javorová a Bielovodské doliny, se zabýval Mezei et al. (2014). Ve studované oblasti bylo v letech 1990 – 2000 poškozeno více než 118 000 m³ dříví na ploše přesahující 3 000 ha. Studie poukazuje na závislost různých faktorů ovlivňující vývoj kůrovcové kalamity, jako je vliv větru, radiace, stáří a stav porostů, lokalitu aj. se závislostí těchto faktorů na úmrtnosti stromů. Výsledky poukazují, že v počáteční fázi vývoje kalamity měl nejvyšší závislost na úmrtnost stromů stáří a stav porostů a faktor větru, ve fázi, kdy kalamita gradovala, byla téměř veškerá úmrtnost způsobena kůrovci. Významným faktorem, kromě stavu porostů, zde bylo sluneční záření (Mezei, P. et al. 2014).

Studie, kterou prováděli Minařík a kol. (2016), byla zaměřena na využití potenciálu multispektrálních snímků s ultravysokým rozlišením pro analýzu stavu smrkových porostů. Byla provedena na Šumavě na hranici mezi Německem a ČR. Zde po vichřicích a bouřích na bavorské straně hor v polovině 80. let došlo k masivnímu napadení lýkožroutem smrkovým, což vedlo k rozsáhlé poruše a rozpadu porostů. Rozpad porostů byl urychlen po vichřicích a bouřích v letech 2007 a 2008. Tato oblast leží v národním parku Šumava a porosty jsou ponechány samovolnému vývoji. Pro studii byl použit UAV vybavený multispektrální kamerou μ MCA Snap 6. Spektrální pásma senzoru byla nastavena tak, aby pokryla odrazivost v zelené, červené a blízké infračervené oblasti (550, 650, 700, 800, 850 a 900 nm). Na základě získaných snímků byly vypočítány vybrané spektrální indexy. Většina testovaných indexů dokázala správně rozlišit hraniční kategorie zastoupené zdravými a mrtvými stromy. Studie prokázala, že index NDVI má vyšší rozdíly v zóně zdravého nebo mírně poškozeného lesa. Naproti tomu má index SR 800/650 vyšší citlivost v zóně poškozeného lesního porostu. Podle indexu GNDVI se nedokázalo odlišit ani jednotlivé stromy a ani poškození porostů. Studie prokázala použitelnost spojení UAV s multispektrálními senzory pro analýzu poruch lesa (Minařík et al. 2016).

V další studii se Abdullah a kol. (2018) zabývají problematikou včasného odhalení napadení kůrovcem tzv. "Zelený útok" – období, kdy stromy dosud nevykazují vizuální příznaky napadení nebo stresu, kdy se očekává se, že napadení stromů kůrovcem při zeleném útoku ovlivňuje fyziologický a chemický stav stromů. Jedná se o období, kdy se kůrovec vyvíjí pod kůrou stromu, je tedy uvnitř kmene. Souběžně s napadením stromu a postupným vývojem kůrovce se mění biochemické vlastnosti asimilačního aparátu,

hlavně obsah dusíku a chlorofylu v jehlicích, a s touto změnou se mění spektrální odrazivost. Studie probíhala v německém Bavorském národním parku, kdy se na začátku léta roku 2015 uskutečnil rozsáhlý terénní průzkum, při kterém byly odebrány vzorky listů ze 120 zdravých a zeleně napadených stromů. Spektrální odrazivost vzorků listů byla měřena s použitím ASD FieldSpec3 v rozsahu 400 – 2000 nm. Významné statistické rozdíly ($p < 0,05$) mezi zdravými a napadenými vzorky jehlic byly zjištěny ve středních odrazových spektrech, přičemž nejvýraznější rozdíly byly pozorovány v oblastech NIR a SWIR mezi 730 a 1370 nm. Dále byly zjištěny významné statistické rozdíly ($p < 0,05$) v biochemických vlastnostech (koncentrace chlorofylu a dusíku) zdravých a zelených napadených vzorků. Studie ukazuje, že počáteční fáze napadení snižuje obsah biochemických látek v listech a tedy při zeleném napadení je ovlivňována spektrální odrazivost listů, stejně jako biochemické vlastnosti listů a měření pomocí DPZ lze tedy úspěšně využít k včasnému zjištění napadení kůrovcem (Abdullah et al. 2018).

Ze širokého záběru problematiky DPZ v lesnictví byly vybrány předchozí příspěvky, které se dotýkají oblasti ochrany lesa. Ve všech případech zde byl hodnocen zdravotní stav, případně přesnost, s jakou lze tento stav předvídat, či konstatovat. Pokud bychom chtěli tato data aplikovat dál do geoinformačních softwarů a dále s nimi pracovat, například vytvářet mapy ohrožení, poškození, aplikovat data do porostních map apod., potřebujeme tato data georeferencovat s co nejvyšší přesností. Tuto problematiku publikuje ve své práci Gábrlík s kolektivem dalších autorů, kde se zabývá vývojem a zkoušením přesného multi-senzorového systému pro přímé georeferencování leteckých snímků. Systém se skládá z přijímače GNSS (Global Time Navigation Satellite System) s dvojitou anténou (RTK) s přesností na úrovni centimetru a inerciálního navigačního systému (Inertial Navigation System - INS), který zajišťuje inerciální a poziční informace, které poskytují přesné údaje o navigaci a orientaci v reálném čase (Gábrlík et al. 2016).

4 Materiál a metodika

Následující kapitoly popisují konkrétní monitorovanou oblast pro tuto studii, prostředky a materiál, které byly použity a postup jak byla studie zpracována. V první části jsou popsány podrobněji vybrané lokality pro vlastní monitoring a důvody výběru. V další části jsou popsány technologie a přístroje použité pro monitoring a základní principy jejich fungování. Vlastní práce jsou rozděleny na práce v terénu – sběr dat a kancelářské práce, kde byla pořízená data následně zpracována a vyhodnocena.

4.1 Popis sledované oblasti

Tato diplomová práce se zabývá monitoringem gradace lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) který působí v lesním hospodářství značné škody, zvláště pak v posledních letech, kdy byl zaznamenán zvýšený výskyt vlivem vysokých letních teplot a sucha. Tento zvýšený výskyt je patrný i v horských oblastech Krkonoš. Vzhledem k těmto faktorům byla pro monitoring vybrána lokalita, kde byl zaznamenán zvýšený výskyt kůrovce v posledních letech a pravděpodobnost výskytu v roce 2017, kdy byl prováděn vlastní monitoring, byla tedy velmi vysoká. Studovaná oblast se nachází v katastrálním území obce Pec pod Sněžkou, v rámci působnosti Správy KRNAP toto území spadá pod správu Územního pracoviště (ÚP) Pec pod Sněžkou, konkrétní lesnický úsek Obří důl. ÚP Pec pod Sněžkou má celkovou výměru téměř 5 810 ha a zahrnuje celkem sedm lesnických úseků, přehled výměr jednotlivých LÚ uvádí tabulka 7.

Tab. 7: Přehled výměr ÚP Pec pod Sněžkou dle zón v ha (LHK)

ÚP 35 Pec pod Sněžkou			parcelní plochy				
LÚ	Název LÚ	Lesní	I.zóna	II.zóna	III.zóna	OP	celkem
1	Javořinka	Štefan René, Bc.	22,37	118,50	466,77	75,89	683,53
2	Zelený potok	Vihan Ota	377,29	207,06	204,05	18,15	806,55
3	Obří důl	Vašíček Bedřich, Bc.	808,59	140,67	34,39	0,56	984,21
4	Křížový potok	Rejzek Roman, Ing.	544,36	238,42	187,79		970,57
5	Pomezní boudy	Urban Pavel, Ing.	169,03	666,32	97,79		933,14
6	Rennervy boudy	Prokop Martin		89,12	657,20		746,32
7	Pěnkavčí vrch	Kracík Radoslav		125,88	539,04	20,61	685,53
ÚP 35 Pec pod Sněžkou			1 921,64	1 585,97	2 187,03	115,21	5 809,85

Lesnický úsek, na kterém byla studie provedena, je pojmenován podle lokality Obří důl, jedná se o jednu z nejcennějších lokalit Krkonoš. Pro sledování vývoje napadení kůrovcem byly vybrány porosty v oddělení 234. Porostní skupina 234Dm27x, kde byl předpoklad výskytu kůrovce v roce 2017, se nachází v 1. zóně KRNAP a jedná se o porost v bezzásahovém režimu ponechanému samovolnému vývoji. Porosty v této lokalitě jsou zařazeny do stupně přirozenosti 1 nebo 2 (viz kapitola 3.3.1.). Vzhledem k tomu, porosty jsou zanechány samovolnému vývoji a tudíž se zde proti kůrovci ani jiným biotickým nebo abiotickým škodlivým činitelům nezasahuje, jsou porosty vhodné pro monitoring všech stadií vývoje kůrovce. Nabízí se zde tak možnost sledovat všechna vývojová stadia lýkožrouta smrkového od jeho napadení na zdravý strom, přes založení nové generace až po dokončení jejího vývoje a rojení nového pokolení.

Tabulka 8 uvádí přehled o výši celkové roční těžby dříví na ÚP Pec pod Sněžkou (do r. 2012 Lesní správa Pec pod Sněžkou), podílu nahodilé těžby a těžby v důsledku kůrovce v průběhu let 2003 – 2017. Údaje jsou zpracovány z LHE.

Tab. 8: Přehled výše těžeb ÚP Pec pod Sněžkou 2003 – 2017 (LHE)

Rok	Objem těžby za rok (m ³)	Z toho nahodilá (m ³)	Z toho kůrovcová (m ³)
2003	10 948	8 042	326
2004	8 400	5 880	352
2005	8 941	3 311	1 339
2006	7 287	1 259	1 563
2007	4 811	4 192	348
2008	11 737	2 888	6 997
2009	10 559	1 417	8 177
2010	19 666	5 224	12 865
2011	20 570	8 996	9 915
2012	10 284	1 543	7 097
2013	10 860	1 768	6 138
2014	11 374	3 280	5 702
2015	10 068	1 082	4 585
2016	14 994	1 649	6 355
2017	13 900	1 508	2 349

4.2 Popis UAS

4.2.1 Bezpilotní systém Zefyros Oktos XL

Následující odstavce popisují, dle provozní příručky vydané výrobcem, bezpilotní systém, se kterým byly pořizována data pro tuto diplomovou práci. Celý bezpilotní systém se skládá z několika součástí a prvků. Jedná se o:

- bezpilotní letadlo s kolmým startem a přistáním,
- užité zařízení
- nosič užitého zařízení
- video vysílač s anténou
- video přijímač
- dálkově řídicí stanice
- pozemní stanice

Letoun má označení Zefyros Oktos XL, jedná se o pozemní vrtulník oktokoptéra s osmi elektromotory, jež jsou připevněny na ramenech z uhlíkových nosníků ve shodných vzdálenostech od středu draku i od sebe samotných. Výrobcem je německá společnost MikroKopter (součást HiSystems GmbH). Je schopen udržovat GPS polohu a barometrickou výšku. Doba provozu letounu je závislá na několika faktorech. Určující je kapacita baterie, její stav a hladina nabití, váha užitého zařízení a provozní meteorologické podmínky. Pilot k rozhodnutí o době letu využívá indikace napětí baterie prostřednictvím dálkové řídicí stanice. Provoz omezuje maximální užité zatížení 2 kg, provozní teplota v rozmezí 0 – 40 °C, rychlost větru do 7 m/s, dohlednost, případné srážky.

Užitým zařízením je spektrální kamera TETRACAM ADC-Lite o rozměrech 114 mm x 77 mm x 22 mm, váha kamery činí 200 g, je opatřena snímačem s rozlišením 3.2 megapixelů, CMOS senzorem, a externí spouští. Dalším zařízením je fotoaparát včetně objektivu, označení Canon EOS 600D s rozměry 133,1 × 99,5 × 79,7 mm, váhou 570 g (bez objektivu, včetně baterie a paměťové karty). Uchycení obou zařízení je ke kompenzovatelnému držáku fotoaparátu HiSight SLR2 přímo pomocí šroubového spoje.

Video vysílač s anténou je zařízení určené pro akmžitý přenos obrazového záznamu z kamery. Do přeneseného obrazu jsou zaznamenávány údaje o rychlosti letu, letovém

kurzu, letové hladině, vzdálenosti od místa startu době letu, napětí akumulátoru a počet přijímaných satelitů.

Video přijímač je součástí pozemní stanice, napájen 12V baterií, slouží k příjmu obrazového záznamu z kamery.

Dálkové řídicí stanice, jejíž typové označení je Graupner MC 32 2,42GHz HOTT RC je schopná spárovaného provozu s jediným kompatibilním přijímačem, její provoz je odolný vůči rušení, umožňuje nastavení k ukončení letu, pokud dojde k přerušení řídicího signálu.

Pozemní stanice je klasický přenosný počítač, vybavený speciálním softwarovým vybavením – Mikrokopter Tool, který slouží k příjmu, zobrazení a zpracování výstupu z užitečného zatížení a k vyhodnocení telemetrických údajů. Pomocí propojení s tímto softwarem je možné provádět tzv. automatický let. Je vždy obsluhován dalším členem posádky (pomocníkem/pozorovatelem).



