

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

POSOUZENÍ SUBSIDENCE ISFAHÁNSKÉ PÁNVE
V IRÁNU NÁSLEDKEM KLESAJÍCÍ HLADINY SPODNÍ
VODY ZA POUŽITÍ METOD SATELITNÍ RADAROVÉ
INTERFEROMETRIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Mgr. Jan Kropáček, Ph.D.

Diplomant: Bc. Alžběta Šmejkalová

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Alžběta Šmejkalová

Zemědělská specializace
Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Posouzení subsidence v oblasti isfahánské pánve v Iránu jako následek klesající hladiny spodní vody za použití metod satelitní radarové interferometrie”

Název anglicky

Assessment of land subsidence in Isfahan Basin, Iran as a consequence of ground water level decline by SAR interferometry

Cíle práce

Poklesávání zemského povrchu (subsidence) je závažným problémem aridních a semiaridních oblastí světa, ve kterých dochází k nekontrolovanému čerpání podzemních vod pro využití v zemědělství, průmyslu a domácnostech. Isfahánská pánve je typickým příkladem, kde dochází ke snižování hladiny podzemních vod o desítky cm ročně. Radarová interferometrie (InSAR) je na rozdíl od bodových pozemních měření schopná podat prostorový přehled poklesů v zasažených územích. Cílem práce bude stanovit průběh poklesů pomocí dat z konstelace evropských družic Sentinel-1 pomocí radarové interferometrie.

Metodika

Zpracování dat Sentinel-1 metodou InSAR bude probíhat v následujících krocích:

1. Vyhledání a stažení dat SLC (Single Look Complex) ze serveru Copernicus
2. Výběr vhodných interferometrických párů
3. Vytvoření zpracovatelského řetězce v prostředí SNAP
4. Vypočtení interferogramů a export
5. Rozvinutí interferogramů v prostředí SNAPHU
6. Výpočet poklesu povrchu ve směru pohledu pro vzestupnou i sestupnou dráhu
7. Převod na vertikální posun
8. Interpretace výsledků, diskuse

Doporučený rozsah práce

40-60 stran

Klíčová slova

subsidence, radarová interferometrie, podzemní voda, Isfahán

Doporučené zdroje informací

Haghshenas Haghighi, Mahmud, and Mahdi Motagh. "Nation-wide Detection and Measurement of Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Iran." EGU General Assembly Conference Abstracts. Vol. 20. 2018.

Motagh, Mahdi, et al. "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements." Engineering geology 218 (2017): 134-151.

Pepe, Antonio, and Fabiana Calò. "A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of earth's surface displacements." Applied Sciences 7.12 (2017): 1264.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Mgr. Jan Kropáček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2020

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2020

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Posouzení subsidence v oblasti isfahánské pánve v Iránu, jako následek klesající hladiny spodní vody za použití metod satelitní radarové interferometrie“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze 25.3.2020

.....

Alžběta Šmejkalová

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat doc. Mgr. Janu Kropáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a cenné rady.

Ráda bych také poděkovala rodičům za podporu v průběhu celého studia vysoké školy a mé sestře za velkou trpělivost, konzultace a pomoc při zpracování práce.

ABSTRAKT

Práce se zabývá monitoringem poklesu zemského povrchu v oblasti Isfahánské pánve v důsledku masivního čerpání podzemní vody. Pánev jako součást povodí Zayandeh Rud se nachází ve středním Iránu a jedná se převážně o semi-aridní oblast. Díky špatnému vodnímu managementu, společně s nárůstem počtu obyvatel a změnou klimatu, se v posledních letech potýká s vážným nedostatkem vody. Z tohoto důvodu se mnohem více orientuje na podzemní zdroje, což s sebou přináší hrozbu trvalého poklesu hladiny podzemní vody a následné zhutnění vodonosného systému. Analýza posuzuje reakci systému na tento trend, prostřednictvím metody radarové interferometrie, konkrétně diferenční interferometrie s využitím externího digitálního modelu povrchu pro odstranění topografické složky fáze. Využita jsou volně dostupná data projektu Copernicus pořízená družicí Sentinel-1. V prostředí SNAP jsou zpracovány 3 sady snímků, o 10 interferometrických párech, pokrývající území přes 41000 km². Pro výpočet vertikálního posunu jsou využity snímky vzestupných i sestupných drah o časové základně interferometrických párů 360 dní mezi lety 2018 a 2019. Výsledkem analýzy je mapa prostorového rozložení poklesů v zájmové oblasti. Tímto postupem bylo možné identifikovat lokality, kde dochází k vyšší míře deformace a vytvořit tak odrazový můstek pro podrobnější lokální studie.

Klíčová slova: subsidence, radarová interferometrie, podzemní voda, Isfahán

ABSTRACT

This work focuses on monitoring land subsidence in the area of the Isfahan plain, resulting from the massive extraction of groundwater. As a part of the Zayandeh Rud basin, the plain is a mostly semi-arid area located in central Iran. Due to bad water management, combined with increasing population and climate change, serious water scarcity problems have been growing in recent years. Therefore, the orientation is largely on groundwater resources, which amplifies the risk of permanent decrease of groundwater levels and associated compaction of the aquifer. The analysis investigates the reaction of the system to this trend, using the methods of radar interferometry, specifically differential interferometry combined with an external digital surface model to remove the topographic phase component. The used data are freely accessible acquisitions from the Copernicus Sentinel-1 satellite. In the SNAP environment, 3 sets of images consisting of 10 interferometric pairs each, were processed to cover an area of approx. 41 000 km². For the calculation of the vertical displacement, images from both ascending and descending passes were used, with a temporal baseline of the interferometric pairs 360 days between 2018 and 2019. The result of the analysis is a map of the spatial distribution of annual vertical surface displacement. Using this methodology, it was possible to identify locations with the occurrence of higher subsidence rates and therefore, to prepare a baseline for a more detailed study of these selected locations.

Key words: land subsidence, radar interferometry, groundwater, Isfahan

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍLE	2
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY	3
3.1	Deformace zemského povrchu v důsledku lidské činnosti	3
3.2	Metody monitorování deformací Zemského povrchu.....	4
3.3	Radar se syntetickou aperturou (SAR).....	5
3.3.1	Základní informace a vývoj	5
3.3.2	Princip a geometrie SAR	6
3.4	SAR interferometrie (InSAR).....	9
3.4.1	Základní princip InSAR.....	9
3.4.2	InSAR metoda pro měření výšky topografie.....	10
3.4.3	InSAR metoda pro monitoring změn terénu	11
3.5	Diferenciální interferometrie (DInSAR).....	11
3.6	Vybrané studie časové analýzy InSAR	13
4	ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ.....	14
4.1	Povodí Zayandeh Rud	14
5	DATA.....	17
5.1	Satelitní data – Sentinel 1	17
5.1.1	Sentinel 1	17
5.1.2	Snímací režimy.....	18
5.1.3	Polarizace.....	19
5.1.4	Dostupnost Dat.....	19
5.1.5	Datové produkty a režimy zpracování.....	19
5.1.6	SLC produkty IW režimu	20
5.2	Výběr dat pro zpracování.....	20
6	METODIKA.....	24
6.1	Předzpracování dat – Krok 1	26
6.2	Interferometrické zpracování - Krok 2	27
6.2.1	Koregistrace a ESD	27
6.2.2	Formování interferogramu	27
6.3	Krok 3 – Diferenční interferogram	28
6.3.1	Odstranění topografické fáze.....	28
6.4	Krok 4	29
6.4.1	Multilooking	29
6.4.2	Filtrace fáze.....	29
6.5	Krok 5 - SNAPHU	30

6.5.1	Rozbalení fáze	30
6.6	Krok 6.....	31
6.6.1	Terénní korekce.....	31
6.6.2	Displacement - výpočet vektoru posunu ve směru LOS.....	31
6.7	Krok 7 – postprocessing	32
6.7.1	Časová normalizace dat	32
6.7.2	Výpočet posunu v trojrozměrném vektoru.....	32
6.7.3	Normalizace na základě vztažných bodů.....	34
6.7.4	Průměrování.....	34
6.7.5	Vytvoření mozaiky	34
7	VÝSLEDKY.....	35
7.1	Koherence.....	35
7.2	Vertikální posun zemského povrchu	36
8	DISKUZE.....	39
8.1	Zhodnocení použitých nástrojů a metody.....	39
8.2	Zhodnocení míry deformace	40
9	ZÁVĚR	41
10	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	42
11	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	46

1 ÚVOD

Mnoho zemí, zejména v semiaridních a vyprahlých regionech, je stále více závislé na zdrojích podzemní vody ať už pro zemědělství, průmysl nebo domácnosti. Důvodem je nedostatek či špatné hospodaření s jinými vodními zdroji. Nadměrné čerpání podzemní vody však způsobuje výrazný pokles hladiny podzemní vody a přináší tak na první pohled nevině vyhlížející geologickou a hydrogeologickou hrozbu.

Dopady jsou pozorovatelné na mnoha místech naší planety ve formě trhlin nebo propadů terénu v lokálním i regionálním měřítku. Tato tzv. „Subsidence“ je nyní zaznamenávána hlavně ve velkých městech, kde je spotřeba vody největší a změny snadno a rychle viditelné. Jako příklady nejvyšších detekovaných subsidencí lze uvést města Jakarta, Mexico City, Shanghai, Tokyo, Teherán nebo Houston. Více pozornosti je nicméně stále věnováno spíše viditelnému poškození infrastruktury či budov než nevratným hydrogeologickým nebo topografickým změnám.

Irán je zemí, která se potýká s rozsáhlými problémy v oblasti vodních zdrojů. Její omezení jsou různorodá v závislosti na poloze či období. Zájmové území Isfahánské pánve má však určitá specifika. Oblast je zásobována velkým vodním zdrojem řekou Zayandeh Rud, která však díky neefektivnímu hospodaření a špatnému vodnímu managementu přichází o ohromné množství vody. Následkem špatné distribuce vzniká v některých oblastech velký nedostatek vody, což nutí místní k masivnímu čerpání podzemních zdrojů (Mohajeri and Horlemann, 2017). S tím však mohou souviset zmíněná rizika poklesu terénu následkem zhutnění vodonosných systémů.

Ekonomický rozvoj a změna klimatu budou nadále zvyšovat nároky na množství vody. Ta však není nevyčerpatelným zdrojem a nelze tak hledat řešení pouze v čerpání podpovrchových zásob. Monitorování změn a hlubší porozumění je tedy zásadní pro předvídání následků a zvažování rizik, která s čerpáním souvisí. Samotné rozšíření povědomí a tlak na zlepšení vodního managementu může být velkým přínosem.

Tato studie se zaměřuje na vyhodnocení poklesu povrchu s využitím metody satelitní radarové interferometrie (InSAR). Jedná se o nástroj vhodný pro monitoring dočasných i trvalých reakcí vodonosných vrstev na změny úrovně podzemní vody. Výhoda využití satelitních dat se nachází hlavně v možnosti monitorovat změny kontinuálně pro takto rozlehlé a hůře dostupné oblasti s vysokou přesností a nízkými náklady.

2 CÍLE

Pro získání potřebných znalostí a přehledu o problematice, následně pro vhodný výběr dat a metody zpracování, jsou v rámci literární rešerše a úvodu do problematiky stanoveny následující cíle:

- Nastudování problematiky subsidence v důsledku masivního čerpání podzemní vody
- Nastudování problematiky radaru a metod radarové interferometrie (InSAR) a diferenciální radarové interferometrie (DInSAR)
- Podrobnější nastudování vybraných metod a nástrojů používaných pro monitoring deformací zemského povrchu

Dalším cílem, který je důležitý pro pochopení místních podmínek a souvislostí, je:

- Seznámení se studovaným územím Isfahánské pánve, převážně v oblasti vodního managementu, místních vodních zdrojů, zemědělství, základních geografických, geologických, hydrogeologických a klimatických podmínek

Pro analytickou část práce, zabývající se zpracováním dat, byly stanoveny cíle následující:

- Výběr vhodných dat Sentinel-1 pro zpracování metodou DInSAR
- Vytvoření vlastního zpracovatelského řetězce
- Zpracování dat metodou DInSAR
- Výpočet poklesů terénu v zájmové oblasti
- Vytvoření mapy prostorového rozložení poklesů v zájmové oblasti
- Identifikace nejvíce postižených lokalit

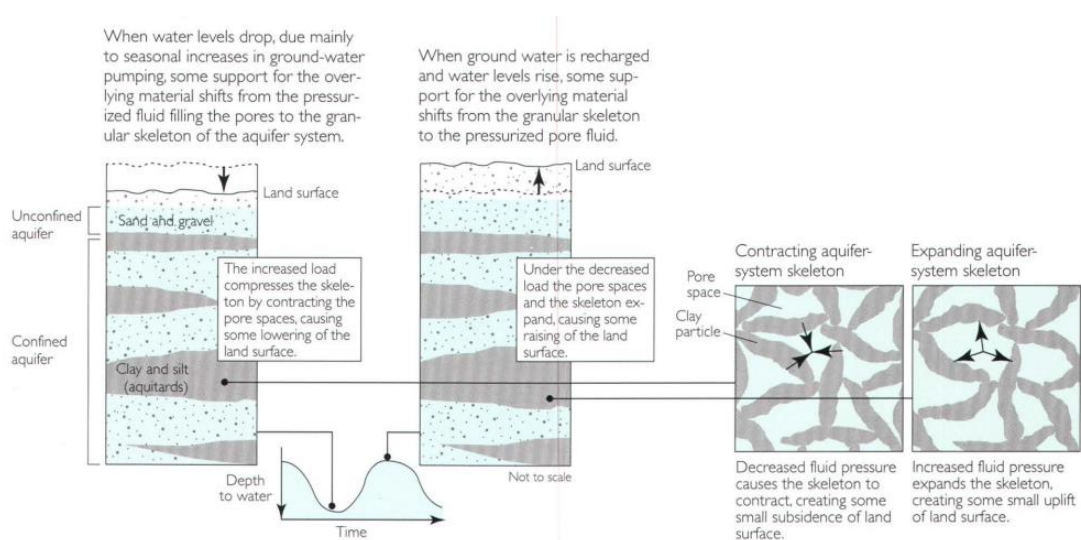
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY

3.1 Deformace zemského povrchu v důsledku lidské činnosti

Termín subsidence označuje dlouhodobé klesání (sedání) zemského povrchu. Jedná se pouze o pohyb vertikální – pozvolný či náhlý. Horizontální pohyb není na daném místě žádný nebo je minimální. Tyto změny mohou být různého měřítka na malých, ale i na velmi rozsáhlých plochách.

Pokles terénu může být způsoben přírodními jevy, jako je zemětřesení, zhutnění půdy, krasovění nebo například eroze. Tato práce se však věnuje změnám a deformacím způsobeným činností člověka, jejichž měřítko je srovnatelné, v mnoha případech i převyšující deformace přírodní (NOAA, 2019). Časté antropogenní příčiny jsou těžba ropy, těžba zemního plynu a dalších nerostných surovin. Více jak 80% těchto deformací - „Land subsidence“ je však způsobeno masivním čerpáním podzemní vody (USGS, 2016).

Riziko deformace zemského povrchu je převážně u nezpevněných, sedimentovaných hornin. Důvodem je vztah mezi úrovní hladiny podzemní vody a kompresí vodonosného systému. Jak je vidět na obr.3.1, pokud tlak vody v pórech a prasklinách vodonosné vrstvy klesne následkem snížení hladiny podzemní vody, kostra vodonosného systému komprimuje. Naopak pokud je množství vody znovu doplněno a je obnovena původní hladina, tlak je přenesen opět do tekutiny a kostra systému expanduje. Takto střídavě prochází kompresí a expanzí, stejně jak klesá a stoupá tlak vody. Pokud tedy systém má možnost se znovu doplnit, jedná se o elastickou deformaci vodonosného systému, jejíž následkem jsou plně obnovitelné sezónní poklesy terénu. K takovéto změně dochází obvykle ve všech kolektorových systémech v reakci na sezónní čerpání podzemní vody (Galloway, Jones and Ingebritsen, 1999).

