

# Univerzita Karlova

## Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



**Bc. Jan Doležal**

## **Využití dat Sentinel-1 pro sledování managementu luk**

Grassland management monitoring based on Sentinel-1 data

Diplomová práce

**Vedoucí práce:** Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha, 2018

**Vysoká škola:** Univerzita Karlova

**Fakulta:** Přírodovědecká

**Katedra:** Aplikované geoinformatiky a kartografie

**Školní rok:** 2017/2018

# Zadání diplomové práce

**Jméno:** Bc. Jan Doležal

**Studijní obor:** Kartografie a geoinformatika

**Téma:** Využití dat Sentinel-1 pro sledování managementu lučních porostů

## Zásady pro vypracování

Diplomová práce se bude zabývat sledováním vybraných příznaků lučních porostů v časové řadě radarových dat Sentinel-1 ve vztahu ke způsobu obhospodařování lučních porostů (sečení, pasení, popř. mulčování). Cílem práce je identifikovat vhodné příznaky a vytvořit metodiku klasifikace vedoucí k průběžnému určování stavu lučního porostu. Jako modelové území byla zvolena oblast Krkonoš a přilehlého podhůří z důvodu zájmu KRNP o zmíněnou problematiku.

Hodnocenými příznaky budou v první řadě koeficient zpětného rozptylu, koherence, popř. entropie a polarimetrický úhel. K dispozici jsou data z pozemního měření na zájmových územích z let 2016 a 2017, jako doplňkové je doporučeno použít údaje o srážkách ČHMÚ.

## Seznam relevantní odborné literatury:

Haldar, D., Chakraborty, M., Manjunath, K. R., & Parihar, J. S. (2014). Role of polarimetric sar data for discrimination/biophysical parameters of crops based on canopy architecture. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(8), 737.

Samanta, D., & Sanyal, G. (2012). Classification of SAR Images Based on Entropy. *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci*, 4, 82.

Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., & Talgre, L. (2016). Relating Sentinel-1 interferometric coherence to mowing events on grasslands. *Remote Sensing*, 8(10), 802. Voormansik, K., Jagdhuber, T., Zalite, K., Noorma, M., & Hajnsek, I. (2016). Observations of cutting practices in agricultural grasslands using polarimetric

SAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4), 1382-1396.

Wagner, W., Pathe, C., Doubkova, M., Sabel, D., Bartsch, A., Hasenauer, S., ... & Löw, A. (2008). Temporal stability of soil moisture and radar backscatter observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). *Sensors*, 8(2), 1174-1197.

Wang, X., Ge, L., & Li, X. (2013). Pasture monitoring using sar with cosmo-skymed, envisat asar, and alos palsar in otway, australia. *Remote Sensing*, 5(7), 3611-3636.

Zalite, K., Antropov, O., Praks, J., Voormansik, K., & Noorma, M. (2016). Monitoring of agricultural grasslands with time series of X-band repeat-pass interferometric SAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(8), 3687-3697.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: červenec 2018

.....

Vedoucí diplomové práce

.....

Garant studijního oboru

V Praze dne 12.2.2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze,

Podpis.....

Bc. Jan Doležal

Poděkování:

Rád bych tímto způsobem poděkoval především Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za odborné vedení mé práce, cenné rady, věnovaný čas, odborné připomínky a trpělivost. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Hlavním cílem této diplomové práce bylo najít a kvantifikovat souvislost mezi koherencí, entropií, polarimetrickým úhlem alfa získaným z radarových dat Sentinel-1 a sečením luk/pastvou. Výzkum probíhal v lokalitě Krkonošského národního parku. Pro sestavení a ověření aplikované metodiky byl 5krát proveden sběr dat v terénu. K dispozici byla hodinová srážková data od ČHMÚ, která ale nemusela být použita – nebyly zaznamenány žádné srážky v době snímání. Potvrdila se závislost mezi sečením a hodnotou koherence. Po sečení byla mediánová koherence na polygonech vyšší než před sečením. Výsledky byly podobné pro VH i VV polarizaci. Koherence na polygonech zůstala vyšší i po 12-24 dnech. Celkem byly zkoumány dvě odlišné geometrie pořízení dat (vzestupná a sestupná dráha letu). Výsledky v obou případech byly podobné. Pro polarimetrické parametry nebyla prokázána korelace mezi polarimetrickými parametry a sečením nebo pastvou.

**Klíčová slova:** radar, SAR, Sentinel-1, koherence, polarimetrie, sečení luk

## **Abstract**

The main goal of this diploma thesis was to find and quantify the connection between coherence, entropy, polarimetric angle alpha obtained from Sentinel-1 radar data and grass cutting/pastures. The research was carried out in the area of the Krkonoše national park. To assemble and validate applied methodology, field data was collected 5 times. Hourly rainfall data from Czech hydrometeorological institute was available, but it did not have to be used – no rainfalls were recorded at the time of data acquisitions. Dependence between mowing and the value of coherence has been confirmed. After mowing, median coherence was higher than before mowing. The results were similar to VH as well as VV polarization. Coherence on polygons remained higher after 12-24 days. In total, two different data acquisition geometries (ascending and descending) were examined. The results in both cases were similar. For polarimetric parameters, no correlation between polarimetric parameters and grass mowing or pasture has been confirmed.

**Keywords:** radar, SAR, Sentinel-1, coherence, polarimetry, grass mowing

# Obsah

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. ÚVOD .....</b>                                                      | <b>13</b> |
| <b>2. PROBLEMATIKA RADAROVÝCH DAT .....</b>                               | <b>14</b> |
| 2.1. HISTORIE SAR .....                                                   | 14        |
| 2.2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA SAR .....                                   | 14        |
| 2.2.1. Geometrické vlastnosti radarových obrazových záznamů .....         | 15        |
| 2.2.2. Dopplerův efekt .....                                              | 18        |
| 2.2.3. Polarizace .....                                                   | 20        |
| 2.2.3.1. Polarimetrická dekompozice .....                                 | 21        |
| 2.3. ZOBRAZENÍ SAR .....                                                  | 23        |
| 2.4. ZÁKLADY INTERFEROMETRIE .....                                        | 24        |
| 2.4.1. Princip radarové interferometrie .....                             | 25        |
| 2.4.2. Koherence radarových dat .....                                     | 26        |
| 2.4.3. Koregistrace .....                                                 | 27        |
| 2.5. SPECKLE .....                                                        | 28        |
| 2.5.1. Filtrace Speckle .....                                             | 29        |
| 2.6. SENTINEL-1 .....                                                     | 29        |
| 2.7. MANAGMENT LUK A SAR .....                                            | 31        |
| <b>3. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ A POUŽITÁ DATA .....</b>                              | <b>33</b> |
| 3.1. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ .....                                                  | 33        |
| Fyzicko-geografická charakteristika území .....                           | 33        |
| 3.2. POUŽITÁ DATA .....                                                   | 35        |
| 3.2.1. Data Sentinel 1 .....                                              | 35        |
| 3.2.2. Srážková data ČHMÚ .....                                           | 36        |
| <b>4. METODIKA .....</b>                                                  | <b>38</b> |
| 4.1. VÝBĚR METODIKY .....                                                 | 38        |
| 4.2. ZPRACOVÁNÍ RADAROVÝCH DAT .....                                      | 40        |
| 4.2.1. Předzpracování .....                                               | 40        |
| 4.2.2. Interferometrické zpracování .....                                 | 42        |
| 4.2.3. Polarimetrické zpracování .....                                    | 42        |
| 4.2.4. Geometrická korekce a uložení dat .....                            | 42        |
| 4.3. ZPRACOVÁNÍ VEKTOROVÝCH DAT .....                                     | 43        |
| <b>5. VÝSLEDKY .....</b>                                                  | <b>44</b> |
| 5.1. ROK 2016 .....                                                       | 44        |
| DATASET 20. 7. 2016 .....                                                 | 44        |
| Stav bez biomasy .....                                                    | 44        |
| 5.2. ROK 2017 .....                                                       | 46        |
| DATASET 15. 6. 2017 .....                                                 | 47        |
| Relativní dráha 146 – stav bez biomasy .....                              | 47        |
| Relativní dráha 22 – stav bez biomasy .....                               | 49        |
| Relativní dráha 146 – stav s biomasou .....                               | 50        |
| Relativní dráha 22 – stav s biomasou .....                                | 50        |
| DATASET 26. 6. 2017 .....                                                 | 52        |
| Relativní dráha 146 – stav bez biomasy .....                              | 52        |
| Relativní dráha 22 – stav bez biomasy .....                               | 53        |
| Relativní dráha 146 – stav bez biomasy – dřívější sečení .....            | 54        |
| Relativní dráha 22 – stav bez biomasy – dřívější sečení .....             | 54        |
| Relativní dráha 146 – stav s biomasou .....                               | 55        |
| Relativní dráha 22 – stav s biomasou .....                                | 56        |
| Odhad sečení z datové řady na základě výsledků pro vybrané polygony ..... | 57        |
| 5.3. DATASET KRNAP .....                                                  | 59        |
| Relativní dráha 22 – sečené louky .....                                   | 59        |
| Relativní dráha 146 – sečené louky .....                                  | 59        |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| <i>Pastva</i> .....                     | 60        |
| <i>Odhad sečení z datové řady</i> ..... | 60        |
| 5.4.    VALIDACE .....                  | 61        |
| <b>6.    DISKUZE</b> .....              | <b>64</b> |
| <b>7.    ZÁVĚR</b> .....                | <b>69</b> |
| <b>PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY</b> ..... | <b>70</b> |
| <b>PŘÍLOHY</b> .....                    | <b>76</b> |

## **Přehled použitých zkratk**

ASAR – Advanced Synthetic Aperture Radar

ENVISAT – Environmental Satellite

ERS – European Remote Sensing Satellite

ESA – European Space Agency

DEM – Digital elevation model

MAD – Median absolute deviation

NDVI – Normalised difference vegetation index

PRF – Pulse repetition frequency

SAR – Synthetic Aperture Radar

SLC – Single Look Complex

WKT – Well known text

## Seznam obrázků

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 – Radarová geometrie (upraveno podle Swart, 2010) .....                                                          | 16 |
| Obrázek 2 – Závislost rozlišení v horizontálním směru na dopadovém úhlu a šířce pásma (upraveno podle Reigber, 2015) ..... | 17 |
| Obrázek 3 – Efektivní šířka paprsku (upraveno podle Reigber, 2015) .....                                                   | 20 |
| Obrázek 4 – Geometrie radarové interferometrie (Urban, 2005) .....                                                         | 25 |
| Obrázek 5 – Postup koregistrace (upraveno dle Selva et al., 2007) .....                                                    | 27 |
| Obrázek 6 – Radarový snímek ukazující speckle (Richards, 2009 - p140) .....                                                | 28 |
| Obrázek 7 – Vznik speckle díky kombinaci několika odrazečů v jedné buňce (Richards, 2009) .....                            | 28 |
| Obrázek 8 - Suma srážek za 24h pro stanici Pec pod Sněžkou pro sezónu 2016 .....                                           | 36 |
| Obrázek 9 – Suma srážek za 24h pro stanici Pec pod Sněžkou pro sezónu 2017 .....                                           | 37 |
| Obrázek 10 – Různé aplikace speckle filtrů (rozlišení pixelu 4 m) .....                                                    | 39 |
| Obrázek 11 – Zpracování radarových dat .....                                                                               | 41 |
| Obrázek 12 – Sklonitost/orientace svahů pro data za sezónu 2017 .....                                                      | 46 |
| Obrázek 13 – Koherence VH – časová řada pro sečené polygony (rel. dráha 146) .....                                         | 48 |
| Obrázek 14 – Polygon 20 (Zdroj: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.) .....                                                       | 48 |
| Obrázek 15 – Hodnota koherence VH před/po sečení pro louky bez biomasy (rel. dráha 146) .....                              | 49 |
| Obrázek 16 – Hodnota koherence VV před/po sečení pro louky bez biomasy (rel. dráha 146) .....                              | 49 |
| Obrázek 17 – Hodnota koherence VH před/po sečení pro louky s biomasou (rel. dráha 22) .....                                | 49 |
| Obrázek 18 – Koherence VH (vlevo) a VV (vpravo) v časové řadě pro polygon 20 .....                                         | 57 |
| Obrázek 19 - Koherence VH (vlevo) a VV (vpravo) v časové řadě pro polygon 8 .....                                          | 58 |
| Obrázek 20 – Polarimetrický úhel alfa pro polygon 16 (rel. dráha 146) .....                                                | 58 |
| Obrázek 21 – Změna koherence před/po sečení pro datovou sadu od Správy KRNP .....                                          | 60 |
| Obrázek 22 – Průběh koherence VH pro polygon 9160260 .....                                                                 | 60 |
| Obrázek 23 – změna koherence VV (rel. dráha 146) .....                                                                     | 61 |
| Obrázek 24 – Změna koherence VH a odpovídající změna NDVI .....                                                            | 62 |
| Obrázek 25 – Hodnota koherence VH před/po sečení (rel. dráha 146) .....                                                    | 62 |
| Obrázek 26 – Změna koherence před/po sečení (rel. dráha 146) .....                                                         | 63 |
| Obrázek 27 - Rozdíl koherence před/po sečení pro sezónu 2017 .....                                                         | 64 |

## Seznam tabulek

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 – Geomorfologické členění Krkonoš (Balatka et. al., 2006) .....                                                                                                                                       | 34 |
| Tabulka 2 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22).....                 | 45 |
| Tabulka 3 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) .....               | 45 |
| Tabulka 4 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) .....               | 51 |
| Tabulka 5 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22) .....                | 51 |
| Tabulka 6 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) .....  | 51 |
| Tabulka 7 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22) .....   | 52 |
| Tabulka 8 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) .....               | 53 |
| Tabulka 9 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22) .....                | 53 |
| Tabulka 10 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro dříve sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) .....                | 54 |
| Tabulka 11 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro dříve sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22) .....                 | 55 |
| Tabulka 12 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146) ..... | 56 |
| Tabulka 13 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22).....   | 56 |

## Seznam příloh

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Příloha 1 – Použité snímky – relativní dráha 22.....                                     | 76 |
| Příloha 2 - Použité snímky – relativní dráha 146 .....                                   | 76 |
| Příloha 3 - Použité snímky – relativní dráha 22 .....                                    | 77 |
| Příloha 4 - Použité snímky – relativní dráha 146 .....                                   | 78 |
| Příloha 5 - Použité snímky – relativní dráha 146 .....                                   | 79 |
| Příloha 6 – Skript pro výpočet zonální statistiky v R .....                              | 80 |
| Příloha 7 – Skript na spojení všech statistik do jednoho souboru v Pythonu .....         | 81 |
| Příloha 8 – Skript na spojení všech statistik po jednotlivých polygonech v Pythonu ..... | 82 |
| Příloha 9 – Mapované louky 2016 .....                                                    | 83 |
| Příloha 10 – Mapované louky 15. 6. 2017 .....                                            | 84 |
| Příloha 11 – Mapované louky 26. 6. 2017 .....                                            | 85 |
| Příloha 12 – Mapované louky – KRNAP .....                                                | 86 |
| Příloha 13 – Mapované louky 12.6.2018 .....                                              | 87 |

# 1. Úvod

Radar se syntetickou aperturou (SAR) se používá v civilních aplikacích pozorování Země již přes 30 let. Díky radarům jsou dostupná data, která mají poměrně vysoké prostorové a v posledních letech i časové rozlišení. Zároveň nejsou závislá na denní době, oblačnosti a také jsou téměř nezávislá na povětrnostních podmínkách (více v kapitole 2.4.2). Jako příklady četných aplikací lze uvést: monitorování změn zemského povrchu, generování výškových modelů, monitorování ropných skvrn, ledových ploch nebo zjišťování půdní vlhkosti.

Monitorování změn zemského povrchu je aktuální téma. Můžeme sem zařadit například změnu krajinného pokryvu, změnu povrchu vlivem přírodních jevů nebo ovlivnění krajiny člověkem. V této práci bude řešena změna povrchu luk po sečení, případně změna v důsledku pastvy a jak se tyto jevy projeví v datech zobrazujícího radaru neseného družicí.

Cílem práce je nalezení vhodných příznaků, vytvoření a ověření metodiky klasifikace vedoucí k průběžnému monitorování stavu luk. Zkoumanými parametry jsou koherence, entropie a polarimetrický úhel alfa. Tyto parametry jsou získány z dat Sentinel-1A/1B pomocí volně dostupného software SNAP. Práce vychází z literární rešerše zdrojů zabývajících se hodnocením současných metod pro korelaci sečení a změny výše uvedených parametrů. Součástí je vyhodnocení vhodnosti dat Sentinel-1 pro danou problematiku.

Jako modelové území byla zvolena oblast Krkonoš a přilehlého podhůří z důvodu zájmu Správy KRNAP o zhodnocení možnosti monitorování managementu luk prostředky DPZ. K dispozici jsou data z několika terénních výjezdů a dále datová sada poskytnutá Správou KRNAP. V neposlední řadě jsou k dispozici hodinová srážková data od ČHMÚ.

V metodické části je popsáno vlastní zpracování radarových dat. Dále jsou uvedeny výsledky výzkumu, které jsou v další kapitole zhodnoceny a diskutovány.

## **2. Problematika radarových dat**

### **2.1. Historie SAR**

První civilní platformou družicového radarového snímání byl SEASAT, který byl vypuštěn v roce 1978. Od té doby došlo k výraznému pokroku ve využívání této technologie. Původní SEASAT byl spíše experimentálním nástrojem, který měl sloužit hlavně k monitorování moří a oceánů. Dalšími průkopníky byly družice ERS-1 a ERS-2 (vypuštěny v roce 1991 resp. 1995) provozované Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Jejich původním cílem bylo získávání informace o teplotách a výškách vln oceánu. Postupně tyto platformy byly využity i pro monitorování zemského povrchu, ledovců a přírodních katastrof (ERS overview, 2011). Následníkem ERS byl ASAR na družici ENVISAT (vypuštěna v roce 2002), která nesla vylepšenou verzi původních ERS senzorů a přinášela využití 5 polarizačních konfigurací: HH, VV, HH/VV, HV/HH, VH/VV (více k polarizaci v kapitole 2.2.2). Dalším satelitem, který stojí za zmínku je TerraSAR-X od německého střediska pro letectví a kosmonautiku, který odstartoval v roce 2007. Jeho předností je prostorové rozlišení až 1 m. V roce 2010 byl stejnou společností vypuštěn TanDEM-X který je v konstelaci s TerraSAR-X vhodný pro interferometrické zpracování pořízených dat. Jejich primárním úkolem byla tvorba světového výškového modelu (TanDEM-X, 2016).

Pro tuto práci je nejzajímavější mise Sentinel-1 provozovaná ESA. Sentinel-1 se skládá ze dvou platforem a to 1A (start 2014) a 1B (start 2016). Hlavní výhodou celého systému Sentinel-1 je temporální rozlišení 6 dní (na rovníku), velikost snímané scény a volný přístup k datům a zpracovatelskému softwaru. Detailnější popis dat Sentinel-1 je v kapitole 2.6.

### **2.2. Základní charakteristika SAR**

Radar (radio dedection and ranging) je aktivní senzor, fungující na základě rádiových vln v rozmezí vlnových délek 1-30 cm (frekvence 40-1 GHz). Původně byl zkonstruován ke zjišťování polohy objektů. Dnes má mnohem širší použití. Zdrojem energie je vysílač připevněný na družici (případně letadle nebo zemském povrchu), který ozařuje část zemského povrchu.

Radarový přijímač zaznamenává odraženou energii. Není nutné, aby jeden satelit měl přijímač i vysílač, ačkoliv většina dnešních družic využívá jednu anténu pro vysílání i přijímání – tato metoda se označuje jako monostatická. Pokud jsou použity antény dvě, pak se jedná o metodu bistatickou.

Samotný radar nevysílá kontinuálně, ale v pulzech, tj. krátkých časových intervalech s opakovací frekvencí PRF (*pulse repetition frequency*) a následně přijímá jejich odezvu (echo). Díky kombinaci více ech je možné získat vysoké prostorové rozlišení.

Intenzita odraženého záření (*backscatter*) je závislá na vlastnostech povrchu, zejména dielektrické konstantě a drsnosti povrchu. Čím je povrch hladší, tím více se záření odráží směrem od radaru a pixel na radarovém zobrazení (v textu bude dále použito označení snímek<sup>1</sup>) má pak tmavší odstín (nejlepším příkladem je klidná vodní hladina). Naopak hrubší povrch odráží záření směrem k radaru a pixel se jeví světlý (příkladem jsou budovy) (Richards, 2009).

### **2.2.1. Geometrické vlastnosti radarových obrazových záznamů**

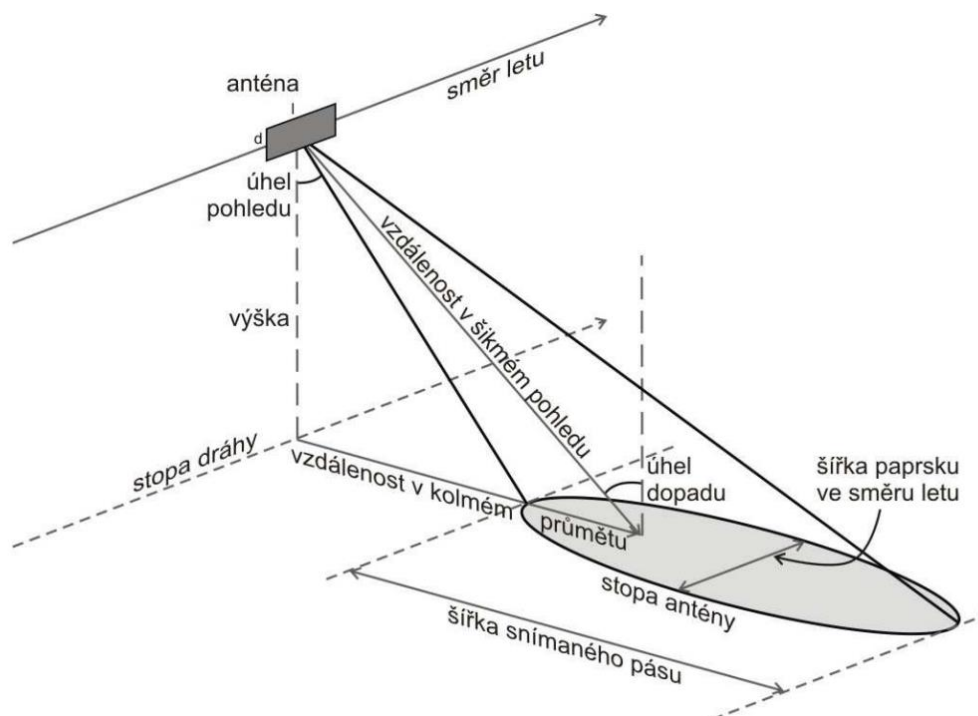
Primárním zdrojem dat v této práci je radar se syntetickou aperturou, který svým způsobem měření dociluje efektu velmi dlouhé antény. Díky syntetizaci dlouhé antény se docílí lepší rozlišovací schopnosti v porovnání se skutečnou anténou. Jak již bylo zmíněno, radar detekuje intenzitu odrazu a zároveň fázi odraženého záření. Jedná se o plně koherentní systém, každý puls začíná stejnou fází – proto se nazývá koherentním radarem (Richards, 2009).

Úhel, pod kterým radar ozařuje zemi, se nazývá úhel pohledu –  $\theta$ . Vzdálenost mezi družicí a povrchem ve směru pohledu se nazývá šikmá vzdálenost (*slant range*) a kolmý průmět šikmé vzdálenosti se nazývá horizontální vzdálenost (*ground range*). Vzdálenost mezi oblastí blízkého dosahu (*near range*) a oblastí vzdáleného dosahu (*far range*) se nazývá šířka

---

<sup>1</sup> Označení snímek není správné, ale pro porozumění je vhodnější

záběru (*swath*). Místo ozářené jedním vyslaným pulzem se nazývá stopa antény (*antenna footprint*) (Obrázek 1).