Obr. 11: UAV Zyferos Oktos XL

4.3 Specifikace použitých fotografických přístrojů

4.3.1 Základní parametry přístroje Sony Alpha A7 ILCE-7, použitý pro snímání RGB

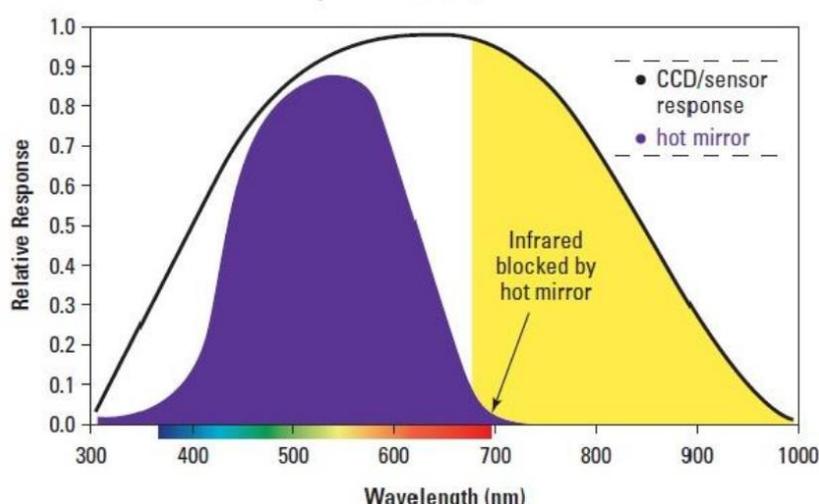
Digitální fotoaparát Sony Alpha A7 ILCE-7 je vybaven snímačem s rozlišením 24.3 Mpx, Exmor CMOS fullframe senzorem, obrazovým procesorem Bionz X výkonným

i při nedostatečném osvětlení, dále obsahuje 3 palcový výklopný displej, XGA OLED elektronický hledáček s 2 359 000 obrazovými body, rychlý hybridní autofokus s fázovou detekcí a 25/117 zaostřovacími body, 5 fps při kontinuálním fotografování, multifunkční sáňky Sony a Wi-Fi modul s technologií NFC. Přístroj byl opatřen širokoúhlým objektivem Voigtlander 21mm F/4,0 Color Skopar s ohniskem 21 mm a manuálním ostřením.

4.3.2 Základní parametry přístroje Lumix TZ7, použitý pro snímání IR

Digitální fotoaparát Panasonic Lumix TZ7 je vybaven 1/2,33“ obrazovým snímačem CCD s efektivním rozlišením 10,1 Mpx a obvodem s procesorem Venus Engine, souvislé snímání v plném rozlišení má rychlost 2,3 obr./s pro max. 5 snímků ve standardní kvalitě (3 v nejvyšší), v režimu vysokorychlostního sériového snímání při sníženém rozlišení zvládne 10 obr./s. Objektiv Leica DC Vario-Elmar 4,1 – 49,2 mm 1:3,3 – 4,9. Objektiv byl opatřen filtrem IR 76 (760 nm).

Pro infračervený digitální záznam je důležité blízké infračervené záření NIR. Rozsah vlnových délek NIR záření je od 700 nm do 1000 nm. Citlivost snímacích senzorů na digitálních fotoaparátech je v rozsahu 300 – 1000 nm, Vzhledem k rozsahu citlivosti je před snímací čip digitálního fotoaparátu umístěn IR filtr (angl. hot mirror), který zamezuje propouštění infračerveného záření na senzor. Citlivost snímacího senzoru je graficky znázorněn na obr. 12.



Obr. 12: Citlivost senzoru CCD (Sandidge 2009)

4.4 Spektrální chování objektů

Sluneční záření dopadající na povrch Země je z části absorbováno, z části vedeno do nižších vrstev a z části odraženo zpět do atmosféry. Ke změnám tedy dochází při průchodu atmosférou, při odrazu zpět i při dopadu na zemský povrch. Intenzita odraženého krátkovlnného a intenzita emitovaného dlouhovlnného záření závisí tedy především na těchto faktorech:

- na druhu látky, či objektu
- na jeho fyzikálním stavu
- na stavu jeho okolí

Podle Dobrovolného (1998) množství odraženého záření lze charakterizovat tzv. spektrální odrazivostí $\rho(\lambda)$, kterou lze definovat jako poměr intenzity odraženého záření (M_r) a intenzity dopadajícího záření (M_i) na určité vlnové délce (λ).

Přes výše uvedené vlivy lze tedy konstatovat, že různé látky na zemském povrchu se vyznačují vlastní spektrální charakteristikou. Některé objekty, či jevy tak jsou lépe rozpoznatelné ve viditelné části spektra a jiné lépe v infračervené části spektra. Na snímku se jako tmavý objekt bude jevit takový, který odráží málo světla a naopak (Dobrovolný 1998).

.

4.4.1 Spektrální projevy vegetace

Rostliny vykazují specifickou odrazivost v jednotlivých spektrálních pásmech elektromagnetického záření. Modrá a červená část záření jsou v převážné většině spotřebovávány při procesu fotosyntézy, část zeleného spektra je odražena, proto se nám rostliny jeví jako zelené. V blízké infračerveném spektru (NIR) je většina záření odražena. NIR je pro lidské oko neviditelné, pro jeho záznam je nutné speciální detekční zařízení. Odrazivost ve viditelné části záření podává informaci o stavu fotosyntetického aparátu, zatímco v NIR o množství biomasy. Na tzv. multispektrálním snímku, který zahrnuje všechna tato pásma, se pak vegetace bude v modré a červené části jevit jako velmi tmavá až černá, v zeleném šedá a v NIR bude světlá až bílá. Takto je popsána zdravá vegetace, rostliny trpící stresem (nebo stárnoucí) vykazují změny v odrazivosti, kdy přibývá odrazivost v červeném spektru (rostliny žloutnou) a naopak se snižuje odrazivost v NIR. Principu porovnávání odrazivosti v jednotlivých spektrech je určujícím rysem většiny

přístrojů používaných k hodnocení stavu porostů. Senzorové měření dokáže poměrně spolehlivě detekovat porostní rozdíly např. nedostatečnou výživu, vodní stres, napadení rostlin apod., obvykle ale není schopno určit přesnou příčinu identifikovaného stresu (Lukas et al. 2011).

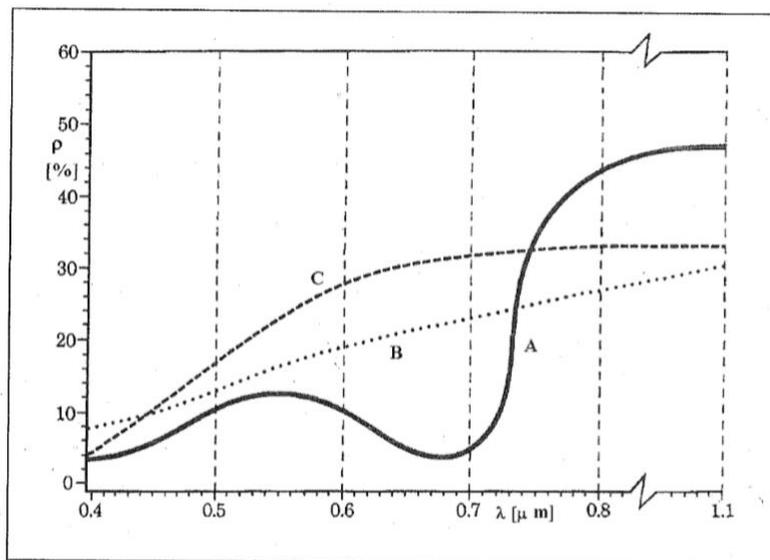
Podle Dobrovolného (1998) se spektrální křivka odrazivosti listu dělí na 3 hlavní části:

1. oblast pigmentační absorpce (0,4 – 0,7 μm), pro spektrální chování listu ve viditelné části jsou nejdůležitější pigmentační látky – karotenoidy a chlorofyl. Chlorofyl pohlcuje většinu záření v modré a červené části spektra. Maximum odrazivosti se nachází v zelené části spektra, to je příčinou našeho vnímání zelené barvy rostlin ve vegetačním období. V této oblasti spektra je pohlcováno zeleným barvivem 70 – 90% dopadajícího záření (Campbell 1996).
2. oblast buněčné struktury (0,7 – 1,3 μm), pro vegetaci je typický nárůst odrazivosti ve vlnových délkách kolem 0,7 μm . Hlavním faktorem v této části spektra, který odrazivost ovlivňuje, je morfologické utváření listu. Protože je toto velice proměnlivé u různých druhů rostlin, dávají data pořízená v této části spektra největší možnost pro rozpoznání ploch pokrytých vegetací a ostatních ploch, ale také i jednotlivých druhů. V této části spektra lze charakterizovat míru hustoty vegetačního krytu v podobě indexu listové pokrývnosti (LAI - leaf area index). Toto bezrozměrné číslo lze využít k výpočtu některých vegetačních indexů.
3. oblast absorpce vody (1,3 – 3,0 μm), v této části spektra je odrazivost formována absorpčními pásy vody, je přibližně nepřímě úměrná obsahu vody v listu. Pokles vodního obsahu způsobuje vzrůst odrazivosti, mění vnitřní strukturu u listu i obsah chlorofylu. Střední absorpčních pásů vody jsou lokalizovány na vlnových délkách 1,4, 1,9 a 2,7 μm (Dobrovolný 1998).

4.5 Spektrální indexy

Spektrální indexy, též nazývané vegetační indexy, mohou pomocí jednoduchých matematických operací se dvěma nebo i více částmi spektra obrazu zvýraznit např.

vegetační složku v obraze. Za určitých podmínek lze těchto indexů využít k určení kvantitativních ukazatelů, např. množství zelené biomasy na ploše pixelu obrazu.



Obr. 13: Odrazivost zelené vegetace (A), suché půdy (B) a usychající vegetace (C) ve viditelné a IR části elektromagnetického spektra, R – odrazivost (%), λ – vlnová délka (μm) (Dobrovolný 1998).

Na obr. 13 je znázorněno typické spektrální chování vegetace, kde zdravá, nepoškozená vegetace odráží 40 – 50% dopadajícího záření v oblasti NIR (0,7 – 1,1 μm). V důsledku pohlcování záření chlorofylem je ve viditelné části (0,4 – 0,7 μm) odrazivost 10 – 20%.

Nejpoužívanější vegetační indexy jsou rozděleny do dvou skupin, tzv. poměrové indexy a ortogonální indexy.

Poměrové indexy dávají do vztahu odrazivost v červené viditelné (TM3) a blízké infračervené (TM4). Základním poměrovým indexem je jednoduchý poměrový vegetační index (RVI - Ration Vegetation Index):

$$RVI = \frac{TM4}{TM3}$$

Nejvíce používaným poměrovým indexem je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

Jeho využití je především v zemědělství a lesnictví. Hodnoty se pohybují v intervalu od -1 do 1, kdy kladné hodnoty znamenají vysoké množství zelené hmoty a záporné malé množství zelené hmoty. Například velmi hustá vegetace dosahuje hodnot okolo 0,5 a voda hodnot okolo -0,257, dle NDVI můžeme stanovit zdravotní stav vegetace (Dobrovolný 1998).

4.6 Prostředky pro odchyt lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*)

Pro monitoring vývoje populace lýkožrouta smrkového jsou v LH používány především feromonové lapače a lapáky. Kontrola l. smrkového je legislativně založena v rámci § 32 zákona č. 289/1995 Sb. Podrobněji je rozvedena ve vyhlášce Ministerstva zemědělství č. 236/2000 Sb., a dále také v ON 48 1000. Dle této legislativy se odchyt l. smrkového provádí feromonovými lapači nebo lapáky, a to ve všech smrkových porostech starších 60 let se zastoupením smrku alespoň 20 %. Kontrolní opatření instalujeme na nejohroženější místa (osluněné porostní stěny, starší ohniska žíru, paseky po polomech apod.), a to v průměrném počtu minimálně 1 kontrolní opatření na 5 ha.

4.7 Sběr dat v terénu

4.7.1 Monitoring porostů UAV

Letecký monitoring porostů studované lokality byl prováděn v pravidelných časových intervalech tak, aby bylo možno následně data porovnat zpětně v časové posloupnosti mezi jednotlivými lety a vyhodnotit, zda sledované hodnoty vegetačních indexů zpětně vykazovaly mezi jednotlivými lety statisticky významné rozdíly, které by případně prokázali rozdíl mezi napadenými a zdravými stromy. Monitoring UAV byl prováděn v pravidelných intervalech v období po jarním rojení lýkožrouta smrkového, aby bylo možné sledovat změny hodnot vegetačních indexů napadených stromů, a to do počátku června 2017 do počátku října 2017.

Nastavení letové hladiny a průběhu automatizovaného letu bylo provedeno tak, aby jednotlivé snímky měli dostatečný překryv pro následné počítačové zpracování. Podrobnější informace o průběhu letu a následném zpracování snímků do mapového podkladu je uveden v příloze 4 Report.

4.7.2 Vizuální monitoring pochůzkou v terénu

Současně s pořizováním leteckých snímků UAV byly pravidelně kontrolován stav stromů ve sledované lokalitě, zda vykazují známky napadení kůrovcem. V intervalech 10 – 14 dní byl zároveň prováděn pravidelný monitoring položených lapáků, zde byl sledován stupeň napadení a vývojové stadium, a stav počtu odchycených brouků lýkožrouta smrkového ve feromonových lapačích. Z důvodů zájmu ochrany samovolného vývoje přírodních procesů této oblasti zde nebylo možné položit lapáky ani instalovat feromonové lapače pro sledování vývojových stadií lýkožrouta a stupeň napadení (odchyty). Tyto údaje jsou tak vyhodnoceny z okolních porostů a vzhledem k přírodním podmínkám celého lesnického úseku tak nevykazují významné rozdíly. V případě sledování známek napadení kůrovcem na stojících zdravých stromech byly vyhledávány znaky napadení, jako jsou závrtky na jednotlivých kmenech stromů, drtinky na patě kmene, barevné změny jehlic v koruně nebo opadávající kůra na stromech. Tyto znaky byly zaznamenávány a následně porovnávány s daty pořízenými leteckým monitoringem UAV na IR kameru.