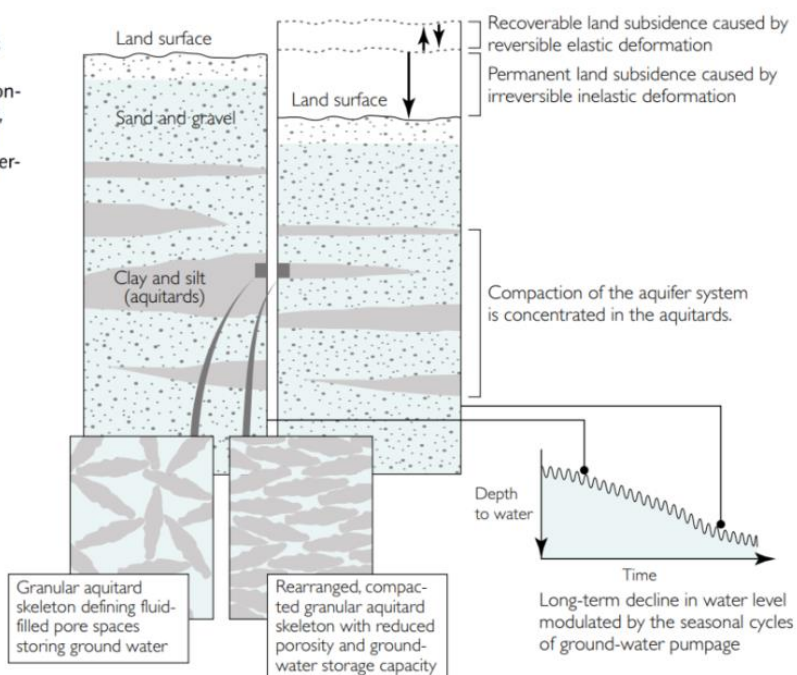


Obr.3.1 Elastická deformace vodonosného systému (Galloway, Jones and Ingebritsen, 1999)

Dlouhodobé odběry velkého množství vody však způsobují pokles úrovně hladiny podzemní vody v řádu metrů až desítek metrů. Pokud odčerpané množství přesahuje schopnost daného vodonosného systému na tuto změnu reagovat či jí odolávat, může nastat pokles nevratný (Faunt *et al.*, 2016; USGS, 2016). Úroveň namáhání systému,

po jejímž překročení může docházet ke ztuhnutí a následné subsidenci, se nazývá překonsolidační napětí (Galloway, Jones and Ingebritsen, 1999; Todd and Mays, 2005).

When long-term pumping lowers ground-water levels and raises stresses on the aquitards beyond the preconsolidation-stress thresholds, the aquitards compact and the land surface subsides permanently.



Obr.3.2 Ztuhnutí vodonosné vrstvy - trvalá deformace (Galloway, Jones and Ingebritsen, 1999)

Proces vedoucí ke ztuhnutí, a tedy neelastické deformaci, je vysvětlen na obr.3.2. Dochází k tomu když zvodnělá vrstva šterku a písku, jenž je primárním zdrojem, obsahuje i lože jemnozrnných částic (jílů, hlín a prachu). Tyto jemnozrnné sedimenty obsahují ploché talířovité částice, jejichž náhodná orientace zajišťuje jejich pórovitost. Snížený tlak v systému při nízké hladině podzemní vody, tedy mimo pórů hrubozrnných částic, vytlačuje vodu i z tohoto ložiska. Voda již nepřenáší zatížení a pokud toto napětí dlouhodobě přetrvává, pórovitost klesne a vrstva se stlačí. Stlačení pak trvale snižuje skladovací kapacitu systému a může způsobit nevratný pokles terénu (Domenico and Mifflin, 1965; Todd and Mays, 2005).

3.2 Metody monitorování deformací Zemského povrchu

Měření nadmořské výšky, výšky hladiny podzemní vody či rozsah ztuhnutí vodonosného systému je zásadní pro pochopení procesů zodpovědných za deformace zemského povrchu. Hodnoty jsou získávány různými metodami měření. Nejstarší metodou je nivelace, která jako pozemní metoda využívá pro určení výškových rozdílů vztažnou vodorovnou rovinu. Dále se pro detekci výškových rozdílů využívá GPS, CGPS (*continuous* GPS) a z dálkového průzkumu metoda blízké fotogrammetrie a radarové interferometrie (InSAR). Ztuhňování systému zvodní je pak měřeno extenzometry. Tyto přístroje měří ztuhňování a rozšiřování aquiferového systému a poskytují data, která mohou pomoci lépe pochopit rychlost, rozsah a hloubku, ve kterých dochází k deformaci (*Measuring and Monitoring | USGS.gov*, 2018).

Nejpřesnější měření se obvykle provádí pomocí nivelace a extenzometrů. Nejméně naopak bývá využití GPS, neboť tato metoda neumožňuje zaznamenávání menších

rozsahů deformací z důvodu šumu. Výšková změna zde musí být větší než očekávaná chyba měření a je tedy nutné prodloužit rozestupy sběru dat v závislosti na míře poklesu (USGS, 2018b). Metody CGPS a InSAR se v této škále pohybují někde uprostřed.

Pozemní měření mohou být tedy přesnější a detailnější, jsou však prostorově řidká. Provádějí se pouze bodově na několika určených místech a není tedy možné dosáhnout takové hustoty jako u satelitního snímání. Novou metodou pro plošnou detekci deformací je tzv. blízká fotogrammetrie, metoda která využívá optické snímání bezpilotních systému (UAV). Jedná se o relativně přesnou a rychlou metodu. Omezena je plochou snímání v závislosti na dosahu dronu a používá se tedy spíše pro lokální deformace. Frekvence a způsob měření proto závisí na cílech studie, míře poklesu, rozsahu oblasti a dalších hodnotách.

Výhody InSAR se oproti předchozím metodám nachází především v možnosti monitorovat změny kontinuálně, nezávisle na počasí, pro velká a špatně dostupná území. Je možné využít data snímání v minulosti a vytvářet tak delší a podrobnější časové analýzy. Metoda také umožňuje lepší automatizaci zpracování dat a menší časovou a finanční náročnost (USGS, 2018a).

3.3 Radar se syntetickou aperturou (SAR)

3.3.1 Základní informace a vývoj

Radarové systémy jsou využívány od 40. let 20. století k detekci objektů, určení jejich polohy a vzdálenosti. Termín RADAR je tedy anglickým akronymem *RADio Detection And Ranging*. Tento aktivní systém je založen na vysílání krátkého pulzu mikrovlnného signálu a následné zaznamenávání navracené části signálu odraženého od snímaných objektů. Systémy mohou být umístěny na povrchu země, nebo mimo něj – nejčastěji na palubě letadla nebo vesmírné družice. Dělí se na nezobrazující, které jsou využívány v meteorologii, pro řízení dopravy, navigační účely apod. a zobrazující systémy, které vytváří obrazový záznam (Dobrovolný, 1998).

Do 50. let byly používány zobrazující radary systému SLAR (*Side Looking Airborne* – letecký radar z pohledu ze strany). Tento tzv. Radar se skutečnou aperturou (*Real Aperture Radar*) bylo možné využívat pouze na letadlových nosičích. Systém pořizoval záznam po straně nosiče a byl označován jako boční radar. Z této boční konstrukce ale plyne dvojitý prostorové rozlišení, a to jak ve směru příčném (kolmém dráze letu) tak i ve směru podélném (ve směru letu). Délka pulzu určuje rozlišení v příčném směru a šířka vyslaného paprsku ve směru podélném. Prostorové rozlišení ve směru letu (azimutální) je tedy závislé na vzdálenosti od cíle pozorování a délce antény (Dobrovolný, 1998). Z tohoto důvodu se SLAR systémy vyznačovaly velmi nízkým azimutálním rozlišením, což bylo zásadní nevýhodou pro další rozvoj. V roce 1951 (patentováno 1954) Carl Wiley překonal toto omezení vynálezem koherentního radaru a zaostřením pomocí Dopplerova efektu, které vedlo ke zlepšení azimutálního rozlišení. Tento koncept byl následně rozšířen na princip radaru se syntetickou aperturou (SAR), tak jak jej známe dnes. Stejného azimutálního rozlišení bylo tedy možné dosáhnout i s anténou poloviční délky, a to bez ohledu na vzdálenost mezi

senzorem a objektem snímání. Toto představovalo hlavní mezník pro vývoj satelitních radarových systémů (Moreira *et al.*, 2013).

Vývoj systému SAR byl v 50. a 60. letech primárně orientován na vojenské účely. V 70. letech se některé systémy začaly vyvíjet i s cílem získat bio a geo-fyzikální parametry o zemském povrchu a v roce 1978 byl vypuštěn první civilní SAR satelit Seasat. Snímky pořízené z této mise ověřovaly dosavadní teorie o interferometrických metodách. Dále následovalo vypuštění satelitů ERS-1/2 (C-band) - ESA, JERS (L-Band) - JAXA a Radarsat-1(C-Band) - CSA v 90. letech. Technologie SAR systémů jako je polarimetrie, interferometrie a diferenční interferometrie byly nejvíce rozvíjeny v 80. a 90. letech. Jejich aplikace byla odstartována misí SIR-C/X-SAR (X-,C-,L-Band) - NASA a SRTM (X-,C-Band) - NASA (Moreira *et al.*, 2013). V roce 2002 ESA navázala unikátním projektem Envisat (C-Band), který dominoval jak velikostí satelitu, tak i množstvím senzorů. Satelit nesl celkem devět senzorů včetně ASAR (*Advanced Synthetic Aperture*), což umožnilo pokračovat a zlepšovat geofyzikální měření, která začala s programem ERS. Dalším následovníkem, který měl zajistit kontinuitu dat v C-Band je projekt Sentinel-1, jehož snímky jsou využívány v této studii.

V současnosti je na oběžné dráze více než 20 aktivních satelitních misí se senzorem SAR na palubě. Mnoho dalších je plánováno vypustit v blízké budoucnosti, zejména pak v komerčním sektoru (*THE CEOS DATABASE*, 2020). Všeobecně jsou SAR systémy považovány za spolehlivou, globální technologii, primárně určenou ke sledování dynamických procesů na zemském povrchu.

3.3.2 Princip a geometrie SAR

SAR je aktivní senzor, který na rozdíl od pasivních (např. optických) senzorů, nese vlastní zdroj záření a nespolečá tak na externí zdroj (Slunce). Je proto schopný pořizovat snímky jak ve dne, tak v noci. Nízké frekvence v mikrovlnné části spektra také umožňují získávání dat přes mlhu nebo oblačnost (s výjimkou velmi silných dešťů a sněžení) a nejsou tedy závislé na ročním období či počasí.

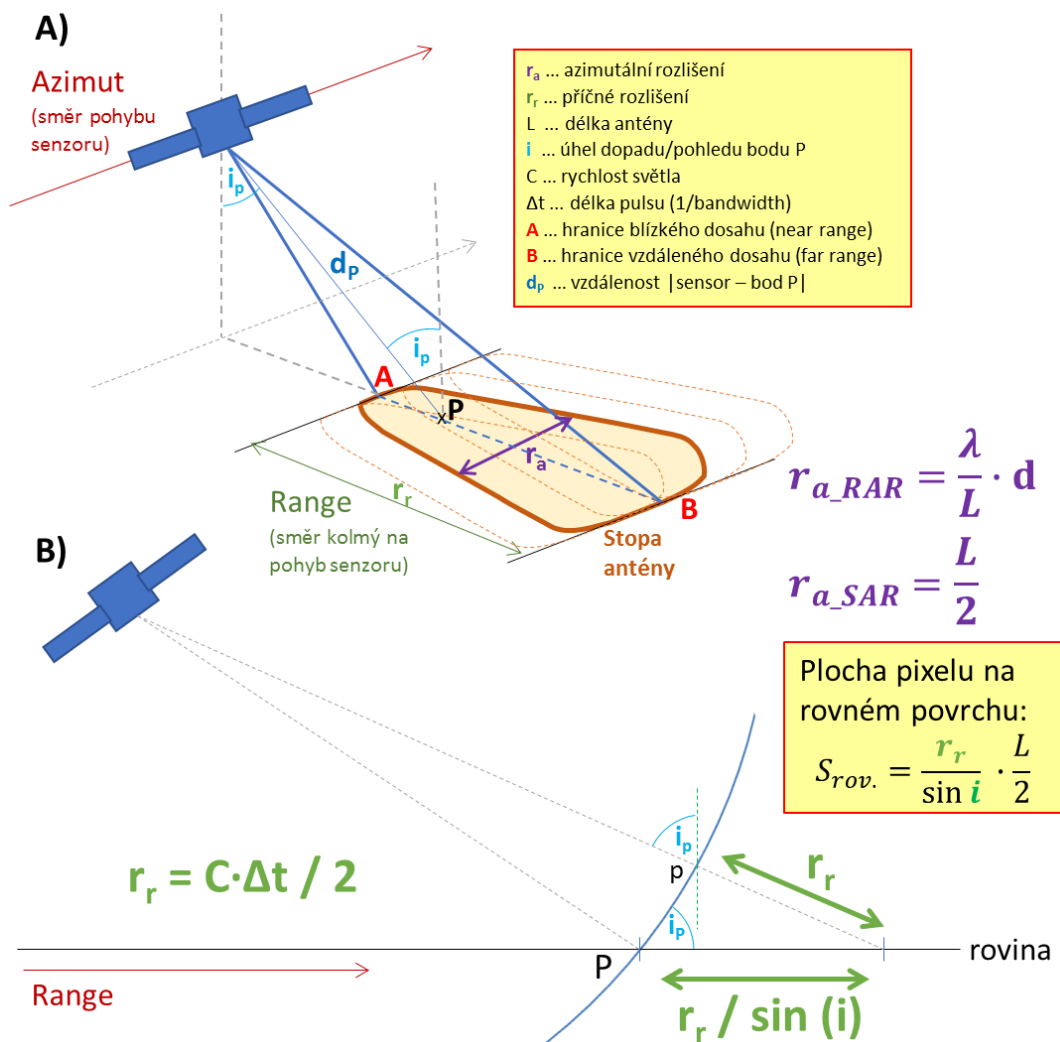
Systém vysílá pulzy elektromagnetického záření směrem k zemskému povrchu, kolmo na směr letu. Část vyslaného záření je odrazena zemským povrchem zpět k senzoru a je přijata anténou v odmlkách mezi jednotlivými pulzy. Frekvenci vysílání pulzů nazýváme opakovací frekvencí (PRF - *Pulse Repetition Frequency*) (Richards, 2009).

Parametry radarového signálu:

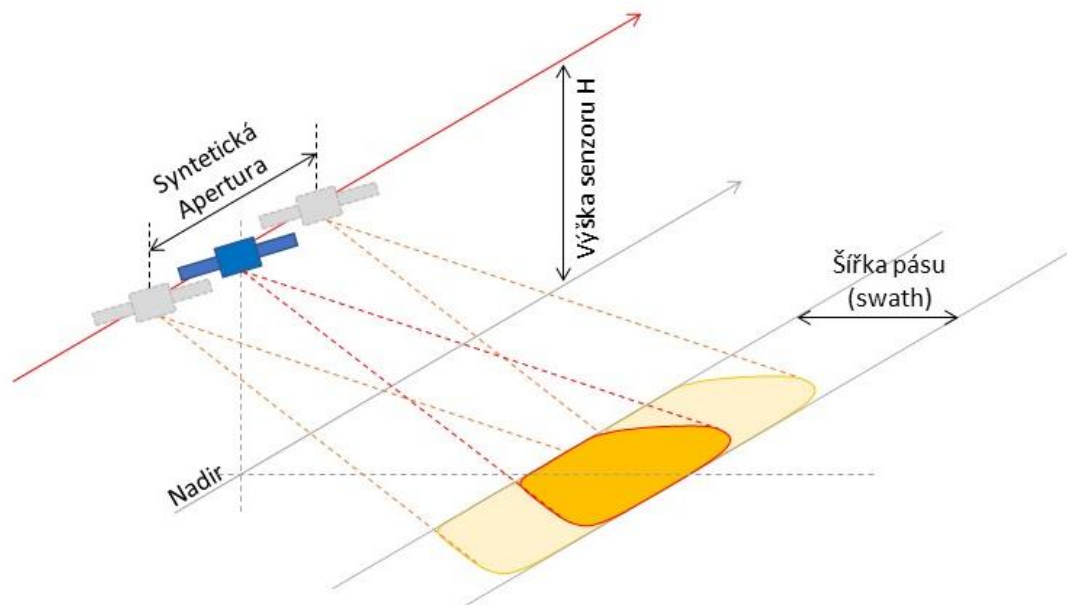
- Vlnová délka (λ) – pro SAR nejčastěji pásma L, C, X, (S). Určuje míru zeslabení signálu vlivem atmosféry a také schopnost pronikání mikrovlnného signálu povrchem.
- Polarizace – dle orientace vlny elektromagnetického záření při vysílání a přijímání – vertikální (V), horizontální (H). Vysílání a přijímání může být ve shodném režimu – HH, VV nebo v režimu rozdílné polarizace – VH, HV.
- Incidenční úhel – (úhel dopadu) úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou k rovině zemského povrchu
- Azimut – orientace snímané scény ke směru dopadajícího paprsku. Směr azimutu odpovídá směru letu.