Obrázek 1 – Radarová geometrie (upraveno podle Swart, 2010)

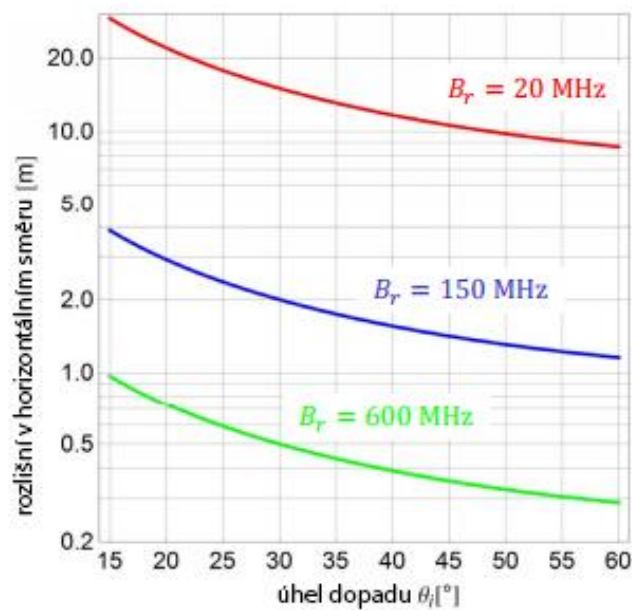
Data v podobě radarového snímku jsou znázorněna mřížkou komplexních hodnot o dvou složkách, a to amplitudovou a fázovou složkou. Amplitudová část je ukazatelem energie (resp. výkonu) odraženého signálu (udává se ve wattech), fázová složka je ukazatelem posunu fáze vlny. Vlna má sinusoidní charakter o délce  $2\pi$  a hodnota fázového posunu odpovídá posunu mezi počátkem vlny a jejím přijetím. Označuje se jako  $\phi$  a je závislá na časovém zpoždění  $\tau$ . Radarová data mají rozdílné rozlišení v horizontálním a azimutálním směru. Rozlišení v šikmém směru (*slant range*)  $\delta_r$  je dáno vztahem:

$$\delta_r = \frac{c\tau_r}{2} = \frac{c}{2B_r} \quad 2.1$$

kde  $\tau_r$  je délka vyslaného pulzu,  $c$  je rychlost elektromagnetického záření a  $B_r$  je šířka frekvenčního pásma. Rozlišení v horizontálním směru (*ground range*) lze na základě znalosti úhlu dopadu  $\theta$  (*incidence angle*) jednoduše spočítat jako:

$$\delta_g = \frac{\delta_r}{\sin \theta} \quad 2.2$$

Z uvedeného vyplývá, že rozlišení v šikmém směru není závislé na vzdálenosti radaru od povrchu, ale na šířce frekvenčního pásma (případně délce trvání pulzu). Rozlišení v horizontálním směru je závislé na velikosti úhlu dopadu, tj. mění se v závislosti na vzdálenosti od senzoru (Obrázek 2).



Obrázek 2 – Závislost rozlišení v horizontálním směru na dopadovém úhlu a šířce pásma (upraveno podle Reigber, 2015)

Rozlišení v azimutálním směru (ve směru letu) je závislé na rozbíhavosti paprsku  $\alpha_{ra}$ :

$$\alpha_{sa} = \frac{\lambda}{2L_{sa}} \quad 2.3$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $L_{sa}$  je délka syntetické apertury. Délka apertury se spočítá pomocí:

$$L_{sa} = \frac{\lambda r_0}{L} \quad 2.4$$

Kde  $r_o$  je šikmá vzdálenost (*slant range*) k objektu a  $L$  je skutečná délka antény. Rozlišení ve směru letu je:

$$\delta_{az} = \alpha_{sa} r_o = \frac{L}{2} \quad 2.5$$

Rozlišení ve směru letu je tedy závislé na délce antény, čím kratší anténa, tím lepší rozlišení. Limitující jsou vysoké nároky na energii potřebnou k vyslání pulzu tak, aby byl zaznamenán. Zároveň je požadována co nejkratší opakovací frekvence pulzu z důvodu dostatečného rozsahu dopplerovského spektra (Reigber, 2015).

Důsledkem geometrie snímání povrchu radarem je, že vysoké terénní objekty jsou na snímku nakloněné k senzoru. Na snímcích se pak objevují jevy zhuštění obrazu (*foreshortening*), překrytí (*layover*) a stín (*shadow*). Zhuštění obrazu vzniká, pokud paprsek dorazí k základně dříve než k vrcholu struktury (například hory). Jelikož radar měří šikmou vzdálenost, dojde ke kompresi svahu. Překryv vznikne, když paprsek dorazí k vrcholu dříve než k základně. Vrchol (či jiná struktura) se jeví v zaznamenaném obrazu jako překlopený. Stín vzniká v místech, kde je nulový odraz, tedy zastíněná místa vysokými terénními útvary.

Radar snímá povrch šikmo k povrchu, protože jinak by docházelo ve všech případech k překrytí.

Detekovaná amplituda slouží pro zobrazení odrazivosti povrchu (hlavně obrazové znázornění), kdežto fáze slouží k vypočtení vzdálenosti mezi radarem a bodem na povrchu, resp. výšky povrchu vůči referenční ploše v případě tzv. radarové interferometrie.

### **2.2.2. Dopplerův efekt**

Když se detektor pohybuje relativně k vysílači, dochází k posunu frekvence. Tento jev je známý jako Dopplerův efekt. Pokud se zdroj s frekvencí  $f_s$  pohybuje od pozorovatele (přijímače) s rychlostí  $v$ , pak je výsledná frekvence:

$$f_o = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{v}{c}\right)}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)}} f_s \quad 2.6$$

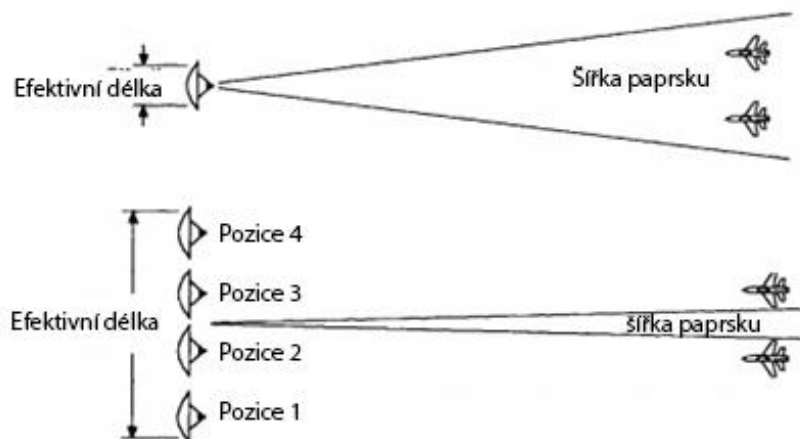
Když se zdroj pohybuje směrem k pozorovateli, pak je výsledná frekvence:

$$f_o = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)}{1 + \left(\frac{v}{c}\right)}} f_s$$

Z toho vyplývá, že pokud se zdroj pohybuje směrem k pozorovateli, pak přijímá vyšší frekvenci, než byla vyslána. Pokud se zdroj pohybuje od zdroje, je frekvence nižší. Jakmile jsou na zemi dva cíle ve směru letu, mají pro anténu mírně odlišný úhel ve směru letu. Díky tomu mají mírně odlišnou rychlost v momentně interakce s dopadajícím zářením. Z každého cíle pak bude pořízen záznam s jinak posunutou frekvencí. Na základě tohoto Dopplerova posunu lze rozlišit objekty nacházející se ve stejné vzdálenosti v oblasti ozářené vyslaným paprskem.

Jelikož je objekt ozařovaný kontinuálně (pokud je v záběru), dochází k záznamu různých frekvencí. Pokud je objekt před anténou, je posun kladný (nosič se k objektu přibližuje), je-li přímo pod anténou, je posun nulový, a nachází-li se za, pak je posun záporný. Díky následnému zpracování této informace lze docílit velice úzkého efektivního paprsku (Lillesand et al., 2015). To nám umožňuje zlepšit detekci objektů na povrchu. Čím je paprsek užší, tím lépe rozpoznáme blízké objekty (Obrázek 3).

Je nutné si uvědomit, že na tento proces působí vnější vlivy, jako rotace Země, inklinace dráhy a topografie. Díky tomu osa vyslaného svazku není přesně kolmá na vektor rychlosti letu družice, ale je posunutá o tzv. úhlovou odchylku vyzařování (*squint angle*). Osa svazku směřuje do bodu Dopplerova centroidu, který je nutné znát pro další zpracování informace. Možné zpracování, které probíhá u družice Sentinel 1, je popsáno na stránkách ESA (ESA, 2018b).



Obrázek 3 – Efektivní šířka paprsku (upraveno podle Reigber, 2015)

### 2.2.3. Polarizace

Elektromagnetické záření je složeno ze dvou částí, vektorů elektrického a magnetického pole, které jsou kolmé samy na sebe a na směr šíření záření. Tyto dvě složky se mohou otáčet kolem vektoru šíření záření. Tento jev popisuje polarizace. Radarové systémy jsou schopny vysílat a přijímat signál v určité polarizaci. Polarizace může být buď horizontální nebo vertikální. Radarové systémy se rozlišují dle vysílané/přijímané polarizace: VV (vertikálně polarizovaný signál vysílaný i přijímaný), HH (horizontálně vysílaný i přijímaný), HV (horizontálně vysílaný, vertikálně přijímaný), VH (vertikálně vysílaný, horizontálně přijímaný). Radarový systém může operovat v jednom nebo i více módech najednou.

Různě polarizované vlny se při odrazu chovají odlišně, díky této vlastnosti lze získat více informací o snímaném objektu. Snímky jednotlivých polarizací lze skládat do RGB kompozic.

### 2.2.3.1. Polarimetrická dekompozice

Cílem dekompozice polarimetrických dat je analýza matice rozptylu  $[S]$ , kterou pořizuje radarový systém. Matice vzniká kombinací odrazu signálu jednotlivých jednoduchých objektů:

$$[S] = \sum_{i=1}^k c_i [S]_i \quad 2.8$$

Kde  $[S]_i$  je odražený signál jednotlivých objektů a  $c_i$  indikuje váhu těchto objektů. Matice rozptylu charakterizuje odražený signál objektu, a tedy charakterizuje i objekt samotný. To je ale možné pouze v případě, kdy dopadající a odražená vlna jsou kompletně polarizované. Tato matice ale charakterizuje pouze koherentní odražeče, těmi jsou odražeče bodové či „ryzí“ (*pure target*). Pokud chceme popsat objekty nekoherentní, je nutné použít kovarianční/koherenční matici (Lopéz-Martinez et al., 2005).

$\langle [C] \rangle$  – kovarianční matice

$\langle [T] \rangle$  – koherenční matice

Složitost odrazových mechanismů je extrémně náročná na přímé zkoumání matic, proto se snažíme tyto matice rozložit na druhotné deskriptory odrazových mechanismů jednoduchých objektů. Tyto dekompoziční teorémy lze napsat jako:

$$\langle [C_x] \rangle = \sum_{i=1}^k p_i [C_x]_i \quad 2.9$$

$$\langle [T_x] \rangle = \sum_{i=1}^k q_i [T_x]_i \quad 2.10$$

Kde základní mechanismy jsou reprezentovány jako  $[C_x]_i$  respektive  $[T_x]_i$  (x poukazuje na druh matice, můžeme mít 2x2, 3x3, 4x4 matice),  $p_i$  a  $q_i$  jsou koeficienty komponent v maticích. Tyto komponenty poukazují na určité vlastnosti objektu.

V dostupné literatuře (Haldar et al., 2014, Galant et al., 2014, Turkar, 2011) se pro detekci vegetace a jejich vlastností používá polarimetrie, konkrétně z ní odvozená rozptylová entropie (H), polarimetrický úhel alfa ( $\alpha$ ) a anisotropie

(A). Pro tuto dekompozici je nutné koherenční matici  $\langle [T_3] \rangle$  (v tomto příkladu matici 3x3) rozložit na vlastní vektory a vlastní čísla:

$$\langle [T_3] \rangle = [U_3][\Sigma_3][U_3]^{-1} \quad 2.11$$

Diagonální 3x3 matice  $[\Sigma_3]$  obsahuje vlastní čísla  $\langle [T_3] \rangle$ :

$$[\Sigma_3] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad 2.12$$

Kde  $\infty > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$

3x3 unitární matice  $[U_3]$  obsahuje vlastní vektory  $u_i$  pro  $i=1,2,3$  matice  $\langle [T_3] \rangle$ :

$$[U_3] = [\underline{u}_1 \quad \underline{u}_2 \quad \underline{u}_3] \quad 2.13$$

Vlastní vektory  $u_i$  pro  $i=1,2,3$  matice  $\langle [T_3] \rangle$  pak mohou být popsány jako:

$$\underline{u}_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\delta_i} \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\gamma_i}] \quad 2.14$$

Kde  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  vycházejí z dekompozice matice rozptylu (více Lopéz-Martínez et al., 2005). Vlastní dekompozice  $\langle [T_3] \rangle$  může být zapsána jako:

$$\langle [T_3] \rangle = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \underline{u}_j \underline{u}_j^{*T} \quad 2.15$$

Kde  $*T$  znamená komplexně sdružené číslo. Z výše uvedené rovnice vyplývá, že místo 3x3 matice můžeme použít kombinaci 3 jednoprvkových koherenčních matic:

$$[T_3]_i = \underline{u}_i \underline{u}_i^{*T} \quad 2.16$$

Pro zjednodušení získávání informace z výše uvedených rovnic se zavádějí 3 sekundární parametry zavedené jako funkce vlastních čísel a vlastních vektorů: entropie, anizotropie a polarimetrický úhel alfa.

### Entropie:

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad 2.17$$

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad 2.18$$

Kde  $p_i$  se též nazývá pravděpodobnost vlastního čísla  $\lambda_i$

Entropie je z definice mírou neurčitosti systému, kde ostrá rozdělení pravděpodobnosti mají entropii nízkou, neostrá rozdělení pak mají entropii vysokou. Pokud máme normální pravděpodobnostní rozdělení, pak bude entropie nejvyšší (Daintith, 2005). V rámci SAR entropie reprezentuje náhodnost rozptylu, kdy hodnota entropie rovná 0 poukazuje na jeden dominantní rozptylový mechanismus (izotropní rozptyl) a naopak hodnota entropie blízká 1 ukazuje na směr rozptylových mechanismů se stejným rozložením (Scheuchl et al., 2001).

### **Anizotropie:**

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 2.19$$

Anizotropie je vlastnost, která označuje závislost veličiny na volbě směru. Vlastnosti jsou v různých směrech různé. Může se jednat i o popis změny veličiny na základě vlastnosti materiálu (Daintith, 2005). U SAR anizotropie reprezentuje relativní sílu druhotných rozptylových mechanismů. Pokud je hodnota blízká 0, jedná se o symetrické rozdělení mechanismů (Scheuchl et al., 2001).

### **Polarimetrický úhel alfa:**

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad 2.20$$

Polarimetrický úhel alfa reprezentuje průměrný dominantní rozptylový mechanismus. Spodní hodnota (0°) je dána zrcadlovým odrazem. Horní limit (90°) pak nastane u rohového odražeče.

## **2.3. Zobrazení SAR**

Obrazy se zapisují řádek po řádku a vytvářejí tak binární soubor (*SAR raw data*). Proces tvoření obrazu se nazývá *SAR processing* nebo *focusing*. Každý pixel zobrazení SAR (*SAR image*) obsahuje informace o amplitudě (intenzitě) a fázi odraženého záření. Intenzita je vázána hlavně k odrazovým vlastnostem povrchu, kdežto fáze ke vzdálenosti.

Amplitudová složka je ovlivněna fyzikálními vlastnostmi objektu (povrchu), vlhkostí apod. Například exponovaná skála nebo zastavěné oblasti

vykazují výraznou amplitudu díky principu koutového odražeče. Zatímco rovné, hladké povrchy (vodní hladina) odráží vlny jako zrcadlo a mají tím pádem nízkou amplitudu. Z toho plyne, že amplituda záleží více na drsnosti povrchu než na jeho chemických vlastnostech (Dobrovolný, 1998).

Fázová složka poskytuje informaci o fázi, jak již bylo zmíněno výše.

Snímek se skládá ze sloupců a řádků, které vytvářejí jednotlivé rozlišovací buňky. V rozměrech pixelu ve směru letu a v kolmém směru je velký rozdíl, obraz pak bývá upraven pomocí procesu *multilooking*. Tj. určitý počet pixelů se stejným azimutem se zprůměruje do jednoho pixelu o větší velikosti. Po této úpravě jsou rozměry v obou směrech přibližně stejné. *Multilooking* má za následek i částečnou filtraci speckle. Pokud je na snímky aplikována terénní korekce, není nutné provádět *multilooking*.

## 2.4. Základy interferometrie

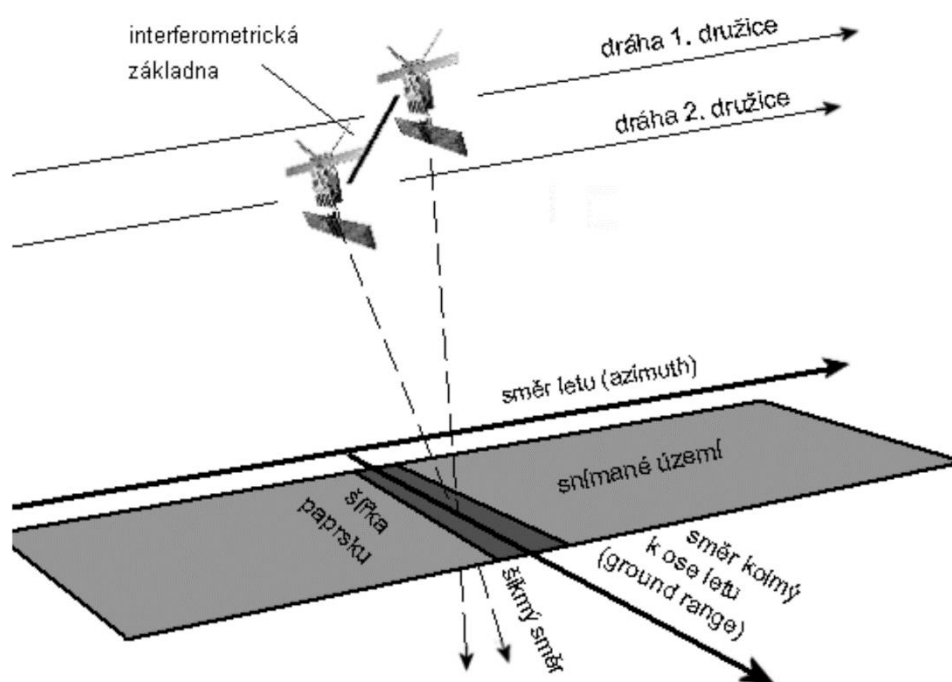
Radarová interferometrie (InSAR) je metoda, ve které se využívá rozdílů ve fázi dvou radarových komplexních signálů získaných z odlišné pozice radaru. Výsledkem může být například digitální výškový model nebo v případě diferenciální radarové interferometrie (DInSAR) mapa deformací povrchu (Bamler et al., 1998). Mapa deformací může být využita pro detekci zemětřesení, sesuvů a dalších změn. Koherenci (viz kapitola 2.4.2) interferometrické dvojice lze využít pro detekci změn.

Družice mohou být v různých konfiguracích

- snímání jedním radarem na stejné družici ze stejné dráhy v různém čase (Sentinel 1 – 6 dní)
- snímání dvěma radary pomocí dvou družic ze stejné dráhy (TanDEM-X)
- snímání jedním radarem se dvěma přijímacími anténami umístěnými ve známé vzdálenosti od sebe (mise SRTM)

### 2.4.1. Princip radarové interferometrie

Pro radarovou interferometrii je nutné mít alespoň dvě scény stejného území. Snímky se označují jako hlavní snímek (*master*) a vedlejší (*slave*). Všechny informace jsou pak vztaženy k hlavnímu snímku (vedlejších snímků může být větší počet). Radary se v okamžiku snímání stejného území nacházejí na různém místě, vzdálenost mezi místy pořízení se nazývá interferometrická základna  $B$  (*interferometric baseline*). Vzdálenost je vztažena k rovině kolmé k oběžné dráze referenční družice. Základnu lze rozdělit na dvě složky, kolmou základnu  $B_n$  (*perpendicular baseline*) a tečnou základnu  $B_t$  (*parallel baseline*) (Obrázek 4). Dále se definuje časová základna  $B_{temp}$  (*temporal baseline*) – jedná se o časový rozdíl mezi dvěma expozicemi. Pokud je časová základna delší, na zobrazeném povrchu mohlo dojít ke změnám, výsledkem je nízká korelace mezi snímky.



Obrázek 4 – Geometrie radarové interferometrie (Urban, 2005)

### 2.4.2. Koherence radarových dat

Koherence je ukazatelem korelace mezi dvěma měřeními ve stejné buňce. Může se jednat o měření v různém čase, o různé základně nebo odlišné polarizaci. Koherence je nízká pro objekty, které se mění v čase (pole, lesy, vodní plochy) a vysoká pro objekty, které se nemění (zastavěné oblasti, skalní útvary) (Richards, 2009).

Pro výpočet koherence je nutné mít dva komplexní snímky  $s_1$ ,  $s_2$  (například Sentinel-1 SLC produkt), koherence je pak definována jako:

$$\gamma = \frac{|\langle s_1 s_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad 2.21$$

Kde  $|\dots|$  je absolutní hodnota,  $\langle \dots \rangle$  je průměr a  $*$  udává komplexně sdružené číslo. Z tohoto vzorce vyplývá, že pokud jsou si hodnoty pixelů podobné, je koherence vysoká (blízká 1) a opačně. Pro výpočet koherence je nutné, aby data byla co nejpřesněji koregistrována – udává se hodnota 1/10 pixelu (2.4.3). Koregistrace je velice důležitá, pixely si na všech snímcích musejí odpovídat, jinak nemá smysl koherenci počítat. Koherence je ovlivněna mimo koregistraci i dalšími zdroji, o těchto chybách pojednává například Hansenn (2002), Tamm et al. (2016), Zalite et al. (2016) a mezi nejdůležitější patří:

- Srážky a oblačnost
- Tlak a teplota
- Vítr v době pořízení snímku
- Rosa v případě pořízení snímku v ranních hodinách

Hobbs et. al. (1998) píše, že nejvýznamnějším z výše uvedených faktorů je vítr, dle Tamm et. al. (2016) jsou ale nejvýznamnějším faktorem srážky. Z hlediska této práce je nejpodstatnější vazba mezi koherencí a růstem vegetace, kde například v předchozích studiích byl použit nejkratší interval snímkování 11 dní (Voormansik et al., 2016), případně 12 (Tamm et al., 2016), který dle nich je nedostačující a navrhuje použití právě 6denní řady Sentinel-1, které by vliv růstu trávy mělo částečně eliminovat (stejný názor mají i Zalite et al., 2016)

### 2.4.3. Koregistrace

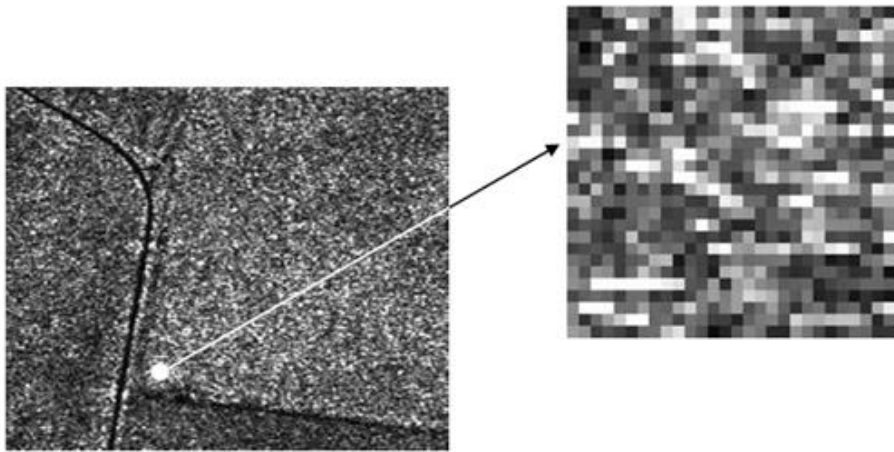
Koregistrace je kritickou operací ve zpracování SAR dat pro radarovou interferometrii (a další aplikace). Jedná se o proces, kdy jsou dva snímky vůči sobě natransformovány se subpixelovou přesností a překryty přes sebe. Pokud si pixely na jednotlivých snímcích neodpovídají, nelze přesně odečíst fázi, spočítat koherenci atd. Nejběžnější metodou je použití vzájemné korelační funkce (*cross-correlation function*) (Li et al., 1990). Prvním krokem pro koregistraci je hledání shodných pixelů s jedno až dvou pixelovou přesností (hrubá koregistrace) a posun vedlejšího snímku tak, aby odpovídal hlavnímu. Dále dochází k hledání bodů se subpixelovou přesností. Obvykle se používá přesnost na 1/10 pixelu (Hannsen et al., 1999, Kwoh et al., 1994, Rufino et al., 1996, Ruffino et al., 1998). Pro transformaci vedlejšího snímku do hlavního se používá transformační rovnice se 4, 6 nebo 12 parametry (Selva et al., 2007). Posledním krokem je převzorkování vedlejšího snímku. Používají se běžné funkce pro převzorkování – bilineární interpolace, kubická konvoluce, případně další. Hodnocením převzorkovacích funkcí se zabývala například Slačiková (2010).