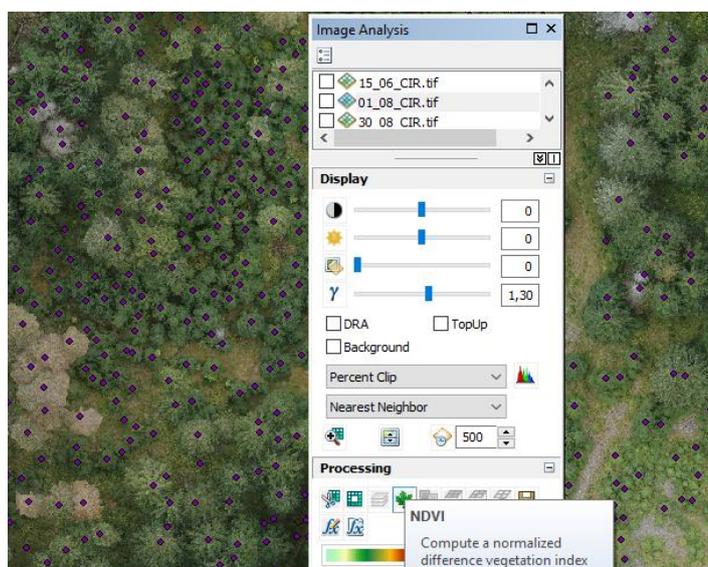
4.8 Zpracování dat

4.8.1 Zpracování dat v programu Agisoft

Data získaná v terénu byla následně zpracovávána a vyhodnocena v programu Agisoft a Arcmap. V programu Agisoft byly zpracovány jednotlivé snímky získané z leteckého monitoringu UAV do souvislého mapového podkladu, který je již kompatibilní s programem Arcmap a lze tak dále analyzovat sledované změny ve spektrálním chování vegetace. Orientace obrazu byla zpracována na geodetický souřadný systém S-JTSK Křovák East North. Pět vlíčovacích bodů sloužilo jako body k vyhodnocení přesnosti zarovnání. Tímto postupem byly zpracovány snímky pro jednotlivé letové dny, takže vznikly celkem 4 podkladové vrstvy CIR z jednotlivých dnů. Aby bylo možné rozlišit jednotlivé stromy a zároveň později eliminovat nežádoucí hodnoty NDVI, byly označeny do další vrstvy vrcholy jednotlivých stromů na základě hodnoty z souřadnice (každý pixel je definován hodnotou pro polohu x , y a z pro výšku). Vznikla tak další vrstva Stromy_vyska. Práce v programu Agisoft byly provedeny odbornými pracovníky oddělení GIS Správy KRNAP.

4.8.2 Zpracování dat v programu Arcmap

Ze získaných podkladových vrstev byly vypočteny hodnoty indexu NDVI pro každou vrstvu zvlášt pomocí funkce Image Analysis (obr. 14). Tímto způsobem byly vyhodnoceny 4 vrstvy map obsahující hodnotu NDVI. Aby bylo možno eliminovat nežádoucí hodnoty NDVI, které by zkreslovaly výsledky studie, např. zastíněné větve ve spodních vrstvách, spodní etáž nízko rostoucích smrků, které kůrovec nenapadá, programem mylně označené vrcholy stromů (např. boční větve vyhodnocené jako vrchol stromu) apod., byly v okolí vrcholů stromů vytvořeny kruhové základny o poloměru 0,5 m, v programu Arcmap funkce Buffer, kde byla zároveň definována výška stromů nad 15 m, kůrovec preferuje dospělé smrkové porosty starší 60 let (Kula 2014). Vznikla tak další vrstva, kterou bylo nutno propojit s vrstvami NDVI pomocí funkce Join (obr. 15).

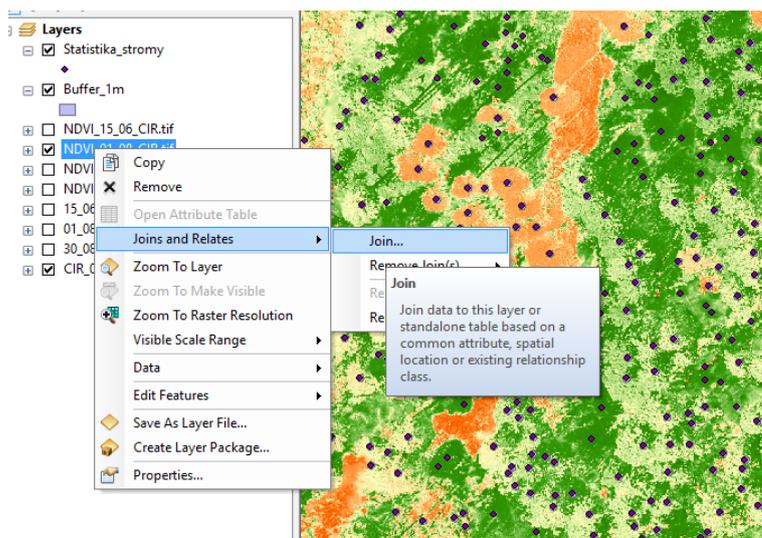


Obr. 14: Funkce Image Analysis v programu Arcmap

V této funkci je třeba nadefinovat kritéria propojení, aby byly propojeny vždy vrstvy NDVI a CIR ze stejného data letu. Funkce Image Analysis zároveň vypočítá základní statistické ukazatele (buď uživatelem nadefinované, nebo všechny dostupné) se kterými je možno dále pracovat. Tyto jsou zobrazeny v atributové tabulce dané vrstvy. Vrstva s vypočítanými statistickými hodnotami byla nazvána Statistika. Do této vrstvy byly postupně propojeny všechny vrstvy NDVI, výsledkem jedna atributová tabulka

obsahující všechny hodnoty potřebné pro další zpracování (obr. 16). V této atributové tabulce byly odlišeny jednotlivé stupně poškození stromů následujícími hodnotami:

- 0 – stromy nezahrnuté ve studii
- 1 – stromy napadené v roce 2017, hlavní předmět zájmu studie (obr. 16)
- 2 – stromy zdravé
- 3 – kůrovcové souše, stromy napadené v roce 2016



Obr. 15: Funkce Join v programu Arcmap

FID	Shape	Kurove	RASTERV	Rowid	ORIG_FID	COU	ARE	MIN	MA	RAN	MEAN	STD	SU	VARIET	MAJORI	MINORI	MEDIA	Rowid
230	Point	1	19,761108	1226	2304	316	0,79	52	98	46	72,832	7,8692	230	42	71	52	71	1226
232	Point	1	26,397095	1238	2325	316	0,79	60	83	23	69,892	3,7880	220	22	71	60	70	1238
234	Point	1	29,693054	1251	2340	316	0,79	64	81	17	71,620	2,6412	226	17	71	64	72	1251
235	Point	1	25,31189	1260	2351	316	0,79	61	82	21	71,825	3,8159	226	21	70	61	72	1260
235	Point	1	25,538818	1262	2353	316	0,79	52	82	30	70,949	4,4498	224	26	73	52	71	1262
236	Point	1	28,778748	1277	2369	316	0,79	57	76	19	66,363	3,2458	209	18	64	57	66	1277
239	Point	1	25,627441	1292	2394	316	0,79	66	94	28	76,746	5,5145	242	29	73	90	76	1292
243	Point	1	26,11792	1321	2433	316	0,79	63	84	21	72,715	3,6631	229	21	72	63	72	1321
246	Point	1	17,087708	1349	2466	316	0,79	22	43	21	30,806	3,9189	973	22	30	41	30	1349
247	Point	1	26,554688	1355	2474	316	0,79	60	91	31	73,819	4,8836	233	28	74	60	74	1355
374	Point	1	29,167542	2212	3747	316	0,79	61	100	39	73,962	5,9554	233	32	70	61	73	2212
377	Point	1	24,996887	2229	3778	316	0,79	55	87	32	71,867	5,5084	227	32	71	55	71	2229
380	Point	1	29,138855	2243	3804	316	0,79	53	87	34	70,588	5,5262	223	33	71	53	71	2243
382	Point	1	28,309021	2253	3826	316	0,79	57	91	34	72,158	5,8639	228	31	73	57	73	2253
386	Point	1	30,668945	2273	3866	316	0,79	59	85	26	71,373	3,0463	225	26	71	60	71	2273
387	Point	1	23,925232	2281	3879	316	0,79	49	72	23	60,123	3,5275	189	23	61	49	60	2281
388	Point	1	25,281189	2285	3886	316	0,79	61	89	28	72,617	5,1091	229	29	71	61	72	2285
389	Point	1	26,602295	2291	3897	316	0,79	63	94	31	75,193	5,2522	237	28	71	63	75	2291
390	Point	1	24,042236	2295	3904	316	0,79	66	85	19	72,791	3,2966	230	17	71	85	72	2295
393	Point	1	24,464172	2309	3936	316	0,79	56	83	27	71,022	4,5034	224	26	70	57	71	2309
404	Point	1	24,911133	2362	4042	316	0,79	50	82	32	70,044	5,9739	221	32	69	50	71	2362
404	Point	1	25,279114	2364	4044	316	0,79	44	71	27	55,544	5,9396	175	27	61	44	55	2364
405	Point	1	27,858582	2367	4051	316	0,79	60	81	21	69,75	4,3067	220	22	71	79	70	2367

Obr. 16: Atributová tabulka kůrovcem napadených stromů

4.8.3 Statistické vyhodnocení

Data získaná z předchozích kroků byla dále statisticky vyhodnocována v programu IBM SPSS Statistic. Zde byla vyhodnocena data pro jednotlivé letové dny. Pro vyhodnocení bylo využito průměrných hodnot pixelů NDVI indexu pro jednotlivé stromy,

resp. vybraného bufferu pro sledované stromy. Tyto výsledky byly zpracovány do grafu a provedena statistika metodou Anova a Post Hoc Tests.

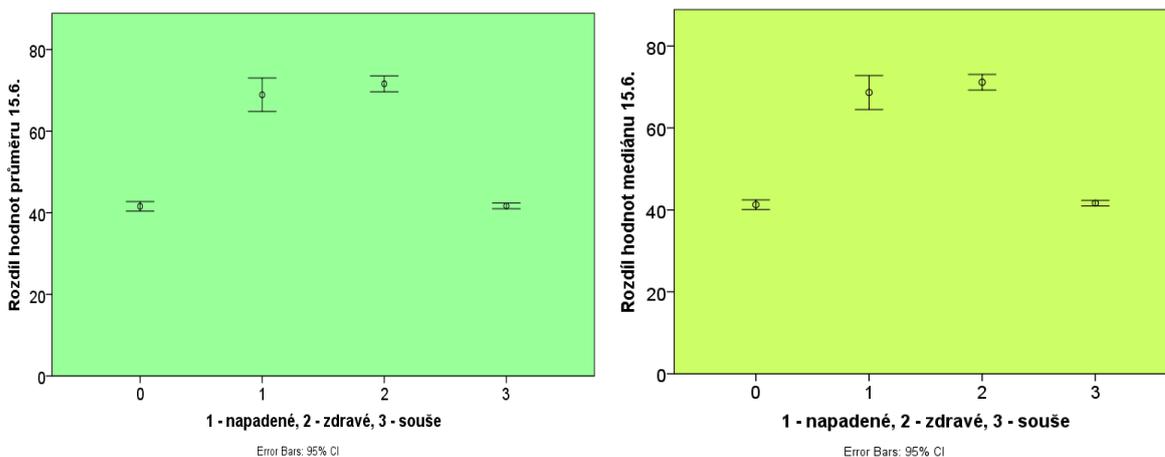
5 Výsledky práce

5.1 Vyhodnocení výstupů z programu SPSS

5.1.1 Grafické výstupy

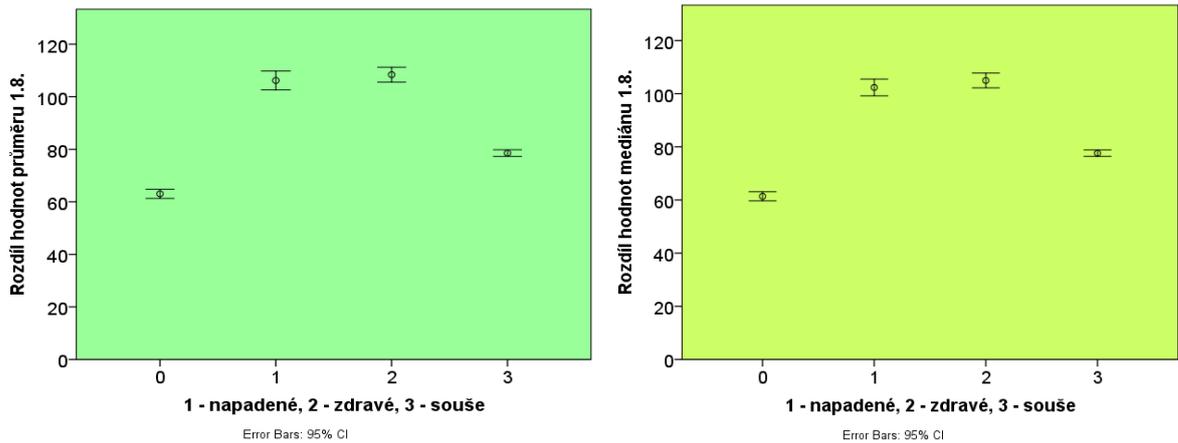
Výsledky studie monitoringu napadení stromů lýkožroutem smrkovým jsou zpracovány v programu IBM SPSS Statistic. Následující grafy zobrazují rozdíl hodnot pixelů NDVI indexu v bufferu korun vybraných stromů v různém stupni napadení pro každý let, kdy na ose x jsou označeny stromy napadené kůrovcem v roce 2017 hodnotou 1, zdravé stromy hodnotou 2, kůrovcové souše z roku 2016 hodnotou 3 a stromy nezahrnuté do studie hodnotou 0. Počet zahrnutých stromů do grafu je 23 stromů, u kterých bylo zjištěno napadení, 150 kůrovcových souší a 304 zdravých. Na ose y jsou vyneseny hodnoty rozpětí NDVI indexu pro průměr a medián tohoto indexu.

Graf na obr. 17 znázorňuje hodnoty rozpětí NDVI indexu z letu ze dne 15.6.2017, můžeme zde konstatovat, že hodnoty se mezi napadenými a zdravými stromy výrazně nemění, nijak se nepřibližují hodnotám kůrovcových souší a to v obou grafech pro hodnoty průměru (obr. 17a) a hodnoty mediánu (obr. 17b).