Rozlišení ve směru letu (azimutální) - Jak již bylo řečeno, pro radarové systémy s reálnou aperturou (SLAR) se azimutální rozlišení snižuje s rostoucí vzdáleností senzoru od cíle pozorování a zvyšuje s délkou antény (neboli se zmenšuje velikost pixelu v azimutálním směru). SAR však využívá pohyb senzoru a kombinaci překrývajících se záběrů (Dobrovolný, 1998; Moreira *et al.*, 2013). Neboli, po sobě jdoucí vysílání/přijímání se zde promítne do různých pozic následkem pohybu nosiče. Koherentní kombinace signálů umožňuje konstrukci virtuální neboli syntetické apertury, která je mnohem delší než fyzická délka antény. Stručněji je možné říci, že systém používá úsek na své letové dráze pro transformaci fyzické antény na velké množství těchto antén, které jsou dále matematicky transformovány do jedné (viz obr.2.4). Toto společně s využitím Dopplerova efektu frekvenčních posunů, který umožňuje oddělit pouze střední část ze šířky paprsku, zaručuje vysoké azimutální rozlišení (Dobrovolný, 1998).

Příčné rozlišení – Zásadním parametrem radarové geometrie je tzv. úhel dopadu (i , *incidence angle*). Tento úhel určuje mimo jiné také délku stopy ve směru kolmém na směr pohybu, tzv. příčné rozlišení (obr.2.3B). V kolmém směru můžeme rozlišit objekty, které jsou od sebe vzdálené minimálně polovinu vzdálenosti, kterou urazí světlo za dobu trvání pulsu Δt . Vzdálenost mezi senzorem a bodem snímání ve směru pohledu (*line of sight – LOS*) je tzv. šikmá vzdálenost (*slant range*) d .



Obr. 3.3 Návrh geometrie snímání a pozemního prostorového rozlišení SLAR; Část A ukazuje tzv. stopu antény, tedy oblast na zemském povrchu, kterou anténa osvětluje; Část B zobrazuje geometrii kolmou ke směru pohybu senzoru.



Obr. 3.4 Princip virtuální antény SAR; šířka pásu (swath) udává rozsah snímané scény, délka závisí na aktivním provozu radaru

SAR snímek je výsledkem zpracování surových dat a představuje dvourozměrný záznam odrazivosti snímané oblasti. Je tvořen mřížkou komplexních hodnot o dvou složkách - složkou fázovou, která nese informaci o fázovém posunu a složkou amplitudy s informací o intenzitě odraženého záření (Lernerová, 2010). Vlna vyslaná od radaru musí dosáhnout bodů na zemském povrchu tzv. odražečů (*scatterers*). Různá šikmá vzdálenost odražečů od senzoru se projeví na různém zpoždění přijatého signálu. To díky téměř sinusové povaze signálu odpovídá fázovému posunu mezi odraženým a přijatým signálem. Fázový posun se značí Φ a nabývá hodnot v intervalu $<0,2\pi>$ (Karvánek, 2016). Následující rovnice popisuje fázi komplexního pixelu snímku SAR, kde R je vzdálenost od senzoru ve směru LOS a λ vlnová délka záření. Φ_{scatt} představuje fázový posun odražečů.

$$\Phi = - \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} R}_{\text{Vzdálenost}} + \underbrace{\Phi_{scatt}}_{\text{rozptyl}}$$

Radarové obrazové záznamy jsou oproti optickým specifické nejednotným měřítkem v příčném směru, které se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od antény. Dalším specifikem jsou poziční chyby snímaných objektů s vertikálním rozměrem. Dochází k tomu proto, že radar zaznamenává vzdálenosti snímaných prvků od senzoru. Boční senzor může tedy v závislosti na sklonu svahu a úhlu dopadu signálu zobrazovat výškově členitý terén s geometrickými distorzemi (Dobrovolný, 1998). Typy těchto distorzí jsou:

- *Layover* – zpětný překryv – převrácení relativní polohy vrcholu a paty,
- *Forshortening* – zhuštění signálu – svahy orientované ke směru letu, délka výrazně zkrácena
- *Shadowing* – radarový stín – odvrácené svahy, nepřichází odtud žádný signál (Sarti, 2009)

3.4 SAR interferometrie (InSAR)

3.4.1 Základní princip InSAR

SAR interferometrie (InSAR) je zobrazovací metoda, která umožňuje velmi přesné měření topografie, pohybů a deformací zemského povrchu v čase a dalších změn u podrobných charakteristik terénu. Využitím fáze koherentního radarového signálu, interferometrie změnila dálkové radarové snímání z převážně interpretační vědy na kvantitativní nástroj s aplikacemi v kartografii, geodézii, charakterizaci krajinného pokryvu, při přírodních pohromách (Rosen, 2000) nebo i v urbanismu a plánování měst.

SAR snímky obecně zobrazují intenzitu neboli amplitudu odraženého záření. Interferometrie ale využívá fázové složky. Klíčová myšlenka je založena na porovnání fáze u dvou nebo více komplexních radarových snímků, které byly pořízeny z lehce jiné pozice (z různých letových stop, z různých senzorů na jednom nosiči) nebo v jiném čase (*Gisat / Radarová interferometrie*, 2018). Jedná se tedy o použití min. dvou antén pozorujících stejnou scénu a to:

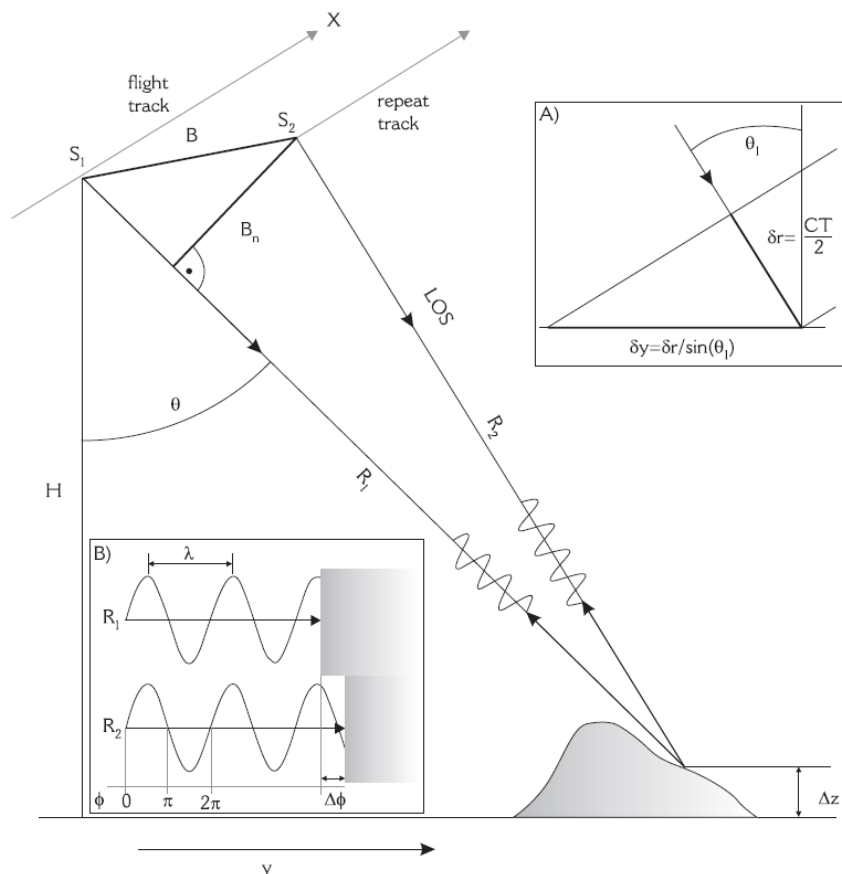
- ve stejném čase ale z jiné pozice, umístěných napříč směru dráhy – *across-track interferometry*
- v jiném čase ze stejné pozice – *along-track interferometry*
- v jiném čase a z jiné pozice na téže oběžné dráze – *repeat pass across-track interferometry* (Moreira *et al.*, 2013; Pepe and Calò, 2017)

Vzdálenost mezi dvěma nosiči senzorů se nazývá interferometrická základna. Je rozdělena na dvě složky – kolmou základnu (*perpendicular baseline*), která je průmětem do roviny, kolmým ke směru paprsku a paralelní základnu (*parallel baseline*). Časový rozestup mezi snímáním jednotlivých snímků interferometrického páru se nazývá časová základna (*temporal baseline*).

Pro interferometrii je nutné tedy mít alespoň dva SAR snímky daného území. Jsou označeny jako snímek **hlavní (master)** a snímky **vedlejší (slave)**. Z těchto snímků lze po velmi přesné koregistraci vytvořit radarový interferogram, který umožňuje získání informace o třetí dimenzi (výšce) snímané scény. Fáze každého obrazového pixelu SAR snímku totiž obsahuje informaci o rozsahu, který odpovídá zlomku vlnové délky (viz obr. 2.5 B). Takto je možné měřit malé rozdíly v dráze s vysokou přesností, nezávisle na vzdálenosti scény od senzoru.

SAR interferogram je generován komplexním násobením pixelů (tj. k nim přiřazených komplexních čísel P) prvního snímku s druhým. Amplituda pixelu interferogramu představuje hodnotu amplitudy pixelu z prvního snímku vynásobenou amplitudou odpovídajícího pixelu druhého snímku a interferometrická fáze každého pixelu představuje rozdíl fází odpovídajících si pixelů z prvního a druhého snímku (Urban, 2002). Následující rovnice představuje změnu interferometrické fáze pixelu jako rozdíl fází snímku hlavního (1) a snímku vedlejšího (2).

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \quad (\text{if } \Phi_{scatt 1} = \Phi_{scatt 2})$$



Obr.3.5 Geometrie inSAR, kde S_1, S_2 - pozice senzorů, B – interferometrická základna, B_n – kolmá základna, LOS – směr pohledu, θ – úhel dopadu; část A – pixelové rozlišení ve směru pohledu a příčné rozlišení; část B – zobrazení fázového rozdílu mezi dvěma radarovými paprsky (Rott, 2009)

Výsledný interferogram lze zobrazit ve dvou kanálech – obraz intenzity a obraz fázového rozdílu. Obraz fáze zobrazuje relativní výškové informace (ve směru LOS), vyjádřené interferometrickými proužky (*fringes*). Jejich hodnota je určena na základě tzv. „výšky nejednoznačnosti“ (*altitude of ambiguity*) H_a , která je nepřímo úměrná velikosti kolmé základny (Karvánek, 2016).

2π cyklická povaha fáze je nejednoznačná a takto „zabalená fáze“ je důvodem obtížné interpretace interferogramu. K řešení se používají techniky fázového rozbalení, které transformují relativní hodnotu fáze na absolutní přidáním správného celočíselného násobku 2π . Toto rozbalení fáze je zásadním krokem pro transformaci interferogramů na geofyzikální produkty (Rott, 2009).

Důležitým parametrem radarové interferometrie je koherence, která určuje spolehlivost interferogramu na základě korelace obou snímků a míry šumu. Pohybuje se mezi hodnotami 0 (pouze šum) až 1 (bez šumu) a je znázorněna odstíny šedi. Černá barva odpovídá hodnotám blízkým nule a jedná se o tzv. dekoherenci. Koherenci ovlivňuje jak prostorová, tak časová základna.

3.4.2 InSAR metoda pro měření výšky topografie

Mapování terénu pomocí cross-track interferometrie využívá relativní rozdíly fáze přijaté dvěma různými anténami, vyplývající ze změn výšky povrchu. Rovnice popisující změnu topografické fáze následkem změny výšky Δz je následující:

$$\Delta\Phi_{topo} = \Delta z \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin\theta}$$

Kde B_n je kolmá základna, jenž určuje citlivost interferometrické konfigurace na výšku. Tuto citlivost popisuje *height ambiguity*, která, jak bylo řečeno, je nepřímo úměrná délce B_n . Z toho plyne, že delší kolmé základny jsou citlivější pro měření topografie. Jsou však teoretické limity neboli kritická hodnota kolmé základny nad níž dochází ke snížení koherence a je obtížné rozbalení fáze (Hanssen, 2001). Tato hodnota závisí na vlnové délce a rozlišení senzoru ve směru snímání (LOS).

3.4.3 InSAR metoda pro monitoring změn terénu

Posun povrchu neboli *Surface displacement* během časového intervalu mezi dvěma akvizicemi snímků je monitorován ze stejné dráhy a stejného místa. V některých aplikacích představuje fáze posunu téměř okamžitý přesun prvků scény jako např. při deformaci zemětřesením. V jiných případech, jako je ledovcový pohyb, představuje tato fáze pomalý pohyb sledovaný v čase mezi pozorováními.

Jelikož předmětem zkoumání je pouze změna terénu, je žádoucí, aby fáze byla co nejméně ovlivněna topografií a jinými vlivy. Z tohoto důvodu je naproti předchozí metodě kolmá základna volena co nejmenší. Podrobněji je tato problematika odstranění dalších složek fáze pro přesné určení fázové složky posunu popsána v další kapitole „Diferenciální interferometrie“.

Interferometrický fázový posun způsobený posunutím povrchu, a tedy výškovou změnou, je dán rovnicí:

$$\Delta\Phi_{dis} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$$

Kde ΔR je komponent třírozměrného vektoru posunu neboli displacementu, který se promítá na směr LOS radarového paprsku. Protože frakce 2π fázového cyklu (odpovídající až $\lambda/2$) lze detekovat, umožňuje InSAR měření posunů s přesností na centimetry až milimetry. *Displacement* je však pouze relativní. Pro výpočet absolutní hodnoty posunu je nutné znát orientaci pohybového vektoru. Toho lze docílit kombinací interferometrických dat ze vzestupných a sestupných drah (Rosen, 2000; Rott, 2009).

3.5 Diferenciální interferometrie (DInSAR)

Metoda DInSAR navazuje na principy radarové interferometrie. Diferenciální neboli rozdílový přístup je založen na rozdílu fáze dvou nebo více radarových snímků a odečtení její topografické složky. Toto umožňuje monitoring vertikálního pohybu v čase bez vlivu topografie.

Následující rovnice zobrazuje fázové složky interferometrické fáze,

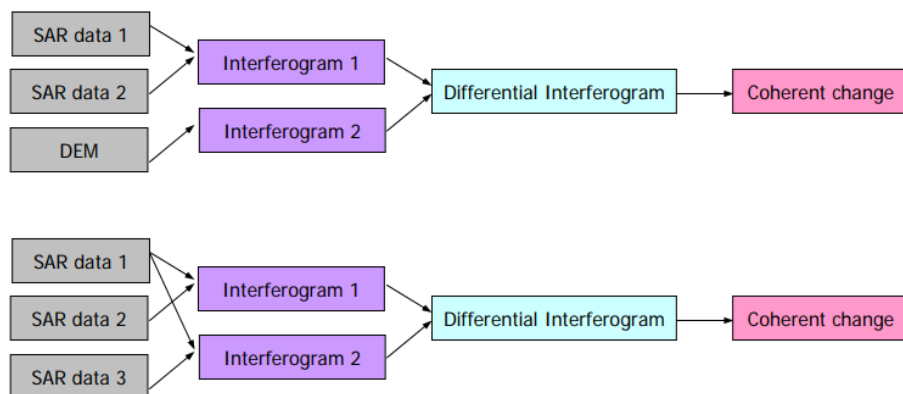
$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{flat} + \Delta\Phi_{topo} + \Delta\Phi_{dis} + \Delta\Phi_{atm}$$

kde $\Delta\Phi_{flat}$ a $\Delta\Phi_{topo}$ jsou fázové rozdíly způsobené relativní vzdáleností snímaného cíle od satelitu. *Flat-earth phase* je referenční fáze zemského povrchu bez topografie a *Topography phase* je fázová složka topografie (povrchu). $\Delta\Phi_{atm}$ určuje fázový rozdíl způsobený změnami obsahu vodní páry v atmosféře a $\Delta\Phi_{dis}$ je fázový rozdíl posunu pozorovaného cíle ve směru LOS neboli hledaná fázová složka. Pro co

nejpřesnější sledování samotného posunu, je tedy nutné pokusit se co nejlépe odečíst ostatní složky interferometrické fáze.