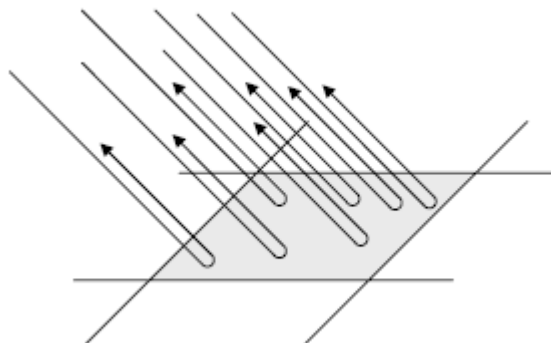
Obrázek 5 – Postup koregistrace (upraveno dle Selva et al., 2007)

## 2.5. Speckle

Fenoménem dat pořízených radarem se syntetickou aparaturou je speckle. Jedná se o typickou strukturu připomínající šum (o šum se ale nejedná) a snižující vizuální kvalitu snímku (Obrázek 6). Speckle je přímým důsledkem koherence celého systému. Pokud by celý pixel zabírala jedna neměnná plocha (budova, rohový odražeč), pak by odražený signál byl ovlivněn právě touto plochou a odraz z okolí by byl potlačen. Jelikož ale v rámci jednoho pixelu je několik různých odražečů (Obrázek 7), pak je výsledný signál jejich kombinací a vizuálně nám připomíná speckle šum (Richards, 2009)



Obrázek 6 – Radarový snímek ukazující speckle (Richards, 2009 - p140)



Obrázek 7 – Vznik speckle díky kombinaci několika odražečů v jedné buňce (Richards, 2009)

### **2.5.1. Filtrace Speckle**

Možností, jak zredukovat speckle, je mnoho. Jedním z možných řešení je zprůměrování časové řady, což ale znemožní identifikaci změny mezi soubory. V současné literatuře je nepřehledné množství algoritmů pro filtrování speckle. Pro tuto práci je potřeba filtr, který co nejvíce zachová původní vlastnosti objektů. Vhodné se jeví použití filtru „simulovaného žíhání“, který dobře zachovává hrany a vyhlazuje větší plochy a zároveň nedochází ke zhoršení rozlišení (Reigber, 2015). Například Schou (2001) prokazuje, že pro polarimetrická data je tento filtr jedním z nejlepších. Při použití filtru simulovaného žíhání je důležitá volba počtu iterací. Standardně se používá 50-80 iterací (Capstick et al., 2001, Lankoand et al., 2005), tento nižší počet iterací by měl zaručit zachování hodnot odrazivosti. Lee et al. (2009) pak píše o použití Leeho filtru s velikostí okna 7x7 následovaného Frostovým filtrem s velikostí okna 5x5 jako nejlepší volbu pro polarimetrická VV+VH data (Sentinel 1 používá právě VV + VH polarizaci). Tyto filtry použil i Stavroula (2016) který dospěl k uspokojivým výsledkům. Je tedy možné použít i tuto kombinaci filtrů, která je plně podporována v software SNAP, který bude použit ke zpracování dat.

Pro částečnou redukci speckle je možné použít i multilooking, jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.

## **2.6. Sentinel-1**

Sentinel-1 mise je konstelace 2 satelitů s polární oběžnou drahou (693 resp. 786 km). Sentinel-1B je vzhledem k 1A posunut o 180°. Původně byl pouze jeden satelit, Sentinel-1A, který má temporální rozlišení 12 dní. Díky vypuštění Sentinelu-1B došlo ke zkrácení temporálního rozlišení na polovinu (6 dní na rovníku). Samotný radar pak operuje na frekvenci 5,405 GHz, což odpovídá vlnové délce 5,5 cm – jedná se o SAR operující v pásmu C (*C band*) (ESA, 2017).

Profil mise:

- start družice Sentinel 1A: 3. dubna 2014
- start družice Sentinel 1B: 25. dubna 2016

- nosná raketa: Soyuz, kosmodrom Kourou (Francouzská Guayana)
- minimální životnost: 7 let, plánovaná 12 let
- dráha: slunečně synchronní, výška 693 km, inklinace 98,18°
- polarizace: horizontální (H) nebo vertikální (V)

Satelit má 4 módy, ve kterých může pořizovat data.

- Stripmap – 80 km záběr (5 m x 5 m rozlišení)
  - Pouze při zvláštním požadavku pro monitorování krizových situací
- Interferometric Wide Swath – 240 km záběr (5 m x 20 m rozlišení)
  - Výchozí režim pro snímání nad pevninou
- Extra Wide Swath – 400 km záběr (20 m x 40 m rozlišení)
  - Částečně používaný nad mořem a v polárních oblastech
- Wave mode – 20 km x 20 km záběr (20 m x 5 m rozlišení)

Sentinel-1 umožňuje duální polarizaci (VV+VH, HH+HV).

Data jsou distribuována na různých úrovních zpracování:

- Level-0: komprimovaná, surová data
- Level-1: nejčastější formát ve dvou variantách
  - SLC – Single Look Complex: data georeferencovaná s informací o výšce a poloze na oběžné dráze, zachovává informaci o fázi
  - GRD – Ground Range Detection: data zpracovaná pomocí multilookingu a georeferencovaná pomocí zemského elipsoidu, nemá informace o fázi
- Level-2 OCN: obsahuje přídatné informace o vlastnostech oceánu v době snímání (rychlost, směr větru)

## **2.7. Management luk a SAR**

Pro monitorování managementu luk z dat SAR jsou v současné literatuře uváděny tři parametry.

### ***Koherence a louky***

Jelikož koherence je vlastně korelace, tak by mělo při posečení dojít k poklesu koherence mezi dvěma soubory, kdežto v případě růstu vegetace by koherence měla být vyšší (Zalite et al., 2016). Zároveň by se koherence neměla výrazně lišit mezi neposečenými snímky v pásmu C (Tamm et al., 2016). Pokud je chceme zjistit, zda došlo k posečení, tak je nutné použít 3 soubory dat a počítat koherenci mezi prvním a druhým souborem a následně mezi druhým a třetím souborem a sledovat, jak se koherence mění. Pokud dojde k posečení mezi prvním a druhým souborem, pak na první dvojici bude koherence nižší než u druhé dvojice.

### ***Entropie a polarimetrický úhel alfa***

Z některých článků vyplývá (Voormansik et al., 2016), že při úpravě louky (například sečení) by mělo dojít ke zvýšení entropie. V jejich případě se jednalo pokaždé o navýšení až o 21 % (v průměru o 10 %). Pro polarimetrický úhel došlo k nárůstu v průměru o 6,5°. Stavroula (2016) také píše o nárůstu entropie a úhlu po sečení louky. Díky nárůstu entropie by bylo možné klasifikovat jednotlivé soubory na základě entropie a pak porovnat rozdíl mezi jednotlivými soubory, kde rozdíl by znamenal změnu v klasifikaci, a tedy rozdíl by znázorňoval sečení. Jelikož data ze Sentinelu jsou k dispozici každých 6 dní, tak by rozdíl mezi jednotlivými klasifikacemi neměl být velký (pro oblasti, kde nedošlo k žádné výrazné změně). Pro samotnou klasifikaci založenou na polarimetrii existuje mnoho algoritmů. López-Martinez (2005) píše, že nejlepší je Wishartova H- $\alpha$  segmentace

### ***Temporální rozlišení***

Pro tuto práci je časová základna důležitá, jelikož hlavním cílem je sledování změny mezi dvěma snímky, a to z pohledu detekce sečení, případně pastvy. Například Voormansik et al. (2016) poukazují i na temporální rozlišení, kde RADARSAT má rozlišení 24 dní a na těchto datech nebylo možné sledovat sečení. Kdežto u družice TerraSAR-X, která má rozlišení 11

dní, již bylo možné sledovat změnu entropie, úhlu i koherence. Tedy u družice Sentinel 1 s rozlišením 6 dní problém nebude. Je samozřejmě otázkou, jestli v rámci C-band, který používá S1, dojde k výrazným změnám, hlavně díky tomu, že C-Band nemusí projít až úplně k zemi a při posečení pak nedojde k nárůstu koherence. To ale nepotvrzuje studie od Tamm et al. (2016), podle nichž by frekvence pásma C Sentinelu-1 měla být dostačující.

## 3. Zájmové území a použitá data

### 3.1. Zájmové území

Modelové území bylo vybráno z důvodu zájmu Krkonošského národního parku (KRNAP) o tuto problematiku. Celkem bylo provedeno 6 výjezdů do terénu (7.7.2016, 20. 7. 2016, 15. 6. 2017, 26. 6. 2017, 2. 6. 2018, 12. 6. 2018, přehledové mapy – Příloha 9, Příloha 10, Příloha 11, Příloha 13), během kterých bylo zmapováno celkem 183 luk. Při mapování byly zjištěny tyto údaje:

- Nadmořská výška
- Stav porostu
- Výška porostu
- Poznámka – doplňující údaje (sečeno, nesečeno, čerstvě sečeno, pastva a další...)

Data poskytnutá správou Krkonošského národního parku obsahovala celkem 8644 polygonů reprezentujících louky (Příloha 12). Na každém z polygonů bylo provedeno 2x měření a zaznamenány údaje reprezentující:

- Stav porostu
- Výšku porostu
- Poznámka – doplňující údaje

### ***Fyzicko-geografická charakteristika území***

Oblast Krkonošského národního parku je situována v oblasti Krkonošského hřebene, který je dlouhý přibližně 35 km. Vrcholové partie jsou ploché a na severovýchodě spadají prudce do Polska. Krkonoše se dělí na Krkonošské hřbety, Krkonošské rozsochy a Vrchlabskou vrchovinu (Tabulka 1).

Tabulka 1 – Geomorfologické členění Krkonoš (Balatka et. al., 2006)

| Geomorfologické členění Krkonoš                                        |                       |                                             |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| ČESKÁ VYSOČINA • Krkonošsko-jesenická subprovincie • Krkonošská oblast |                       |                                             |
| Podcelek                                                               | Okrsek                | Podokrsek (vrchol)                          |
| KRKONOŠSKÉ<br>HŘBETY                                                   | Slezský hřbet         | Západní Slezský hřbet (Vysoké Kolo, 1509 m) |
|                                                                        |                       | Východní Slezský hřbet (Sněžka, 1603 m)     |
|                                                                        | Český hřbet           | Západní Český hřbet (Kotel, 1435 m)         |
|                                                                        |                       | Východní Český hřbet (Luční hora, 1555 m)   |
| KRKONOŠSKÉ<br>ROZSOCHY                                                 | Vilémovská hornatina  | Kapradnická hornatina (Bílá skála, 964 m)   |
|                                                                        |                       | Rokytnická hornatina (Čertova hora, 1021 m) |
|                                                                        | Vlčí hřbet            | nečlení se (Vlčí hřeben, 1140 m)            |
|                                                                        | Žalský hřbet          | nečlení se (Mechovinec, 1081 m)             |
|                                                                        | Černohorská hornatina | Stráženská rozsocha (Zadní planina, 1423 m) |
|                                                                        |                       | Černohorská rozsocha (Liščí hora, 1363 m)   |
|                                                                        | Růžohorská hornatina  | Růžohorská rozsocha (Růžová hora, 1396 m)   |
|                                                                        |                       | Maloúpská rozsocha (Lysečina, 1188 m)       |
| VRCHLABSKÁ<br>VRCHOVINA                                                | Rýchory               | nečlení se (Dvorský les, 1036 m)            |
|                                                                        | Janský hřbet          | nečlení se (Zlatá vyhlídka, 807 m)          |
|                                                                        | Lánovská vrchovina    | nečlení se (Sovinec, 765 m)                 |

Krkonoše tvoří komplex tzv. krkonošsko-jizerského krystalinika, který je budován převážně krystalickými břidlicemi o stáří 600 milionů až jedné miliardy let. Dále se na stavbě Krkonoš podílejí křemence, krystalické vápence a částečně i čedič. V karbonu proniklo pod starší horniny žulové tělesno (krkonošsko-jizerský pluton). S jeho existencí je spojen vznik tvrdého kontaktního pásma. Na kontaktu s karbonátovými horninami se vytvořila některé krkonošská ložiska nerostných surovin (KRNAP, 2010).

Krkonoše tvoří přirozené rozvodí mezi severním a Baltským mořem. Pramení zde řeky Labe, Úpa, Jizerka, Mumlava, Kamienica a další.

Podnebí Krkonoš je rozmanité, na vrcholcích se dle Köppenovi klasifikace nachází tundra, dále pak Krkonoše spadají do boreálního pásma a lesů mírného pásma. Průměrná teplota je v rozmezí 7 °C (Trutnov) do 0,2 °C (Sněžka). Množství srážek je závislé na nadmořské výšce a orientaci svahu, na úpatí spadne ročně 800 mm, na hřebenech až 1400 mm srážek (KR NAP, 2010).

Díky poměrně rozmanitému podnebí se v Krkonoších nachází několik vegetačních stupňů. Konkrétně:

- Submontánní (podhorský) stupeň
- Montánní (horský) stupeň
- Alpínský (horní) stupeň
- Spodní alpínský (subalpínský) stupeň
- Svrchní alpínský stupeň

V Krkonoších je převážná většina půd kyselá, v nejnižších polohách převládají hnědé lesní půdy, výše mají převahu humusové a rašelinné podzoly. Na výchozech vápenců jsou vyvinuté rendziny a na nejvyšších vrcholech převládají mrazem tříděné kamenité a alpské půdy. Na lesních rašeliništích a subarktických rašeliništích obou náhorních plošin se vyskytují rašelinné půdy, jejichž mocnost nepřesahuje 2–3 metry. (KR NAP, 2010).

## **3.2. Použitá data**

### **3.2.1. Data Sentinel 1**

Pro tuto práci byla použita data Sentinel 1 ve formátu SLC (*Single look complex*), která zachovávají informaci o fázi (nutné pro výpočet koherence), na úrovni zpracování 1 (Level-1) v duální polarizaci.

Snímky byly vybrány tak, aby pokrývaly celé zájmové území v rámci jedné scény. Následně byly rozděleny do skupin dle stejné relativní dráhy.

Výsledkem výběru bylo celkem 78 snímků ze 2 relativních drah (seznam snímků v příloze Příloha 1, Příloha 2 Příloha 3 Příloha 4 Příloha 5):

- 12 snímků pro relativní dráhu 22 za rok 2016 (sestupná dráha)
- 11 snímků pro relativní dráhu 146 za rok 2017 (vzestupná dráha)
- 25 snímků pro relativní dráhu 22 za rok 2017 (sestupná dráha)
- 25 snímků pro relativní dráhu 146 za rok 2017 (vzestupná dráha)
- 6 snímků pro relativní dráhu 146 za rok 2018 (vzestupná dráha)

Příklad souboru:

20.05.2017 | 16:51 | S1A\_IW\_SLC\_\_1SDV\_20170520T165125\_20170520T165152\_016668\_01BAA5\_893B

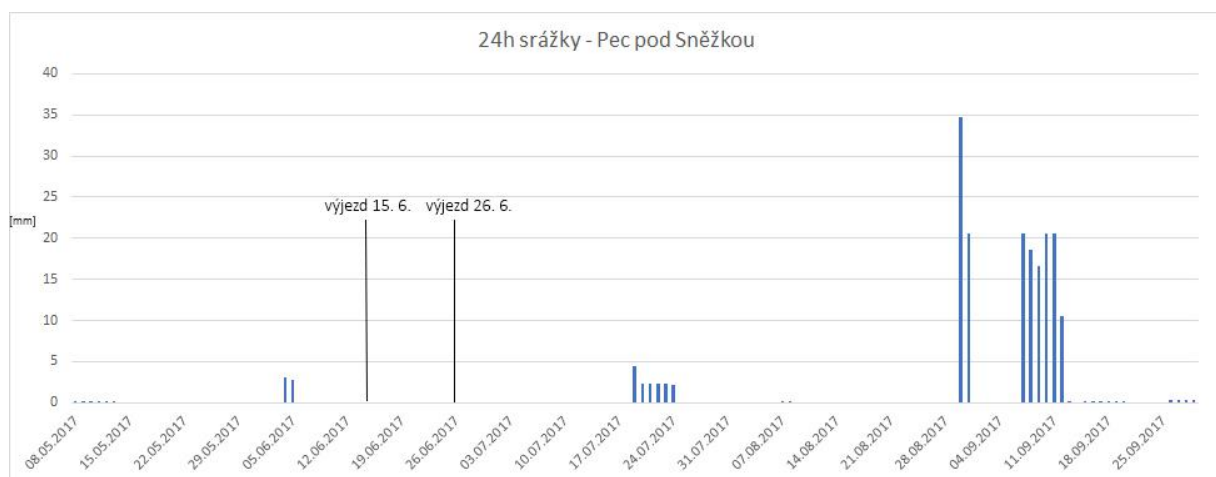
Z názvu vyplývá, že se jedná o data družice Sentinel 1-A, v módu IW, předzpracované jako produkt SLC o úrovni 1. Další znaky poukazují na produktovou třídu S-standard a DV označuje duální polarizaci VV+VH. V názvu se dále vyskytují údaje o datu pořízení a čase začátku/konce snímání.

### 3.2.2. Srážková data ČHMÚ

K dispozici byly hodinové srážky a suma za posledních 24 h pro většinu stanic na území Česka. Pro tuto práci byly vybrány stanice Pec pod Sněžkou a Vrchlabí, které jsou nejbližší zájmovému území.



Obrázek 8 - Suma srážek za 24h pro stanici Pec pod Sněžkou pro sezónu 2016



Obrázek 9 – Suma srážek za 24h pro stanici Pec pod Sněžkou pro sezónu 2017

Data od ČHMÚ za sezónu 2016 (Obrázek 8) a 2017 (Obrázek 9) poukazují na to, že data při snímání v době výjezdů 7. 7. 2016, 20. 7. 2016, 15. 6. 2017, 26. 6. 2017 nebyla ovlivněna srážkami. Suma srážek za 24 h byla 0 mm.

Srážky 31.8 a 1.9 nezasáhly do radarových dat, srážky v termínu 10.-15. 9. 2017 mohly ovlivnit data. Vzhledem k faktu, že srážky na zájmovém území v termínu 10.-15.9. spadly v nočních hodinách (23:00-5:00 CET), nebylo nutné snímky z tohoto důvodu odfiltrovat. Pro dráhu 22 probíhalo snímkování v 6:09 CET, pro dráhu 146 pak v 17:55 CET. Dráha 22 mohla být v ranních hodinách ovlivněna zvýšenou vlhkostí po dešti. Výkyvy koherence ale nebyly v těchto termínech zaznamenány.

Například Doviak et. al. (1993) píší, že k významnému útlumu radarového signálu dochází až při srážkách větších než 20 mm/h. V našem případně srážky nepřesáhly 5 mm/h.

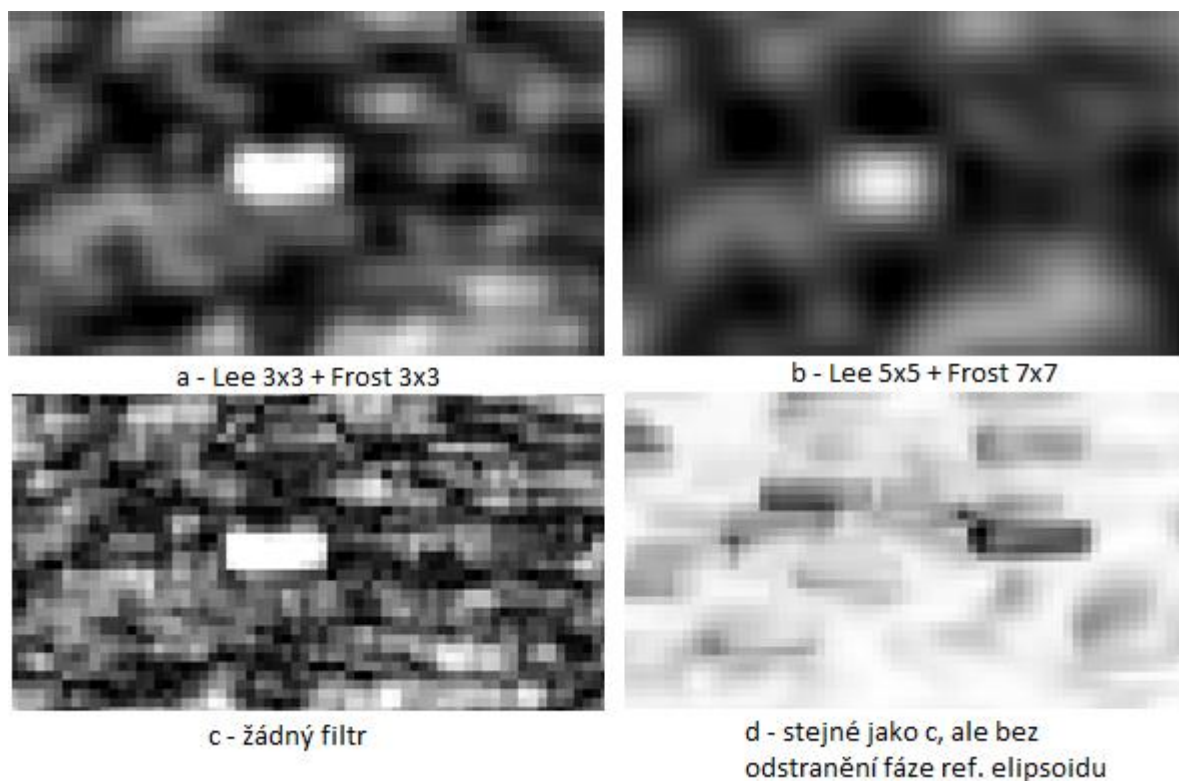
## 4. Metodika

### 4.1. Výběr metodiky

Na základě rešerše a znalostí problematiky radarových dat jsem se rozhodl využít několik parametrů pro detekci změn na loukách. Hlavním problémem práce je zjištění, zda-li došlo k posečení louky, tedy vlastně jde o hledání změny mezi jednotlivými snímky. Proto se nabízí využití koherence elektromagnetického záření (detailněji v kapitole 2.4.2). Zalite et. al. (2016) píší, že je vhodnější použití koherence než přímo odrazivosti. V jejich případě neměla odrazivost téměř žádnou korelaci s výškou vegetace. Je známo, že odrazivost ovlivňuje aktuální půdní vlhkost (pomocí SAR je možné její změny monitorovat (Outrata, 2016)). Pokud by měla být použita odrazivost, je nutné znát aktuální půdní vlhkost, která významně ovlivňuje rozptyl (Wagner et al., 2008). Pro náš případ je toto řešení nevhodné, jelikož nejsou k dispozici měření půdní vlhkosti.

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.5, radarová data ovlivňuje speckle, který je nutné odfiltrovat. Pro tuto práci byl vybrán Leeho filtr následovaný Frostovým filtrem. Bylo vyzkoušeno více oken, ve kterých filtry pracují. Stavroula (2016) a Lee et al. (2009) píší, že pro klasifikace na základě koherence je vhodné použít Leeho filtr 5x5 následovaný Frostovým filtrem 7x7. Po aplikaci této kombinace došlo v našem případě k příliš velké generalizaci (Obrázek 10), proto byl použit Leeho filtr 3x3 následovaný Frostovým filtrem s oknem 3x3. Samozřejmostí pro SLC data je odstranění fáze referenčního elipsoidu.

Pro porovnání dat mezi různými dráhami je nutné provést terénní korekce. Pro terénní korekce je důležité použití vhodného výškového modelu. Tamm et al. (2016) píší, že je dostačující použití SRTM 90 m, stejný názor má i Stavroula (2016).



Obrázek 10 – Různé aplikace speckle filtrů (rozlišení pixelu 4 m)

Hlavním krokem je výpočet a vyhodnocení koherence mezi 3 soubory dat. Pokud dojde k posečení mezi prvním a druhým souborem, pak na první dvojici bude koherence nižší než u druhé dvojice. Můžeme se domnívat, že při krátkém intervalu mezi soubory dojde k menší změně (tráva vyroste méně), a tedy koherence bude vyšší, než pokud budeme mít data, která byla pořízena s větším odstupem. Tamm et al. (2016) zjistili, že koherence se mění při sečení, kdy například po posečení došlo ke změně z 0,15 na 0,47 (tedy k nárůstu), což bylo důsledkem toho, že záření proniklo až k zemi, která má vyšší koherenci dat mezi dvěma soubory než vegetace. K dispozici měli pouze řadu ze Sentinel-1a, kde temporální rozlišení bylo pouze 12 dní, tedy ještě před vypuštěním satelitu Sentinel-1b. Tamm et al. (2016) popisují i to, že právě šestidenní interval by měl mít za následek vyšší hodnoty koherence mezi jednotlivými soubory. Koherence v jejich případě téměř pokaždé zaznamenala nárůst po posečení – nárůst byl větší než 10 %, na nejlepších plochách pak i 40 %.