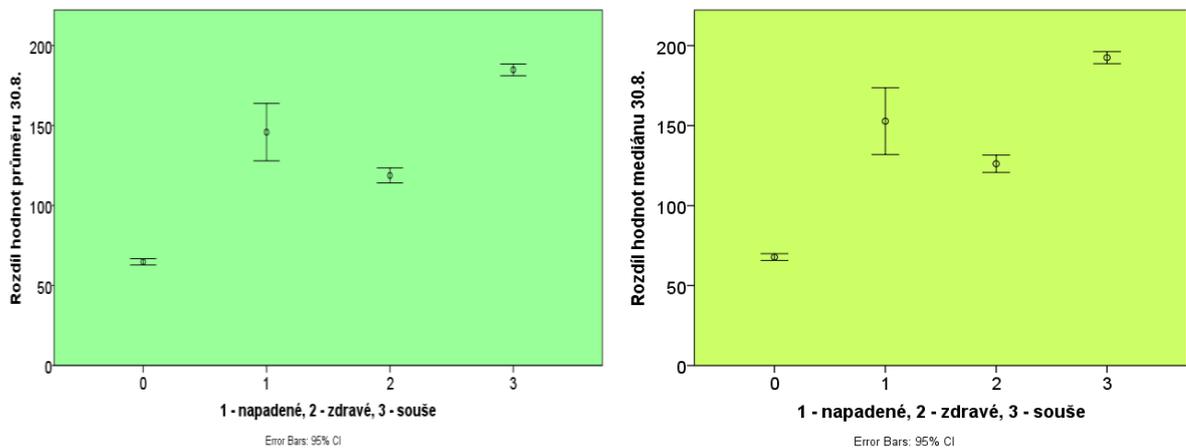
Obr. 17: Grafický výstup hodnot NDVI z 15.6.

Graf na obr. 18 znázorňuje hodnoty rozpětí NDVI indexu z letu ze dne 1.8.2017. Na tomto grafu se hodnoty NDVI napadených stromů mírně liší od stromů zdravých.



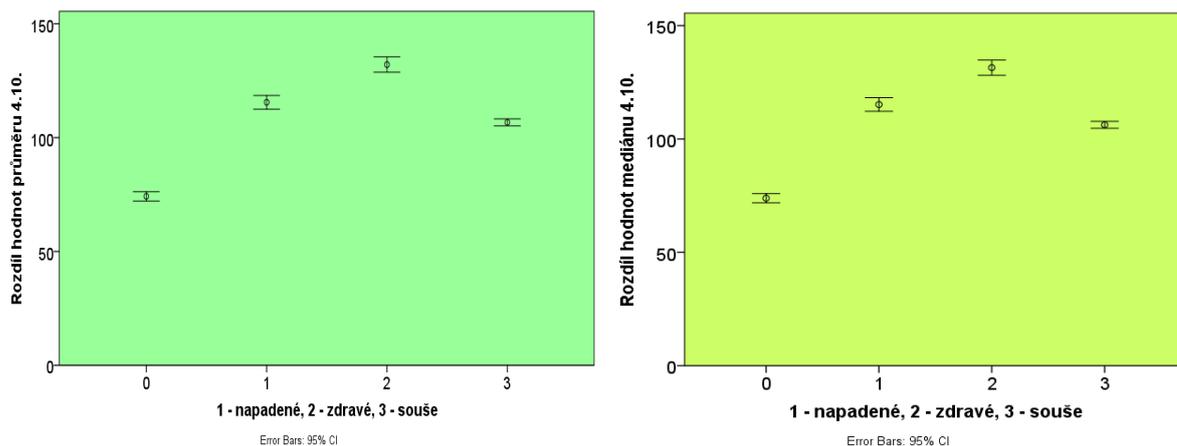
Obr. 18: Grafický výstup hodnot NDVI z 1.8.

Graf na obr. 19 znázorňuje hodnoty rozpětí NDVI indexu z letu ze dne 30.8.2017.



Obr. 19: Grafický výstup hodnot NDVI z 30.8.

Graf na obr. 20 znázorňuje hodnoty rozpětí NDVI indexu z letu ze dne 4.10.2017. Na tomto grafickém výstupu je již zaznamenána výrazná změna hodnot NDVI mezi zdravými a kůrovcem napadenými stromy, kdy se hodnota NDVI napadených stromů významně přibližuje k hodnotě NDVI pro kůrovcové souše.



Obr. 20: Grafický výstup hodnot NDVI z 4.10.

5.1.2 Anova

Dalším výstupem pro vyhodnocení výsledků studie programem SPSS je tabulka hodnot zpracovaná statistickým modelem Anova, kde jsou uvedeny výsledky pro průměrnou hodnotu NDVI (tab. 9, ozn. MEAN) a hodnotu nejvíce zastoupených NDVI pixelů (tab. 10, ozn. MAJORITY) pro jednotlivé lety. Počet zahrnutých stromů do statistiky je 23 stromů, u kterých bylo zjištěno napadení, 150 kůrovcových souší a 304 zdravých stromů.

Statisticky tento test vykazuje poměrně málo významné změny u kůrovcem napadených a zdravých stromů mezi jednotlivými lety.

Tab. 9: Anova pro průměr hodnot NDVI

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
MEAN	Between Groups	3,E+5	3	90296	65,264	,000
	Within Groups	6,E+6	4658	1384		
	Total	7,E+6	4661			
MEAN_1	Between Groups	6,E+5	3	2,E+5	70,524	,000
	Within Groups	1,E+7	4658	3032		
	Total	1,E+7	4661			
MEAN_12	Between Groups	3,E+6	3	1,E+6	248,0	,000
	Within Groups	2,E+7	4658	3923		
	Total	2,E+7	4661			
MEAN_12_13	Between Groups	1,E+6	3	4,E+5	88,665	,000
	Within Groups	2,E+7	4658	4129		
	Total	2,E+7	4661			

Tab. 10: Anova pro nejvyšší zastoupení hodnot NDVI

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
MAJORITY	Between Groups	3,E+5	3	87664	65,342	,000
	Within Groups	6,E+6	4658	1342		
	Total	7,E+6	4661			
MAJORITY_1	Between Groups	6,E+5	3	2,E+5	67,616	,000
	Within Groups	1,E+7	4658	2742		
	Total	1,E+7	4661			
MAJORITY_2	Between Groups	4,E+6	3	1,E+6	228,7	,000
	Within Groups	3,E+7	4658	5445		
	Total	3,E+7	4661			
MAJORITY_3	Between Groups	1,E+6	3	4,E+5	88,331	,000
	Within Groups	2,E+7	4658	4029		
	Total	2,E+7	4661			

5.1.3 Post Hoc Tests

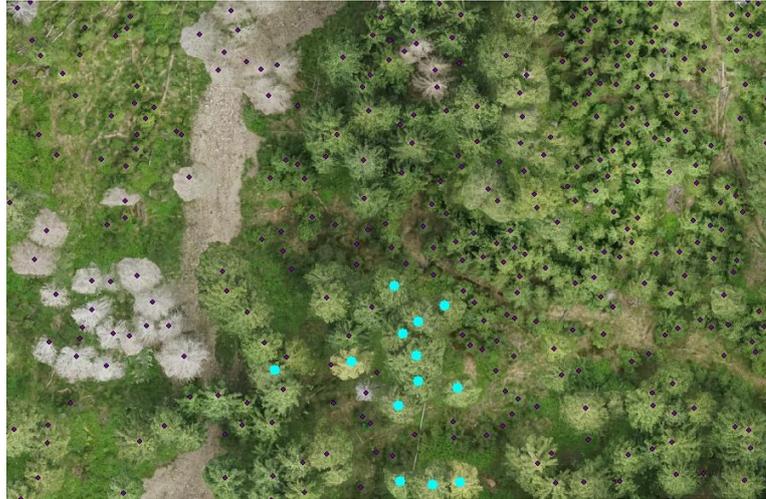
Počet zahrnutých stromů do statistiky je 23 stromů, u kterých bylo zjištěno napadení, 150 kůrovcových souší a 304 zdravých. Dle tohoto testu jsou výsledky jako u Anovy, test zobrazuje změny mezi jednotlivými lety, které jsou statisticky významné, tabulka výsledků Post Hoc Tests je uvedena v příloze 2.

V tabulce jsou uvedeny v jednotlivých obdobích (MEAN – období 1. letu, MEAN_1 – období 2. letu atd.) rozdíly mezi stromy typu 1, 2 a 3, kdy statisticky významný rozdíl má hvězdičku. V prvním období (MEAN) vyhodnotíme řádek, který má v sloupci (I) Kurovec hodnotu 1 a v sloupci (J) Kurovec hodnotu 3, to je rozdíl mezi stromy typu 1 a 3, tedy napadenými a kůrovcovými soušemi. Tady je statisticky významný rozdíl, jeho hodnota je 27.22 a signifikance 0.006, čili čerstvě napadené stromy a staré napadené stromy se výrazně liší, to se ale postupně mění až k poslednímu náletu (MEAN_12_13), kdy hodnota stromů typu 3 vůči stromům typu 1 je 8,82 a signifikance 0,928, čili hodnoty těchto NDVI indexů se statisticky významně přibližují – tedy není rozdíl mezi starými a napadenými stromy.

5.2 Výstupy z programu Arcmap

Výsledky studie v programu Arcmap zobrazují viditelné změny v hodnotách NDVI mezi zdravými a kůrovcem napadenými stromy v každém zaznamenaném letu. Následující obrázky jsou chronologicky seřazeny a je zde vidět stav kůrovcem napadených stromů, které se postupně barevně odlišují od zdravých a přibližují se kůrovcovým souším.

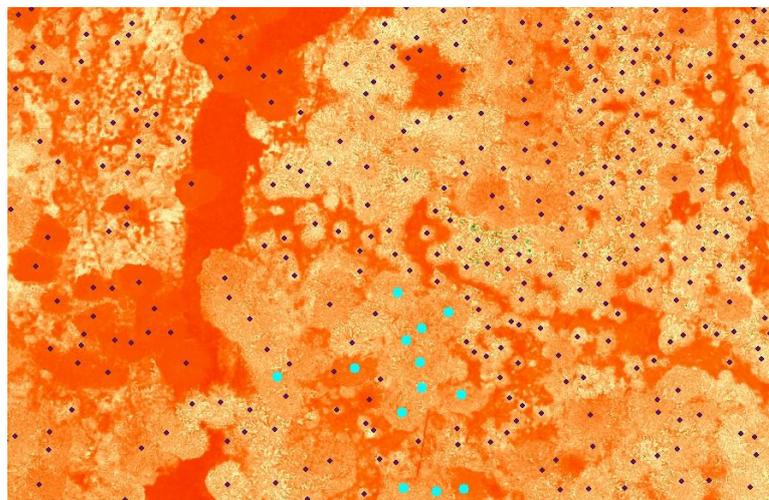
Na obr. č. 21 a 22 jsou zaznamenány barevné změny kůrovcem napadených stromů v časovém období 15.6. – 4.10., sledované stromy jsou označeny bufferem v jednotlivých korunách, v levé dolní části snímků jsou zřetelně odlišitelné kůrovcové souše.



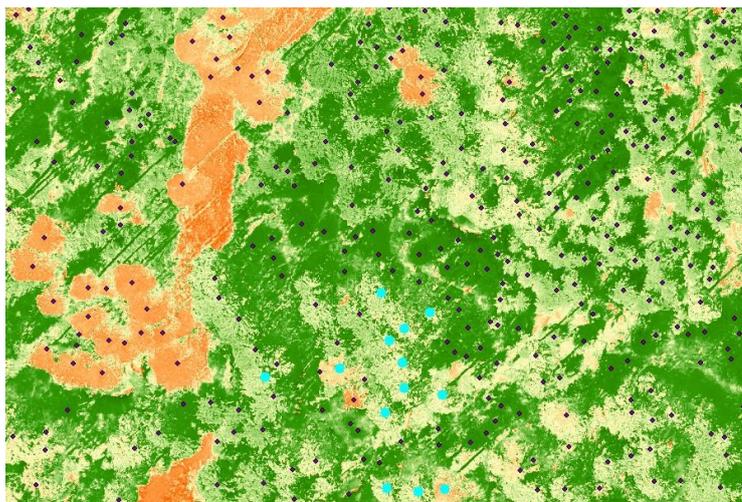
Obr. 21: Snímek 15.6.2017



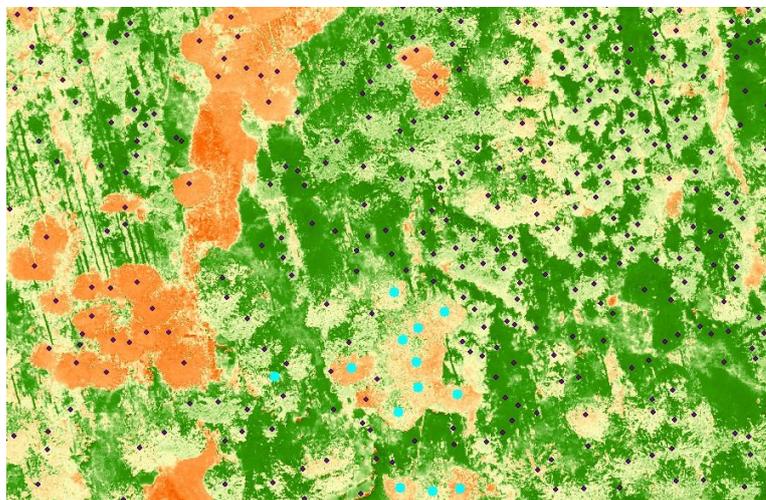
Obr. 22: Snímek 4.10.2017



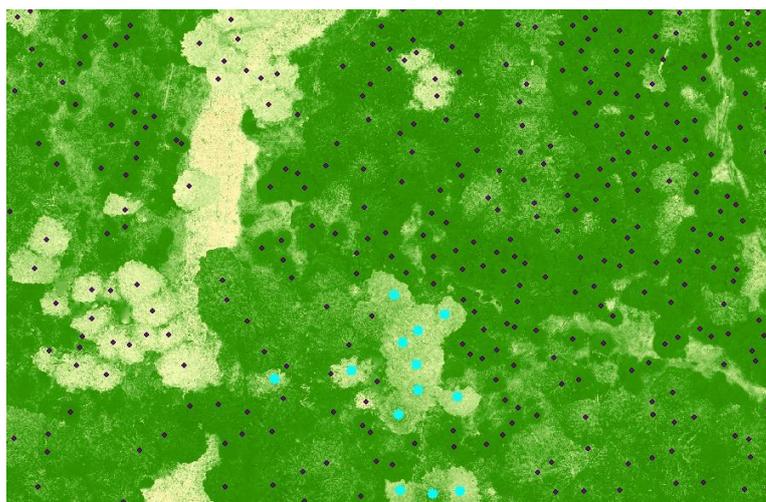
Obr. 23: Snímek NDVI 15.6.