Referenční fáze – *Flat-earth phase* – Tuto složku fáze je možné spočítat a tedy odečíst na základě přesných orbitálních dat. Odečtení této fáze je jedním z prvních kroků v interferometrickém zpracování.

Topografická fáze – *Topography phase* – Míra neboli vliv topografické složky na interferometrickou fázi závisí na kolmé základně mezi snímky interferometrického páru. Pokud by pár měl kolmou základnu nulovou, vliv terénu by zde nebyl žádný. Toho však v praxi nelze přesně dosáhnout a v reálném případě je vždy různá od nuly a je tedy nutné ji odstranit. Existují dvě možné techniky jak toho dosáhnout. Obě vycházejí z dalšího zdroje dat, a to buď z externího modelu terénu/povrchu (DMT/DMP) nebo z další sady interferometrických dat (viz obr.2.6). Výběr metody závisí na povaze zkoumaného pohybu a kvalitě dostupných dat.



Obr.3.6 Možné varianty tvorby diferenčního interferogramu (Sarti, 2009); Dle počtu snímků se metoda rozděluje na dvou-snímkovou (two-pass), která dále využívá externí DMT nebo tří-snímkovou (three-pass).

Pokud jsou k dispozici přesné parametry DMT a přesná orbitální data, interferometrická analýza posunu terénu může být provedena pouze pomocí jednoho interferogramu. Syntetický fázový obraz topografie se vypočítá a odečte z původního interferogramu.

Atmosférická složka – Problém, který nelze vyřešit použitím jednoho interferogramu je atmosférická nejednoznačnost. Atmosféra může způsobit fázové posuny ekvivalentní posunutí povrchu až o několik centimetrů (Hanssen, 2001). Velikost atmosférických vlivů na fázi se zvyšuje s rostoucí vzdáleností napříč SAR snímkem. V lokálním měřítku se používají blízké stabilní cíle jako referenční body, které mohou pomoci atmosférické účinky snižovat. Více obecné řešení se však nabízí složením více interferogramů, za předpokladu že atmosférické vlivy jsou pouze náhodné. Koncept odstranění atmosférického vlivu na fázi je optimalizován při použití metody permanentních odražečů (Ferretti, Prati and Rocca, 2001; Rott, 2009).

Výsledky zpracování provedené technikou DInSAR výrazně ovlivňuje také výskyt fázového šumu. Zdrojem může být geometrická dekorelace (*baseline decorrelation*), ke které dochází se zvyšující se interferometrickou základnou, a tedy i zvyšujícím se fázovým rozdílem mezi dvěma SAR snímky. Pokud je tato základna příliš velká, koherence snímků je nízká a nejsou tudíž vhodné k interferometrickému zpracování. Toto omezuje množství dvojic snímků, které lze pro toto zpracování využít.

Další zdrojem šumu může být časová dekorelace, která nastává při změně odrazivých vlastností snímaného povrchu v čase. Pro použití více-obletové interferometrie je tedy zásadní stabilita fáze odraženého záření. Povrch bez porostu je tedy vhodnější k této metodě, neboť signál zůstává koherentní po dobu i několik let.

Dekorelace může být také následek překročení maximální hodnoty deformace, kterou lze detekovat. Toto maximum je způsobeno fázovou nejednoznačností radarového signálu. Proto je možné technikou DInSAR změřit posun povrchu pouze v rozsahu do poloviny vlnové délky signálu, což odpovídá jednomu fázovému cyklu (Rott, 2009).

Některé z těchto problémů metody DInSAR mohou být překonány při použití nových metod. Metody PSI (*Permanent Scatterers Interferometry*) jsou založeny na technice tzv. trvalých odražečů neboli na zpracování fázové informace z jednotlivých izolovaných objektů s vysokou koherencí v dlouhém časovém období. Tato metoda, která zpracovává takto stabilní signál, není ovlivněná atmosférickými vlivy nebo velikosti časové či prostorové základny (Ferretti, Prati and Rocca, 2001; Delgado Blasco *et al.*, 2019).

3.6 Vybrané studie časové analýzy InSAR

V roce 2008 byl zpracován první plošnější průzkum na území Iránu, který studoval dříve detekovaná území geodetickými studiemi. Byly využity snímky z projektu Envisat, mapující vybraná území s nejvyšší mírou subsidence. Jednalo se Tehran, Rafsanjan, Zarand-Kerman, Yazd-Ardakan, Kashmar, a Mashhad.

Podrobnější celoplošný monitoring probíhal v roce 2018 s cílem detekovat místa nejvíce postižená subsidencí v důsledku čerpání velkého množství podzemní vody. Studie zpracovala přes 3500 snímků Sentinel-1 z období mezi lety 2014-2017. Byla vytvořena celostátní mapa a identifikováno více než 70 zemědělských nebo urbanizovaných oblastí podléhajícím deformaci s maximálním poklesem mezi 5-30 cm/rok (Haghighi and Motagh, 2018). Tato data bohužel nejsou přístupná a nebyla tedy v této studii využita.

Na základě InSAR časové analýzy je na území Iránu zpracováno i několik lokálních studií. Pro planinu Rafsanjan v jihovýchodním Iránu byla zpracována studie monitorující změny v období od června 2004 do května 2016. Tato studie využívá data z družic Envisat, ALOS a Sentinel-1. Studie potvrzuje obecný vztah mezi mírou subsidence a poklesem hladiny spodní vody, kde pokles vede ke snížení tlaku v pórech ve vodonosné vrstvě systému a je zodpovědný za široce pozorovatelný pokles povrchu. Zaznamenává také pokles míry subsidence v posledních letech, přestože rozloha postižené oblasti zůstává téměř stejná (Motagh *et al.*, 2017).

Další studie, která zpracovává snímky provincie Yazd sousedící s provincií Isfahan, porovnává výsledky naměřené nivelací s výsledky časové analýzy DInSAR. Ukazuje také závislost subsidence na kompenzačních schopnostech dané oblasti. Prokazuje důležitost zohlednění tloušťky a hydraulických vlastností vodonosných systémů při organizaci a řízení čerpání vody, neboť oblasti, ve kterých byla míra čerpání nejvyšší, neodpovídali těm s maximální subsidencí (Amighpey and Arabi, 2016)

4 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

Pro Irán, stejně jako pro další země blízkého nebo středního východu, voda je a vždy byla vzácností a trvalým nedostatkem. Během několika mála posledních desetiletí se však z důvodu vzrůstajícího počtu obyvatelstva, urbanizace, industrializace, rozšíření zemědělství, ale i klimatických změn, země dostává do krize. Udržitelný vodní management se stává jedním z hlavních témat a obav místní společnosti. Pro pokrytí rostoucích potřeb se výrazně zvyšují nároky na zdroje podzemní vody, které s sebou však nesou rizika trvalého poklesu hladiny podzemní vody a následné subsidence místního či regionálního měřítka.

Isfahánská pánev, která je předmětem této práce, je typickým příkladem, kde dochází k masivnímu čerpání podzemní vody pro uspokojení požadavků rostoucího zemědělství. Pro ucelenost zkoumané oblasti z hlediska hydrologických a hydrogeologických poměrů, byla pro tuto studii rámcově vybrána oblast celého **povodí řeky Zayandeh Rud**. Míra a rozsah deformací terénu jsou zde posuzovány za období srpen až září 2018 a 2019.

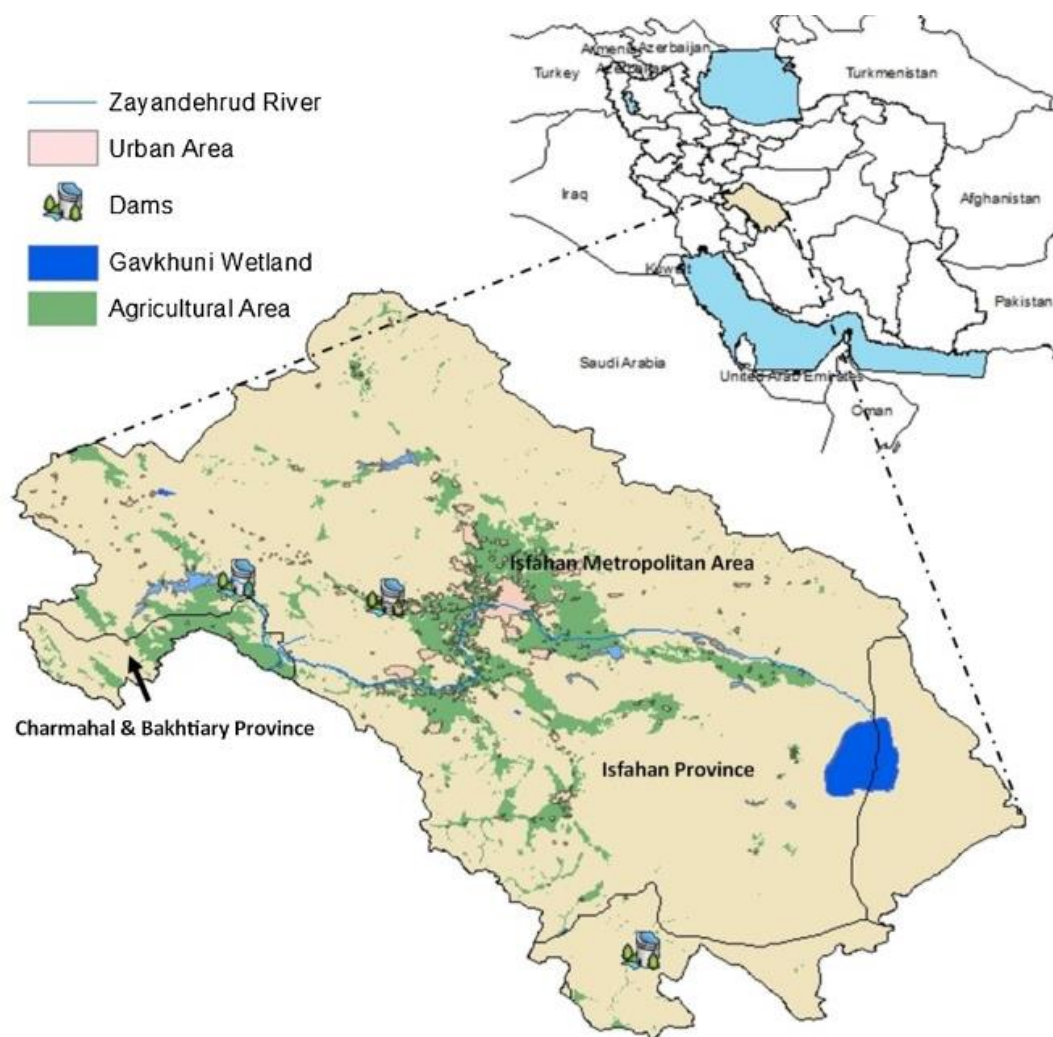
4.1 Povodí Zayandeh Rud

Uzavřené povodí Zayandeh Rud patří mezi nejdůležitější povodí v zemi, neboť poskytuje vodu pro přibližně 4,5 milionů obyvatel a 270 000 ha zemědělské půdy v centrálním Iránu (Schramm and Sattary, 2014).

Povodí má rozlohu téměř 41 500 km² a zasahuje do provincií Chahar Mahal a Isfahán. Provincie Chahar Mahal se nachází na horním toku řeky a její podíl na povodí je pouze 7% rozlohy a 1,8% populace (Mohajeri *et al.*, 2016). Většina území i obyvatel se tedy nachází na území provincie Isfahán. Mimo tyto dvě provincie Zayandehrud poskytuje pitnou vodu také pro sousední města Yazd a Kashan (Nazemi *et al.*, 2019). Největší zásobárnou vody je nádrž Chadegan, dokončená v roce 1970, která se nachází těsně nad místem, kde Zayanderud vstupuje do plošší částí povodí. Nádrž má kapacitu přibližně 1500 milionů metrů krychlových vody (Sarhadi and Soltani, 2013).

Řeka Zayandeh Rud je největší řekou středního Iránu. Pramení v pohoří Zagros ve výšce kolem 4 000 m.n.m a dále pokračuje isfahánskou pánví do aridních a semi-aridních oblastí ve výškách kolem 1500 - 1800 m.n.m. Ve střední části povodí, tedy asi po 150 km, řeka protéká hlavním městem provincie - Isfahan (1,961,260 obyv.). Dále pokračuje několika zemědělskými oblastmi až do ekologicky významné mokřadní lokality Gav-Khuni Marsh na jihovýchodní straně povodí (Gohari *et al.*, 2013). Celková délka řeky je asi 350 km.

Podnebí se v průběhu pánve výrazně liší. Roční úhrn srážek se pohybuje od 1500 mm (převážně sněhových srážek) v západní části až do 50 mm na východní straně povodí.

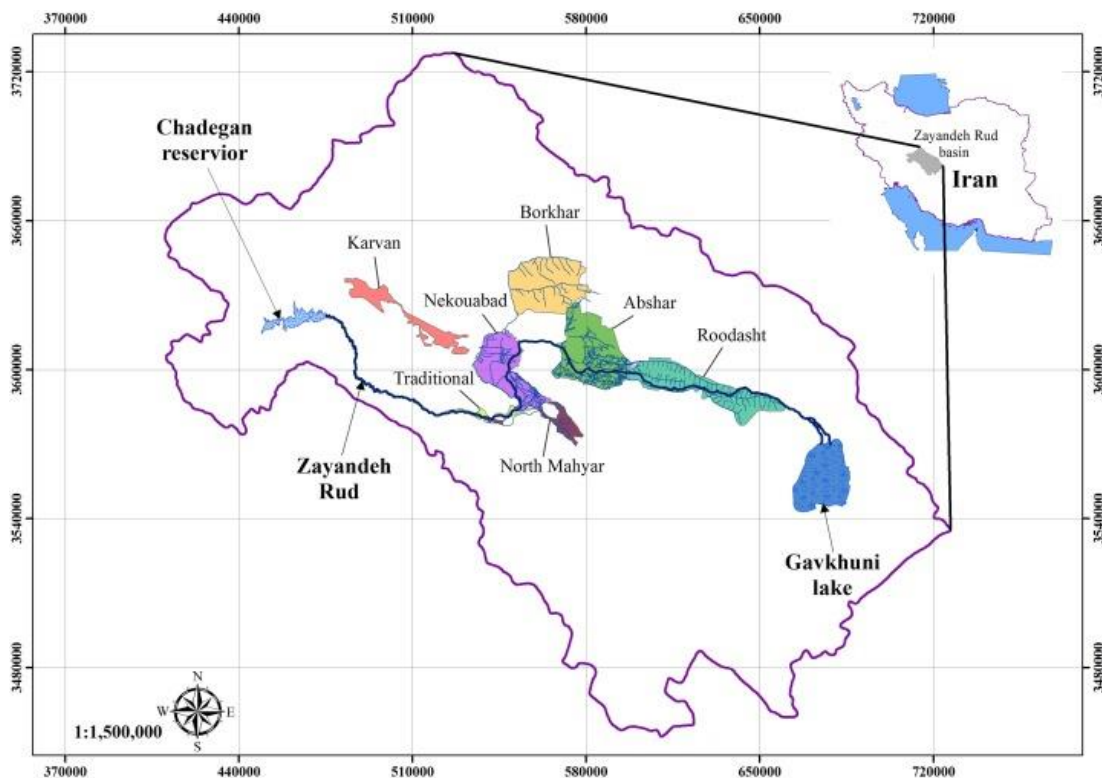


Obr.4.1 Povodí v rámci Iránu; znázornění prostorových souvislostí v rámci povodí Zayandeh-Rud (Nazemi *et al.*, 2019).