Pro entropii a polarimetrický úhel alfa je očekávám také nárůst. Entropie například ve studii, kterou provedl Voormansik et al. (2016) zaznamenala nárůst průměrně o 10 %. Polarimetrický úhel alfa pak v průměru o 6,5°. Pro samotnou dekompozici byla zvolena H-A- $\alpha$  dekompozice (kapitola 2.2.3.1) – z důvodu, že jsou k dispozici pouze data s duální polarizací.

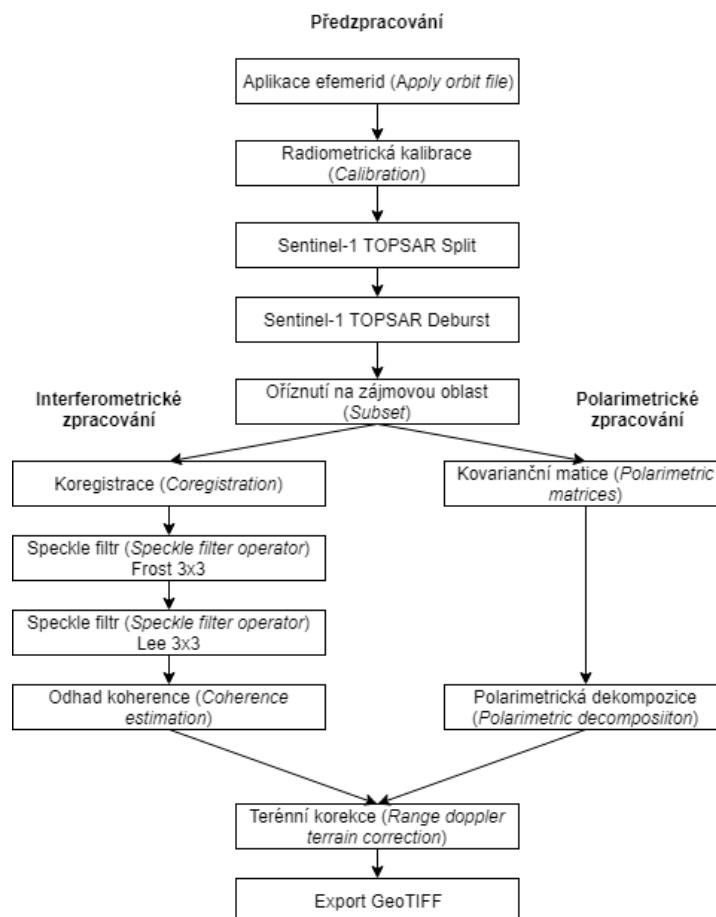
Výše uvedené příznaky jsou zaměřené hlavně na sečení. Jedním z cílů práce je ale zjištění změny biomasy díky pasení dobytka. V takovém případě je postup analogický. Je zřejmé, že dobytek nedokáže spást velkou plochu za tak krátkou dobu, jako člověk posekat, dobytek trávu ale značně udusá. Pro změnu biomasy i přes to lze využít radarová data. V rámci pastvy se koherence chová podobně jako u sečení (Wang, 2013) a postup je tedy analogický

## **4.2. Zpracování radarových dat**

### **4.2.1. Předzpracování**

Radarová data je nutná předzpracovat pro následné analýzy. Takové předzpracování je složeno z několika kroků a je závislé na daném účelu. Aby bylo možné data mezi sebou porovnávat, je nutné provést kalibraci, aplikovat informace o přesné orbitě a další (Obrázek 11). Zpracování probíhalo v aplikaci SNAP, která je vyvíjena Evropskou kosmickou agenturou.

Jako první je důležité udělat korekci pomocí informace o přesné orbitě (*Apply orbit file* – aplikace efemerid). Původní informace, které nalezneme v metadatech, nejsou přesné (poziční chyba družice do 10 m) a je vhodné je nahradit detailnějšími daty, která jsou dostupná na stránkách ESA. SNAP si efemeridy automaticky stáhne z internetu. Do 3 hodin od snímání jsou dostupné relativní efemeridy s poziční chybou do 10 cm. Detailní efemeridy (poziční chyba družice do 5 cm) jsou dostupné do 20 dní po snímání oblasti (ESA, 2018a).



Obrázek 11 – Zpracování radarových dat

Dalším krokem je provedení radiometrické kalibrace. Jelikož chceme porovnávat data, která byla pořízena jiným senzorem, v jiný čas a zpracována jiným procesorem, je nutné data zkalibrovat. V daném produktu jsou veškeré nutné informace pro konverze hodnot mezi DN hodnotou a  $\sigma^0$  již obsaženy. To umožňuje jednoduchou transformaci produktu (ESA, 2018a).

Aby bylo možné data zpracovat dále, je nutné rozdělit data pomocí TOPSAR Split (*Sentinel-1 TOPSAR Split*). IW data jsou pořizována vždy ve 3 „dráhách“, které je nutné rozdělit a zpracovat samostatně. Data jsou zároveň pořizována pomocí „dávek“ (*burst*), kdy jedna dávka trvá 2.75 s a zároveň dochází k překryvu 50-100 těchto vzorků. Pro další zpracování je nutné tyto dávky rozložit, na to slouží funkce *Sentinel-1 TOPSAR Deburst* (ESA, 2018a).

Dalším krokem bylo oříznutí snímku na zájmovou oblast (*subset*), aby byla snížena náročnost na výpočetní výkon. Oblast lze definovat pomocí WKT polygonu.

#### **4.2.2. Interferometrické zpracování**

Pro výpočet koherence bylo nutné udělat „haldu“ (*stack*). K tomu slouží koregistrace (*coregistration*). Ta se provádí na subpixelové úrovni. Jedná se o důležitý krok, bez kterého není možné provádět interferometrické analýzy. Jeden snímek byl určen jako hlavní (*master*) a druhý jako vedlejší (*slave*). Aby byla zaručena konzistence, jako hlavní byl vybrán vždy první snímek (datum pořízení) z dané dvojice.

Dalším krokem je odstranění speckle. Byla použita 2x funkce na redukci speckle (*speckle filter operator*). Nejdříve došlo k použití Frostova 3x3 filtru, následně Leeho 3x3 filtru.

Pro získání samotné koherence je pak již nutné pouze provést samotný odhad koherence (*coherence estimation*). Popis výpočtu je popsán v kapitole 2.4.2.

#### **4.2.3. Polarimetrické zpracování**

Pro výpočet entropie, anisotropie a polarimetrického úhlu alfa bylo nutné provést polarimetrickou dekompozici, která se skládá ze dvou kroků. První z nich je výpočet kovariančních matic (*polarimetric matrices*) (2.2.3.1). Dále pak již může být provedena samotná dekompozice (*polarimetric decomposition*). Byla zvolena H-A-Alfa dekompozice.

#### **4.2.4. Geometrická korekce a uložení dat**

Protože není zájmové území rovné, dochází ke zkreslení na plochách, které jsou sklonité (kapitola 2.2.1). Proto bylo nutné provést terénní korekce (*range doppler terrain correction*), jejichž cílem je tato zkreslení eliminovat. Pro eliminaci je nutné zvolit DEM. V rámci funkce je možné zvolit několik druhů DEM, pro danou úlohu byl zvolen SRTM model s velikostí pixelu 3“. Jako metoda převzorkování byla zvolena metoda nejbližšího souseda, jelikož nedojde ke změně původních hodnot.

Aby mohlo být se snímky dále pracováno mimo software SNAP, je nutné je exportovat do jiného formátu. Za takový formát byl zvolen GeoTIFF, jelikož se nejsnadněji importuje do dalších SW.

### **4.3. Zpracování vektorových dat**

Data z terénního průzkumu byla bodová a bylo nutné provést vektorizaci luk v místě měřeného bodu. To bylo provedeno v SW ArcMAP verze 10.6. Pro vektorizaci bylo použito ortofoto poskytované ČÚZK formou webových mapových služeb. Samotné polygony byly zvoleny tak, aby nedosahovaly až ke kraji louky a následná statistika nebyla ovlivněna odrazem signálu od povrchů a předmětů, které s loukami sousedí. Dále byly v rámci těchto polygonů spočteny pro výše uvedené parametry (koherence, entropie, polarimetrický úhel alfa) zonální statistiky v SW R ve verzi 3.4.3, tedy medián, mediánová absolutní odchylka a směrodatná odchylka.

## 5. Výsledky

V následujících kapitolách jsou představeny výsledky z provedených výzkumů, které byly zpracovány metodikou výše popsanou. Výsledky jsou rozděleny na 3 oddíly, prvním jsou výsledky pro data z roku 2016. V druhém z roku 2017. Ve třetím pak data od správy KRNAP.

Dále jsou jednotlivé roky rozděleny na různé stavy sečení. Jedná se o sečené louky – stav bez biomasy (biomasa byla uklizena) nebo s biomasou (sušení sena).

### 5.1. Rok 2016

Pro rok 2016 jsou dostupná pouze data ze Sentinel 1-A. V červnu byl navíc zaznamenán výpadek a za tento měsíc nejsou dostupné snímky. Nebylo tedy možné analyzovat celou datovou řadu, ale pouze shromáždit informace o změně parametrů kolem data výjezdu.

Družicová data zpracovaná pro rok 2016 jsou uvedena v příloze (Příloha 1 a Příloha 2).

### Dataset 20. 7. 2016

#### ***Stav bez biomasy***

Průměrná změna koherence pro VH i VV polarizaci (relativní dráha 22) (Tabulka 2) byla záporná a to -0.01. Pro relativní dráhu 146 byla průměrná změna koherence 0 pro VH a -0,01 pro VV (Tabulka 3).

Tabulka 2 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22)

| Track22 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|---------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 4       | 0,79                        | -0,07 | 63,78                | 2,70  | 0,28                            | 0,03  | 0,23                            | 0,02  |
| 19      | 0,82                        | 0,15  | 64,68                | -3,74 | 0,22                            | 0,06  | 0,30                            | 0,10  |
| 20      | 0,77                        | -0,02 | 66,82                | 1,97  | 0,28                            | 0,00  | 0,22                            | -0,05 |
| 21      | 0,80                        | -0,03 | 65,41                | 5,09  | 0,27                            | -0,03 | 0,29                            | -0,01 |
| 24      | 0,83                        | 0,00  | 60,83                | -0,98 | 0,24                            | -0,05 | 0,19                            | -0,10 |
| 30      | 0,79                        | -0,02 | 64,36                | 1,12  | 0,24                            | -0,02 | 0,25                            | 0,02  |
| 31      | 0,81                        | 0,00  | 64,28                | 0,56  | 0,23                            | 0,00  | 0,25                            | 0,02  |
| 33      | 0,89                        | -0,01 | 57,63                | 0,36  | 0,26                            | -0,07 | 0,19                            | -0,06 |
| 34      | 0,81                        | 0,01  | 63,55                | -0,11 | 0,25                            | 0,02  | 0,26                            | 0,01  |
| 38      | 0,79                        | -0,03 | 65,25                | 3,70  | 0,20                            | -0,09 | 0,25                            | -0,04 |
| 40      | 0,77                        | -0,03 | 65,52                | 2,10  | 0,29                            | 0,04  | 0,23                            | -0,04 |
| Průměr  |                             | 0,00  |                      | 1,16  |                                 | -0,01 |                                 | -0,01 |
| Medián  |                             | -0,02 |                      | 1,12  |                                 | 0,00  |                                 | -0,01 |
| Smodch  |                             | 0,05  |                      | 2,28  |                                 | 0,04  |                                 | 0,05  |

Průměrná změna polarimetrického úhlu alfa byla pro dráhu 22 1.16 ° a pro dráhu 146 -0,44 °.

Entropie zaznamenala průměrnou změnu rovnou -0,004 pro dráhu 22, respektive 0,01 pro dráhu 146.

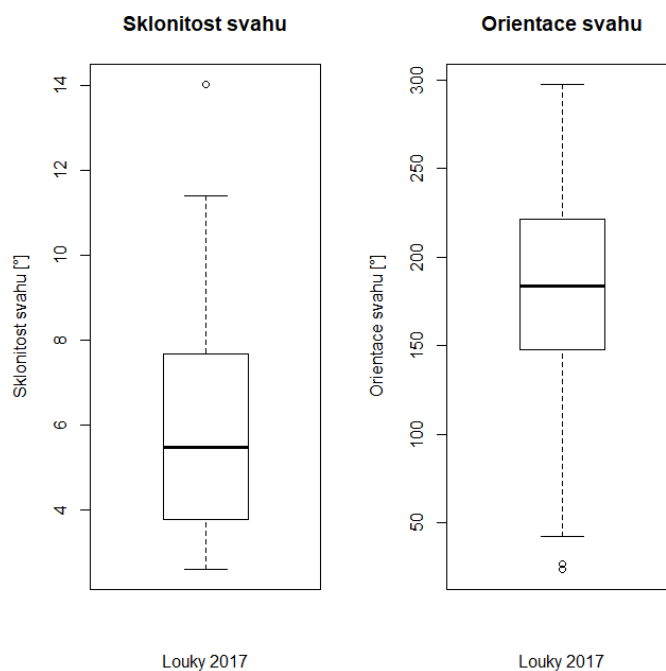
Důvodem těchto nevýrazných výsledků je pravděpodobně nedostatečně hustá časová řada s výpadkem právě v době největší aktivity sečení luk.

Tabulka 3 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|----------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon  | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 4        | 0,75                        | -0,03 | 67,29                | 1,94  | 0,30                            | -0,01 | 0,26                            | -0,06 |
| 19       | 0,81                        | 0,07  | 62,95                | -4,46 | 0,32                            | 0,07  | 0,31                            | 0,03  |
| 20       | 0,85                        | 0,07  | 59,93                | -3,31 | 0,29                            | 0,05  | 0,30                            | 0,04  |
| 21       | 0,83                        | 0,03  | 62,45                | -0,94 | 0,28                            | -0,04 | 0,32                            | -0,01 |
| 24       | 0,77                        | 0,07  | 64,86                | -4,53 | 0,34                            | 0,07  | 0,33                            | 0,02  |
| 30       | 0,74                        | 0,00  | 66,52                | -0,08 | 0,27                            | -0,03 | 0,29                            | -0,01 |
| 31       | 0,78                        | -0,03 | 65,45                | 3,20  | 0,28                            | -0,02 | 0,28                            | -0,01 |
| 33       | 0,74                        | 0,00  | 65,96                | -0,38 | 0,26                            | -0,06 | 0,39                            | 0,09  |
| 34       | 0,81                        | 0,00  | 63,82                | 0,74  | 0,30                            | 0,01  | 0,31                            | -0,03 |
| 38       | 0,82                        | -0,01 | 61,89                | -0,76 | 0,33                            | 0,03  | 0,29                            | -0,04 |
| 40       | 0,73                        | -0,06 | 67,70                | 3,68  | 0,31                            | -0,01 | 0,33                            | 0,03  |
| Průměr   |                             | 0,01  |                      | -0,44 |                                 | 0,00  |                                 | 0,01  |
| Medián   |                             | 0,00  |                      | -0,38 |                                 | -0,01 |                                 | -0,01 |
| Smodch   |                             | 0,04  |                      | 2,68  |                                 | 0,04  |                                 | 0,04  |

## 5.2. Rok 2017

Družicová data zpracovaná pro rok 2017 jsou uvedena v příloze (Příloha 3 a Příloha 4). Většina luk má mírný sklon (4-8 °), průměrně pak 6,01 °, směrodatná odchylka 2,54 °. Louky mají převážně jižní orientaci (150-200 °) průměrně pak 181 °, směrodatná odchylka 63 ° (Obrázek 12). Orientace a sklon byl vypočten z SRTM 30 m.



Obrázek 12 – Sklonitost/orientace svahů pro data za sezónu 2017<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Boxplot – krabicový graf, ohraničené pole (box) označuje kvantil (25 % a 75 %), silná čára medián (50 %), tenké vodorovné čáry označují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí a body mimo jsou odlehlé (extrémní) hodnoty

## **Dataset 15. 6. 2017**

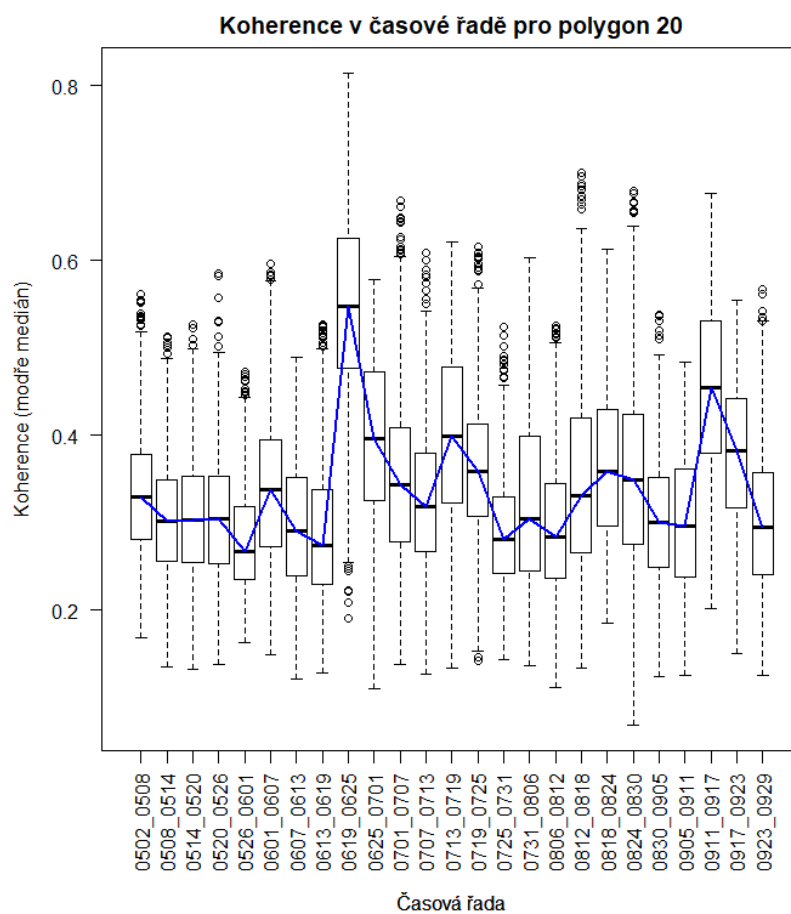
Nejdříve budou prezentovány výsledky pro data z měření 15. 6. 2017. V rámci tohoto měření bylo zaměřeno celkem 47 luk, z nichž celkem 17 bylo čerstvě posečeno a neležela na nich žádná biomasa. 3 louky byly čerstvě posečeny, ale biomasa byla zanechána na místě. Čerstvě posečené znamená, že byla louka sečena v rozmezí 0-3 dní před výjezdem. V žádném z případů nedošlo k úplnému odstranění vegetace, vždy zůstal 5-15 cm vysoký porost. To mělo za následek, že na žádném ze sledovaných území nebyla zaznamenána vysoká hodnota koherence (0,9+). Pro každé území byla zjištěna hodnota koherence (VH, VV), entropie a polarimetrického úhlu alfa v celé datové řadě.

### ***Relativní dráha 146 – stav bez biomasy***

Pro koherenci v polarizaci VH došlo ke kladné změně v 15 případech (Tabulka 4), pro VV pak v 9 případech. Největší změna koherence (VH) byla pro polygon 20 z 0,28/0,51 (Obrázek 13). Druhá největší  $\gamma_{VH}$  pro polygon 31 z 0,31/0,44. Pro  $\gamma_{VV}$  byla největší změna pro polygon 20 z 0,31/0,46 a druhá největší u polygonu 31 z 0,28/0,45. Průměrná změna  $\gamma_{VH}$  byla 0,039 a pro  $\gamma_{VV}$  0,009. Louka 20 se oproti ostatním vyznačuje jihozápadní orientací (223 °), téměř shodnou orientaci mají polygony 31 (224 °) a 41 (217 °). Sklonitost je u těchto polygonů různá.

Pro entropii došlo k největší změně pro polygon 38 z 0,77/0,82. Průměrná změna pak byla záporná, -0,017.

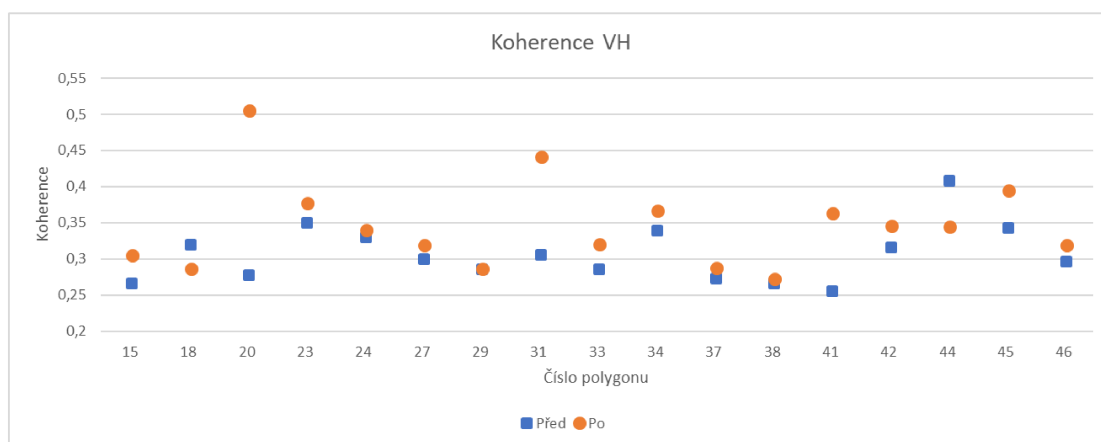
U polarimetrického úhlu alfa byla největší změna z polygonu 33 a to z 64/69,4, průměrná změna byla 0,98 °.



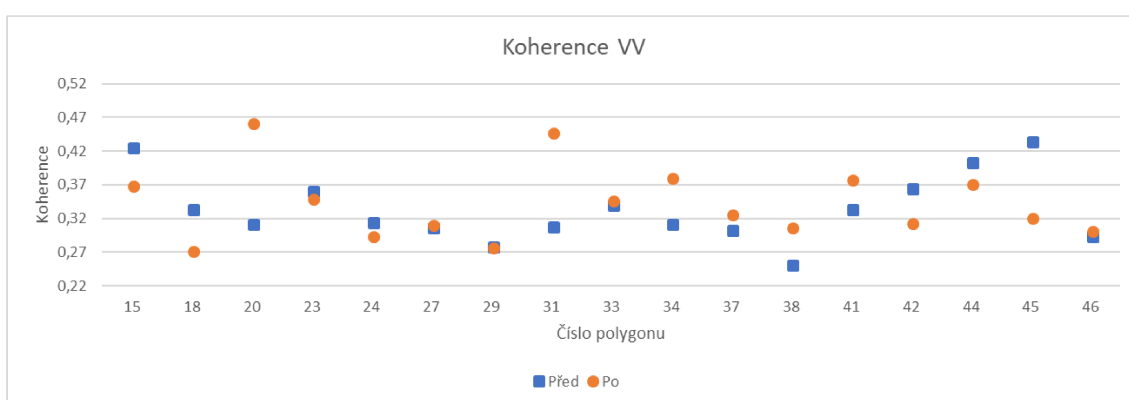
Obrázek 13 – Koherence VH – časová řada pro polygon 20 (rel. dráha 146)



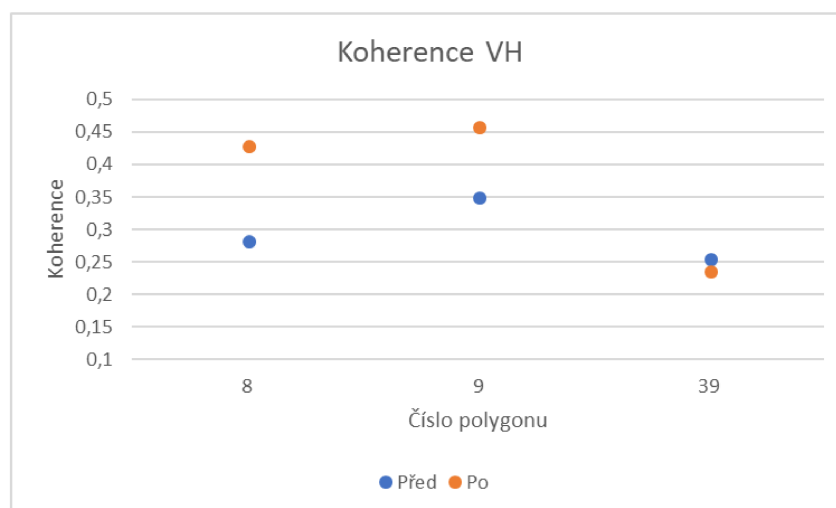
Obrázek 14 – Polygon 20 (Zdroj: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.)