Obr. 24: Snímek NDVI 1.8.2017



Obr. 25: Snímek NDVI 30.8.2017



Obr. 26: Snímek NDVI 4.10.2017

5.3 Monitoring porostu pochůzkou

Ve sledovaném porostu byl zároveň s leteckým monitoringem sledován stav porostu při pochůzce v terénu a zaznamenáván stav vývoje lýkožrouta smrkového v položených lapácích v okolních porostech. Z důvodu ochrany samořídících funkcí lesa (viz kap. 3.3.1 a 4.1) nebylo možné položit lapáky přímo v monitorovaném porostu. Byl vyhodnocen stav napadení lapáků dle metodiky ČSN 48 1000 a vývojové stadium. Pro určení období rojení byly vyhodnoceny data také z feromonových lapačů v okolních porostech. Počet odchycených brouků lýkožrouta smrkového, stupeň napadení lapáků je uveden v příloze 1. Dále byla zaznamenána vývojová stadia v lapácích. Jarní rojení probíhalo v rozmezí 1. – 10.6., kdy byly zaznamenány na jednotlivých lapácích závrtý, snubní komůrky a místy nakladená vajíčka (obr. 27).



Obr. 27: Závrtý a počínající matečná chodba na lapáku, foto ze dne 1.6.2017

V dalším období mezi 15. – .20.6. bylo na většině nalétnutých lapácích zjištěno stadium larvy (obr. 28), později na přelomu července a srpna stadium kukly. Noví mladí brouci se začaly objevovat v polovině srpna po 15.8.



Obr. 28: Zaznamenané stadium larvy, foto ze dne 22.6.2017

5.4 Časové porovnání

Z hlediska hodnocení časové náročnosti byly měřeny časy jednotlivých letů. Lety byly provozovány v autonomním módu (dráha letu je graficky zaznamenána v příloze 4), dle povětrnostních podmínek trvaly přibližně 15 min. Další časový prostor je nutný na počítačové zpracování dat, výsledky jsou zaznamenané v příloze 4.

Pochůzka v terénu a monitoring napadení stromů kůrovcem, kdy je kontrolován vizuálně stav koruny a kmenů, zda se objevují známky napadení, trval přibližně 4 hodiny.

6 Diskuze

6.1 Porovnání výsledků s jinými autory

Tato studie se zabývala monitoringem gradace lýkožrouta smrkového pomocí moderních metod DPZ na území Krkonošského národního parku v oblasti Pece pod Sněžkou. Horské podmínky této oblasti mají vliv na průběh vývoje lýkožrouta smrkového, kdy v průběhu roku zde vytváří zpravidla 1, příp. 2 generace za příhodných klimatických podmínek (Křístek, Urban 2013, Kula 2014), v této studii bylo zjištěna 1 generace.

Výsledky poukazují na možnost využití DPZ s použitím infračerveného pásma elektromagnetického spektra k monitoringu kůrovcem napadených stromů. Tzv. „Zelený útok“, který popisuje Abdullah (2018) jako období, kdy stromy dosud nevykazují vizuální příznaky napadení, je pro lesního nejdůležitější období, kdy je třeba rozpoznat, zda je strom zdravý, či nalétnutý kůrovcem, a případně tyto stromy vhodným způsobem asanovat. Toto období je pro lesní hospodáře zásadní, kůrovec je pod kůrou kmene a právě v této době je nutné kůrovcem napadené stromy, či dříví zpracovat. Zelený útok se potvrdil i v této studii, kdy při monitoringu porostů pochůzkou nebyly napadené stromy rozpoznány, nebyly zaznamenány závrtky na stojících kmenech, nebo barevné změny jehlic v korunách stromů. Na snímcích, které byly vyhodnocovány v Arcmapu však je postupně jasně zřetelná barevná změna NDVI mezi kůrovcem napadenými a zdravými stromy jak je vidět na obr. 23 – 27. Na obr. 23 je barevné vykreslení do červeně zabarvených tónů, to může být způsobeno pravděpodobně přehozenými barevnými kanály při zpracování v programu, nicméně jsou zde velmi dobře odlišitelné souše od zdravých stromů. K velmi podobným výsledkům došli Minařík et al. (2016), kteří prováděli monitoring multispektrální kamerou a výsledky rovněž prokázali možnost využít tuto technologii zejm. v oblasti blízkého infračerveného spektra. Obdobně Abdullah et al. (2018) porovnávali napadené a zdravé stromy v pásmu NIR a dalších, mezi 730 a 1370 nm, a dospěli k podobným výsledkům. Zjistili že, počáteční fáze napadení snižuje obsah biochemických látek v listech, což významně ovlivňuje spektrální odrazivost listů (Abdulah et al. 2018).

Rovněž grafické zobrazení výsledků poukazuje na dobrou možnost odlišit zdravé stromy, napadené a souše, kromě grafu na obr. 19, kde mají hodnoty NDVI napadaných stromů velký rozsah a přibližují se jak ke stromům zdravým, tak k souším, ale i tady

vykazují změnu. Statistické metody Anova a Post Hoc Tests prokázaly významné změny hodnot mezi napadenými stromy a kůrovcovými soušemi, kdy se hodnota signifikace v každém leteckém monitoringu postupně přibližovala od hodnoty zdravého stromu k hodnotě kůrovcové souše. Nebyl zde zaznamenán významný rozdíl mezi čerstvě napadenými a zdravými, to však může být důsledkem poměrně malého zastoupení vzorku napadených stromů (celkem 23 stromů) které se v průběhu studie v monitorované oblasti objevily.

Pokud porovnáme časovou náročnost mezi monitoringem UAV nebo pochůzkou z hlediska efektivity získaných výsledků, je zřejmě výhodnější monitoring UAV, kdy jsou výsledky patrné ihned po zpracování dat. Při vizuálním monitoringu kůrovcem napadených stromů v mnoha případech napadené stromy, tzv. zelený útok, nelze rozpoznat dříve, než se začnou objevovat příznaky napadení (drtinky, barevné změny jehlic, opadávající kůra apod.).

6.2 Doporučení pro další využití

Monitoring této studie byl proveden v bezzásahové oblasti, kde nebylo možné z napadených stromů odebrat vzorky k určení vývojového stadia, nebo položit lapáky, byly vývojová stadia vyhodnoceny z okolních porostů, takže přehled zaznamenaných vývojových stadií nemusí být přesný. Dalším negativním faktorem při sběru dat byly omezené podmínky pro použití UAV, kdy klimatické podmínky neumožnili pravidelný monitoring.

Pro přesnější určení vývojového stadia a stavu napadení stromu by bylo vhodné při příštích studiích tohoto tématu monitorovat kůrovcem ohrožené stromy pravidelně a zároveň zaznamenávat přesněji vývojová stadia lýkožrouta smrkového, tak aby byl ke každému letu identifikováno zjištěné vývojové stadium. Dalším doporučením může být při zpracování dat využít možnost data vyhodnotit jinými indexy, kdy statistické výsledky mohou mít vyšší význam. Dále se nabízí otázka, zda buffery vytvořené kolem vrcholů korun stromů byly pro statistické vyhodnocení dostatečně nastavené, zda v příštích studiích nezvolit jiný rozměr.

V současné době lze tuto technologii využít k mapování kůrovcových ohnisek, ke sledování změn zdravotního stavu porostů i jednotlivých stromů a může tak být vhodným pomocníkem lesního hospodáře. Je vhodná zvláště v rozsáhlých chráněných území jako

jsou např. národní parky a jejich bezzásahové zóny, kde lze tímto způsobem dobře zmapovat ohrožené porosty, rostoucí poškození těchto porostů apod.

Monitoring kůrovcem napadených stromů, či celých lesních komplexů pomocí moderních metod DPZ má velký potenciál. Do budoucna by bylo vhodné pro tuto problematiku stanovit spolehlivou metodiku, kterou bude možné rozpoznat kůrovcem napadené stromy od zdravých již v počáteční fázi napadení.

7 Závěr

Nejen lesní hospodářství v posledních několika letech sužují nepříznivé klimatické podmínky, jako jsou častá dlouhodobá sucha střídající se přivalovými dešti, nedostatek vody v krajině, časté větrné kalamity apod., následkem toho jsou lesní porosty do značné míry oslabeny a projevuje se tak menší odolnost těchto porostů proti různým škodlivým činitelům. Jedním z nejobávanějších škůdců v lesním hospodářství je lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), který právě takto oslabené porosty se zastoupením smrku vyhledává a působí v nich v posledních letech výrazné škody, kdy napadá jak jednotlivé stromy, tak i celé lesní komplexy. Čelit těmto následkům je velice náročné, v první řadě je nezbytné včas zaznamenat napadené stromy a následně zajistit účinná opatření, která šíření kůrovce zamezí.

Tato diplomová práce se zabývá možností využitím moderních metod pro dálkový průzkum Země při monitorování vývoje kůrovcem napadených smrkových porostů pomocí bezpilotních prostředků, které mohou ukládat obraz na vhodný druh záznamového zařízení. V této práci byl využit UAV Zyperos Oktos XL, pro záznam dat digitální fotoaparát Lumix TZ7 upravený pro snímání v infračerveném spektru. Studovaná oblast byla vybrána v bezzásahovém území KRNAP, kde se proti kůrovci nezasahuje a byla tedy možnost sledovat změny stavu porostů v průběhu celého vývoje lýkožrouta smrkového.

Výsledky této práce ukázaly, že lze velice dobře zaznamenat oslabené stromy v důsledku napadení kůrovcem. Data z leteckého průzkumu byla zpracována do mapových podkladů a na základě indexu NDVI byl vyhodnocen stav jednotlivých stromů. Výsledky ukázaly, že lze vyhodnotit stav napadení kůrovcem již ve stadiu larev, kdy v důsledku jejich žíru je strom oslabován.

Při pravidelném monitoringu je tak možné zjistit rozdíl mezi počátečními a dalšími hodnotami NDVI indexu, který poukazuje na možné oslabení stromu mezi jednotlivými časovými úseky monitoringu. Následně je třeba vyhodnotit důsledek oslabení stromů, v případě napadení různými škůdci pak učinit taková opatření, která dalšímu šíření zabrání.

Tyto výsledky poukazují na možnost využití DPZ pro sledování stavu porostů v podmínkách, kde je monitoring kůrovce obtížný, nebo v bezzásahových oblastech národních parků a následně učinit vhodná opatření, která šíření lýkožrouta smrkového do okolních porostů zabrání.

Monitoring vývoje lýkožrouta smrkového pomocí moderních metod DPZ má pro LH velký potenciál. V současné době je tato technologie pro využití v LH nová a její možnosti jsou ve fázi výzkumu. Pro vlastníka lesů má však včasná informace o zdravotním stavu porostů zásadní význam, na jehož podkladu může učinit včasná opatření a zabránit tak případným následkům např. v podobě kůrovcové kalamity.

8 Summary

Not only the forest management has suffered from adverse climatic conditions in the last few years such as frequent long-term drought spells replaced by floods, followed by lack of water, wind storms and frequent wind calamities, etc. As a result, both forest stands and individual trees are weakened greatly and they are not resistant against various harmful factors. One of the pests feared mostly by forest managers is the *Ips typographus*, which it seeks weakened spruce stands in which it has inflicted significant damage in recent years. To face these consequences is very challenging, first of all, it is necessary to find the affected trees in time and then to take effective measures to prevent the spread of bark beetle.

This diploma thesis focuses on the possibility of using modern methods for remote sensing in monitoring the development of bark beetles in affected forest stands by pilot-free device recording the images in a suitable way. In this thesis, the UAV Zyperos Oktos XL, for data recording Lumix TZ7 digital camera adapted for infrared scanning was used. The studied area was selected within the management-free area of KRNAP, where no measures against the bark beetle are taken and therefore it was possible to observe the changes within the spruce stands during the entire development cycle of spruce bark beetle.

The results of this these showed that trees weakened by bark beetles can be easily documented. Data from the pilot-free survey were processed into maps based on the NDVI index, which assesses the status of individual trees. The results showed that already the trees attacked by larvae weakening a tree can be assessed.

With regular monitoring, it is possible to identify the difference between the initial and other NDVI index values, which indicate the possible weakening of the trees in course of time. Subsequently, it is necessary to evaluate the effect of the weakening of the trees, and in case of attack by various agents also adopt measures that prevent further propagation.

These results show the possibility of using remote sensing for monitoring the forest stands in conditions where monitoring of bark beetles is difficult or in the management-free areas of national parks and allow then adopting appropriate measures to prevent spreading spruce bark beetles in the surrounding stands.

The monitoring of spruce bark beetles development using modern remote sensing methods has a great potential for forest management. Currently, this technology is new in forest

management and its possibilities are subject to research. However, timely information on the condition of the forests is essential for the forest owner and they can take timely action to prevent possible consequences of a bark beetle outbreak.

9 Seznam literatury a použitých zdrojů

Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Groen, T. A., & Heurich, M. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. 64 (October 2017), 199–209. Dostupné také z WWW: <http://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>

Baier P, Pennerstorfer J, Schopf A: PHENIPS – A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tools for hazard rating of bark beetle infestation. *Forest Ecology and Management*. 2007. 249: 171–186.