Hlavním uživatelem vody v oblasti je zemědělský sektor, který využívá 80-90% celkově odebrané vody. Zbytek 10-20% je distribuován do domácností a průmyslu (Raber and Mohajeri, 2017; Zamani *et al.*, 2019). V současné době je také více než 20% obyvatel povodí závislých na příjmech ze zemědělství a na zásobování místními potravinami. Obavy o zabezpečení potravin vyvstaly v osmdesátých letech během osmileté války mezi Irákem a Íránem a od této události je potravinová soběstačnost jednou z nejvyšších národních priorit bez ohledu na závažnost vodní krize. Politika potravinové soběstačnosti zahrnuje vysoké sazby za dovážené potraviny a finanční příspěvky na podporu domácí produkce (Nazemi *et al.*, 2019). Hlavními pěstovanými plodinami zde jsou pšenice, rýže, ječmen a kukuřice. Mezi další patří brambory, vaječná, rajčata, zahradní produkce atd. (Gohari *et al.*, 2013).

Povodí má 11 zavlažovacích sítí (6 hlavních - viz. obr 4.2) zásobovaných povrchovou vodou z řeky Zayandeh-Rud a vodou podzemní (Raber and Mohajeri, 2017). Většina zavlažovacích sítí získává dostatek povrchové vody z řeky, tak aby společně s běžnými srážkami uspokojila svou poptávku. Kvůli špatné účinnosti zařízení (mezi 32,1 a 42,1%) (Abbasi *et al.*, 2017; IDE, 2015) a vysokému tlaku na produkci jsou však zemědělci, i přes vážný nedostatek vody v povodí, nuceni čím dál intenzivněji odebírat podzemní vodu. Špatný vodní management, nevhodně řešené zavlažovací

systemy a nespravedlivý rozdělovací systém vody jsou zdrojem nedůvěry a nespokojenosti zemědělců i místních úřadů. V důsledku tohoto tlaku se však přístup k nakládání s vodou namísto zlepšování účinnosti systémů ještě více orientuje na podzemní zdroje (Mehdy *et al.*, 2018). S masivním čerpáním pak ale přímo úměrně souvisí problém snižování hladiny podzemní vody a riziko následných deformací zemského povrchu v oblasti pánve.



Obr.4.2 Hlavní zavlažovací systémy povodí (Zamani *et al.*, 2019)

Povodí Zayandeh-Rud je velmi rozmanité. Táhne se od vrcholů pohoří Zagros přes poušť až po solné jezero Gavkhuni. Po celá staletí tato velká řeka přitahovala lidi a hostila rozmanité ekosystémy. Jen za posledních 60 let populace vzrostla téměř čtyřnásobně. Růst regionu spojený se změnou klimatu si však bere vysokou daň ve formě ztráty tohoto velmi cenného vodního zdroje. Mizení Zayandeh Rud (v překladu Životodárné řeky) je velkým problémem a to nejen z ekonomické ale i sociální, zdravotní a ekologické perspektivy. Ještě před několika lety mnoho druhů ptáků migrovalo na zimu do oblasti jezera Gavkhuni, nyní však jezero zůstává po většinu času bez vody. Je tedy velmi důležité co nejdříve přijít s integrovanou koncepcí udržitelného vodního hospodářství (Horlemann *et al.*, 2018). S touto vizí vznikl také iránsko-německý projekt IWRM Zayandeh Rud (*Integrated Water Resources Management*) s cílem ukázat možnosti udržitelného vodního hospodářství v zemi i v regionu. V současné době je projekt ve fázi propracovaného konceptu, jenž se snaží na úrovni státu a provincií prosadit myšlenky o společné koordinaci a úzké spolupráci (IWRM-Zayandehrud, 2018).

5 DATA

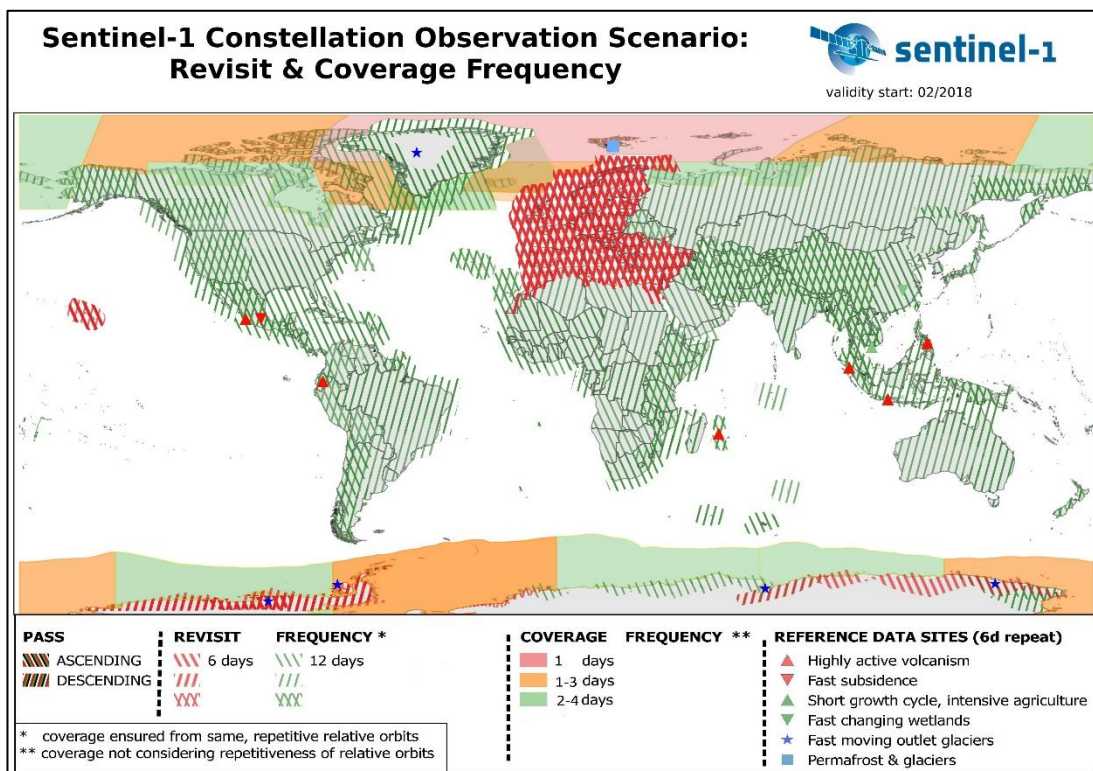
5.1 Satelitní data – Sentinel 1

5.1.1 Sentinel 1

Sentinel-1 je probíhající projekt programu Evropské Unie – Copernicus. Jedná se o dvou družicovou konstelaci S1A a S1B na stejné oběžné dráze při posunu 180°. Tyto identické satelity nesou snímač SAR v pásmu C (5404 MHz) a zajišťují tak kontinuitu dat z již ukončených misí ERS-1, ERS-2 a Envisat ASAR (Copernicus, 2020).

První satelit Sentinel-1A byl vypuštěn 3. dubna 2014, Sentinel-1B pak 25. dubna 2016. Mezi cíle této mise patří monitorování krajinného pokryvu, sledování pohybů zemského povrchu (sesuvy půdy, zemětřesení či již zmíněná subsidence), dále monitorování mořského prostředí, monitorování mořského ledu či ledovců, detekce námořních plavidel, mapování přírodních i člověkem způsobených katastrof a také podpora krizového řízení (Žubrietovský, Švábová a Šváb, 2017).

Satelit pracuje ve 12-denním cyklu opakování. Maximální časové rozlišení je tedy 6 dní pro konstelaci obou družic. Senzor na palubě snímá ve 4 snímacích režimech poskytujících různá rozlišení a šířku záběru. Pokrytí je globální, liší se ale právě v režimu, polarizaci nebo frekvenci snímání v závislosti na požadavcích a místě pozorování (ESA - Sentinel Online, 2018; Torres *et al.*, 2012).

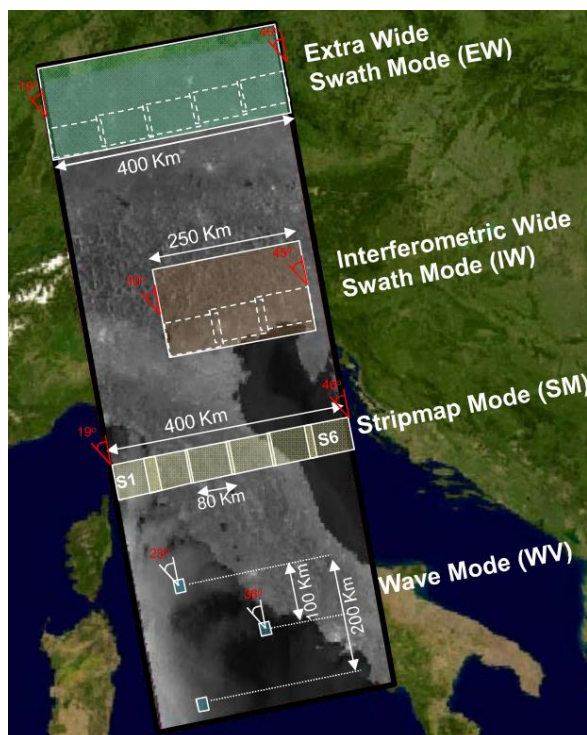


Obr.5.1. Sentinel 1 - pokrytí a časové rozlišení (ESA - Sentinel online, 2018)

5.1.2 Snímací režimy

- Interferometric Wide Swath Mode (IW)

Režim IW je hlavním režimem pro snímání nad pevninou (polarizace VV a VH). Šířka záběru je 250 km a umožňuje střední geometrické rozlišení 5x20m.



Obr.5.2 Sentinel 1 – snímací režimy (ESA - Sentinel online, 2018)

- Wave Mode (WV)

WV je hlavní režim užívaný nad otevřeným oceánem. Snímek je zde pořizován každých 100 km podél dráhy letu, střídavě ve dvou různých úhlech. Podobný režim byl využíván také v misích ERS a Envisat SAR.

- Extra Wide Swath Mode (EW)

Tento režim snímá částečně moře a částečně pevniny polárních oblastí. Jeho produkty jsou využívány primárně pro monitorování mořského ledu.

- Strip Map Mode (SM)

SM režim není využíván operativně, ale pouze v případě potřeby k monitorování krizových událostí např. při přírodních katastrof.

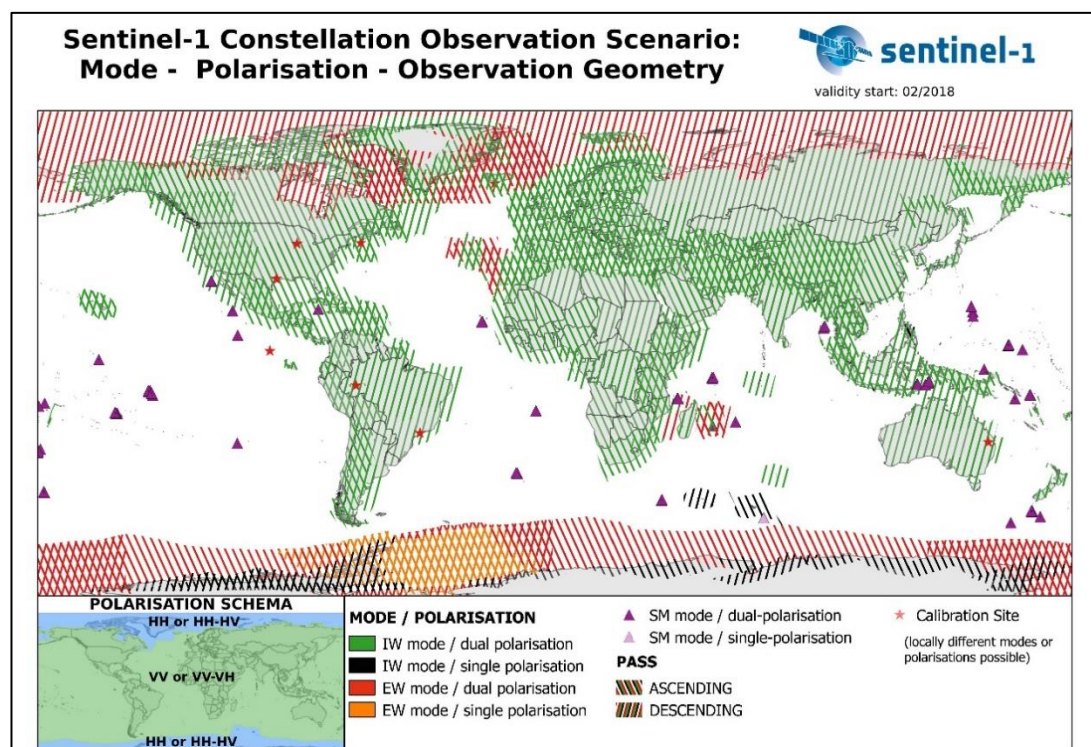
Tab.5.1 Přehled základních parametrů snímacích režimů Sentinel-1 (Žubrietovský, Švábová a Šváb, 2017)

Snímací režim	Šířka záběru [km]	Prostorové rozlišení [m]	Úhel dopadu [°]	Počet sub-pásu	Polarizační varianta
Interferometric Wide Swath Mode	250	5x20	29,1° – 46,0°	3	duální HH + HV, VV + VH sigle HH, VV
Wave Mode	Prostorové rozlišení 5x5 m ve čtvercích 20x20 km		21,6° – 25,1° 34,8° – 38,0°	2	Single HH, VV
Extra Wide Swath Mode	400	20x40	18,9° - 47,0°	5	Duální HH + HV, VV + VH Single HH, VV
Strip Map Mode	80	5x5	18,3° – 46,8°	6	duální HH + HV, VV + VH sigle HH, VV

Strategie provozu a využívání jednotlivých režimů snímání definuje tzv. Sentinel High Level Operations Plan (ESA - Sentinel Online, 2018).

5.1.3 Polarizace

Radar nesený družicí Sentinel-1 umožňuje snímání v tzv. duální polarizaci. Může tedy vysílat i přijímat pulzy v horizontální i vertikální polarizaci. Schémata jsou volena dle zásady – HH-HV nebo HH pro polární oblasti a mořské zalednění a VV-VH nebo VV nad pevninou a ostatními oblastmi (s výjimkou Baltského moře) (Žubrietovský, Švábová a Šváb, 2017).



Obr.5.3 Sentinel 1 – snímací režimy, pozorovací geometrie a polarizace (ESA - Sentinel online, 2018)

5.1.4 Dostupnost Dat

Stejně jako všechna ostatní data generovaná programem Copernicus, i data ze Sentinel-1 jsou volně dostupná. Rychlost dostupnosti závisí na prioritě, účelu jejich využití a zeměpisné oblasti. Vybraná data lze stáhnout například ze serverů Open Acces Hub, ONDA - Dias Catalogue, PEPS atd.

5.1.5 Datové produkty a režimy zpracování

Režimy snímání distribuuji produkty ve 3 úrovních zpracování (L0, L1, L2)

- Úroveň **L0** je základ pro zpracování vyšších úrovní. Jedná se o komprimovaná surová data.
- Produkty **L1** jsou používány nejčastěji, jsou dostupné ve dvou typech:
 - o Single Look Complex (**SLC**) - Pro typ SLC jsou data georeferencovaná pomocí informací o výšce a poloze družice na oběžné dráze, se zachovanou informací o fázi snímku. SLC produkt je využit v této studii, neboť umožňuje detekci fázového posunu.
 - o Ground Range Detected (**GRD**) – Data dále zpracována pomocí „multilookingu“; GRD produkty nezachovávají informaci o fázi a nejsou proto vhodné pro interferometrické aplikace.
- **L2 Ocean** jsou získávány z úrovně L1 jako geolokalizované geofyzikální produkty, využívané v oblasti sledování rychlosti a směru větru, vln a mořských proudů (Žubrietovský, Švábová a Šváb, 2017).