Obrázek 15 – Hodnota koherence VH před/po sečení pro louky bez biomasy (rel. dráha 146)



Obrázek 16 – Hodnota koherence VV před/po sečení pro louky bez biomasy (rel. dráha 146)



Obrázek 17 – Hodnota koherence VH před/po sečení pro louky s biomasou (rel. dráha 22)

### ***Relativní dráha 22 – stav bez biomasy***

Pro  $\gamma_{VH}$  došlo k nárůstu koherence v 10 případech ze 17 (Tabulka 5) a u  $\gamma_{VV}$  celkem v 6 případech. Největší změna nastala pro  $\gamma_{VH}$  u polygonu 23 a to

z 0,26/0,31, pro  $\gamma_{VV}$  pak pro polygon 44 z 0,27/0,31. Průměrná změna pro  $\gamma_{VH}$  je 0,009 a pro  $\gamma_{VV}$  záporná a to -0,009.

Průměrná změna entropie je 0,012, největší nárůst byl zaznamenán u polygonu 24 a to z 0,78/0,9.

Polarimetrický úhel alfa byl v průměru záporný a to -1.01 °, největší změna pak byla na polygonu 15 z 58.5/62.9.

### ***Relativní dráha 146 – stav s biomasou***

U stavu s biomasou pro koherenci VH došlo k růstu koherence ve 3 případech ze 3 (Tabulka 6). Největší změna  $\gamma_{VH}$  nastala u polygonu 8 z 0,31/0,46. Pro  $\gamma_{VV}$  byla největší změna pro polygon 8 a to z 0,9/0,47. Průměrná změna pak byla  $\gamma_{VH}$  0,107 a pro  $\gamma_{VV}$  0,0735.

Entropie zaznamenala kladnou změnu pouze u polygonu 8, změna byla z 0,78/0,81, průměrná změna entropie byla pak -0,011.

Polarimetrický úhel alfa měl největší změnu u polygonu 9 z 60,4/63 a průměrná změna byla 0,66 °.

### ***Relativní dráha 22 – stav s biomasou***

Pro  $\gamma_{VH}$  došlo k nárůstu u 2/3 případů (Tabulka 7), stejně pak u  $\gamma_{VV}$ . Největší nárůst byl v obou případech u polygonu 8. Pro  $\gamma_{VH}$  z 0,28/0,43 a pro  $\gamma_{VV}$  z 0,29/0,41. Průměrná změna  $\gamma_{VH}$  byla 0,078, pro  $\gamma_{VV}$  pak 0,059.

Největší změna entropie byla u polygonu 8 a to z 0,78/0,82, průměrně pak narostla o 0,027.

Polarimetrický úhel alfa vzrostl v jednom případě u polygonu 39 a to z 62,2/62,4, průměrně pak ale poklesla hodnota o -1,19 °.

Tabulka 4 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |                          |       |                      |       |                              |       |                              |       |
|----------|--------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| Polygon  | Entropie (hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH (hodnota/změna) |       | koherence VV (hodnota/změna) |       |
| 15       | 0,78                     | -0,04 | 64,94                | 1,57  | 0,31                         | 0,04  | 0,37                         | -0,06 |
| 18       | 0,81                     | -0,04 | 64,43                | 3,41  | 0,29                         | -0,03 | 0,27                         | -0,06 |
| 20       | 0,84                     | 0,03  | 62,10                | -0,91 | 0,51                         | 0,23  | 0,46                         | 0,15  |
| 23       | 0,78                     | -0,02 | 64,48                | 0,61  | 0,38                         | 0,03  | 0,35                         | -0,01 |
| 24       | 0,82                     | 0,05  | 63,63                | -0,73 | 0,34                         | 0,01  | 0,30                         | -0,02 |
| 27       | 0,77                     | -0,01 | 65,57                | -0,09 | 0,32                         | 0,02  | 0,31                         | 0,00  |
| 29       | 0,79                     | -0,03 | 64,18                | 0,62  | 0,29                         | 0,00  | 0,28                         | 0,00  |
| 31       | 0,75                     | 0,00  | 64,86                | -1,89 | 0,45                         | 0,14  | 0,45                         | 0,14  |
| 33       | 0,70                     | -0,09 | 69,41                | 5,41  | 0,32                         | 0,04  | 0,35                         | 0,01  |
| 34       | 0,83                     | -0,01 | 61,54                | -0,12 | 0,37                         | 0,03  | 0,38                         | 0,07  |
| 37       | 0,81                     | -0,05 | 62,67                | 2,79  | 0,29                         | 0,01  | 0,33                         | 0,02  |
| 38       | 0,82                     | 0,05  | 62,40                | -2,26 | 0,28                         | 0,01  | 0,31                         | 0,06  |
| 41       | 0,72                     | 0,04  | 68,63                | -0,95 | 0,37                         | 0,11  | 0,38                         | 0,04  |
| 42       | 0,76                     | 0,00  | 65,91                | -0,12 | 0,35                         | 0,03  | 0,32                         | -0,05 |
| 44       | 0,77                     | -0,04 | 65,56                | 3,51  | 0,35                         | -0,06 | 0,37                         | -0,03 |
| 45       | 0,72                     | -0,05 | 67,41                | 2,31  | 0,40                         | 0,05  | 0,32                         | -0,11 |
| 46       | 0,76                     | -0,07 | 66,08                | 3,54  | 0,32                         | 0,02  | 0,30                         | 0,01  |
| Průměr   |                          | -0,02 |                      | 0,98  |                              | 0,04  |                              | 0,01  |
| Medián   |                          | -0,02 |                      | 0,61  |                              | 0,03  |                              | 0,00  |
| Smodch   |                          | 0,04  |                      | 2,12  |                              | 0,06  |                              | 0,07  |

Tabulka 5 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22)

| Track22 |                          |       |                      |       |                              |       |                              |       |
|---------|--------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| Polygon | Entropie (hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH (hodnota/změna) |       | koherence VV (hodnota/změna) |       |
| 15      | 0,80                     | -0,09 | 62,93                | 4,43  | 0,22                         | -0,03 | 0,27                         | 0,06  |
| 18      | 0,75                     | -0,04 | 65,97                | 1,91  | 0,28                         | 0,00  | 0,22                         | -0,05 |
| 20      | 0,87                     | 0,05  | 60,69                | -3,27 | 0,29                         | 0,05  | 0,25                         | -0,02 |
| 23      | 0,79                     | 0,02  | 64,93                | -1,03 | 0,31                         | -0,02 | 0,30                         | 0,01  |
| 24      | 0,90                     | 0,12  | 57,29                | -7,19 | 0,31                         | 0,06  | 0,25                         | -0,01 |
| 27      | 0,80                     | -0,02 | 64,19                | 1,87  | 0,25                         | 0,02  | 0,25                         | 0,01  |
| 29      | 0,84                     | 0,05  | 61,93                | -2,56 | 0,25                         | 0,02  | 0,22                         | -0,02 |
| 31      | 0,76                     | -0,01 | 65,97                | -0,62 | 0,27                         | 0,04  | 0,23                         | -0,04 |
| 33      | 0,75                     | -0,02 | 65,78                | 0,15  | 0,26                         | 0,01  | 0,23                         | -0,03 |
| 34      | 0,80                     | 0,03  | 64,40                | -1,38 | 0,30                         | 0,04  | 0,22                         | -0,01 |
| 37      | 0,80                     | 0,06  | 61,53                | -5,08 | 0,24                         | -0,04 | 0,23                         | -0,01 |
| 38      | 0,84                     | -0,01 | 60,87                | -0,52 | 0,22                         | 0,01  | 0,26                         | 0,00  |
| 41      | 0,85                     | 0,05  | 59,79                | -4,66 | 0,23                         | 0,03  | 0,23                         | -0,03 |
| 42      | 0,78                     | 0,03  | 64,80                | -1,66 | 0,25                         | -0,04 | 0,27                         | -0,01 |
| 44      | 0,78                     | 0,03  | 64,75                | -1,17 | 0,30                         | -0,02 | 0,31                         | 0,04  |
| 45      | 0,75                     | -0,08 | 65,72                | 3,06  | 0,25                         | -0,02 | 0,27                         | -0,05 |
| 46      | 0,76                     | 0,00  | 66,97                | 0,52  | 0,26                         | 0,05  | 0,27                         | 0,02  |
| Průměr  |                          | 0,01  |                      | -1,01 |                              | 0,01  |                              | -0,01 |
| Medián  |                          | 0,02  |                      | -1,03 |                              | 0,01  |                              | -0,01 |
| Smodch  |                          | 0,05  |                      | 2,90  |                              | 0,03  |                              | 0,03  |

Tabulka 6 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |                          |       |                      |       |                              |      |                              |       |
|----------|--------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------------|------|------------------------------|-------|
| Polygon  | Entropie (hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH (hodnota/změna) |      | koherence VV (hodnota/změna) |       |
| 8        | 0,81                     | 0,02  | 62,73                | -1,18 | 0,46                         | 0,15 | 0,47                         | 0,18  |
| 9        | 0,82                     | -0,03 | 62,99                | 2,50  | 0,46                         | 0,16 | 0,44                         | 0,05  |
| 39       | 0,81                     | -0,02 | 62,48                | 0,67  | 0,32                         | 0,01 | 0,32                         | -0,01 |
| Průměr   |                          | -0,01 |                      | 0,66  |                              | 0,11 |                              | 0,07  |
| Medián   |                          | -0,02 |                      | 0,67  |                              | 0,15 |                              | 0,05  |
| Smodch   |                          | 0,02  |                      | 1,50  |                              | 0,07 |                              | 0,08  |

Tabulka 7 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha22)

| Track22 |                          |      |                      |       |                              |       |                              |       |
|---------|--------------------------|------|----------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| Polygon | Entropie (hodnota/změna) |      | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH (hodnota/změna) |       | koherence VV (hodnota/změna) |       |
| 8       | 0,83                     | 0,04 | 62,56                | -1,61 | 0,43                         | 0,15  | 0,41                         | 0,11  |
| 9       | 0,81                     | 0,04 | 63,18                | -2,18 | 0,46                         | 0,11  | 0,37                         | 0,08  |
| 39      | 0,83                     | 0,00 | 62,43                | 0,22  | 0,24                         | -0,02 | 0,24                         | -0,02 |
| Průměr  |                          | 0,03 |                      | -1,19 |                              | 0,08  |                              | 0,06  |
| Medián  |                          | 0,04 |                      | -1,61 |                              | 0,11  |                              | 0,08  |
| Smodch  |                          | 0,02 |                      | 1,02  |                              | 0,07  |                              | 0,06  |

## Dataset 26. 6. 2017

V rámci tohoto měření bylo zaměřeno celkem 39 luk, z nichž celkem 7 bylo sečeno čerstvě. 10 bylo sečeno dříve (rozmezí 3-10 dní před výjezdem). Dále 5 luk bylo sečeno čerstvě, ale biomasa byla ponechána na místě.

### ***Relativní dráha 146 – stav bez biomasy***

Pro 6 ze 7 ploch došlo k navýšení hodnoty koherence u VH polarizace (Tabulka 8). Nejvyšší změna  $\gamma_{VH}$  nastala u polygonu 13 z 0,27/0,38. Pro  $\gamma_{VV}$  nastal ve všech případech pokles hodnoty koherence. Průměrná změna  $\gamma_{VH}$  byla 0,052 a pro  $\gamma_{VV}$  -0,068. Polygony s největší změnou (13, 14) mají rozdílnou orientaci i sklonitost.

Změna entropie byla ve všech případech záporná, a to průměrně o -0,044.

Polarimetrický úhel alfa měl nejvyšší růst u polygonu 33 z 61,25/65,83. Průměrná změna byla 1,71 °.

Tabulka 8 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|----------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon  | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 3        | 0,74                        | -0,03 | 67,85                | 2,70  | 0,31                            | -0,01 | 0,31                            | -0,09 |
| 4        | 0,66                        | -0,10 | 70,68                | 3,27  | 0,34                            | 0,03  | 0,28                            | -0,03 |
| 5        | 0,69                        | -0,05 | 69,17                | 2,51  | 0,34                            | 0,05  | 0,28                            | -0,02 |
| 13       | 0,73                        | 0,01  | 67,06                | -1,43 | 0,38                            | 0,11  | 0,23                            | -0,24 |
| 14       | 0,73                        | -0,04 | 67,97                | 2,96  | 0,39                            | 0,10  | 0,30                            | -0,07 |
| 33       | 0,82                        | 0,04  | 62,59                | -0,65 | 0,34                            | 0,03  | 0,30                            | -0,01 |
| 36       | 0,78                        | -0,01 | 64,87                | 0,88  | 0,36                            | 0,05  | 0,31                            | -0,01 |
| Průměr   |                             | -0,03 |                      | 1,46  |                                 | 0,05  |                                 | -0,07 |
| Medián   |                             | -0,03 |                      | 2,51  |                                 | 0,05  |                                 | -0,03 |
| Smodch   |                             | 0,04  |                      | 1,75  |                                 | 0,04  |                                 | 0,08  |

### **Relativní dráha 22 – stav bez biomasy**

Pro  $\gamma_{VH}$  došlo pro 5/7 (Tabulka 9) případů k nárůstu v průměru o 0,01, v případě  $\gamma_{VV}$  došlo k nárůstu u třech případů, v průměru ale došlo k poklesu koherence, a to o -0,018. Největší nárůst  $\gamma_{VH}$  byl pro polygon 13 z 0,29/0,34. Pro  $\gamma_{VV}$  byl největší nárůst pro polygon 3 z 0,2/0,25.

U entropie došlo ve všech případech k poklesu, v průměru pak o -0,044.

Polarimetrický úhel alfa narostl v průměru o 1,7 °, nejvíce u polygonu 33 z 61,25/65,83.

Tabulka 9 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22)

| Track22 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|---------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 3       | 0,77                        | -0,03 | 64,54                | -0,54 | 0,23                            | 0,03  | 0,25                            | 0,05  |
| 4       | 0,75                        | -0,04 | 67,87                | 2,25  | 0,22                            | -0,06 | 0,19                            | -0,04 |
| 5       | 0,78                        | -0,03 | 65,34                | 0,78  | 0,25                            | 0,01  | 0,23                            | -0,04 |
| 13      | 0,76                        | -0,10 | 63,75                | 1,32  | 0,34                            | 0,05  | 0,28                            | -0,06 |
| 14      | 0,80                        | -0,01 | 63,67                | -0,74 | 0,26                            | -0,02 | 0,29                            | -0,08 |
| 33      | 0,77                        | -0,04 | 65,83                | 4,57  | 0,27                            | 0,02  | 0,26                            | 0,02  |
| 36      | 0,80                        | -0,06 | 64,43                | 4,34  | 0,24                            | 0,04  | 0,24                            | 0,03  |
| Průměr  |                             | -0,04 |                      | 1,71  |                                 | 0,01  |                                 | -0,02 |
| Medián  |                             | -0,04 |                      | 1,32  |                                 | 0,02  |                                 | -0,04 |
| Smodch  |                             | 0,03  |                      | 1,98  |                                 | 0,03  |                                 | 0,05  |

## ***Relativní dráha 146 – stav bez biomasy – dřívější sečení***

Pro koherenci došlo k nárůstu  $\gamma_{VH}$  ve 4 případech z 10, pro  $\gamma_{VV}$  pak v 6 případech (Tabulka 10). Největší změna pro  $\gamma_{VH}$  byla u polygonu 2 z 0,25/0,31. Pro  $\gamma_{VV}$  největší změna nastala u polygonu 1 z 0,22/0,35. Průměrná změna  $\gamma_{VH}$  byla 0,01 a pro  $\gamma_{VV}$  0,006.

Největší změna entropie nastala u polygonu 28 z 0,75/0,87. Průměrně hodnota entropie vzrostla o 0,021.

Polarimetrický úhel alfa měl nejvyšší růst u polygonu 6 z 57,5/64,7. Průměrný nárůst byl 2,7 °.

Tabulka 10 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro dříve sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|----------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon  | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 1        | 0,83                        | 0,02  | 67,50                | 3,70  | 0,31                            | -0,02 | 0,35                            | 0,13  |
| 2        | 0,82                        | 0,01  | 65,30                | 4,79  | 0,31                            | 0,07  | 0,28                            | 0,01  |
| 6        | 0,88                        | 0,09  | 64,74                | 7,26  | 0,30                            | 0,04  | 0,28                            | -0,02 |
| 17       | 0,77                        | 0,02  | 67,93                | 3,54  | 0,35                            | 0,03  | 0,34                            | 0,01  |
| 18       | 0,73                        | -0,06 | 66,66                | -0,80 | 0,29                            | 0,00  | 0,29                            | 0,01  |
| 20       | 0,83                        | 0,00  | 67,82                | 6,92  | 0,32                            | -0,01 | 0,30                            | -0,03 |
| 21       | 0,76                        | -0,01 | 69,74                | 5,64  | 0,28                            | 0,01  | 0,30                            | -0,09 |
| 23       | 0,77                        | -0,03 | 63,70                | -1,58 | 0,31                            | -0,02 | 0,35                            | 0,03  |
| 27       | 0,79                        | 0,03  | 60,37                | -4,36 | 0,30                            | -0,01 | 0,31                            | 0,01  |
| 28       | 0,87                        | 0,12  | 65,24                | 6,06  | 0,27                            | 0,01  | 0,36                            | 0,00  |
| Průměr   |                             | 0,02  |                      | 3,12  |                                 | 0,01  |                                 | 0,01  |
| Medián   |                             | 0,01  |                      | 4,24  |                                 | 0,00  |                                 | 0,01  |
| Smodch   |                             | 0,05  |                      | 3,79  |                                 | 0,03  |                                 | 0,05  |

## ***Relativní dráha 22 – stav bez biomasy – dřívější sečení***

Celkem u 5/9 luk došlo k nárůstu  $\gamma_{VH}$ , průměrně o 0,003, největší nárůst byl u polygonu 23 z 0,23/0,34 (Tabulka 11). Pro  $\gamma_{VV}$  došlo průměrně k poklesu o -0,01, největší nárůst byl pak pro polygon 23 z 0,23/0,29.

Entropie má největší nárůst u polygonu 28 z 0,74/0,87, průměrně pak narostla o 0,036.

Polarimetrický úhel alfa průměrně zaznamenal pokles o -2,09 °, největší nárůst byl u polygonu 23 z 62,28/65,23.

Tabulka 11 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro dříve sečené louky – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22)

| Track22 |                             |       |                      |       |                                 |       |                                 |       |
|---------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Polygon | Entropie<br>(hodnota/změna) |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH<br>(hodnota/změna) |       | koherence VV<br>(hodnota/změna) |       |
| 1       | 0,86                        | 0,11  | 56,72                | -9,43 | 0,27                            | 0,08  | 0,20                            | -0,04 |
| 2       | 0,80                        | 0,09  | 64,72                | -4,58 | 0,23                            | -0,10 | 0,24                            | -0,05 |
| 6       | 0,84                        | 0,04  | 58,38                | -6,87 | 0,25                            | 0,03  | 0,26                            | 0,00  |
| 17      | 0,76                        | -0,01 | 66,90                | 2,81  | 0,25                            | -0,01 | 0,28                            | 0,00  |
| 18      | 0,78                        | 0,01  | 66,15                | -0,51 | 0,21                            | -0,09 | 0,30                            | -0,03 |
| 21      | 0,78                        | 0,02  | 64,72                | 0,47  | 0,23                            | -0,02 | 0,21                            | -0,04 |
| 23      | 0,78                        | -0,03 | 65,23                | 2,95  | 0,34                            | 0,11  | 0,29                            | 0,06  |
| 27      | 0,84                        | -0,02 | 61,89                | 1,86  | 0,25                            | 0,01  | 0,26                            | 0,01  |
| 28      | 0,87                        | 0,13  | 60,03                | -5,51 | 0,21                            | 0,02  | 0,22                            | -0,01 |
| Průměr  |                             | 0,04  |                      | -2,09 |                                 | 0,00  |                                 | -0,01 |
| Medián  |                             | 0,02  |                      | -0,51 |                                 | 0,01  |                                 | -0,01 |
| Smodch  |                             | 0,06  |                      | 4,33  |                                 | 0,06  |                                 | 0,03  |

### ***Relativní dráha 146 – stav s biomasou***

Celkem z 3 luk z 5 došlo k nárůstu  $\gamma_{VH}$  i  $\gamma_{VV}$  (Tabulka 12). Největší změna pro  $\gamma_{VH}$  byla u polygonu 35 z 0,32/0,35, pro  $\gamma_{VV}$  největší změna nastala také u polygonu 35 z 0,31/0,35. Průměrná změna  $\gamma_{VH}$  byla 0,02 a pro  $\gamma_{VV}$  0,002.

U entropie největší změna nastala u polygonu 32 z 0,75/0,82 a průměrná změna pak dosáhla 0,015.

U polarimetrického úhlu alfa nastala největší změna pro polygon 20 z 60,9/67,8, průměrná změna pak byla 1,81 °.

Tabulka 12 - Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 146)

| Track146 |          |       |                      |       |              |       |              |       |
|----------|----------|-------|----------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| Polygon  | Entropie |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH |       | koherence VV |       |
| 20       | 0,83     | 0,00  | 67,82                | 6,92  | 0,32         | -0,01 | 0,30         | -0,03 |
| 31       | 0,76     | -0,01 | 64,57                | -0,41 | 0,30         | -0,01 | 0,33         | 0,03  |
| 32       | 0,83     | 0,08  | 62,64                | 0,14  | 0,31         | 0,01  | 0,32         | -0,03 |
| 34       | 0,84     | 0,00  | 62,61                | 1,69  | 0,35         | 0,05  | 0,33         | 0,01  |
| 35       | 0,79     | 0,00  | 65,11                | 0,71  | 0,38         | 0,06  | 0,35         | 0,04  |
| Průměr   |          | 0,01  |                      | 1,81  |              | 0,02  |              | 0,00  |
| Medián   |          | 0,00  |                      | 0,71  |              | 0,01  |              | 0,01  |
| Smodch   |          | 0,03  |                      | 2,65  |              | 0,03  |              | 0,03  |

### ***Relativní dráha 22 – stav s biomasou***

$\gamma_{VH}$  zaznamenala nárůst ve 3 případech z 5, průměrně o 0,01, nejvíce pak u polygonu 31 z 0,22/0,27. Pro  $\gamma_{VV}$  došlo k nárůstu ve 4 případech z 5, průměrně o 0,022, nejvíce u polygonu 32 z 0,22/0,27.

Entropie má největší nárůst u polygonu 20, nejvíce pak u polygonu 20 z 0,79/0,82, průměrně pak ale došlo k poklesu o -0,013.

Pro polarimetrický úhel alfa měl průměrný nárůst o 1,64 °, nejvíce u polygonu 35 z 55,7/65,7.