Campbell, J.B.: *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis, London. 1996. 622 p. ISBN 978-1-57230-041-5

Campbell, P.E., Rock, B.N., Marn, M.E., Neefus, C.D., Irons, J.R., Middleton, E.M., Albrechtova, J.: Detection of initial damage in Norway spruce canopies using hyperspectral airborne data. *Int. J. Remote Sens.* 2004. 25, 5557–5584

Ciesla, W.: *Remote Sensing in Forest Health Protection*. Minnesota, University of Minnesota. 2000. 266 s. Dostupné také z WWW: www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/RemoteSensingForestHealth00_03.pdf

Cracknell, A.P., Hayes, L.W.B.: *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis. London, New York, Philadelphia. 1993. 293 s.

Dobrovolný, P.: *Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, katedra geografie. 1998. 161 s.

Eisenbeiß, H.: *UAV Photogrammetry*, Diss. no. 18515, Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zürich. 2009. ISBN 978-3-906467-86-3, ISSN 0252-9335

Flousek, J. et al. : *Plán péče o Krkonošský národní park a jeho ochranné pásmo*, Správa KRNAP, Vrchlabí. 1994. 60 s.

Flousek, J., Hartmanová, O., Štursa, J., Potocki, J. (eds): *Krkonoše. Příroda, historie, život*. Miloš Uhlíř - Baset, Praha. 2007. 864 s. ISBN 978-80-7340-104-7

Gábrlík, P.; Jelínek, A.; Janata, P.: *Precise Multi-Sensor Georeferencing System for Micro UAVs*. In 14th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2016. IFAC-PapersOnLine (ELSEVIER). Elsevier, 2016. s. 170–175. ISSN: 2405-8963

Halounová, L., Pavelka, K.: *Dálkový průzkum Země*. V Praze: České vysoké učení technické. 2008 dotisk. ISBN 978-80-01-03124-7.

Jakuš, R., Blaženec, M., Koreň, M., Barka, I., Lukášová, K., Lubojacký, J., Holuša, J.: TANABBO II model pro hodnocení rizika napadení lesních porostů lýkožroutem smrkovým *Ips typographus* (L.) (coleoptera: curculionidae). Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. , Strnady. 2017. 69 s. ISBN 978-80-7417-135-2, ISSN 0862-7657.

Jelínek, J.: Check - list of Czechoslovak insects IV (Coleoptera): Seznam československých brouků. I. vydání. Praha: Picka. 1993. 172 s.

Kindlmann, P., Matějka, K., Doležal, P.: Lesy Šumavy, lýkožrout a ochrana přírody, Praha: Karolinum, 2012. 325 s. ISBN 978-80-246-2155-5.

Kolář, J.: Dálkový průzkum Země. SNTL, Praha. 1989. 170 s.

Kol. autorů, Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2016, MZe ČR, Praha. 2017. 128 s. ISBN 978-80-7434-389-6

Křístek J., Urban J.: Lesnická entomologie, Academia, Praha. 2013. 445 s., ISBN 978-80-200-2237-0

Kubíková, J.: Forest dieback in Czechoslovakia. Vegetatio. 1991. 93. s. 101–108. ISSN 0042-3106

Kula, E.: Ochrana lesa ve středoevropských podmínkách 1. část Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) kalamitní škůdce smrkových ekosystémů střední Evropy, Skripta, Mendelova univerzita Brno. 2014. 69 s.

Lausch, A., Heurich, M., Gordalla, D., Dobner, H.J., Gwilym-Margianto, S., Salbach, C.: Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. Forest Ecology and Management. 2013. 308, s. 76–89.

Legg, Ch.A.: Remote Sensing and Geographic Information System: Geological mapping, mineral exploration and mapping. Wiley a Sons. Chister, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. 1994. 166 s.

Lehmann, J.R.K., Nieberding, F., Prinz, T., Knoth, C. : Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry — A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. Forests, 2015, 6, 594-612. ISSN 1999-4907

Lillesand T. M., Kiefer R. W.: Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd ed. xvi 750 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. 1994. ISBN 0-471-30575-8

Lukas, V.: Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství: metodika pro praxi, Mendelova univerzita v Brně. 2011. 34 s., ISBN 8073755629

- Mezei, P., Grodzki, W., Blaženec, M., Jakuš, R.: Factors influencing the wind - Bark beetles' disturbance system in the course of an *Ips typographus* outbreak in the Tatra Mountains. *Forest Ecology and Management*. 2014, 312, p. 67–77. Dostupné také z WWW: http://www.academia.edu/16729083/Factors_influencing_the_wind_bark_beetles_disturbance_system_in_the_course_of_an_Ips_typographus_outbreak_in_the_Tatra_Mountains
- Mikeska, M.: Přírodní podmínky oblasti. In: J. Haniš et. al.: OPRL pro PLO 22 – Krkonoše. ÚHÚL pobočka Hradec Králové. 2000. s. 11–97.
- Minařík, R., & Langhammer, J. Use of a multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2016, 41, s. 711–718. Dostupné také z WWW: <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-711-2016>
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyykäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T., Holopainen M.: Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sens.* 2015, 7, 15467-15493.
- Pfeffer, A.: Zentral - und westpaläarktische Borken und Kernkäfer (Coleoptera: Scolytidae, Platypodidae). Basel: Pro Entomologia, 1995. 310 s. ISBN 3-9520840-6-9.
- Quaschik E.: Der Fichtenborkenkäfer. Akadem Verlagsges. Geest., Portik K.-G., Leipzig. 1953. 35 s.
- Řehák M., Využití bezpilotních prostředků ve fotogrammetrii, Diplomová práce, ČVUT Praha. 2012. 91 s.
- Sandidge, D.: Digital Infrared Photography, Photo Workshop, 1 vyd. USA: Wiley Publishing, Inc., 2009. 258 s. Dostupné také z WWW: <http://books.google.cz/books?id=zdKdPAAACAAJ&dq=Digital+Infrared+Photography+Photo+Workshop>
- Schwarz, O. et al.: Plán péče Plán péče o Krkonošský národní park a jeho ochranné pásmo (2010 - 2020), Správa KRNAP, Vrchlabí. 2010. 179 s.
- Schwarz, O.: Rekonstrukce lesních ekosystémů Krkonoš, Správa KRNAP, Vrchlabí. 1997. 174 s. ISBN 80-902489-1-8
- Schwarz, O.: Speciální management lesních ekosystémů Krkonoš. Doktorandská disertační práce. MZLU Brno. 2003. 233 s.
- Vacek, S., Vacek, Z. Schwarz, O. a kol.: Struktura a vývoj lesních porostů na výzkumných plochách v národních parcích Krkonoš, Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy. 2010. 568 s. ISBN 978-80-87154-41-0

Wulder, M .A., Dymond, C. C., White J. C., Leckie, D. G., Carroll, A. L.: Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest Ecology and Management*. 2006. 221, 27–41.

Wulder, M .A., Dymond, C. C., White J. C., Remote sensing in the survey of mountain pine beetle impacts: Review and recommendations. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. 2005. 56 p., ISSN 0830-0453, ISBN 0-662-40055-0

Zumr, V.: *Lýkožrout smrkový - biologie, prevence a metody boje*. Matice lesnická, Písek. 1995. 132 s.

Zákony a normy:

Česko. ČNR. Zákon České národní rady č. 114 ze dne 19.2.1992 o ochraně přírody a krajiny. In *Sbírka zákonů České republiky*. 1992, částka 28, s. 666–692. Dostupné také z WWW:

<https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=58170589E7DC0591C125654B004E91C1&action=openDocument>

Česko.Vláda. Zákon č. 49 ze dne 6.3.1997 o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. In *Sbírka zákonů České republiky*. 1997, částka 17, s. 1266–1296. Dostupné také z WWW: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49>

ČSN 48 1000 Ochrana lesa proti kůrovci na smrku. Praha: Český normalizační institut, 2005. 8 s.

10 Seznam příloh

Příloha 1: Výpis z evidence lapačů a lapáků (LHE)

Příloha 2: Post Hoc Test

Příloha 3: Fotografická dokumentace

Příloha 4: Report z monitoringu 1.8.2018 (Agisoft, Přemysl Janata)

Příloha 1: Výpis z evidence lapačů a lapáků (LHE)

EVIDENCE LAPAČŮ 2017																						
porost	číslo	instalace	datum	ks	datum	ks	datum	ks	datum	ks												
216 B k37	1	10.5.	23.5.	100	1.6.	120	14.6.	100	27.6.	30	10.7. V	20	24.7.	100	7.8.	280	21.8.	180	4.9.	10	18.9.	0
"	2	10.5.	23.5.	300	1.6.	120	14.6.	550	27.6.	50	10.7. V	50	24.7.	100	7.8.	150	21.8.	200	4.9.	20	18.9.	0
"	3	10.5.	23.5.	600	1.6.	120	14.6.	630	27.6.	100	10.7. V	70	24.7.	120	7.8.	20	21.8.	70	4.9.	0	18.9.	0
209 D I36	4	10.5.	23.5.	500	1.6.	450	14.6.	840	27.6.	180	10.7. V	70	24.7.	50	7.8.	70	21.8.	120	4.9.	10	18.9.	0
209 D I37	5	10.5.	23.5.	150	1.6.	180	14.6.	220	27.6.	120	10.7. V	70	24.7.	90	7.8.	80	21.8.	140	4.9.	5	18.9.	0
"	6	10.5.	23.5.	10	1.6.	100	14.6.	100	27.6.	70	10.7. V	50	24.7.	100	7.8.	50	21.8.	140	4.9.	10	18.9.	0
"	7	10.5.	23.5.	20	1.6.	120	14.6.	100	27.6.	70	10.7. V	40	24.7.	80	7.8.	60	21.8.	120	4.9.	0	18.9.	0
"	8	10.5.	23.5.	50	1.6.	80	14.6.	140	27.6.	50	10.7. V	20	24.7.	80	7.8.	70	21.8.	150	4.9.	0	18.9.	0
209 E m36a	9	10.5.	23.5.	50	1.6.	350	14.6.	420	27.6.	150	10.7. V	120	24.7.	300	7.8.	100	21.8.	250	4.9.	10	18.9.	0
"	10	10.5.	23.5.	150	1.6.	50	14.6.	100	27.6.	70	10.7. V	50	24.7.	70	7.8.	35	21.8.	70	4.9.	0	18.9.	0
215 B k37	11	10.5.	23.5.	70	1.6.	70	14.6.	120	27.6.	50	10.7. V	35	24.7.	50	7.8.	50	21.8.	120	4.9.	0	18.9.	0

EVIDENCE LAPÁKŮ 2017										
lu	porost	číslo	položeni	datum	ks	datum	ks	datum	ks	datum
3	209 A n27	1	9.5.	23.5.	0	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	"	2	9.5.	23.5.	0	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	209 D I37	3	9.5.	23.5.	0	5.6.	0	19.6.	0	3.7.
3	"	4	9.5.	23.5.	0	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	"	5	9.5.	23.5.	1	5.6.	1	19.6.	1	3.7.
3	"	6	9.5.	23.5.	0	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	210 A n34	44	9.5.	23.5.	0	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	"	45	9.5.	23.5.	1	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	"	46	9.5.	23.5.	2	5.6.	2	19.6.	2	3.7.
3	"	10	9.5.	23.5.	1	5.6.	1	19.6.	1	3.7.