5.1.6 SLC produkty IW režimu

Snímky režimu *Interferometric Wide Swath Mode* (IW) jsou pořizovány s využitím techniky TOPSAR (*Terrain Observation with Progressive Scan SAR*). Jedná se o techniku, která snímá ve třech sub-pásech s minimálním překryvem, což je umožněno elektronickým vychýlením radarového pulsu. Zaručuje tak homogenní poměr signálu k šumu (*signal-to-noise ratio*) v celé šíři záběru a tedy i vyšší kvalitu obrazu.

Snímání se provádí zaznamenáváním ozvěny pulzů, tj. použitím subapertur, na úkor nižšího rozlišení v azimutálním směru. Sentinel-1 využívá tři předdefinované dílčí sub-pásky (subswats) v režimu IW (IW1, IW2 a IW3), čímž dosahuje pokrytí 250 km v kolmém směru. S-1A je schopen aktivního provozu v délce až 25 minut za jeden oběh (98.6 mins), dle toho byl definován postup dělení na jednotlivé poskytované produkty. Co se týče produktů L1 SLC, každý snímek je poskytnut jako segment o délce přibližně 25 s, což odpovídá asi 170 km. Oblast se překrývá přibližně 7% - 8% ve směru azimutu mezi po sobě jdoucími zachycenými pulsy (*bursts*), stejně tak i mezi sousedními dílčími pásky. Tím je zajištěno, že snímky mohou být následně mozaikovány bez mezer (Yague-Martinez *et al.*, 2016).

Tab.5.2 Parametry S1 SLC produktů pořízených IW snímacím režimem (Yague-Martinez *et al.*, 2016).

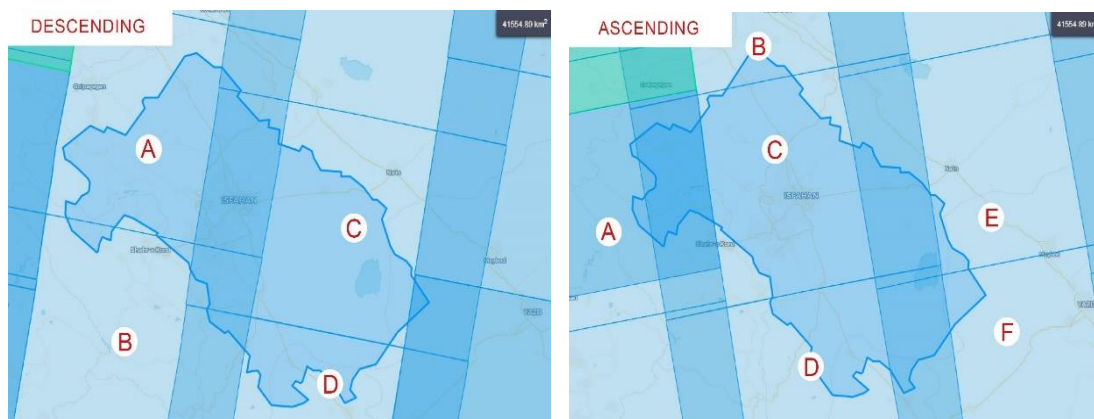
Beam id.	IW1	IW2	IW3
Incidence angles	32.9°	38.3°	43.1°
Slant range resolution	2.7 m	3.1 m	3.5 m
Range Bandwidth	56.5 MHz	48.3 MHz	42.79 MHz
Azimuth resolution	22.5 m	22.7 m	22.6 m
Processing Bandwidth	327 Hz	313 Hz	314 Hz
Doppler Centroid span (Δf_{DC})	5.2 kHz	4.4 kHz	4.6 kHz
Slant range pixel spacing	2.3 m		
Range sampling frequency	64.35 MHz		
Azimuth pixel spacing	14.1 m		
Azimuth sampling frequency	486.49 Hz		
Azimuth steering angle	$\pm 0.6^\circ$		
Burst length ($T_{focused}$)	2.75s / ≈ 20 km		
Ground Swath width	250 km		
Slice length	170 km		
Orbital Repeat Cycle	12 days		
Orbit height	698 - 726 km		
Wavelength	5.547 cm		
Polarization	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)		

5.2 Výběr dat pro zpracování

Data S-1 vhodná pro zpracování metodou InSAR jsou, dle popisu výše, produkty SLC pořízené IW snímacím režimem. Polarizace je pro danou oblast volena vertikální. Využívány jsou dráhy sestupné (*descending*) i vzestupné (*ascending*) z důvodu záměru posouzení skutečné vertikální subsidence.

Data, která jsou využita ke zpracování této studie byla dále vybrána dle těchto požadavků:

- pokrytí zájmového území – jak je viditelné na obr.5.4, zájmová oblast je pokryta čtyřmi snímky v sestupné dráze a šesti snímky v dráze vzestupné. V průběhu zpracování bude vytvořena mozaika pokrývající celé zájmové území v obou směrech.



Obr.5.4 Snímky pokrývající zájmové území v sestupném (vlevo) a vzestupném směru (vpravo)

- vhodné časové období – Snímky jsou voleny z období srpen-září let 2018 a 2019. Toto období bylo vybráno z důvodu nízké hodnoty průměrných měsíčních srážek a menších změn ve vegetačním pokryvu. Zvoleny jsou 3 sady interferometrických párů pro každý snímek mozaiky v rozestupu 12 nebo 24 dní z důvodu snížení atmosférických vlivů. Výsledkem je poté vážený průměr těchto tří snímků na základě časové základny.
- Časová základna (*Temporal baseline*) – Je volena tak, aby byla co nejbližší ke 365 dnům. Důvodem je přiblížení stavu terénu při snímání obou snímků páru pro zajištění vyšší koherence při delším časovém období.
- Kolmá základna (*Perpendicular baseline*) – Pro analýzu deformací zemského povrchu je vhodná kolmá základna s hodnotou blízkou nule. Tím je vliv topografické fáze na interferogram minimální a je omezena citlivost na nepřesnost referenčních DMT (Haghighi and Motagh, 2017) S-1 je však již navržen tak, aby kolmé základny byly co nejmenší (řádově 150m) a většina dat je tudíž vyhovující (Yague-Martinez *et al.*, 2016). U vybraných snímků této studie je základna v rozmezí 5–95 u sestupných drah a 4–175 drah vzestupných.

Následující tabulky (Tab. 5.3, Tab. 5.4 a Tab. 5.5 Tab. 5.6,) zobrazují přehled všech snímků použitých k této interferometrické analýze. Snímky jsou rozděleny dle roku snímání, což definuje pozici snímku jako hlavního či vedlejšího. Pro tuto studii jsou jako vztažné neboli hlavní zvoleny snímky roku 2018, vedlejší pak roku 2019. Časovou základnu zde představuje rozdíl mezi datem pořízení vztažného a vedlejšího snímku.

Tabulky dále obsahují informace, o který interferometrický pár se jedná a jakou část území daný snímek pokrývá (viz obr. č. 5-4). Směr dráhy popisuje, zda jde o dráhu sestupnou či vzestupnou, číslo dráhy (*Relative Orbit Number*) pak jednoznačně určuje dráhu snímání. Čtyřmístný kód je jednoznačný identifikátor z názvu každého snímku.

Tab.5.3 Přehled hlavních snímků sestupných drah (2018)

Pár	Směr dráhy Asc/Dsc	Č. dráhy	Snímek mozaika	Snímek Kód	Rok	Datum pořízení
1	DES	35	A1	8F3E	2018	12.08.18
	DES	35	B1	7AB8	2018	12.08.18
	DES	137	C1	8169	2018	07.08.18
	DES	137	D1	53A3	2018	07.08.18
2	DES	35	A2	6891	2018	24.08.18
	DES	35	B2	A28F	2018	25.08.18
	DES	137	C2	E0C7	2018	31.08.18
	DES	137	D2	BD24	2018	31.08.18
3	DES	35	A3	76E7	2018	05.09.18
	DES	35	B3	76F6	2018	05.09.18
	DES	137	C3	0B78	2018	12.09.18
	DES	137	D3	3C7D	2018	12.09.18

Tab.5.4 Přehled vedlejších snímků sestupných drah (2019)

Pár	Směr dráhy Asc/Dsc	Č. dráhy	Snímek mozaika	Snímek kód	Rok	Datum pořízení
1	DES	35	A1	64EA	2019	07.08.19
	DES	35	B1	43FF	2019	07.08.19
	DES	137	C1	16B9	2019	02.08.19
	DES	137	D1	8132	2019	02.08.19
2	DES	35	A2	B570	2019	19.08.19
	DES	35	B2	E287	2019	19.08.19
	DES	137	C2	FE9C	2019	14.08.19
	DES	137	D2	EBE3	2019	14.08.19
3	DES	35	A3	2B3E	2019	31.08.19
	DES	35	B3	C03D	2019	31.08.19
	DES	137	C3	23E3	2019	26.08.19
	DES	137	D3	271B	2019	26.08.19

Tab.5.5 Přehled hlavních snímků vzestupných drah (2018)

Pár	Směr dráhy Asc/Dsc	Č. dráhy	Snímek mozaika	Snímek kód	Rok	Datum pořízení
1	ASC	101	A1	D534	2018	04.08.18
	ASC	28	B1	A939	2018	11.08.18
	ASC	28	C1	5B8F	2018	11.08.18
	ASC	28	D1	F099	2018	11.08.18
	ASC	130	E1	C780	2018	06.08.18
	ASC	130	F1	B6F7	2018	06.08.18
2	ASC	101	A2	4616	2018	16.08.18
	ASC	28	B2	C8F0	2018	23.08.18
	ASC	28	C2	5987	2018	23.08.18
	ASC	28	D2	CF9F	2018	23.08.18
	ASC	130	E2	EBC0	2018	18.08.18
	ASC	130	F2	FA48	2018	18.08.18
3	ASC	101	A3	9E4C	2018	28.08.18
	ASC	28	B3	461E	2018	04.09.18

	ASC	28	C3	D02F	2018	04.09.18
	ASC	28	D3	0CE2	2018	04.09.18
	ASC	130	E3	2DE6	2018	30.08.18
	ASC	130	F3	F9FE	2018	30.08.18

Tab.5.6 Přehled vedlejších snímků vzestupných drah (2019)

pár	směr dráhy Asc/Dsc	č. dráhy	snímek mozaika	Snímek kód	Rok	Datum pořízení
1	ASC	101	A1	C820	2019	11.08.19
	ASC	28	B1	5A01	2019	06.08.19
	ASC	28	C1	B913	2019	06.08.19
	ASC	28	D1	0495	2019	06.08.19
	ASC	130	E1	6853	2019	01.08.19
	ASC	130	F1	7AE7	2019	01.08.19
2	ASC	101	A2	F058	2019	23.08.19
	ASC	28	B2	35C3	2019	18.08.19
	ASC	28	C2	5144	2019	18.08.19
	ASC	28	D2	8B6B	2019	18.08.19
	ASC	130	E2	C1DA	2019	13.08.19
	ASC	130	F2	5ECF	2019	13.08.19
3	ASC	101	A3	0E66	2019	04.09.19
	ASC	28	B3	507C	2019	30.08.19
	ASC	28	C3	0FCB	2019	30.08.19
	ASC	28	D3	4C75	2019	30.08.19
	ASC	130	E3	7BAE	2019	25.08.19
	ASC	130	F3	8F9D	2019	25.08.19

6 METODIKA

Pro zpracování dat v tomto rozsahu bylo nutné uvažovat o vhodném softwaru, ale také o dostatečně výkonném zpracovatelském prostředí. Z tohoto důvodu byla celá práce zpracovávána na virtuální mašině RUS Copernicus v prostředí LINUX Ubuntu s operační pamětí 120 GB.

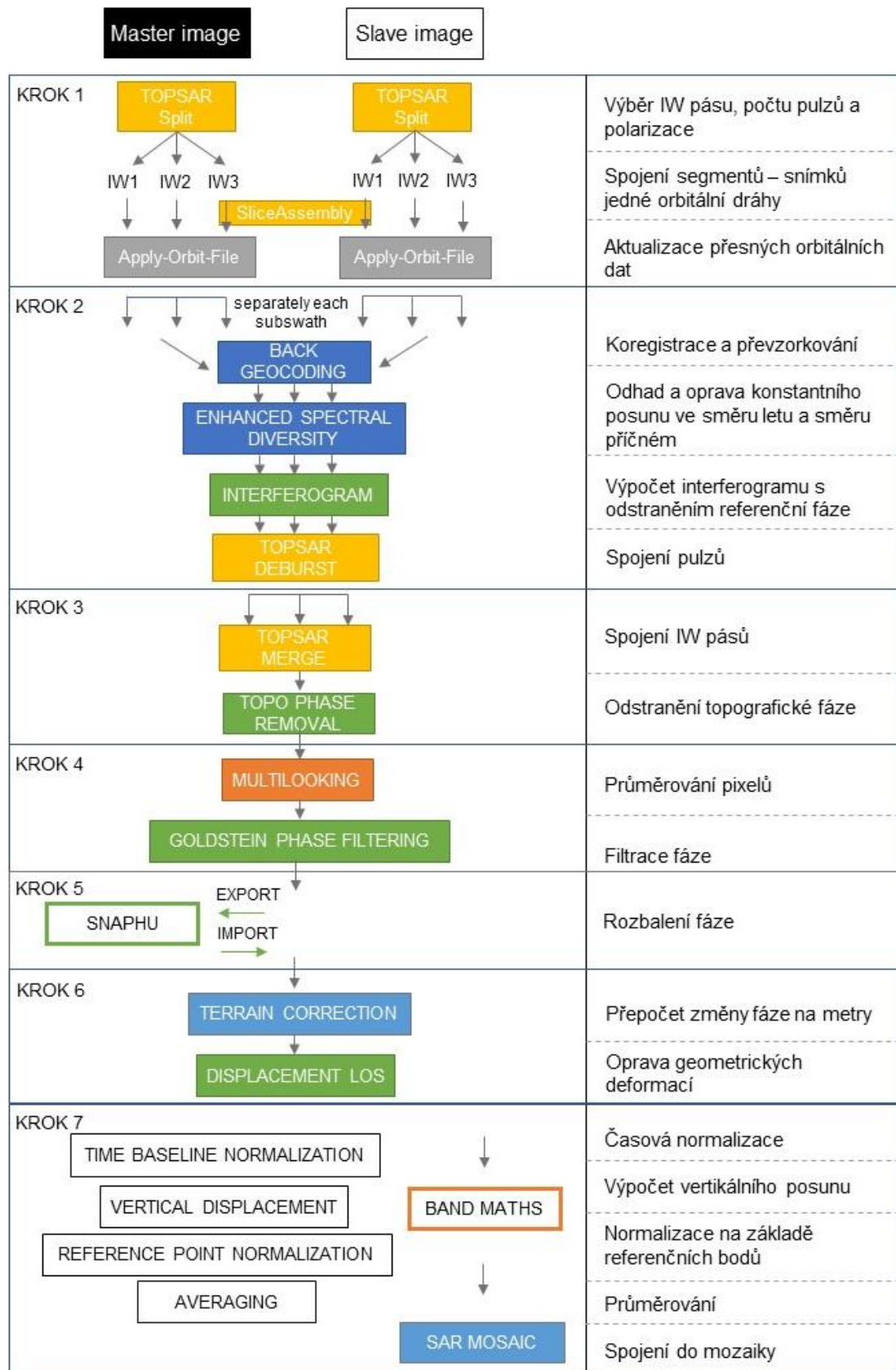
Pro samotné zpracování bylo využito těchto softwarů a nástrojů:

- SNAP (ve verzi 7.0) – Sentinel Application Platform – volně dostupný software agentury ESA, vyvinutý primárně pro zpracování a analýzu dat ze satelitů Sentinel. Využit byl ve formě SNAP – grafická verze a GPT (*Graphic Processing Tool*) – verze pro příkazový řádek.