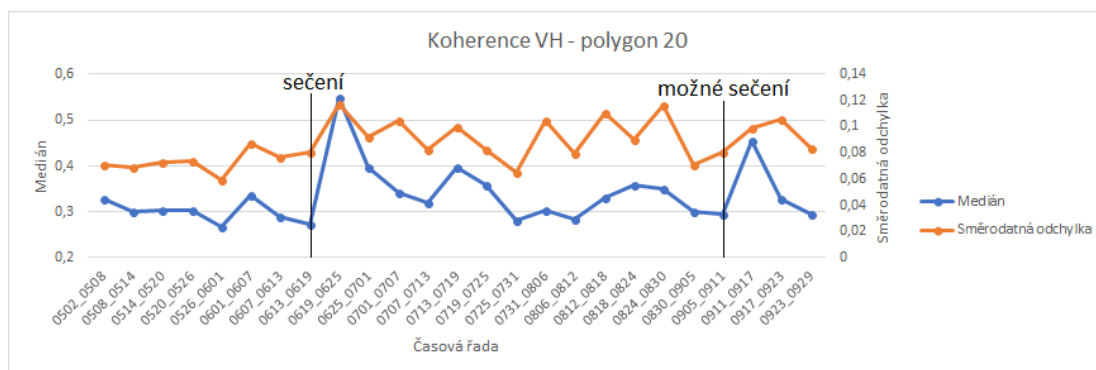
Tabulka 13 – Hodnoty Entropie, polarimetrického úhlu alfa, koherence VH/VV a jejich změna po sečení pro čerstvě sečené louky (s biomasou) – červeně je zvýrazněna kladná změna parametru (rel. dráha 22)

| Track22 |          |       |                      |       |              |       |              |       |
|---------|----------|-------|----------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| Polygon | Entropie |       | Alfa (hodnota/změna) |       | koherence VH |       | koherence VV |       |
| 20      | 0,82     | 0,03  | 63,45                | -1,28 | 0,28         | 0,02  | 0,30         | 0,05  |
| 31      | 0,76     | -0,01 | 66,42                | 1,56  | 0,27         | 0,06  | 0,25         | 0,02  |
| 32      | 0,79     | 0,01  | 62,63                | -1,39 | 0,25         | 0,02  | 0,27         | 0,05  |
| 34      | 0,86     | 0,02  | 60,34                | -0,61 | 0,22         | -0,01 | 0,22         | -0,02 |
| 35      | 0,79     | -0,11 | 65,67                | 9,93  | 0,25         | -0,04 | 0,19         | 0,01  |
| Průměr  |          | -0,01 |                      | 1,64  |              | 0,01  |              | 0,02  |
| Medián  |          | 0,01  |                      | -0,61 |              | 0,02  |              | 0,02  |
| Smodch  |          | 0,05  |                      | 4,28  |              | 0,03  |              | 0,03  |

## ***Odhad sečení z datové řady na základě výsledků pro vybrané polygony***

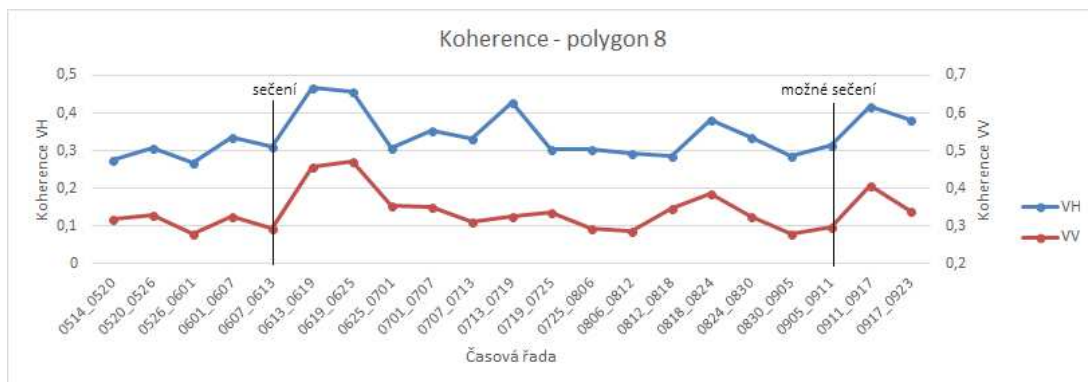
U polygonu 20 bylo sečení bylo zaznamenáno mezi dny 13-15. 6. 2017 (Obrázek 18), koherence u VH i VV po tomto sečení narostla v obou případech. Podobný vývoj lze zaznamenat mezi dny 5.-11. 9. 2017. Je možné, že mezi těmito dny bylo zaznamenáno opětovné sečení. Výraznější průběh koherence je u VH polarizace než VV, jak již bylo zmíněno, průměrný nárůst koherence je větší u VH než u VV.

Stejný vývoj lze sledovat i u polygonu 34, kde došlo k sečení 25.6-1.7.2017. Opakovaný pokles/vzestup koherence je i mezi dny 4.-11.8 2017, kdy též mohlo dojít k sečení. Vidíme, že koherence zůstala vyšší i po možném sečení, to může být vysvětleno například tím, že biomasa byla ponechána na místě.



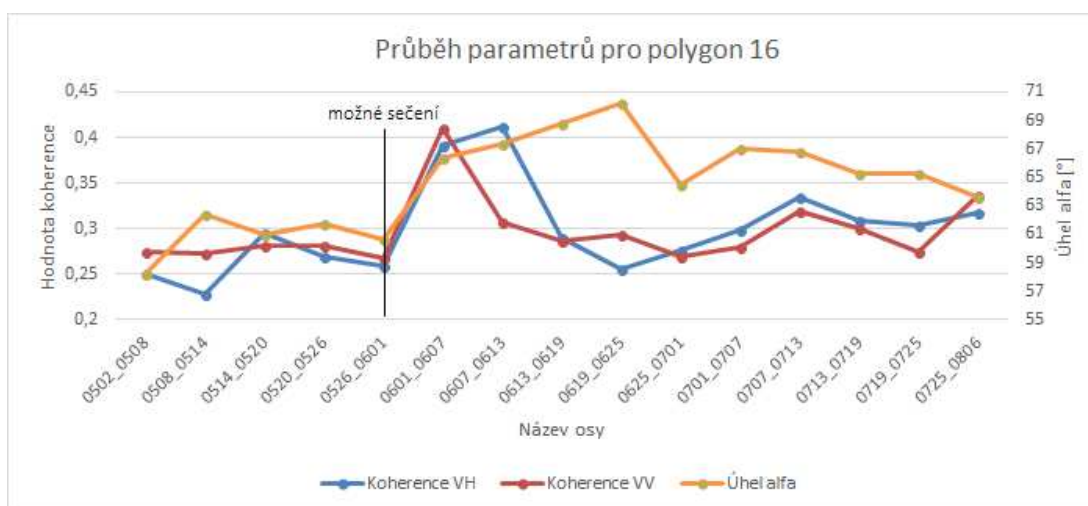
Obrázek 18 – Koherence VH (vlevo) v časové řadě pro polygon 20 (rel. dráha 146)

Podobný průběh můžeme vidět pro louku s biomasou (polygon 8), kdy u sečení mezi 7-13. 6. 2017 (Obrázek 19) došlo k nárůstu koherence a hodnota zůstala relativně vyšší i mezi další dvojicí snímků. Možné další sečení bylo vyhodnoceno na 5-11. 9. 2017 kdy opět došlo k výraznějšímu nárůstu koherence v obou polarizacích. Lze vidět i jednu další možnost a to 6-12. 8. 2017, ovšem zde byl nárůst pouze u VH koherence, kdežto u VV byla hodnota vyšší již dříve, a tak tato možnost byla zamítnuta.



Obrázek 19 - Koherence VH (vlevo) a VV (vpravo) v časové řadě pro polygon 8 (rel. dráha 146)

Dále se můžeme pokusit o odhad, kdy bylo provedeno sečení na ostatních polygonech, u kterých nebylo zaznamenáno, kdy byla louka sečena. Příkladem je polygon 16, kde došlo k nárůstu koherence na snímcích VH i VV polarizací mezi daty 13.–20. 6. 2017. Nárůst byl u VH koherence z 0,25/0,42 a u VV pak z 0,27/0,41. Pokud se podíváme na průběh entropie a polarimetrického úhlu alfa pro stejná data, pak hodnota entropie poklesla z 0,83/0,75 a hodnota polarimetrického úhlu alfa se zvýšila z 60,7/66,4 (Obrázek 20). Lze pravděpodobně říci, že opravdu došlo k sečení mezi uvedenými daty. Celkem 3 ze 4 parametrů poukazují na událost.



Obrázek 20 – Polarimetrický úhel alfa pro polygon 16 (rel. dráha 146)

Je možné, že výše uvedený odhad nemusí být správný. Nárůst koherence může být způsoben i jinými vlivy. Velký vliv na hodnoty koherence má koregistrace. Nitti et. al. (2011) se zabývali různými metodami koregistrace a pro dlouhé interferometrické základny (>300 m) nebo sklonité povrchy, je dle nich vhodnější použití koregistrace pomocí výškového modelu. V našem

případě ale základny byly do 150 m. Dále může ovlivnit koherenci i stav atmosféry a nárůst koherence tedy nemusí znamenat právě sečení. Proto je vhodnější použití více nezávislých parametrů jako například u polygonu 16 (Obrázek 20).

### **5.3. Dataset KRNAP**

Data byla rozdělena na několik částí:

- Sečené louky v obou výjezdech
- Pastva

#### ***Relativní dráha 22 – sečené louky***

Celkem 181 luk bylo sečeno během prvního nebo druhého výjezdu správy KRNAP. Pro  $\gamma_{\text{VH}}$  došlo k nárůstu koherence v 91 případech, průměrně pak narostla hodnota o 0,01, směrodatná odchylka 0,08. Průměrná hodnota pouze u těchto 91 případů je 0,07 a směrodatná odchylka 0,06. U  $\gamma_{\text{VV}}$  nejsou data k dispozici.

Polarimetrický úhel narostl celkem v 83 případech ze 181, průměrně došlo ale k poklesu o -0,004 °.

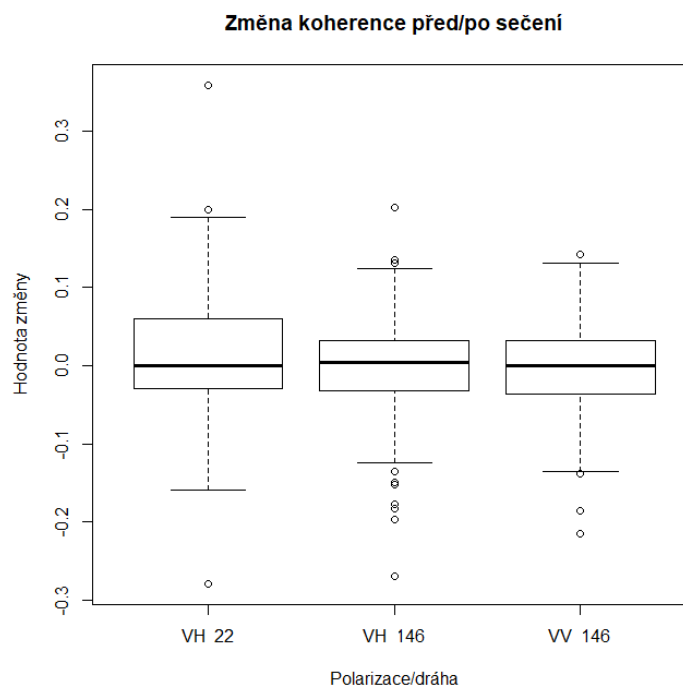
Entropie narostla celkem v 76 případech, průměrně ale poklesla o -0,014.

#### ***Relativní dráha 146 – sečené louky***

Pro  $\gamma_{\text{VH}}$  došlo k nárůstu v 105 případech, průměrně ale došlo k poklesu o -0,002, směrodatná odchylka 0,06.  $\gamma_{\text{VV}}$  narostla v 101 případech z 181, průměrně ale došlo k poklesu o -0,005, směrodatná odchylka 0,06 (Obrázek 21).

Polarimetrický úhel alfa zaznamenal nárůst v 89 případech, průměrně narostl o 0,005 °.

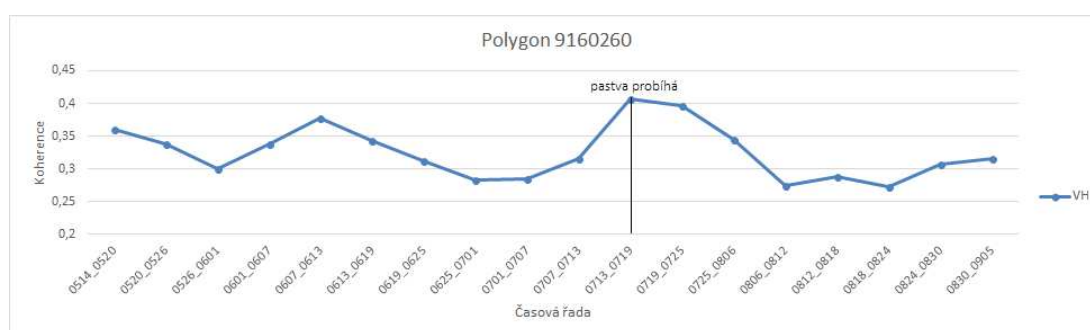
Entropie narostla v 84 případech, průměrně ale poklesla o -0,011.



Obrázek 21 – Změna koherence před/po sečení pro datovou sadu od Správy KRNP

## ***Pastva***

Pastva byla zjišťována ze změny koherence v datové řadě. Výraznější výsledky byly zaznamenány pouze u několika polygonů. Z 263 polygonů, u kterých probíhala v době výjezdu pastva, byl zaznamenán vývoj u 13 polygonů. Nejvýraznější vývoj koherence byl zaznamenán u polygonu 9160260 (Obrázek 22).



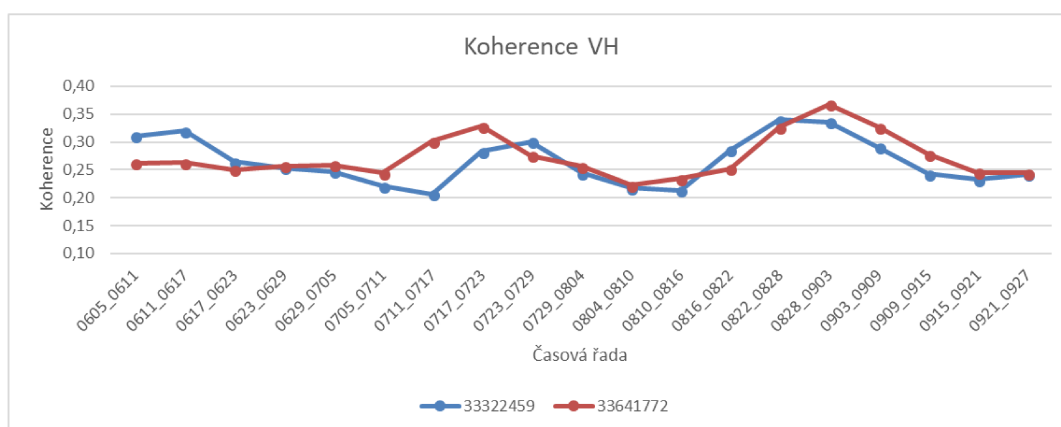
Obrázek 22 – Průběh koherence VH pro polygon 9160260

## ***Odhad sečení z datové řady***

Příkladem mohou být 2 polygony (33322459, 33641772), u kterých je zřejmý průběh koherence. Například pro polygon 33322459 (Obrázek 23) došlo k výraznému nárůstu koherence ve dvou případech. Mezi daty 11.-17. 7. 2017

a 16.-22. 8. 2017. První případ je dokumentovaný a jedná se o čerstvě posečenou louku. V druhém případě nevíme, zda byla opravdu louka sečena, ale průběh koherence tomu napovídá. Zároveň vidíme, že koherence zůstala vyšší i mezi dalším snímkem. To nasvědčuje, že byla na místě ponechána biomasa, například ve formě sušení sena. Případně je možné, že bylo sucho a tráva po sečení rostla pomalu.

Podobný průběh lze vidět u polygonu 33641772 (Obrázek 23), kdy k odhadovanému sečení došlo mezi daty 5.-11. 7. 2017 a 22.-26. 8. 2017.



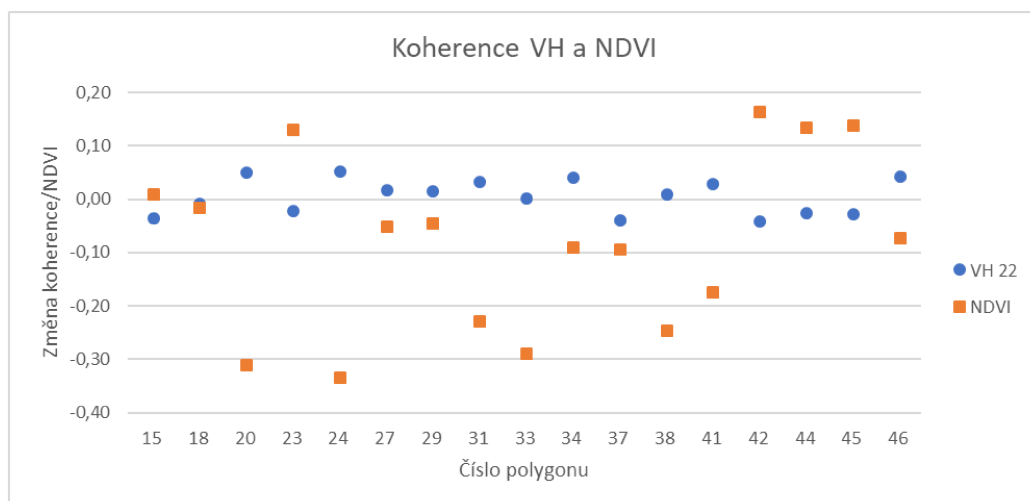
Obrázek 23 – změna koherence VV (rel. dráha 146)

## 5.4. Validace

Pro validaci výsledků byla použita data Sentinel-2, konkrétně produkt Sentinel-2 Level 2A, na který jsou již aplikovány atmosférické i radiometrické korekce. K dispozici byly bezoblačné snímky z 3. 6. 2017 a 20. 6. 2017. Pro tyto snímky bylo vygenerováno NDVI (*normalised difference vegetation index*). Je známo, že hodnota NDVI na sečených loukách je nižší než na loukách nesečených (Halabuk et al., 2015, Lee et al., 2011). Pro validování byla zjišťována hodnota NDVI před a po sečení na daném polygonu.

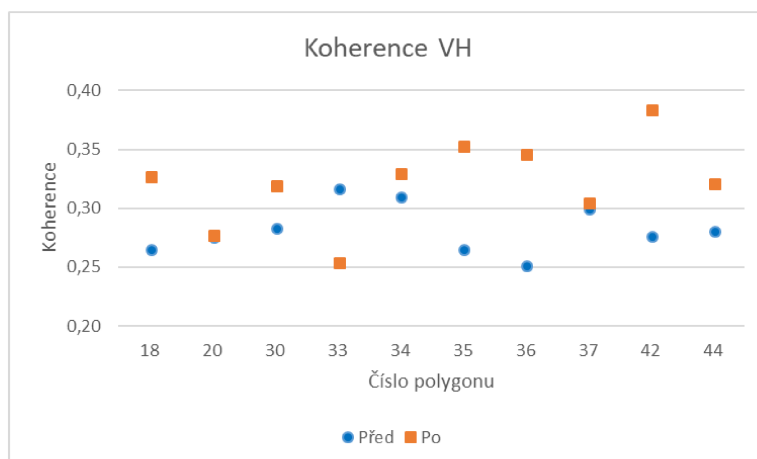
Validace pomocí NDVI byla provedena na datech z výjezdu 15. 6. 2017. Byl vypočten korelační koeficient mezi změnou koherence a změnou NDVI. Největší korelace byla naměřena pro koherenci VH (dráha 22) a NDVI. Hodnota korelačního koeficientu byla -0,73 (záporná silná korelace). Podobný vývoj byl zjištěn u koherence VV (dráha 146), kde hodnota korelačního koeficientu ale byla pouze -0,46.

Hodnota NDVI klesla u 11 polygonů ze 17, přičemž v 10 případech z 11 došlo k nárůstu koherence (Obrázek 24).



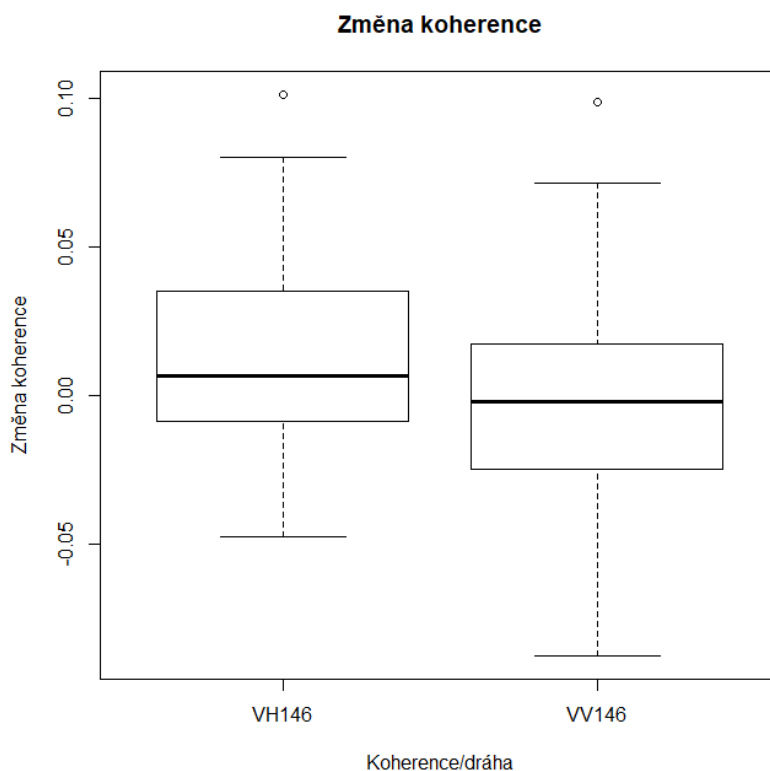
Obrázek 24 – Změna koherence VH a odpovídající změna NDVI

Druhá validace byla provedena pomocí dat Sentinel-1. K dispozici bylo 6 snímků (Příloha 5) na přelomu května/června 2018. Před přeletem družice 2. 6. 2018 byl proveden terénní průzkum. Byly zmapovány polygony, které odpovídají loukám z výjezdu 15. 6. 2016. Celkem na 10 loukách ze 47 probíhalo nebo proběhlo čerstvě sečení. Koherence narostla celkem v 9 z 10 případů pro VH (Obrázek 25) a u všech případů pro VV koherenci. Pro VH pak narostla koherence průměrně o 0,04 a pro VV o 0,01. U polygonu 33 (VH) nedošlo pravděpodobně k nárůstu, protože louka byla sečena právě v době snímkování. Mezi další dvojicí snímků je pro tento polygon již zaznamenaný nárůst a to o 0,05.



Obrázek 25 – Hodnota koherence VH před/po sečení (rel. dráha 146)

Pro třetí validaci byla použita data z posledního výjezdu, který byl uskutečněn 12. 6. 2018. K dispozici bylo stejných 5 snímků jako u druhé validace (Příloha 5). Celkem na 24 loukách z 60 bylo zaznamenáno sečení. Koherence narostla ve 14 případech z 24 pro VH. Průměrný nárůst za všechny tyto polygony byl 0,01 a směrodatná odchylka 0,03. Pro VV koherenci byl zaznamenán nárůst u 11 polygonů z 24. Průměrně koherence narostla o 0,001, směrodatná odchylka 0,04 (Obrázek 26).



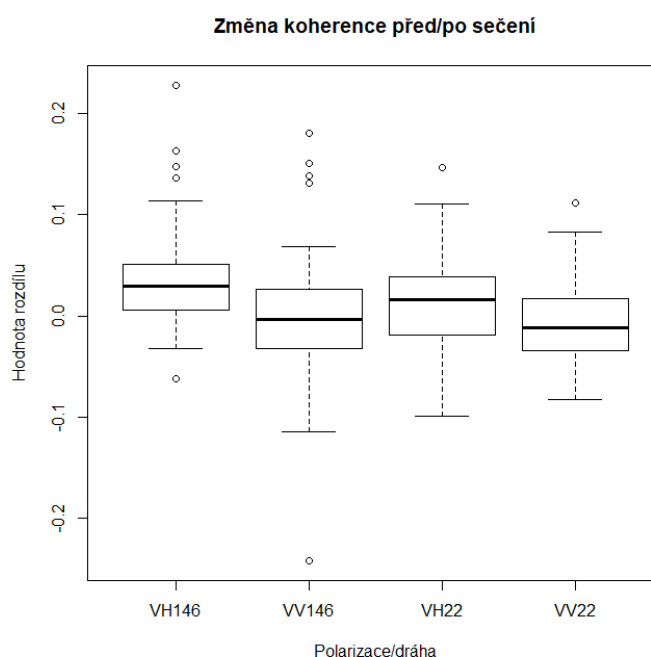
Obrázek 26 – Změna koherence před/po sečení (rel. dráha 146)

## 6. Diskuze

Zjišťováním změny koherence, entropie, polarimetrického úhlu alfa pro sečené louky se zabývalo pouze několik studií. Nejvýznamnější je pravděpodobně studie od Voormansika et al. (2015), kde použili data z TerraSAR-X a plně-polarimetrická data RADARSAT-2. Dále Tamm et al. (2016), kteří použili Sentinel-1 a koherenci rozpoznání sečení.

Tamm et al. (2016) narazili na problém s řídkou časovou řadou, kterou jsem se pokusil v této práci zaplnit. Píší, že tráva v některých případech rostla příliš rychle a 12denní interval nebyl dostatečně podrobný na zachycení změn. Tento problém u 6denní řady nenastal.

Námi naměřená koherence mezi snímky po sečení narostla (dataset 2017, obě dráhy) v 73 % případů v průměru o 0,046 (4,6 %) pro VH koherenci, směrodatná odchylka 0,054. Dále pak pro 61 % případů v průměru o 0,004 (0,4 %) pro VV koherenci, směrodatná odchylka 0,059 (Obrázek 27).