0 = slabý 1 = střední 2 = silný

Příloha 2: Post Hoc Test

Multiple Comparisons							95% Confidence Interval		
Dependent Variable	(I) Kurovec	(J) Kurovec	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound		
MEAN	Tukey HSD	0	1	-27,3 [*]	7,777	,003	-47,32	-7,346	
			2	-30,0 [*]	2,209	,000	-35,71	-24,35	
			3	-11,103	3,091	1,000	-8,054	7,833	
		1	0	27,33 [*]	7,777	,003	7,346	47,32	
			2	-2,700	8,044	,987	-23,37	17,97	
			3	27,22 [*]	8,329	,006	5,816	48,63	
		2	0	30,03 [*]	2,209	,000	24,35	35,71	
			1	2,700	8,044	,987	-17,97	23,37	
			3	29,92 [*]	3,711	,000	20,38	39,46	
	3	0	,1103	3,091	1,000	-7,833	8,054		
		1	-27,2 [*]	8,329	,006	-48,63	-5,816		
		2	-29,9 [*]	3,711	,000	-39,46	-20,38		
	Scheffe	0	1	-27,3 [*]	7,777	,006	-49,08	-5,584	
			2	-30,0 [*]	2,209	,000	-36,21	-23,85	
			3	-11,103	3,091	1,000	-8,754	8,534	
		1	0	27,33 [*]	7,777	,006	5,584	49,08	
			2	-2,700	8,044	,990	-25,19	19,80	
			3	27,22 [*]	8,329	,014	3,929	50,52	
		2	0	30,03 [*]	2,209	,000	23,85	36,21	
			1	2,700	8,044	,990	-19,80	25,19	
			3	29,92 [*]	3,711	,000	19,54	40,30	
	3	0	,1103	3,091	1,000	-8,534	8,754		
		1	-27,2 [*]	8,329	,014	-50,52	-3,929		
		2	-29,9 [*]	3,711	,000	-40,30	-19,54		
	MEAN_1	Tukey HSD	0	1	-43,1 [*]	11,51	,001	-72,73	-13,55
				2	-45,4 [*]	3,271	,000	-53,77	-36,95
				3	-15,5 [*]	4,576	,004	-27,26	-3,742
1			0	43,14 [*]	11,51	,001	13,55	72,73	
			2	-2,224	11,91	,998	-32,83	28,38	
			3	27,63	12,33	,112	-4,057	59,32	
2			0	45,36 [*]	3,271	,000	36,95	53,77	
			1	2,224	11,91	,998	-28,38	32,83	
			3	29,86 [*]	5,495	,000	15,74	43,98	
3		0	15,50 [*]	4,576	,004	3,742	27,26		
		1	-27,63	12,33	,112	-59,32	4,057		
		2	-29,9 [*]	5,495	,000	-43,98	-15,74		
Scheffe		0	1	-43,1 [*]	11,51	,003	-75,33	-10,94	
			2	-45,4 [*]	3,271	,000	-54,51	-36,21	
			3	-15,5 [*]	4,576	,009	-28,30	-2,705	
		1	0	43,14 [*]	11,51	,003	10,94	75,33	
			2	-2,224	11,91	,998	-35,53	31,08	
			3	27,63	12,33	,170	-6,850	62,12	
		2	0	45,36 [*]	3,271	,000	36,21	54,51	
			1	2,224	11,91	,998	-31,08	35,53	
			3	29,86 [*]	5,495	,000	14,49	45,22	
3		0	15,50 [*]	4,576	,009	2,705	28,30		
		1	-27,63	12,33	,170	-62,12	6,850		
		2	-29,9 [*]	5,495	,000	-45,22	-14,49		
MEAN_12		Tukey HSD	0	1	-81,1 [*]	13,10	,000	-114,8	-47,45
				2	-54,0 [*]	3,720	,000	-63,60	-44,48
				3	-120 [*]	5,205	,000	-133,4	-106,7
	1		0	81,11 [*]	13,10	,000	47,45	114,8	
			2	27,07	13,54	,189	-7,739	61,88	
			3	-38,9 [*]	14,02	,028	-74,99	-2,900	
	2		0	54,04 [*]	3,720	,000	44,48	63,60	
			1	-27,07	13,54	,189	-61,88	7,739	
			3	-66,0 [*]	6,249	,000	-82,07	-49,95	
	3	0	120,1 [*]	5,205	,000	106,7	133,4		
		1	38,94 [*]	14,02	,028	2,900	74,99		
		2	66,01 [*]	6,249	,000	49,95	82,07		
	Scheffe	0	1	-81,1 [*]	13,10	,000	-117,7	-44,49	
			2	-54,0 [*]	3,720	,000	-64,44	-43,63	
			3	-120 [*]	5,205	,000	-134,6	-105,5	
		1	0	81,11 [*]	13,10	,000	44,49	117,7	
			2	27,07	13,54	,262	-10,81	64,95	
			3	-38,94	14,02	,053	-78,16	,2774	
		2	0	54,04 [*]	3,720	,000	43,63	64,44	
			1	-27,07	13,54	,262	-64,95	10,81	
			3	-66,0 [*]	6,249	,000	-83,49	-48,54	
	3	0	120,1 [*]	5,205	,000	105,5	134,6		
		1	38,94	14,02	,053	-27,74	78,16		
		2	66,01 [*]	6,249	,000	48,54	83,49		
	MEAN_12_13	Tukey HSD	0	1	-41,3 [*]	13,44	,011	-75,84	-6,784
				2	-57,9 [*]	3,817	,000	-67,69	-48,07
				3	-32,5 [*]	5,340	,000	-46,22	-18,77
1			0	41,31 [*]	13,44	,011	6,784	75,84	
			2	-16,57	13,90	,632	-52,28	19,15	
			3	8,821	14,39	,928	-28,16	45,80	
2			0	57,88 [*]	3,817	,000	48,07	67,69	
			1	16,57	13,90	,632	-19,15	52,28	
			3	25,39 [*]	6,412	,000	8,908	41,86	
3		0	32,49 [*]	5,340	,000	18,77	46,22		
		1	-8,821	14,39	,928	-45,80	28,16		
		2	-25,4 [*]	6,412	,000	-41,86	-8,908		
Scheffe		0	1	-41,3 [*]	13,44	,024	-78,89	-3,740	
			2	-57,9 [*]	3,817	,000	-68,55	-47,20	
			3	-32,5 [*]	5,340	,000	-47,43	-17,56	
		1	0	41,31 [*]	13,44	,024	3,740	78,89	
			2	-16,57	13,90	,701	-55,43	22,30	
			3	8,821	14,39	,945	-31,42	49,06	
		2	0	57,88 [*]	3,817	,000	47,20	68,55	
			1	16,57	13,90	,701	-22,30	55,43	
			3	25,39 [*]	6,412	,001	7,456	43,32	
3		0	32,49 [*]	5,340	,000	17,56	47,43		
		1	-8,821	14,39	,945	-49,06	31,42		
		2	-25,4 [*]	6,412	,001	-43,32	-7,456		

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Příloha 3: Fotografická dokumentace (autor Bedřich Vašíček, není-li uvedeno jinak)

Požerek lýkožrouta smrkového, stadium larev 26.6.2017



Nová generace lýkožrouta smrkového, světlé imago 28.8.2017



Kůrovcem napadené stromy, zelené koruny bez barevných změn 1.8.2017



Kůrovcem napadené stromy, kdy zelené koruny začínají vykazovat barevné změny jehlic a současně začíná odpadávat kůra, období po dokončení vývoje nové generace, 30.8.2017



Kůrovcem napadené stromy, rezavé zbarvení korun 4.10.2017



GPS zaměřování vlíčovacích bodů pro georeferenci snímků 15.6.2017

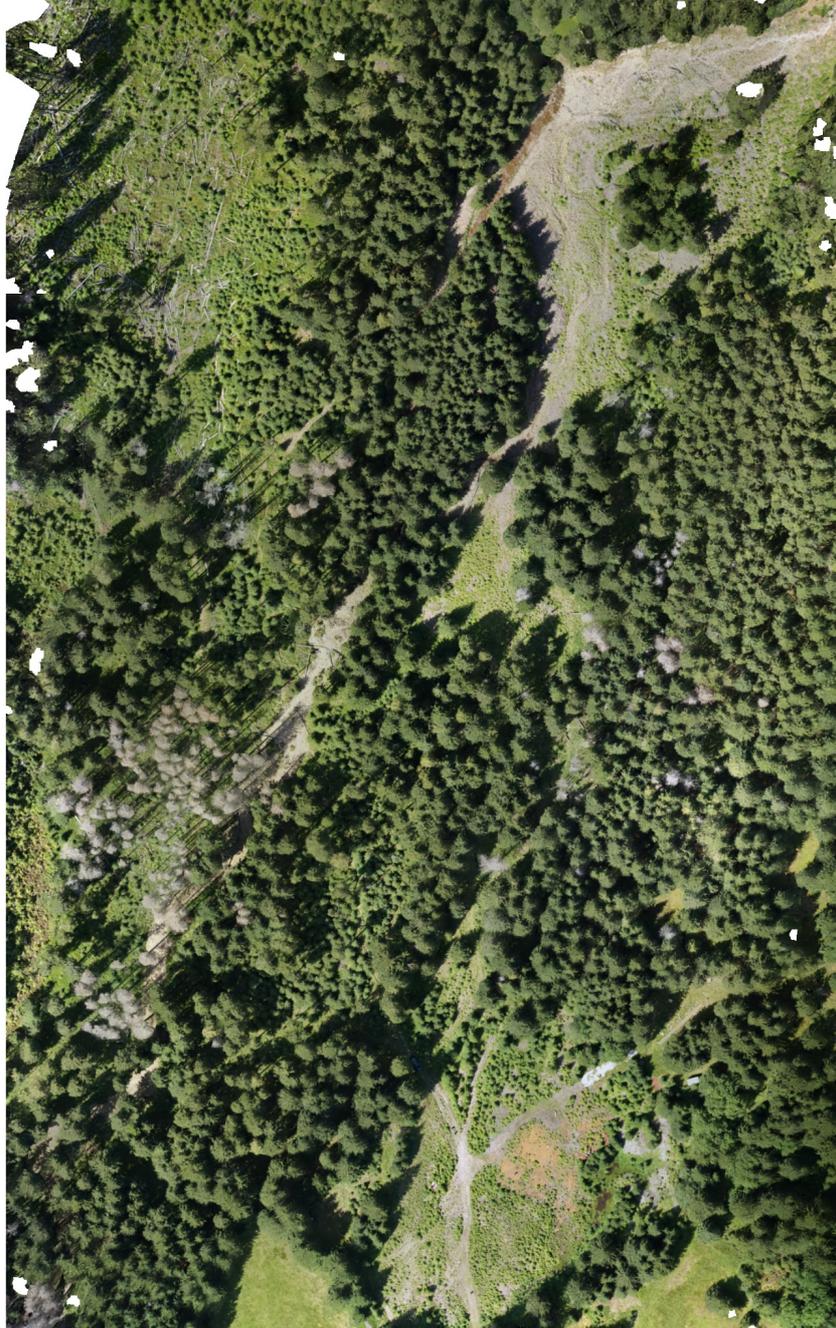


Snímek z UAV na Obří důl. Na snímku uprostřed dole viditelné sledované kůrovcem napadené stromy se změnami barvy v korunách, v levé části kůrovcové souše. (Přemysl Janata 4.10.2017)



Agisoft PhotoScan

Processing Report
01 March 2018



Survey Data

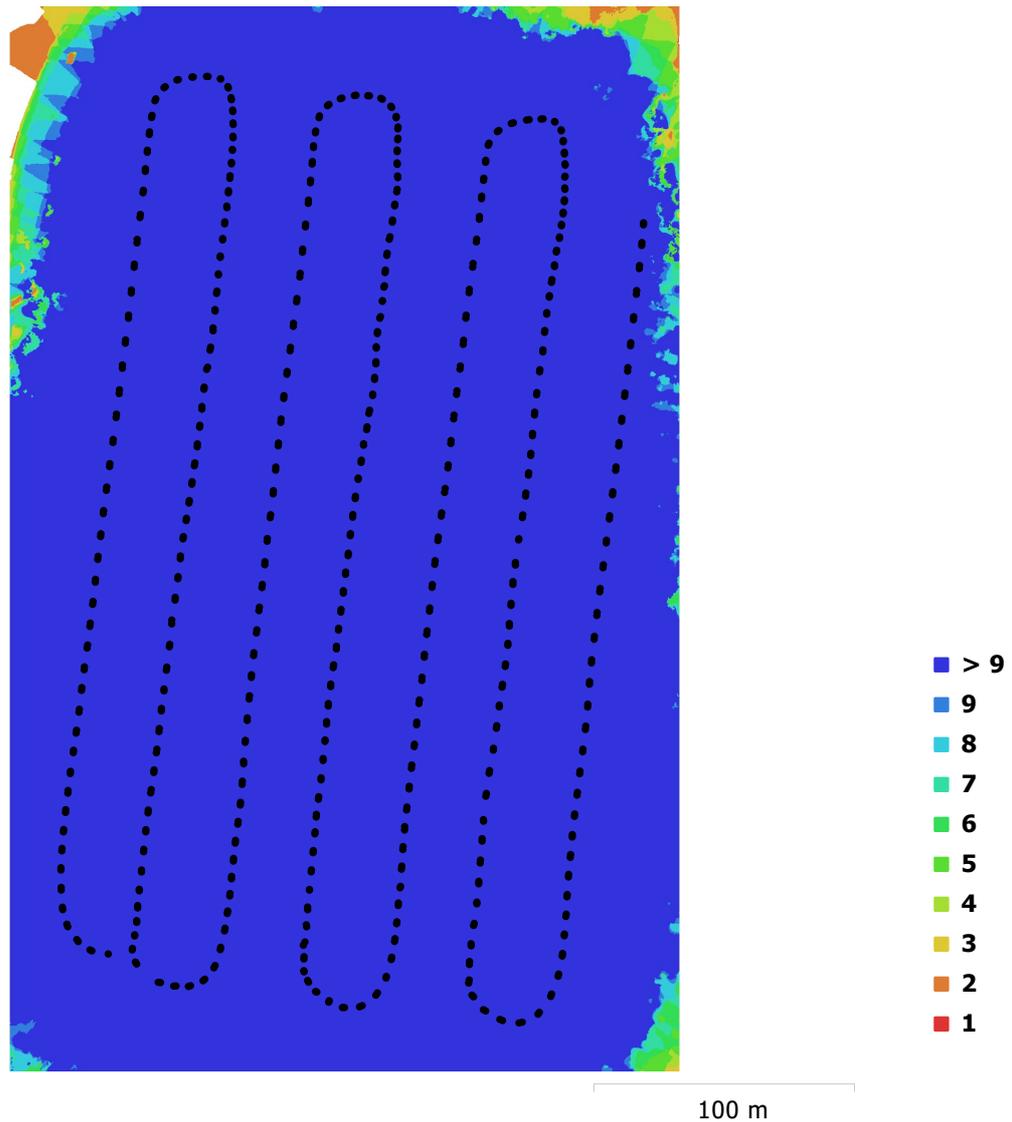


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	673	Camera stations:	673
Flying altitude:	91.3 m	Tie points:	623,392
Ground resolution:	2.23 cm/pix	Projections:	1,823,037
Coverage area:	0.106 km ²	Reprojection error:	1.05 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
DMC-FZ7 (6 mm)	2816 x 2112	6 mm	2.05 x 2.05 μ m	No
ILCE-7	6000 x 4000	21 mm	unknown	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

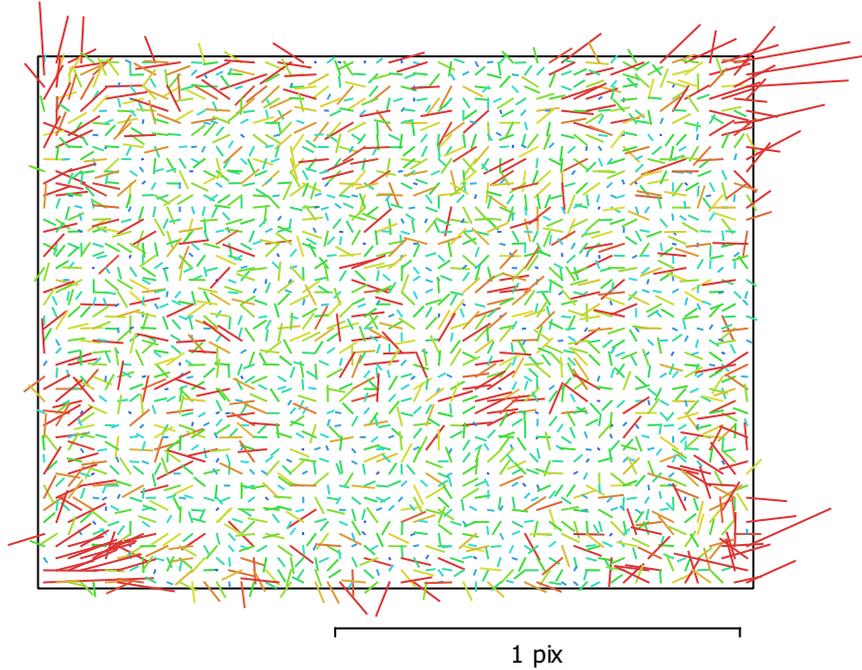


Fig. 2. Image residuals for DMC-FZ7 (6 mm).