V prostředí SNAP byl použit nástroj Graph Builder, který umožňuje vizuální vytváření a úpravu „pracovních postupů“ (*graphs*) ze sekvence procesních nástrojů. Tyto postupy – grafy je možné ukládat jako soubory XML a dále využít jako vstup pro GPT. Tento postup výrazně napomáhá k automatizaci, urychlení procesu a omezení mezi-výstupů jednotlivých kroků zpracování.

- SNAPHU – *Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping* (verze kódu 2.0.3); Jedná se o implementaci statistického algoritmu pro rozbalení fáze, neboli pro proces získání jednoznačných fázových dat z hodnot známých pouze v modulu 2π rad (Stanford.edu, 2019).
- QGIS (ve verzi 3.4.14 – Madeira) – volně dostupný a open source GIS software pro tvorbu, editaci a vizualizaci rastrových a vektorových geo-dat. Nástroj byl využit pro konečnou editaci rastrových dat.
- ArcMap (ve verzi 10.7.1) – aplikace ArcGIS Desktop, která slouží pro všechny mapové úlohy včetně prostorových analýz, kartografie či editaci dat. Nástroj byl použit pro tvorbu mapových výstupů.

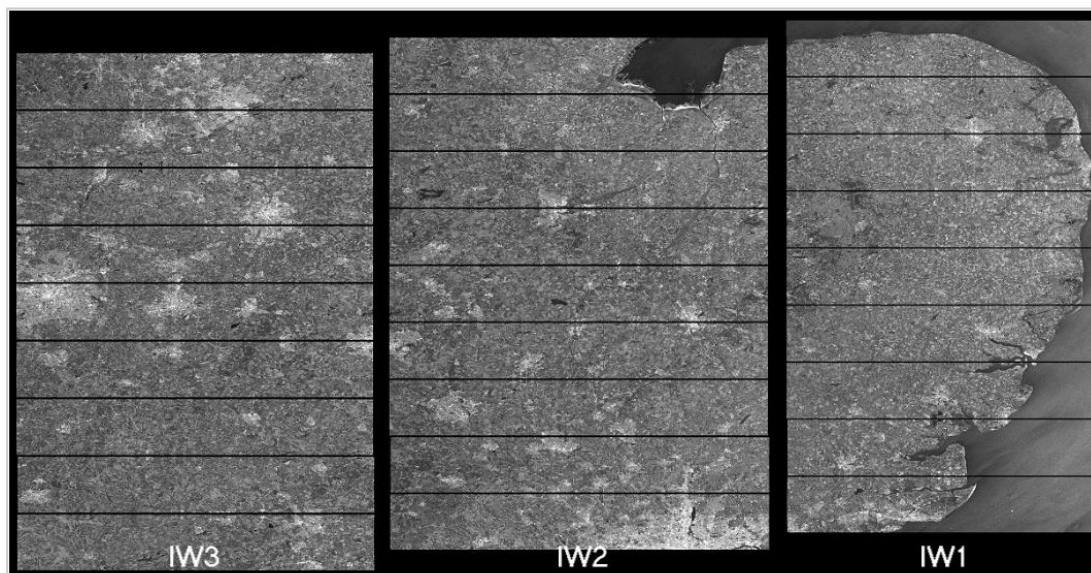
Následující schéma (obr. 6.1) zobrazuje vlastní zpracovatelský řetězec, využívaný při této studii. Pro přehlednost je rozdělen dle kroků vlastního postupu práce a nenaznačuje tím tedy souvislost operátorů v jednotlivých sekcích. Zásadní je celková návaznost a postup v řetězci. Barevné označení určuje, o jaký typ nástroje se jedná v prostředí SNAP. Žlutá barva značí S1-TOPS nástroje, modrá nástroje pro koregistraci, zelená interferometrické operátory, světle modrá geometrické (terénní korekce a tvorba mozaiky) a oranžová operátory ostatní. Rastrové výpočetní nástroje jsou označeny oranžovým okrajem a výpočty a další úpravy mimo prostředí SNAP zeleným okrajem.



Obr.6.1 Zpracovatelský řetězec v prostředí SNAP a SNAPHU

6.1 Předzpracování dat – Krok 1

Než přistoupíme ke koregistraci, SNAP software vyžaduje nejprve rozdělení snímku na jednotlivé sub-pásy snímání (*subswaths*) - IW1, IW2, IW3. Vhodné je také omezení velikosti snímku dle zájmového území pro snížení výpočetní náročnosti a objemu dat. Nástroj *TOPSAR-Split* umožňuje výběr pásu, polarizace a omezení počtu pulsů (*bursts*). Ukázka rozdělení snímku je viditelná na obr.6.2.



Obr.6.2 Rozdělení SLC snímku módu IW na subpásy IW1, IW2 a IW3 a 9 pulsů v kolmém směru (ESA - Sentinel Online, 2016)

Jelikož snímání jednotlivých snímků na jedné orbitální dráze probíhá plynuje, je jednoduše možné opětovné spojení dvou takto navazujících snímků. SNAP nabízí nástroj *SliceAssembly* jenž umožňuje toto spojení v případě stejných pásů (*subswaths*). V této práci byly spojeny jednotlivé pásy navazujících snímků A-B a C-D sestupných drah (DES) a B-C-D a E-F drah vzestupných (ASC). V prvním případě byly využity všechny 3 pásy každého snímku, k omezení došlo pouze v počtu pulsů. V Případě drah vzestupných dochází k úpravě a omezení dat v obou variantách z důvodu snížení časové náročnosti zpracování a dostatečného pokrytí zájmového území.

Dalším krokem je aktualizace orbitálních dat obsažených v metadatech každého produktu/snímku. Tento krok je zásadní pro následnou přesnou koregistraci dat. Při publikaci obsahují data Sentinel-1 informace o poloze a rychlosti senzoru v době snímání. Tato data jsou dále zpřesňována a jejich přesná podoba neboli přesná data o orbitě (*precise orbits*) jsou k dispozici do dvou týdnů po snímání. Nástroj *Apply Orbit File* automaticky stahuje příslušná data z webové databáze a aktualizuje metadata daného produktu.

6.2 Interferometrické zpracování - Krok 2

6.2.1 Koregistrace a ESD

Mírně odlišná geometrie snímků vede k lehké distorzi mezi nimi. Proces, který transformuje vedlejší snímek na hlavní a umožňuje tak správné určení fázového rozdílu interferogramu se nazývá koregistrace. Tento krok společně s formováním interferogramu je výpočetně nejnáročnější část celého zpracování.

Operátor *Back Geocoding* koregistruje dva S-1 SLC produkty stejného sub-pásu (*sub-swath*) za použití DMT a orbitálních dat obou snímků. Jedná se o typ jemné geometrické koregistrace se subpixelovou přesností a převzorkování, kde za pomoci stavových vektorů a externí DMT lze každý pixel vedlejšího snímku přiřadit danému pixelu snímku hlavního.

Při převzorkování vedlejšího snímku páru (*slave*) dle hlavního (*master*) je provedeno odstranění rampy (*deramp*), demodulace a následná interpolace. Na tento interpolovaný obraz je poté znovu aplikován *reramp* a *remodulace*. Pro další zpracování technikou ESD je zde nutné vytvoření samostatného obrazového kanálu (*band*) fáze *deramping* a demodulace (*Deramp and Demod phase*).

Parametry operátoru:

- *Digital Elevation model* - pro koregistraci byl použit digitální model povrchu *SRTM 3Sec (Auto Download)*.
- *DEM Resampling Method* - převzorkování původního DMP do stejné mřížky jako radarové snímky, zvolena byla defaultní bikubická interpolace.
- *Resampling Type* – typ převzorkování, zvolena byla přednastavená - *Bisinc 5* bodová interpolace

Jedinou zbytkovou chybou mezi hlavním a vedlejším snímkem po geometrické koregistraci je konstantní posun v příčném směru a směru azimutu (ve směru letu). Tato chyba závisí na přesnosti orbitálních dat a měla by být odhadnuta a odstraněna pomocí techniky ESD (*Enhanced spectral diversity*).

Enhanced Spectral Diversity operátor tedy následuje *Back Geocoding* ve zpracovatelském řetězci TOPS InSAR. Nejprve odhaduje konstantní posun snímků v kolmém (příčném) směru (*Constant range offset*) pro celý subswath pomocí nekoherentní křížové korelace a následně konstantní posun ve směru letu (*Constant azimuth offset*) pomocí metody ESD, která využívá data překrývajících částí sousedních pulsů a jejich následné zprůměrování. Nakonec probíhá *range* a *azimut* korekce pro každý puls (*burst*) snímku.

6.2.2 Formování interferogramu

Následujícím krokem je už výpočet samotného interferogramu. Interferogram je formován komplexním násobením odpovídajících pixelů obou snímků. Zde dochází k násobení amplitud a odečítání fáze. Změna hodnoty fáze je představena tzv. interferometrickými proužky (*fringes*) jenž odpovídají změně o 2π (Slačíková, 2010).

Vstupními daty pro operátor *Interferogram* je tedy koregistrovaný pás páru s aplikovanou korekcí konstantního posunu v kolmém směru i ve směru letu. V tomto případě výpočet probíhá současně s odečtením referenční fáze neboli fáze

odpovídající zemskému povrchu bez topografie (*flat-earth phase*). Tato fázová složka je součástí interferometrického signálu následkem zakřivení zemského povrchu. Bez odstranění by mohla zásadně ovlivnit výsledná data (Chen *et al.*, 2016).

Parametry operátoru:

- *Number of „Flat Earth“ polynomial* – defaultní je využíván polynomiál 5. stupně, toto nastavení je vhodné pro území do 100x100km (SNAP/Help/Operators, 2020). Z důvodu většího studijního území zde nastavujeme vyšší polynomiální stupeň - 6.
- *Number of „Flat Earth“ estimation points* – nastavení počtu bodů k výpočtu referenční fáze metodou nejmenších čtverců. Defaultní nastavení je zde 501 (pro území opět cca 100x100km), Pro větší scénu je potřeba nastavit více bodů, zde volena hodnota 1001(SNAP/Help/Operators, 2020).
- *Orbit interpolation degree* – nastavení dle počtu stavových vektorů minus 1 (maximálně však 5) (SNAP/Help/Operators, 2020).
- *Coherence Range Window Size + Coherence Azimuth Window Size* – parametr výpočetního okna koherence, lze nastavit pro čtvercový pixel, nastaveno 20 pro *Range Window Size*, tím se automaticky dopočte 5 (6) *Azimuth Window Size*

Posledním nástrojem tohoto kroku je *TOPSAR Deburst*, který umožňuje spojení pulzů, které byly doposud zpracovávány jako samostatné SLC snímky, v rámci jednotlivých sub-pásů (*RUS Training | Land Subsidence mapping with Sentinel-1*, 2018).

6.3 Krok 3 – Diferenční interferogram

Pro zjednodušení a urychlení dalšího zpracování byl v této fázi využit nástroj *TOPSAR Merge*, jenž umožňuje opětovně spojit rozdělené sub-pásy IW1, IW2 a IW3 do jednoho kompaktního celku. Od této chvíle jsou tedy další nástroje používány pouze na jeden vstupní produkt každého páru.

6.3.1 Odstranění topografické fáze

Nyní následuje operátor *TopoPhaseRemoval*, jenž odhaduje a následně odečítá topografickou fázi od komplexního interferogramu. Operátor automaticky využívá DMP a registruje jej do souřadnicového systému hlavního snímku s atributy skutečné hodnoty a vypočtené referenční topografické fáze. Referenční fáze je následně interpolována do mřížky hlavních souřadnic (SNAP/Help/Operators, 2020).

6.4 Krok 4

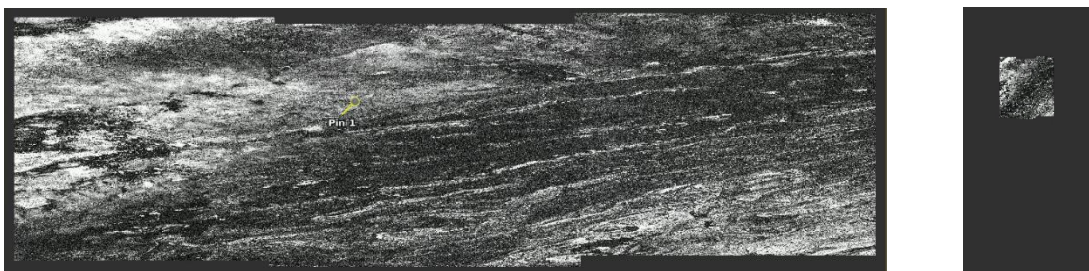
6.4.1 Multilooking

Pro rozbalení fáze a správnost výsledných hodnot pohybu zemského povrchu je zásadní odstranění extrémních hodnot způsobených dekorelací signálu. *Multilooking* není povinná součást zpracovatelského řetězce, avšak do určité míry napomáhá právě odstranění těchto extrémních hodnot, které by mohly ovlivnit kvalitu výsledných dat.

Princip SAR snímání je takový, že rozlišení je vždy vyšší ve směru kolmém na směr letu, avšak není konstantní (zvyšuje se se vzrůstajícím incidenčním úhlem). S-1 poskytuje v režimu snímání IW střední velikost pixelu 5x22m (*range x azimuth*). Nástroj *Multilook* opravuje nekonzistentní velikosti pixelů způsobené úhlem přicházejícího signálu a zprůměrováním pixelů ve směru kolmém na směr letu vytváří obraz s „čtvercovými“ pixely.

Při této úpravě je možné určit počet pixelů které budou zprůměrovány v obou směrech a korigovat tak jejich výslednou velikost. Tímto krokem dochází ke snížení rozlišení dat, v závislosti na zvolených parametrech. Pro zpracování takto rozsáhlého území byly zvoleny parametry:

- *Number of Range Looks* : 16 (počet pixelů průměrovaných ve směru kolmém na směr letu)
- *Number of Azimut Looks* : 4 (počet pixelů průměrovaných ve směru letu)



Obr.6.3 Obrazový kanál koherence produktu AB1_DES před (vlevo) a po (vpravo) *Multilookingu* s parametry 16:4

6.4.2 Filtrace fáze

Přesnost a spolehlivost InSAR měření je velmi závislá na kvalitě vytvořených interferogramů. Kvůli účinkům takových faktorů jako jsou časové, geometrické dekorelace, termický šum (*thermal noise*), *Doppler centroid* dekorelace nebo obsah vodní páry v atmosféře jsou fáze interferogramu zatíženy šumem. Pokud není šum dobře odstraněn projeví se na výsledcích deformační analýzy nebo již dříve, kdy brání procesu rozbalení fáze (Li *et al.*, 2008).

Pro filtraci software SNAP nabízí operátor *GoldsteinPhaseFiltering*, který používá nelineární adaptivní logaritmus navržený v roce 1998 R.M. Goldsteinem a Wernerem. Tento algoritmus výrazně zlepšuje viditelnost interferometrických pruhů (*fringes*) a snižuje fázový šum. (Goldstein and Werner, 1998; Li *et al.*, 2006)

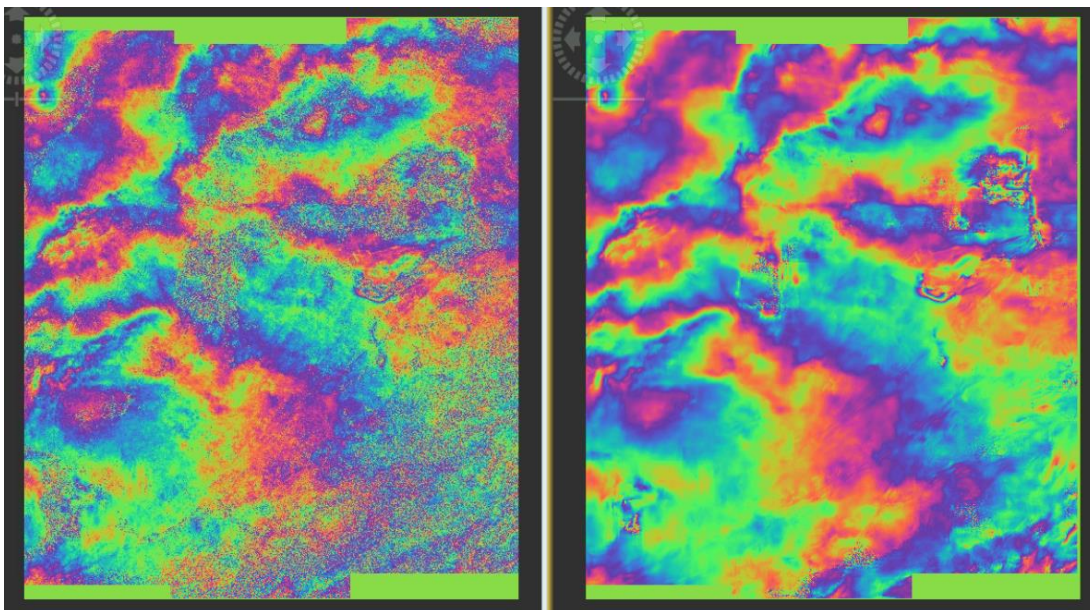
Tento filtr vyhlazuje ve frekvenční doméně prostřednictvím Fourierovy transformace, při níž transformované vzorky $Z(u, v)$, překrývají malé plošky interferogramu:

$$Z'(u, v) = S\{|Z(u, v)|\}^\alpha * Z(u, v)$$

kde α je filtrační parametr (*Adaptive filter exponent*), S je operátor zhlazení, u a v jsou prostorové frekvence. Filtrování je následně ukončeno inverzní Fourierovou transformací vyhlazených Fourierových vzorků (Li *et al.*, 2008).