Obrázek 27 - Rozdíl koherence před/po sečení pro sezónu 2017

Vyšší hodnota VH koherence může být vysvětlena tím, že VH polarizace reaguje lépe na změnu výšky porostu než VV (Bousbih et al., 2017). Bousbih et al. popisují změnu síly signálu VH/VV v závislosti na výšce, kde VV signál s rostoucí výškou vegetace klesá, a naopak VH roste. Dalšími autory, kteří

popisují vliv vegetace na rozptyl polarizací, jsou Hong et al. (2014). Ti píší, že část VH polarizace poukazuje na objemový rozptyl a část na rozptyl od země, to má za následek výraznější změny signálu při růstu vegetace. Data z roku 2016, jak již bylo popsáno výše, nebyla vhodná pro analýzu kvůli chybějícím snímkům v době výjezdu. Výsledky z roku 2017 byly validovány pomocí optických dat Sentinel-2. Výsledkem byla silná záporná korelace pro koherenci a NDVI. Dále byla provedena validace metodiky pomocí dat Sentinel-1 a terénních dat v den snímání povrchu. Výsledky potvrdily výše uvedené a to, že hodnota koherence mezi snímky po sečení vzroste. Celkem v 9 z 10 polygonů došlo k nárůstu. Jeden polygon měl nižší hodnotu pravděpodobně z důvodu, že louka byla sečena přímo v době přeletu satelitu. Další dvojice snímků na tomto polygonu již vykazovala nárůst. Změna koherence byla opět výraznější pro VH polarizaci. Dále byl proveden další terénní výjezd 2 dny před snímáním povrchu. V tomto případě došlo k nárůstu u 14 z 24 polygonů pro VH a u 11 polygonů z 24 pro VV. Výsledky jsou podobné jako u dat z roku 2017. Jedním z důvodů menšího nárůstu koherence může být převažující severovýchodní orientace svahů. V původním datasetu převažovala orientace jižní.

Tamm et al. (2016), Voormansik et al. (2015) a Zalite et al. (2016) píší, že hodnoty koherence je vhodné porovnat s meteorologickými podmínkami. Nejdůležitějším údajem jsou pak srážky. Pro sezónu 2017 byly dostupné hodinové srážky, které v žádném z termínů přímo neovlivnily sběr dat (Obrázek 9). Dalším faktorem ovlivňující koherenci může být ranní rosa, snímky byly pořizovány v 6:09 CET pro dráhu 22 a 17:55 CET pro dráhu 146. Výsledky se mezi dráhami nelišily, je pravděpodobné, že ranní rosa významně neovlivnila výsledky.

Pro data poskytnutá správou KRNAP byly výsledky méně uspokojivé. Koherence narostla (u posečených polygonů) pouze ve 48 % případů pro koherenci VH a to v průměru o 0,01. Pro VV (u posečených polygonů) pak došlo k nárůstu u 55 % případů v průměru o 0,009. Tato data ale obsahovala veškeré polygony poskytnuté správou KRNAP, dataset obsahoval polygony obsahující les, okraje vozovek, budovy. Tato data by bylo nutné případně dále

profiltrovat, jako například upravit polygony, které zasahují mimo louky. Dále by bylo vhodné odstranit polygony, které jsou příliš malé.

Koherence byla počítána pokaždé z jedné relativní dráhy (22/146). Díky tomu by nebylo nutné aplikovat terénní korekce. Následující zpracování mimo software SNAP ovšem vyžaduje data, která jsou georeferencovaná. Terénní korekce je tedy nutné aplikovat. Výsledky pro koherenci jsou podobné pro obě relativní dráhy. Díky relativně nízké sklonitosti luk (Obrázek 12) by bylo možné kombinovat obě dráhy a získat tím lepší časové rozlišení. Fúzí různých orbit se zabývali například Small et. al. (1995) nebo Sircar et. al. (2002). Hodnoty koherence se nelišily mezi družicemi Sentinel-1a a Sentinel-1b a kombinování by nemělo být problematické, stejný názor mají například Schubert et. al. (2017).

Dosavadní postupy zaměřené na využití polarizace (Voormansik et al., 2015) počítají s plně polarimetrickým produktem. Výsledky těchto studií poukázaly na nárůst polarimetrických parametrů (entropie, polarimetrický úhel alfa) po sečení louky. Sentinel-1 využívá pouze duální polarizace, její využití je zdokumentováno například Shanem (2007). Shane píše, že duální polarizace je vhodná spíše na hrubou klasifikaci krajinného pokryvu než na detailnější analýzy. Shane použil PALSAR, využívající L-band, který penetruje více vegetaci než C-band Sentinelu. V této práci byla použita dekompozice H-A- $\alpha$ . Entropie narostla průměrně o 0,0004, jedná se o nevýznamnou změnu. Voormansik et al. (2015) zaznamenali změnu u plně polarimetrického produktu RADARSAR-2 v průměru o 0,03, pro TerraSAR-X zaznamenali nárůst entropie o 0,07. Polarimetrický úhel alfa narostl v našem případě průměrně o 0,187 °, opět se jedná o nízkou hodnotu. Voormansik zaznamenal změnu v průměru o 6,5 ° pro RADARSAT-2 a 7 ° pro TerraSAR-X. Nízké hodnoty naměřené námi jsou pravděpodobně způsobené použitím duální polarizace C-band, u které dostupná dekompozice není uzpůsobena této problematice.

Do budoucna by bylo vhodné najít jiný způsob dekompozice pro duální polarimetrická data. V současnosti je pouze jeden způsob, jak data rozložit, a ten popisuje právě Shane (2007).

Dalším zkoumaným objektem byly pastvy. Vývoj byl objeven pouze u 13 polygonů z 263. Byl očekáván podobný průběh jako u sečení. Pokud se zvěř vypustí na pastvu, lze očekávat postupné spasení/udusání. To ale probíhá s různou rychlostí. Vývoj u 13 polygonů byl takový, že po vypuštění zvěře došlo k mírnému poklesu koherence a mezi dalšími daty docházelo k postupnému nárůstu (VH i VV). Po této fázi vzestupu došlo k poklesu koherence, to může být způsobeno přesunem zvěře na jinou pastvu nebo rychlým růstem vegetace. Do budoucna by bylo vhodné použít data o jiné vlnové délce. Navrhují použít X-band, který by měl být citlivější na změny vegetace. Například Zalite et al. (2016) zaznamenali vyšší hodnoty koherence mezi snímky (rozsah přibližně 0,5-0,8) pro louky. V našem případě jsme měli hodnoty v rozmezí (0,2-0,6), tyto nižší hodnoty jsou způsobeny právě využitím C-band Sentinel-1.

Důvodem, proč se neprokázal očekávaný vývoj koherence u ostatních polygonů může také být způsoben velikostí polygonu (příliš malá/velká plocha). Dále druhem zvěře, skot by mohl mít jiný dopad na pastvu než například ovce. Bude záležet i na počtu zvířat na daném místě, jak rychle dokáží trávu udusat/spásat. Bylo by vhodné mít podrobnější, ideálně kontinuální data o jednotlivých pastvinách.

Dalším postupem může být například automatizace celého procesu generování koherence pro jednotlivé polygony. Na základě změn se pak pokusit o klasifikaci. Změna koherence může být způsobena i jinými jevy, než je sečení. Proto by pro klasifikaci bylo vhodné použít další parametry, díky kterým by sečení bylo možné rozpoznat. Bohužel se zjistilo, že polarimetrické parametry (entropie, úhel alfa) jsou v rámci Sentinel-1 nevhodné. Pokud by ale informace, že došlo ke změně koherence, byla dostačující, lze postup v této práci aplikovat pro lokalitu KRNAP v letní sezóně. Je ale možné, že změna koherence může být způsobena i jinými vlivy. Ať již vnějšími – například srážky nebo vítr. Bylo by vhodné zjistit vliv srážek na hodnoty koherence. Současné studie se zabývají vlivem atmosféry na odrazivost (Doviak et. al., 1993) nebo na konkrétní interferometrické aplikace (Zebker et. al., 1997). Dalším faktorem, který by mohl ovlivnit hodnoty koherence je koregistrace snímků. Například Nitti et. al. (2011) píše, že koherence se může

výrazně lišit ve sklonitém terénu nebo při delších interferometrických základnách ( $>300$  m). V takových případech koregistrace pomocí výškového modelu (*DEM assisted corregistration*) dosahuje přesnější výsledků než námi zvolená metoda. Vybrané louky v Krkonošském národním parku ovšem měly mírný sklon a interferometrická základna nepřesáhla 150 m. Díky těmto vlivům by pak mohl být zaznamenán nárůst/pokles koherence i když louka nebyla sečena.

## 7. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo najít a určit závislost mezi koherencí interferogramu a sečením luk / pastvami. Dále pak najít a určit závislost mezi polarimetrickými parametry (entropie, polarimetrický úhel alfa) a sečením/pastvami. Výzkum byl proveden v lokalitě Krkonošského národního parku.

Výzkum byl rozdělen dle jednotlivých výjezdů. Nejdříve byl porovnáván rok 2016, kde ale nebyla k dispozici data z družice Sentinel-1 kvůli výpadku snímání. Pro rok 2017 se podařilo prokázat závislost mezi sečením a změnou koherence. Validace proběhla pomocí dat Sentinel-2 a Sentinel-1.

Další částí bylo pak porovnání dat poskytnutých správou KRNAP. Zde se závislost změny koherence na sečení prokázat nepodařilo.

Polarimetrické parametry v této práci závislé na sečení luk a pastvě nebyly v žádném ze zkoumaných případů.

Problematika je velice obsáhlá, bohužel neexistuje mnoho metod a přístupů, které se tímto problémem zabývají. Tato práce zcela jistě nevyčerpává všechny možnosti, které poskytují data Sentinel-1 pro tuto problematiku.

## Přehled použité literatury

1. ANDREAS, Reigber. Introduction to Imaging Radar [online]. In: . DLR, 2015, s. 1-52 [cit. 2017-11-18].
2. BAMLER, R., HARTL P., Synthetic aperture radar interferometry, 1998.
3. BALATKA, Břetislav a Jan KALVODA. Geomorfologické členění reliéfu Čech. Praha: Kartografie Praha, 2006. ISBN 80-7011-913-6.
4. BOUSBIH, Safa, Mehrez ZRIBI, Zohra LILI-CHABAANE, Nicolas BAGHDADI, Mohammad EL HAJJ, Qi GAO a Bernard MOUGENOT. Potential of Sentinel-1 Radar Data for the Assessment of Soil and Cereal Cover Parameters. Sensors [online]. 2017, 17(11), 2617- [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.3390/s17112617. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2617>
5. CAPSTICK, D. a R. HARRIS. The effects of speckle reduction on classification of ERS SAR data. International Journal of Remote Sensing [online]. 2001, 22(18), 3627-3641 [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.1080/01431160110056506. ISSN 0143-1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160110056506>
6. DAINTITH, J. A dictionary of physics. 5th ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-280628-9.
7. DOBROVOLNÝ, P. (1998): Dálkový průzkum Země, Digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita v Brně, Brno, 210 s.
8. Doppler Centroid Algorithms. In: ESA (2018b) [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/doppler-centroid-algorithms>
9. DOVIAK, R. J. a Dušan S. ZRNIĆ. Doppler radar and weather observations. 2nd ed., Dover ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2006. ISBN 0486450600.
10. ERS Overview [online]. 2011 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/ERS\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/ERS_overview)

11. ESA (2018a): SNAP Help: Návod k programu SNAP 6.0 [online]. [cit. 2018-03-04].
12. Geologie Krkonoš. Správa Krkonošského národního parku [online]. 2010 [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: <https://www.krnap.cz/geologie/>
13. HALABUK, Andrej, Matej MOJSES, Marek HALABUK a Stanislav DAVID. Towards Detection of Cutting in Hay Meadows by Using of NDVI and EVI Time Series. Remote Sensing [online]. 2015, 7(5), 6107-6132 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.3390/rs70506107. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/5/6107>
14. HANSSEN, R. a R. BAMLER. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 37(1), 318-321 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1109/36.739168. ISSN 01962892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/739168/>
15. HOBBS, Stephen, Weng ANG a Cedric SEYNAT. Wind and rain effects on SAR backscatter from crops. 1998.
16. HONG, Sang-Hoon a Shimon WADOWINSKI. Double-Bounce Component in Cross-Polarimetric SAR From a New Scattering Target Decomposition. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 2014, 52(6), 3039-3051 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2268853. ISSN 0196-2892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6562800/>
17. LANKOANDE, O., M.M. HAYAT a B. SANTHANAM. Speckle modeling and reduction in synthetic aperture radar imagery. In: IEEE International Conference on Image Processing 2005 [online]. IEEE, 2005, III-317 [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.1109/ICIP.2005.1530392. ISBN 0-7803-9134-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1530392>
18. Lee, J. S., Pottier, E. (2009). Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. CRC Press. Taylor & Francis Group
19. LEE, Hyeonju, Dale J. BREMER, Kemin SU a Steven J. KEELEY. Relationships between Normalized Difference Vegetation Index and Visual Quality in Turfgrasses: Effects of Mowing Height. Crop

- Science[online]. 2011, **51**(1), 323- [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.2135/cropsci2010.05.0296. ISSN 1435-0653. Dostupné z: <https://www.crops.org/publications/cs/abstracts/51/1/323>
20. LEONG KEONG KWOH, EE CHIEN CHANG, W.C.A. HENG a HOCK LIM. DTM generation from 35-day repeat pass ERS-1 interferometry. In: Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [online]. IEEE, 1994, s. 2288-2290 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1109/IGARSS.1994.399716. ISBN 0-7803-1497-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/399716/>
21. LI, F.K. a R.M. GOLDSTEIN. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 28(1), 88-97 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1109/36.45749. ISSN 01962892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/45749/>
22. LILLESAND, Thomas M., Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN. Remote sensing and image interpretation. Seventh edition. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1-118-34328-9.
23. López-Martínez, C., Ferro-Famil, L., Pottier, E. TUTORIAL ON SAR POLARIMETRY. Polarimetry Tutorial. PolSARPro. January 2005. ESA
24. OUTRATA, David. Určování vlhkosti půdy s využitím radarových dat
25. NITTI, Davide Oscar, Ramon F. HANSSEN, Alberto REFICE, Fabio BOVENGA a Raffaele NUTRICATO. Impact of DEM-Assisted Coregistration on High-Resolution SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 2011, 49(3), 1127-1143 [cit. 2018-07-13]. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2074204. ISSN 0196-2892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5613931/>
26. Sentinel-1 [online]. 2018 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/174787>. Vedoucí práce Přemysl Štych.
27. RAMON F. HANSSEN. Radar interferometry data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic, 2002. ISBN 9780306476334.

28. REIGBER, Andreas. Microwave and Radar Remote Sensing. German Aerospace Center, Microwave and Radar Institute, 2015.
29. RICHARDS, J. A. Remote sensing with imaging radar. New York: Springer, 2009. Signals and communication technology. ISBN 978-3-642-02019-3.
30. Rufino, G., Moccia, A. and Esposito, S., 1996. DEM generation by means of ERS tandem data Proceedings of the Fringe '96 Workshop ERS SAR, Zurich, Switzerland.
31. RUFINO, G., A. MOCCIA a S. ESPOSITO. DEM generation by means of ERS tandem data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 36(6), 1905-1912 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1109/36.729362. ISSN 01962892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/729362/>
32. Satellite frequency bands. ESA [online]. 2013 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: [http://m.esa.int/Our\\_Activities/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/Satellite\\_frequency\\_bands](http://m.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands)
33. SELVA, Jesus a Juan M. LOPEZ-SANCHEZ. Image coregistration in SAR interferometry only by means of arithmetic operations. In: 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 4493-4496 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423854. ISBN 978-1-4244-1211-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4423854/>
34. Sentinel-1. ESA [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>
35. SHANE, Cloude. The dual polarisation entropy/alpha decompositions: A PALSAR case study. ESA, 2007.
36. SCHEUCHL, B, R CAVES, I CUMMING a G STAPLES. H/A/ $\alpha$ -based classification of sea ice using SAR polarimetry. 23rd Canadian Symposium on Remote sensIng. 2001.

37. SCHOU, Jesper, and Henning Skriver. Restoration of polarimetric SAR images using simulated annealing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39.9 (2001): 2005-2016.
38. SCHUBERT, Adrian, Nuno MIRANDA, Dirk GEUDTNER a David SMALL. Sentinel-1A/B Combined Product Geolocation Accuracy. *Remote Sensing* [online]. 2017, 9(6), 607- [cit. 2018-07-11]. DOI: 10.3390/rs9060607. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/6/607>
39. SIRCAR, S, C RANDELL, D POWER, J YOU DEN, E GIL a P HAN. Lateral Ground Movement Estimation from Space borne Radar by Differential Interferometry. *Remote Sensing Group C-CORE: Memorial University St. Johns NF Canada*, 2002.
40. SMALL, David, Francesco HOLECZ a Daniel NIESCH. COMBINATION OF ASCENDING / DESCENDING ERS-I INSAR DATA FOR CALIBRATION AND VALIDATION. *Remote Sensing Laboratories: University of Ziirich*, 1995.
41. SLAČÍKOVÁ, Jana. Hodnocení vlivu interpolace při koregistraci radarových snímků [online]. 2010 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/81943>. Vedoucí práce Markéta Potůčková.
42. STAVROULA, Kanakaki. Amazon rainforest deforestation study using polarimetry methods. *Harokopio University of Athens, Greece*, 2016.
43. SWART, L. M. Th. Spectral filtering and oversampling for radar interferometry, 2000. *Alphen aan den Rijn: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen – Afdeling Geodesie*, 2000. 166 s.
44. TAMM, Tanel, Karlis ZALITE, Kaupo VOORMANSIK a Liina TALGRE. Relating Sentinel-1 Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands. *Remote Sensing*. 2016, 8(10), 802-. DOI: 10.3390/rs8100802. ISSN 2072-4292. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/10/802>
45. TanDEM-X. DLR [online]. 2016 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: [http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151\\_read-19509/#/gallery/24516](http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-19509/#/gallery/24516)
46. TURKAR, Varsha a Y. S. RAO. Effect of Different Target Decomposition Techniques on Classification Accuracy for Polarimetric SAR Data [online].

- s. 138 [cit. 2017-06-25]. DOI: 10.1007/978-3-642-20209-4\_19. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20209-4\\_19](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20209-4_19)
47. URBAN, P. Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií, disertační práce, Praha, 2005.
48. VOORMANSIK, Kaupo, Thomas JAGDHUBER, Karlis ZALITE, Mart NOORMA a Irena HAJNSEK. Observations of Cutting Practices in Agricultural Grasslands Using Polarimetric SAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016, 9(4), 1382-1396. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2503773. ISSN 1939-1404. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7360150/>
49. Wang, X.; Ge, L.; Li, X. Pasture Monitoring Using SAR with COSMO-SkyMed, ENVISAT ASAR, and ALOS PALSAR in Otway, Australia. Remote Sens. **2013**, 5, 3611-3636.
50. WAGNER, Wolfgang, Carsten PATHE, Marcela DOUBKOVA, et al. Temporal Stability of Soil Moisture and Radar Backscatter Observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). Sensors [online]. 2008, 8(12), 1174-1197 [cit. 2017-06-24]. DOI: 10.3390/s80201174. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/2/1174>
51. ZALITE, Karlis, Oleg ANTROPOV, Jaan PRAKS, Kaupo VOORMANSIK a Mart NOORMA. Monitoring of Agricultural Grasslands With Time Series of X-Band Repeat-Pass Interferometric SAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016, 9(8), 3687-3697. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2478120. ISSN 1939-1404. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7302559/>
52. ZEBKER, Howard A., Paul A. ROSEN a Scott HENSLEY. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. Journal of Geophysical Research: Solid Earth [online]. 1997, 102(B4), 7547-7563 [cit. 2018-07-13]. DOI: 10.1029/96JB03804. ISSN 01480227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/96JB03804>

# Přílohy

## Příloha 1 – Použité snímky – relativní dráha 22

| Datum      | Čas - UTC | Název souboru                                                       |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 05.05.2016 | 05:08     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160505T050857_20160505T050924_011119_010C29_AF47 |
| 17.05.2016 | 05:08     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160517T050849_20160517T050916_011294_0111CF_76FA |
| 29.05.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160529T050907_20160529T050935_011469_011790_0B3A |
| 10.06.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160610T050907_20160610T050935_011644_011D09_925A |
| 04.07.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160704T050909_20160704T050937_011994_012824_D868 |
| 16.07.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160716T050909_20160716T050937_012169_012DE3_E04B |
| 28.07.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160728T050910_20160728T050938_012344_013391_C20F |
| 09.08.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160809T050911_20160809T050939_012519_01396F_2921 |
| 21.08.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160821T050911_20160821T050939_012694_013F33_83D6 |
| 02.09.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160902T050912_20160902T050940_012869_014526_D793 |
| 14.09.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160914T050912_20160914T050940_013044_014AB8_362F |
| 26.09.2016 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160926T050913_20160926T050941_013219_01508D_C599 |

## Příloha 2 - Použité snímky – relativní dráha 146

| Datum      | Čas - UTC | Název souboru                                                       |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 01.05.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160501T165131_20160501T165159_011068_010A9B_7031 |
| 13.05.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160513T165110_20160513T165137_011243_011022_32DF |
| 25.05.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160525T165110_20160525T165137_011418_0115DF_D8DF |
| 06.06.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160606T165120_20160606T165147_011593_011B6D_40C4 |
| 12.07.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160712T165122_20160712T165149_012118_012C3E_E0FE |
| 24.07.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160724T165123_20160724T165150_012293_0131E4_2518 |
| 05.08.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160805T165124_20160805T165151_012468_0137BE_96D6 |
| 17.08.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160817T165124_20160817T165151_012643_013D7A_A9D2 |
| 29.08.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160829T165134_20160829T165201_012818_01436B_CE07 |
| 10.09.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160910T165125_20160910T165152_012993_01490C_EF09 |
| 22.09.2016 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20160922T165126_20160922T165153_013168_014EE2_2EC1 |

### Příloha 3 - Použité snímky – relativní dráha 22

| Datum      | Čas - UTC | Název souboru                                                       |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 12.05.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170512T050911_20170512T050939_016544_01B6D2_6BB8 |
| 24.05.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170524T050916_20170524T050943_016719_01BC39_0EC7 |
| 05.06.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170605T050917_20170605T050944_016894_01C1AC_95F0 |
| 17.06.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170617T050918_20170617T050945_017069_01C711_4989 |
| 29.06.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170629T050919_20170629T050946_017244_01CC55_3159 |
| 11.07.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170711T050919_20170711T050946_017419_01D1A6_2D01 |
| 23.07.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170723T050920_20170723T050947_017594_01D6EE_8C15 |
| 04.08.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170804T050921_20170804T050948_017769_01DC50_8EE5 |
| 16.08.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170816T050921_20170816T050948_017944_01E19D_B082 |
| 28.08.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170828T050922_20170828T050949_018119_01E6E9_0815 |
| 09.09.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170909T050922_20170909T050949_018294_01EC47_DD17 |
| 21.09.2017 | 05:09     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170921T050923_20170921T050950_018469_01F1A9_04A4 |
| 06.05.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170506T050836_20170506T050903_005473_009978_DB8A |
| 18.05.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170518T050837_20170518T050904_005648_009E42_AFC4 |
| 30.05.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170530T050815_20170530T050842_005823_00A351_ACF7 |
| 11.06.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170611T050816_20170611T050843_005998_00A86B_27BB |
| 23.06.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170623T050817_20170623T050844_006173_00AD83_F38C |
| 05.07.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170705T050817_20170705T050845_006348_00B282_FDE2 |
| 17.07.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170717T050818_20170717T050845_006523_00B783_6651 |
| 29.07.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170729T050819_20170729T050846_006698_00BC7D_9076 |
| 10.08.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170810T050820_20170810T050847_006873_00C190_7DCE |
| 22.08.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170822T050820_20170822T050847_007048_00C6A3_96B0 |
| 03.09.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170903T050821_20170903T050848_007223_00CBB8_BC5B |
| 15.09.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170915T050821_20170915T050848_007398_00D0DC_5E68 |
| 27.09.2017 | 05:08     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170927T050822_20170927T050849_007573_00D5E4_D8E5 |