DMC-FZ7 (6 mm)

336 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	2816 x 2112	6 mm	2.05 x 2.05 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	3040.69	0.13	1.00	-0.14	-0.14	-0.00	-0.03	-0.23	0.19	-0.14	0.06	0.07
Cx	-50.7635	0.085		1.00	0.15	0.12	0.14	0.01	-0.03	0.04	0.61	0.10
Cy	-1.16708	0.086			1.00	-0.08	0.14	0.02	-0.02	0.02	0.14	0.59
B1	0.528299	0.017				1.00	0.00	0.00	-0.03	0.04	0.00	-0.01
B2	-0.135512	0.016					1.00	0.01	-0.01	0.01	0.04	-0.09
K1	-0.187815	0.00016						1.00	-0.97	0.91	-0.03	-0.01
K2	0.18009	0.0011							1.00	-0.98	0.01	-0.00
K3	0.0942566	0.0021								1.00	0.00	0.01
P1	-0.00134181	5.4e-06									1.00	0.19
P2	0.000911254	6.4e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Calibration

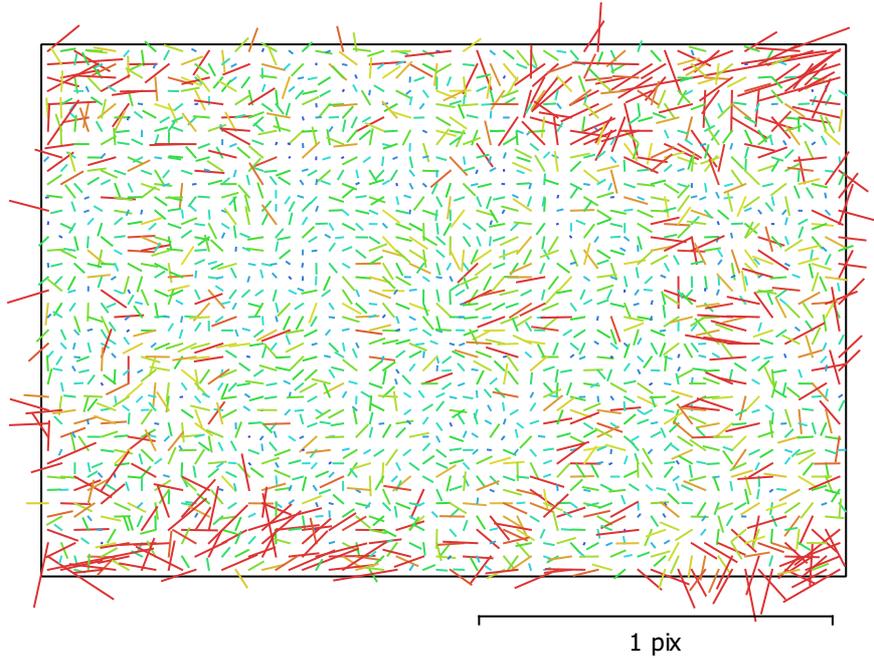


Fig. 3. Image residuals for ILCE-7.

ILCE-7

337 images

Type **Frame** Resolution **6000 x 4000** Focal Length **21 mm** Pixel Size **unknown**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	3616.83	0.14	1.00	0.08	0.16	0.00	-0.00	-0.08	0.20	-0.14	-0.04	0.01
Cx	-61.4631	0.068		1.00	0.10	-0.22	-0.13	0.00	0.02	-0.01	0.60	0.06
Cy	6.1842	0.064			1.00	0.01	-0.25	0.02	0.01	0.01	0.11	0.67
B1	0.258249	0.015				1.00	-0.01	-0.02	-0.00	0.01	-0.22	-0.00
B2	0.042562	0.014					1.00	-0.00	0.01	-0.01	-0.16	-0.16
K1	-0.0651189	2.9e-05						1.00	-0.91	0.84	0.03	0.04
K2	0.0398974	6.2e-05							1.00	-0.98	-0.02	-0.01
K3	-0.00658673	4.1e-05								1.00	0.01	0.01
P1	-0.000587099	2.9e-06									1.00	0.12
P2	-0.000521017	3.1e-06										1.00

Table 3. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

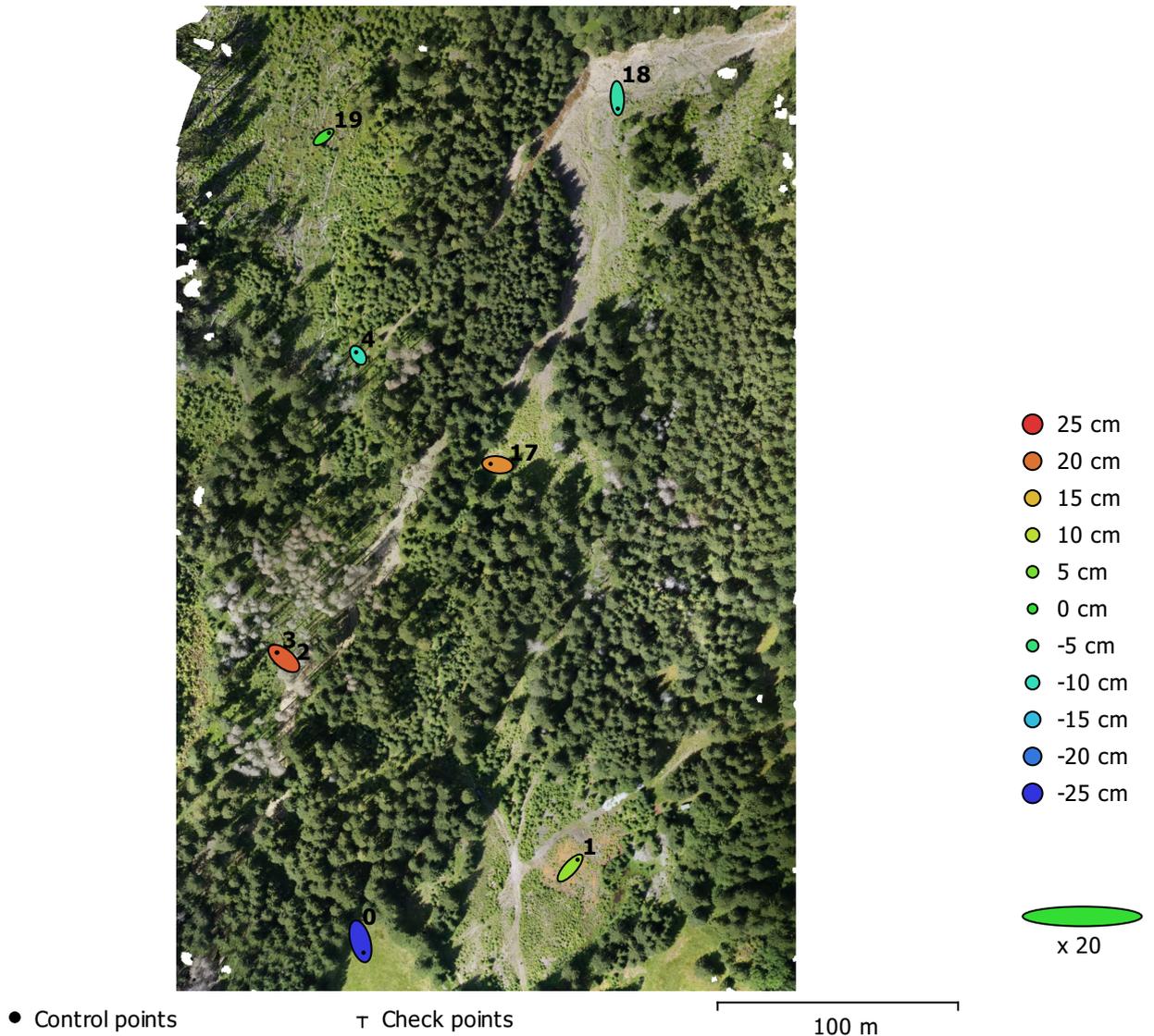


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	22.2328	30.423	15.3326	37.681	40.681

Table 4. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
0	12.7877	-47.4211	-24.9113	55.0714	0.121 (26)
1	30.995	34.7428	6.90798	47.0688	0.132 (54)
17	-28.9996	3.76019	18.1531	34.4187	0.188 (49)
18	2.05979	-44.0718	-8.74039	44.9774	0.152 (41)
19	22.6721	17.1062	0.982476	28.4185	0.084 (3)
2	-30.0653	24.7912	21.7136	44.6094	0.215 (25)
4	-8.52632	12.6252	-9.94771	18.1948	0.172 (34)
3					
Total	22.2328	30.423	15.3326	40.681	0.163

Table 5. Control points.

Digital Elevation Model

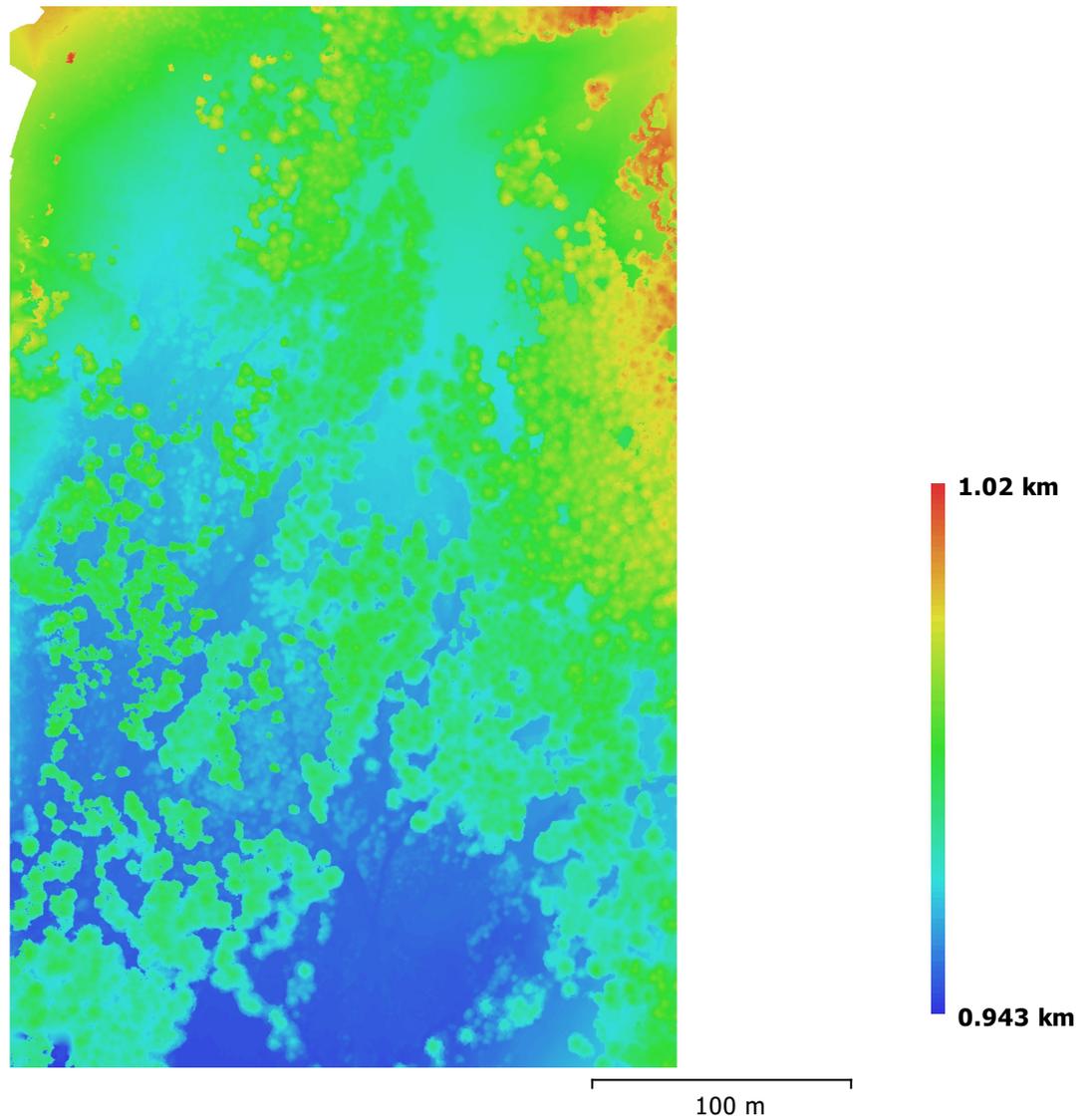


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 8.93 cm/pix
Point density: 125 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	673
Aligned cameras	673
Markers	8
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	623,392 of 714,263
RMS reprojection error	0.171694 (1.05146 pix)
Max reprojection error	1.49301 (49.2932 pix)
Mean key point size	5.25022 pix
Effective overlap	3.43232

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 days 1 hours
Alignment time	25 minutes 14 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	20 seconds

Depth Maps

Count	337
-------	-----

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Processing time	10 hours 53 minutes

Dense Point Cloud

Points	36,324,954
--------	------------

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Moderate
Depth maps generation time	10 hours 53 minutes
Dense cloud generation time	1 hours 34 minutes

Model

Faces	7,260,202
Vertices	3,631,703

Reconstruction parameters

Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Moderate
Face count	7,264,788
Processing time	1 minutes 44 seconds

DEM

Size	2,883 x 4,624
Coordinate system	Local Coordinates (m)

Reconstruction parameters

Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Processing time	16 seconds

Orthomosaic

Size	11,528 x 18,493
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Channels	3, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable color correction	Yes
Enable hole filling	Yes
Processing time	50 minutes 14 seconds
Software	
Version	1.3.4 build 5067
Platform	Windows 64