#### Příloha 4 - Použité snímky – relativní dráha 146

| Datum      | Čas - UTC | Název souboru                                                       |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 08.05.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170508T165124_20170508T165151_016493_01B54C_842D |
| 20.05.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170520T165125_20170520T165152_016668_01BAA5_893B |
| 01.06.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170601T165131_20170601T165158_016843_01C00B_9139 |
| 13.06.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170613T165132_20170613T165159_017018_01C579_60CE |
| 25.06.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170625T165132_20170625T165159_017193_01CAD0_BCB8 |
| 07.07.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170707T165133_20170707T165200_017368_01D011_7398 |
| 19.07.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170719T165134_20170719T165201_017543_01D56C_F5DA |
| 12.08.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170812T165135_20170812T165202_017893_01E016_9D06 |
| 24.08.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170824T165136_20170824T165203_018068_01E560_130E |
| 05.09.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170905T165136_20170905T165203_018243_01EAB4_A7F5 |
| 17.09.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170917T165137_20170917T165204_018418_01F028_0C75 |
| 29.09.2017 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20170929T165137_20170929T165204_018593_01F57F_5D59 |
| 02.05.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170502T165051_20170502T165118_005422_009812_1764 |
| 14.05.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170514T165052_20170514T165119_005597_009CDA_ACA5 |
| 26.05.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170526T165052_20170526T165119_005772_00A1DD_8E85 |
| 07.06.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170607T165050_20170607T165117_005947_00A6EF_1437 |
| 19.06.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170619T165051_20170619T165118_006122_00AC13_A560 |
| 01.07.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170701T165052_20170701T165118_006297_00B124_730F |
| 13.07.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170713T165052_20170713T165119_006472_00B613_1664 |
| 25.07.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170725T165053_20170725T165120_006647_00BB10_B03D |
| 06.08.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170806T165054_20170806T165121_006822_00C01B_1FBC |
| 18.08.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170818T165054_20170818T165121_006997_00C53A_453F |
| 30.08.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170830T165055_20170830T165122_007172_00CA41_CFD2 |
| 11.09.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170911T165055_20170911T165122_007347_00CF69_EA2A |
| 23.09.2017 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20170923T165056_20170923T165123_007522_00D47B_60BD |

# Příloha 5 - Použité snímky – relativní dráha 146

| Datum      | Čas - UTC | Název souboru                                                       |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 21.05.2018 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20180521T165056_20180521T165123_011022_014316_A853 |
| 27.05.2018 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20180527T165137_20180527T165204_022093_026364_A557 |
| 02.06.2018 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20180602T165056_20180602T165123_011197_0148C0_959C |
| 08.06.2018 | 16:51     | S1A_IW_SLC__1SDV_20180608T165138_20180608T165205_022268_0268E3_D586 |
| 14.06.2018 | 16:50     | S1B_IW_SLC__1SDV_20180614T165057_20180614T165124_011372_014E28_E089 |
| 20.06.2018 | 16:50     | S1A_IW_SLC__1SDV_20180620T165138_20180620T165205_022443_026E39_B10A |

## Příloha 6 – Skript pro výpočet zonální statistiky v R

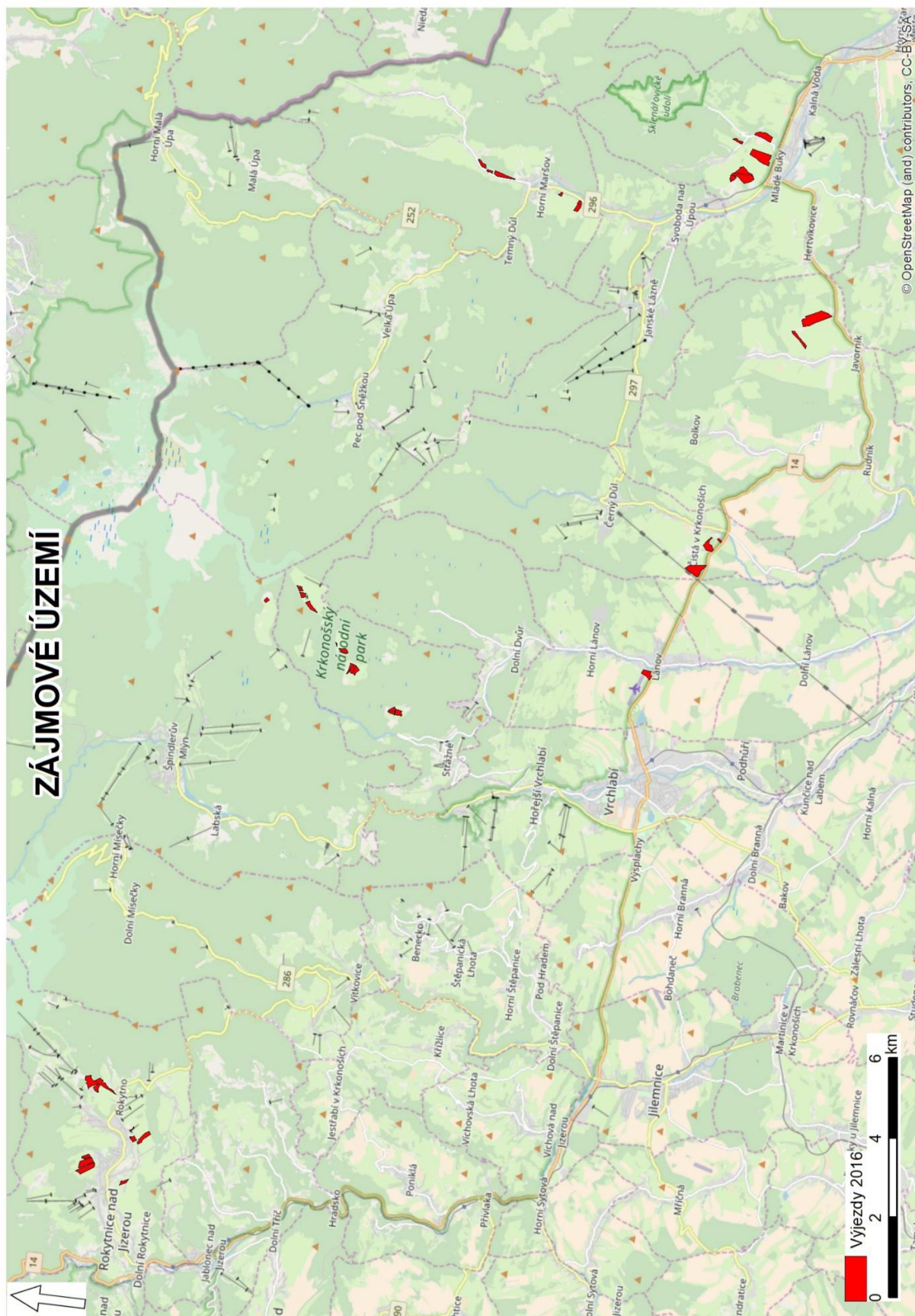
```
1. #import required libraries
2. library(maptools)
3. library(raster)
4. library(openxlsx)
5.
6.
7. #list files (in this case raster TIFFs)
8. dir <- 'path_to_files'
9. grids <- list.files(dir, pattern = "*.tif$")
10.
11. #check the number of files in the raster list (grids)
12. length <- length(grids)
13.
14. #read-in the polygon shapefile
15. poly <- readShapePoly("path_to_polygons")
16.
17. #extract raster cell count within each polygon area (poly)
18. for (i in 1:length(grids)){
19.
20.   #create stack of single raster
21.   s <- stack(raster(paste0(dir, grids[i])), band = 1)
22.
23.   #zonal statistics over every polygon, fun = function for statistics
24.   ex <- extract(s, poly, fun=mad, na.rm=TRUE, df=TRUE)
25.   df <- data.frame(ex)
26.   name <- paste0(substr(grids[i],1,4), '_mad_entropy.xlsx')
27.
28.   #write result to xsls file
29.   write.xlsx(df, file = paste0(dir,name))
30.
31. }
```

## Příloha 7 – Skript na spojení všech statistik do jednoho souboru v Pythonu

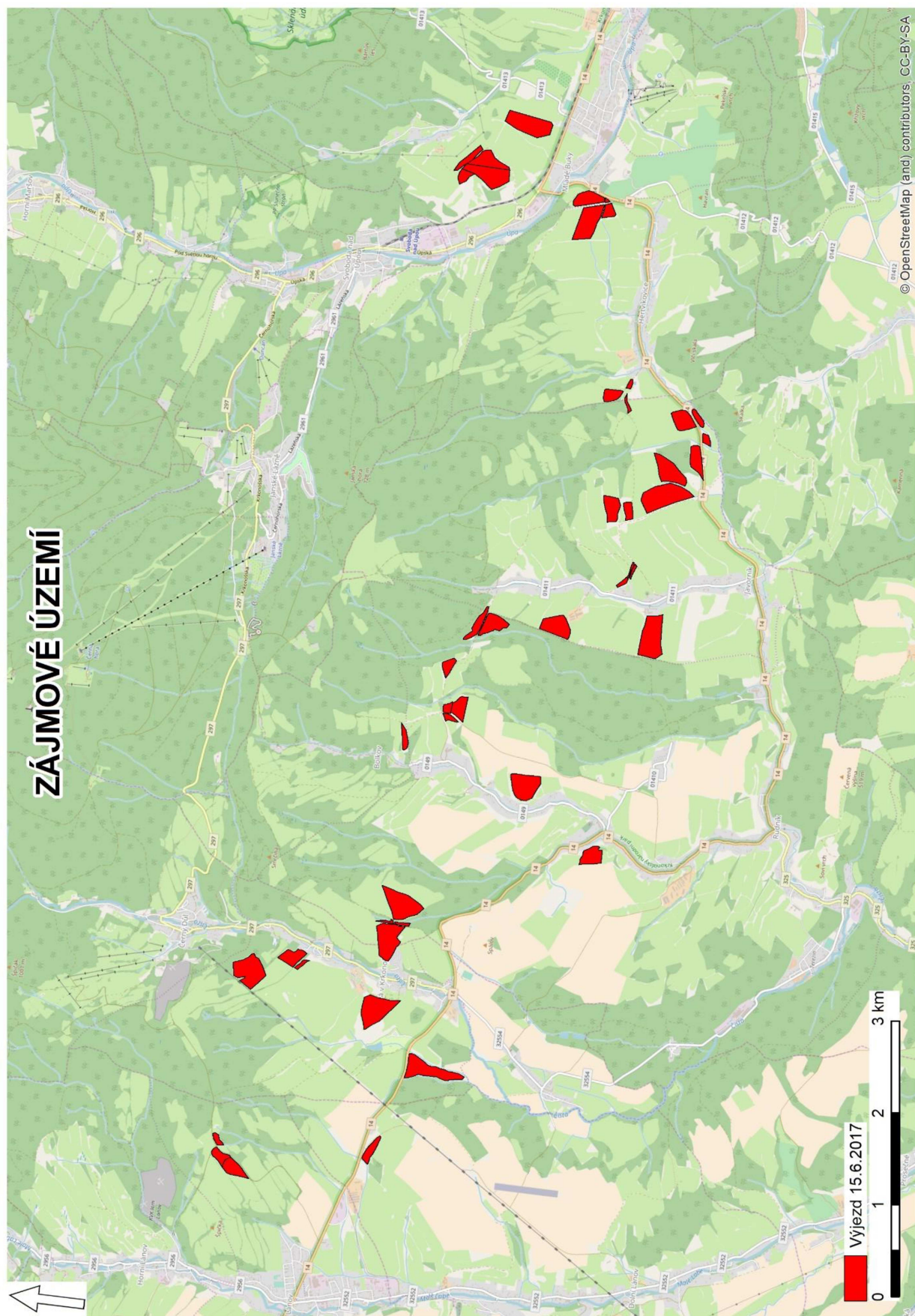
```
1. import pandas as pd
2. import os
3. import glob
4.
5. #choosing track, method and statistics
6. track = 't' + '22'
7. meth = 'alpha'
8. stat = 'median'
9.
10. #choosing path to files and outputs
11. path = r'path_to_files'+track22+'\\'+meth+'\\'+stat+'\\'
12. output = r'path_for_output'+track22+'\\'
13. method = track+'_'+stat+'_'+meth
14.
15. #find all xlsx files
16. files = glob.glob(path + '*.xlsx')
17.
18.
19. #pattern file for output
20. df = pd.read_excel(r'path_to_example'+example.xlsx')
21.
22. #cycle for merging all xlsx files
23. for f in files:
24.     data = pd.read_excel(f)
25.
26.     data.set_index("ID")
27.
28.     df = df.merge(data)
29.
30. #transposing data for better readability
31. df = df.transpose()
32. df = df.iloc[1:]
33.
34. #write file to xslx
35. writer = pd.ExcelWriter(output + method + '.xlsx')
36. df.to_excel(writer, 'Sheet1')
37. writer.save()
```

## Příloha 8 – Skript na spojení všech statistik po jednotlivých polygonech v Pythonu

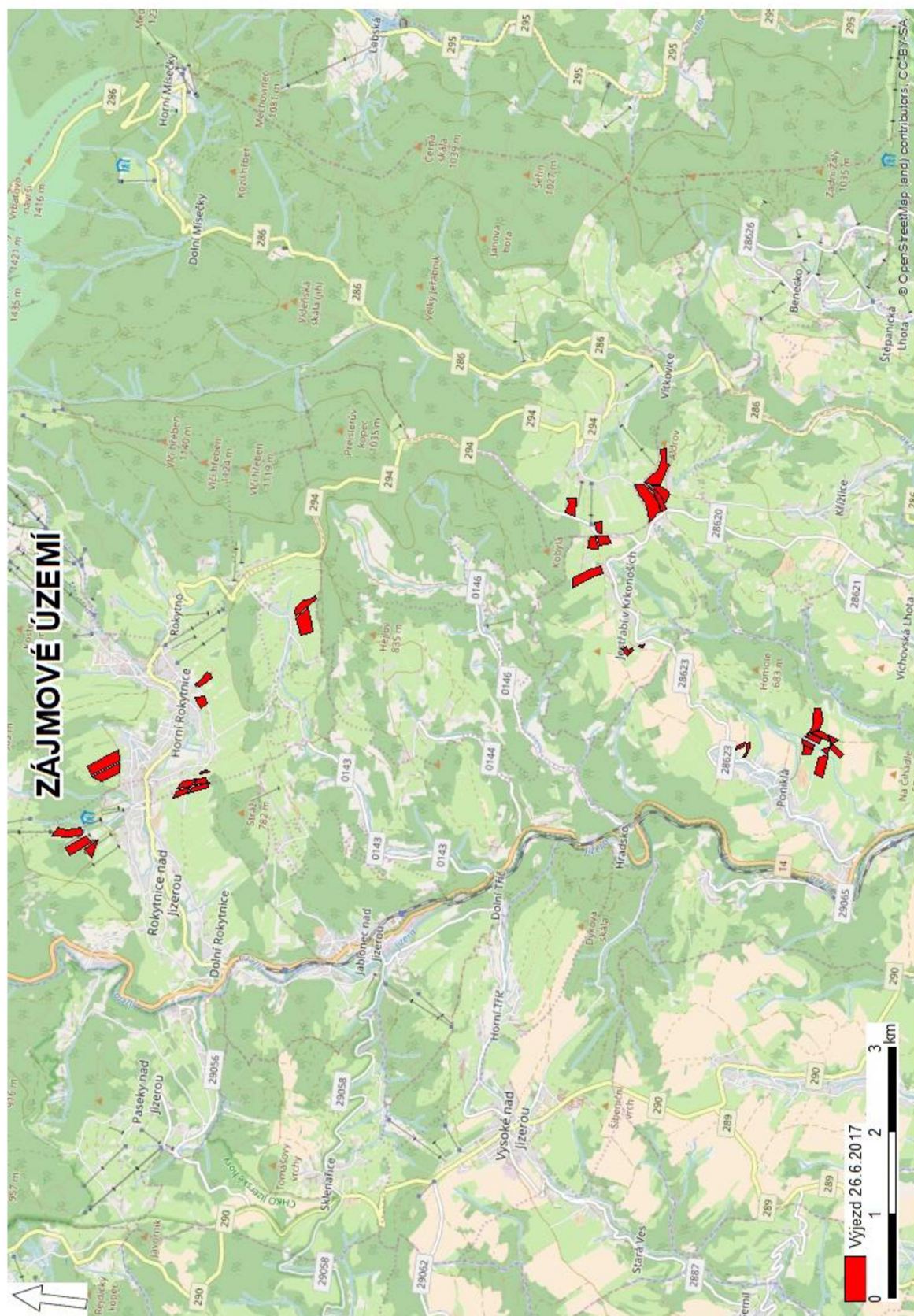
```
1. import pandas as pd
2. import glob
3.
4. #input path
5. path = r"path_to_files"
6.
7. #what parameter are we working on
8. id = "entropy"
9.
10. #find all files with the parameter
11. same = glob.glob(path + "*" + id + "*")
12.
13. dfs = []
14.
15. writer = pd.ExcelWriter(path + "t146_" + id + '_output.xlsx')
16.
17. #read all statistics into separate data frames
18. df1= pd.read_excel(same[1], index_col = 0)
19. df2= pd.read_excel(same[0], index_col = 0)
20. df3= pd.read_excel(same[2], index_col = 0)
21.
22. #divide file into separate sheets, one sheet
23. #for each polygon
24. for i in range(1, 47):
25.
26.     df1_1 = df1[i].to_frame()
27.     df2_1 = df2[i].to_frame()
28.     df3_1 = df3[i].to_frame()
29.
30.     df = pd.merge(pd.merge(df1_1, df2_1, left_index=True, right_index=True)
31.                   ,df3_1, left_index=True, right_index=True)
32.     df.to_excel(writer,str(i))
33.
34. writer.save()
```



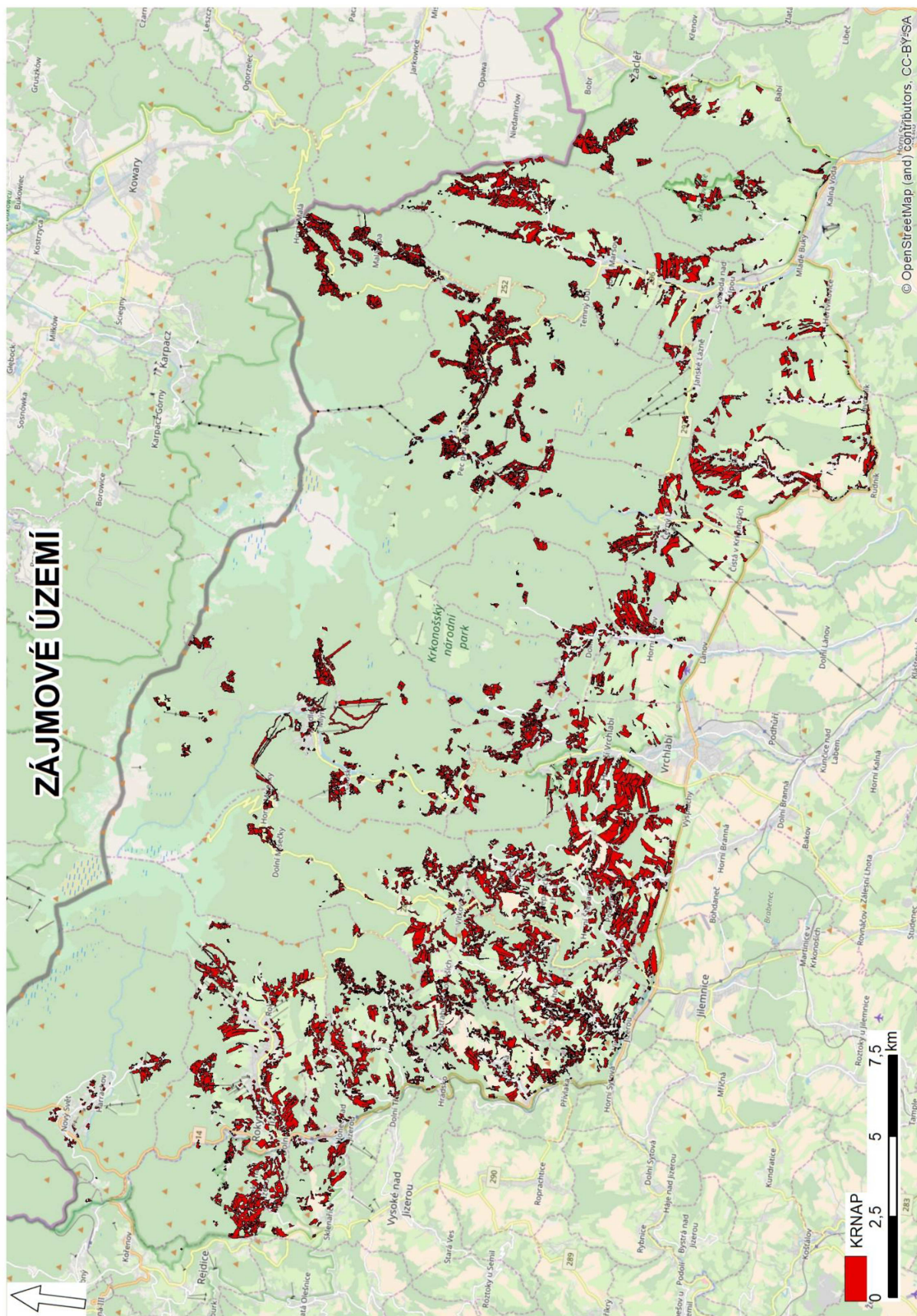
Příloha 9 – Mapované louky 2016



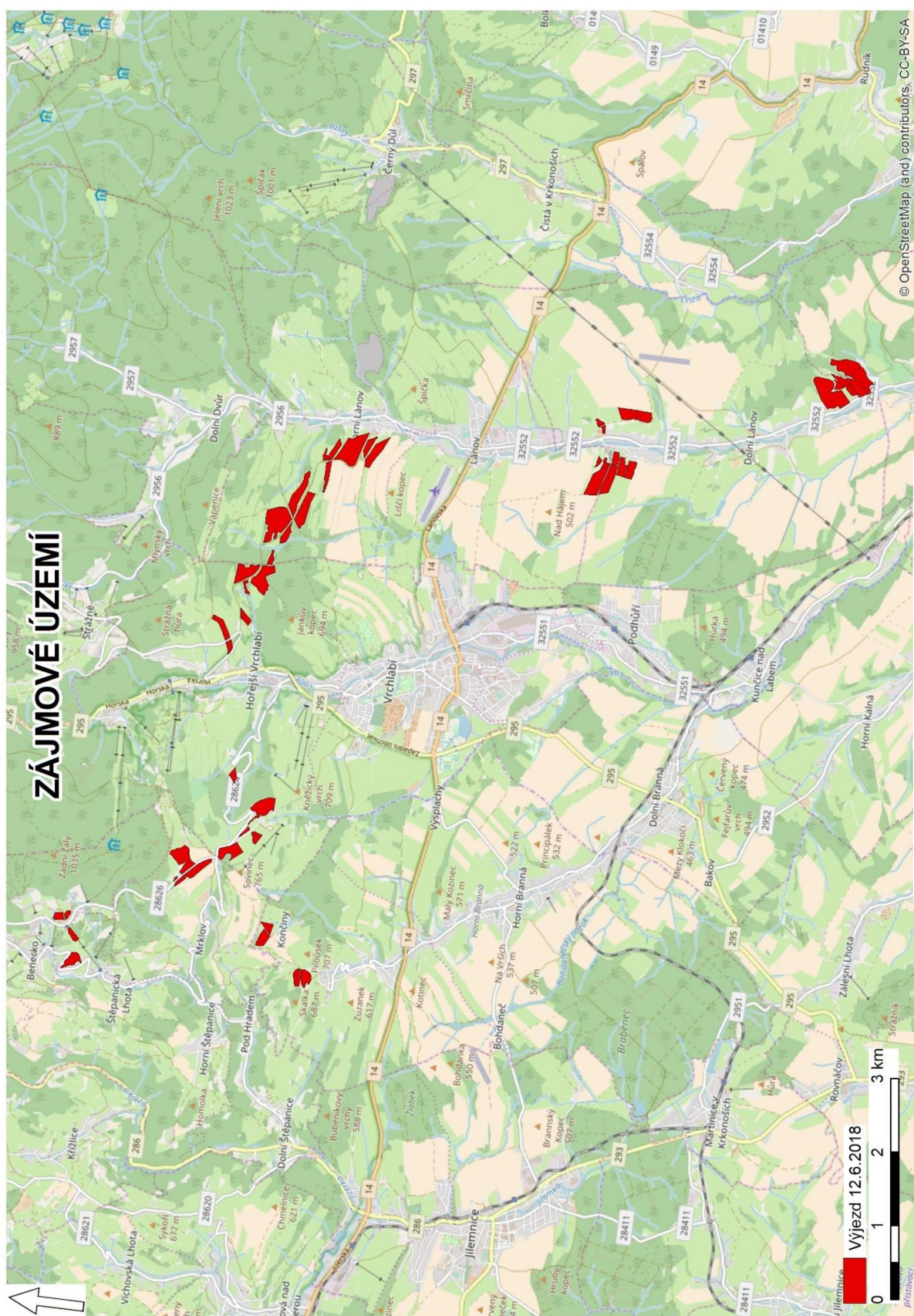
Příloha 10 – Mapované louky 15. 6. 2017



Příloha 11 – Mapované louky 26. 6. 2017



Příloha 12 – Mapované louky – KRNAP



Příloha 13 – Mapované louky 12.6.2018