Parametry operátoru *GoldsteinPhaseFiltering* jsou následující:

- *Adaptive filter exponent* – koeficient určující jemnost filtrace, hodnoty nula (bez filtrování) až jedna (maximální filtrování) – volena hodnota pro maximální filtrace - 1.0
- *FFT Size* – FFT je zkratka pro rychlou Fourierovu transformaci, jedná se o transformaci bloků interferogramu do 2D reprezentace, kde jsou filtrovány, čímž je parametr filtru flexibilní [0-1] pro oblasti různých úrovní šumu – velikost filtrovaného bloku (v mocnině 2) – bylo zvoleno 128



Obr.6.4 Porovnání produktu AB1_DES před filtrací a po filtraci fáze operátorem *Goldstein_Phase Filtering*

Fázový šum radarového interferogramu přímo souvisí s koherencí, ale i *look number* interferogramu. Proto může být fázový šum zcela odlišný pro interferogramy se stejnou koherencí ale odlišným *look number*. Teoreticky je tedy možné říci, že pro interferogram s vyšším *look number* bude fázový šum násobně nižší.

6.5 Krok 5 - SNAPHU

6.5.1 Rozbalení fáze

Vyhlazený interferogram v tuto chvíli poskytuje informaci o změně vzdálenosti senzoru od zemského povrchu prostřednictvím 2π cyklické povahy fáze a koeficientu k , který představuje počet zabalených cyklů. Proces, který transformuje tuto „zabalenou“ fázi na fázi „absolutní“ přiřazením správného celočíselného násobku 2π , se nazývá rozbalení fáze (Ferretti *et al.*, 2007; Rott, 2009).

Pro tento krok byl využit software SNAPHU (*Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*) neboli statistický algoritmus pro výpočet rozbalení fáze.

Software SNAP zajišťuje integritu se SNAPHU pomocí nástrojů *SNAPHU export* a *SNAPHU import*. Při exportu je nutné volit tyto parametry:

- *Statistical-cost mode* – DEFO slouží právě k výpočtu modelu deformací, TOPO by sloužilo pro výpočet výškových modelů terénu
- *Initial method* – parametr pro výběr algoritmu výpočtu: volím MCF (minimum cost flow)
- *Number of Tile Rows and Tile Columns* – nastavení počtu dlaždic (řádků a sloupců) pro které rozbalení fáze počítáno – je ponecháno 10 z důvodu dostatečného výkonu virtuální mašiny

Konfigurační soubor, který je vytvořen při exportu pro spuštění SNAPHU „*snaphu.conf*“ obsahuje příkaz „call snaphu“ pro příkazový řádek. Po proběhnutí výpočtu je možné rozbalenou fázi importovat zpět do prostředí SNAP nástrojem *SNAPHU import*, kde prvním vstupem je filtrovaný interferogram a druhým právě rozbalená fáze (*RUS Training | Land Subsidence mapping with Sentinel-1*, 2018).

6.6 Krok 6

6.6.1 Terénní korekce

Snímky SAR podléhají geometrickým distorzím, které jsou způsobeny bočním snímáním radaru a členitým terénem (viz. Kap. 3.3.2).

Terénní korekce je proces opravující tyto geometrické deformace. Jedná se tedy o korekci vzájemných prostorových vztahů mezi obrazovými body. Tento nástroj také zároveň zajišťuje promítnutí dat z radarové geometrie do kartografického souřadnicového systému.

V prostředí SNAP je možné využít nástroj *Range-Doppler Terrain Correction*, který umožňuje nastavení těchto parametrů:

- *Digital elevation model – SRTM 3sec a DEM resampling method – BILINEAR_INTERPOLATION*, nastaveny stejně jako pro koregistraci.
- *Pixel spacing* – vzdálenost mezi sousedními pixely na snímku, měřena v metrech. Z důvodu výrazného zvětšení pixelu již při multilookingu, byla hodnota nastavena na 60m.
- *Map Projection* – nastavení kartografické projekce, použita byla WGS84 (DD) (podporován SNAP)

6.6.2 Displacement - výpočet vektoru posunu ve směru LOS

Jako další krok následuje přepočtení rozbalené fáze na jednotky délky – metry. Pro tento úkon SNAP nabízí nástroj *PhaseToDisplacement*, jehož funkcí je aplikace následujícího vzorce,

$$d_{LOS} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_d$$

kde d_{LOS} je relativní terénní *displacement* ve směru paprsku, λ je přenesená vlnová délka a $\Delta\varphi_d$ je „rozbalená“ změna fáze (*unwrapped phase*). Výsledný produkt tohoto operátoru – *PhaseToDisplacement* zahrnuje pouze kanál s hodnotami posunu (*displacement*), ostatní informace jsou odstraněny. Pro zachování obrazových kanálů

koherence a incidenčního úhlu, které jsou dále využity pro maskování a výpočet posunu ve vertikálním směru, je zde výpočet proveden ručně pomocí nástroje *Band Maths*.

6.7 Krok 7 – postprocessing

6.7.1 Časová normalizace dat

Z důvodu zpřesnění výstupů byly zpracovány 3 sady interferometrických párů pro každý snímek mozaiky (pár 1, pár 2, pár 3) vzestupných i sestupných drah. V tabulkách č.6.1 a 6.2 je popsána jejich časová základna (*Temporal Baseline*) neboli počet dní mezi snímáním hlavního a vedlejšího snímku páru. Pro další zpracování byla provedena normalizace dle časové základny, kde jako vztažná byla zvolena základna 360 dní. Dle váhy jednotlivých snímků (počet dní/360 dní) byl tedy *Displacement* dělením přepočten na hodnoty odpovídající jednotné časové základně 360 dní.

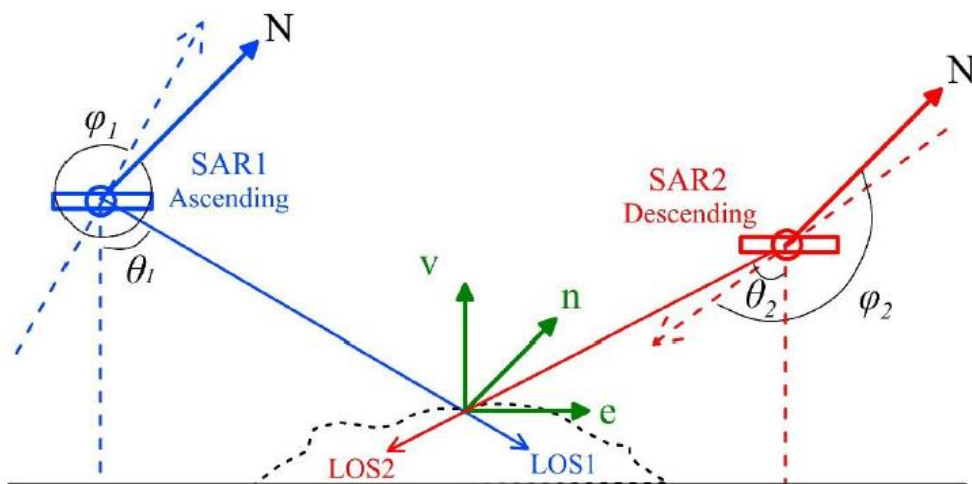
Tab.6.1 - snímky sestupných drah (DES) Tab.6.2 –snímky vzestupných drah (ASC)

Snímek mozaika	Kolmá základna	Časová základna	Váha (t/360)
A1	-38	360	1
B1	-33	360	1
C1	7	360	1
D1	5	360	1
A2	94	360	1
B2	95	360	1
C2	18	348	0,9666
D2	13	348	0,9666
A3	-8	360	1
B3	-14	360	1
C3	31	348	0,9666
D3	33	348	0,9666

Snímek mozaika	Kolmá základna	Časová základna	Váha (t/360)
A1	-95	372	1,033
B1	140	360	1
C1	137	360	1
D1	-134	360	1
E1	105	360	1
F1	99	360	1
A2	-70	372	1,033
B2	-45	360	1
C2	-47	360	1
D2	-50	360	1
E2	6	360	1
F2	4	360	1
A3	-49	372	1,033
B3	175	360	1
C3	173	360	1
D3	171	360	1
E3	-83	360	1
F3	-82	360	1

6.7.2 Výpočet posunu v trojrozměrném vektoru

SAR je schopen měřit pouze rozdíly v délce dráhy ve své linii viditelnosti (*line of sight*). Z tohoto důvodu jsou deformační interferogramy nejednoznačné a je třeba je interpretovat opatrně. Trojrozměrný vektor posunu d_{LOS} , který je pomítnut v šikmém směru LOS obsahuje složky, a tedy d_n - vektor ve směru jih-sever, d_e – ve směru západ-východ a d_v , který vyjadřuje vertikální složku posunu (Hanssen, 2001).



Obr.6.5 Zobrazovací geometrie satelitního SAR systému podél vzestupných a sestupných drah a vztah mezi posunem ve směru LOS a 3D vektorovými komponenty (Dai et al., 2015); φ zde odpovídá α_h následující rovnice

Vztah je vyjádřen následující rovnicí:

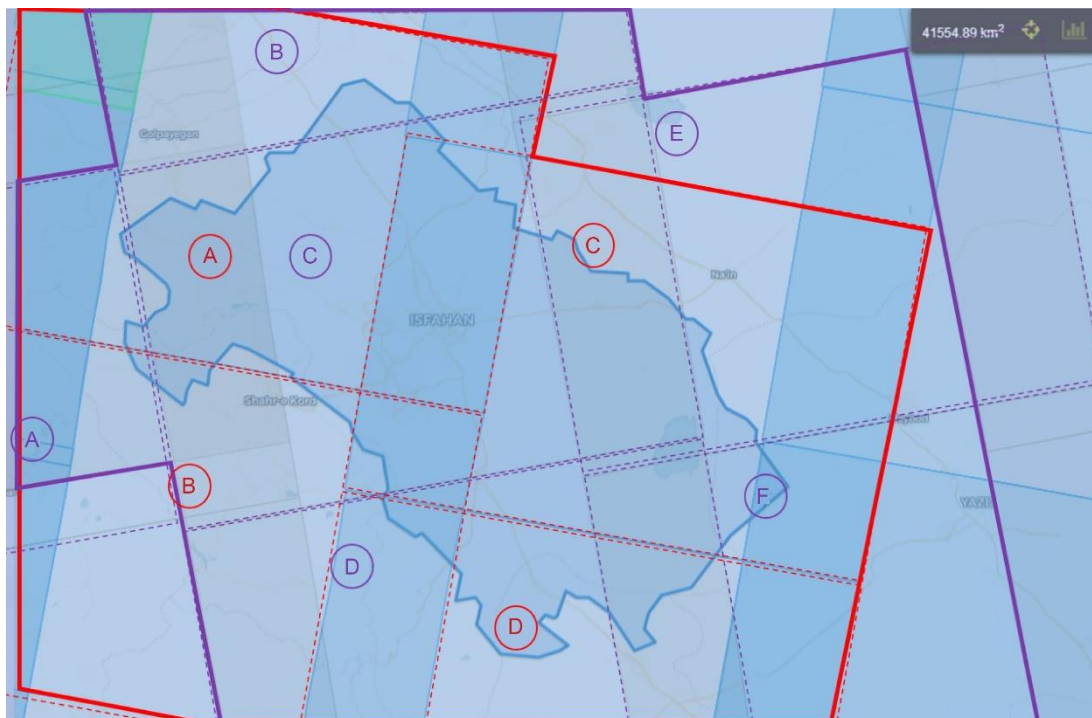
$$d_{LOS} = d_v \cos(\theta_{inc}) - \sin(\theta_{inc}) \left[d_n \cos\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) + d_e \sin\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) \right]$$

kde $\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right)$ odpovídá úhlu ke směru pohledu azimutu, který je kolmý na směr letu satelitu (pro satelit snímající vpravo - *right-looking*). Pro Sentinel-1 α_h odpovídá úhlu $190,4^\circ$ u sestupné dráhy a $349,8^\circ$ u vzestupné dráhy. θ_{inc} je úhel dopadu (*incidence angle*) (Hanssen, 2001).

Protože v rovnici jsou 3 neznámé a jsou odvozeny pouze dva známé komponenty d_{LOS} ze vzestupné a sestupné oběžné dráhy, není možné získat kompletní vektor posunu (d_u, d_n, d_e). Z tohoto důvodu je provedeno zjednodušení na základě znalostí údajů Sentinel-1. V regionální studii této lokality je možné uvažovat, že data Sentinel-1 jsou necitlivá k detekci posunu ve směru sever-jih z důvodu severojižního směru oběžné dráhy. Je zde tedy předpokládáno že $d_n = 0$, což umožní nalézt další dvě složky deformačního vektoru (posunu) (Hu et al., 2014; Pawluszek-Filipiak a Borkowski, 2020). Jedná se o významné zjednodušení z důvodu chybějících údajů pro podrobnější výpočet.

$$d_{LOS\ DES} = d_v \cos(\theta_{inc\ DES}) - \sin(\theta_{inc\ DES}) d_e \sin\left(\alpha_{hDES} - \frac{3\pi}{2}\right)$$

$$d_{LOS\ ASC} = d_v \cos(\theta_{inc\ ASC}) - \sin(\theta_{inc\ ASC}) d_e \sin\left(\alpha_{hASC} - \frac{3\pi}{2}\right)$$



Obr.6.6 Orientační znázornění překrytí snímků sestupné a vzestupné oběžné dráhy; DES – červené, ASC – fialové snímky

6.7.3 Normalizace na základě vztažných bodů

Bylo vybráno 8 referenčních bodů s vysokou koherencí sestupné i vzestupné složky složeného snímku. Tyto body se nachází převážně na překrývajících částech budoucí mozaiky, což zkvalitní i následující proces mozaikování. Primárně jsou vybírány oblasti u nichž by nemělo docházet k výrazným posunům a jejich vertikální složka posunu je tedy velmi blízká nule.

6.7.4 Průměrování

V tento moment jsou snímky normalizovány jak časově tak na základě vztažných bodů. Dále je provedeno hrubé maskování koherencí (*Band Maths: Disp * (coh ≥ 0,05)*) a minimální oříznutí okrajů snímků, což umožní odstranění velmi extrémních hodnot a okrajových nepřesností. Poté následuje průměrování vertikální složky posunu. Nejprve je provedena koregistrace nástrojem *Coregistration* a pomocí *Band Maths* vypočten průměr párů 1, 2 a 3.

6.7.5 Vytvoření mozaiky

Pro vizualizaci celé snímané oblasti povodí je nutné spojení všech částí do mozaiky. Toto je možné pomocí referenčních bodů a operátoru *SAR Mosaic*. Výhodné je vytvoření mozaiky z již koherencí maskovaných snímků. Takto je dále možné vyhodnotit výstupy na základě kvalitnějších dat. V této studii jsou maskována data s hodnotou koherence $coh \geq 0,05$ a dále pro přesnější výstupy $coh \geq 0,3$.

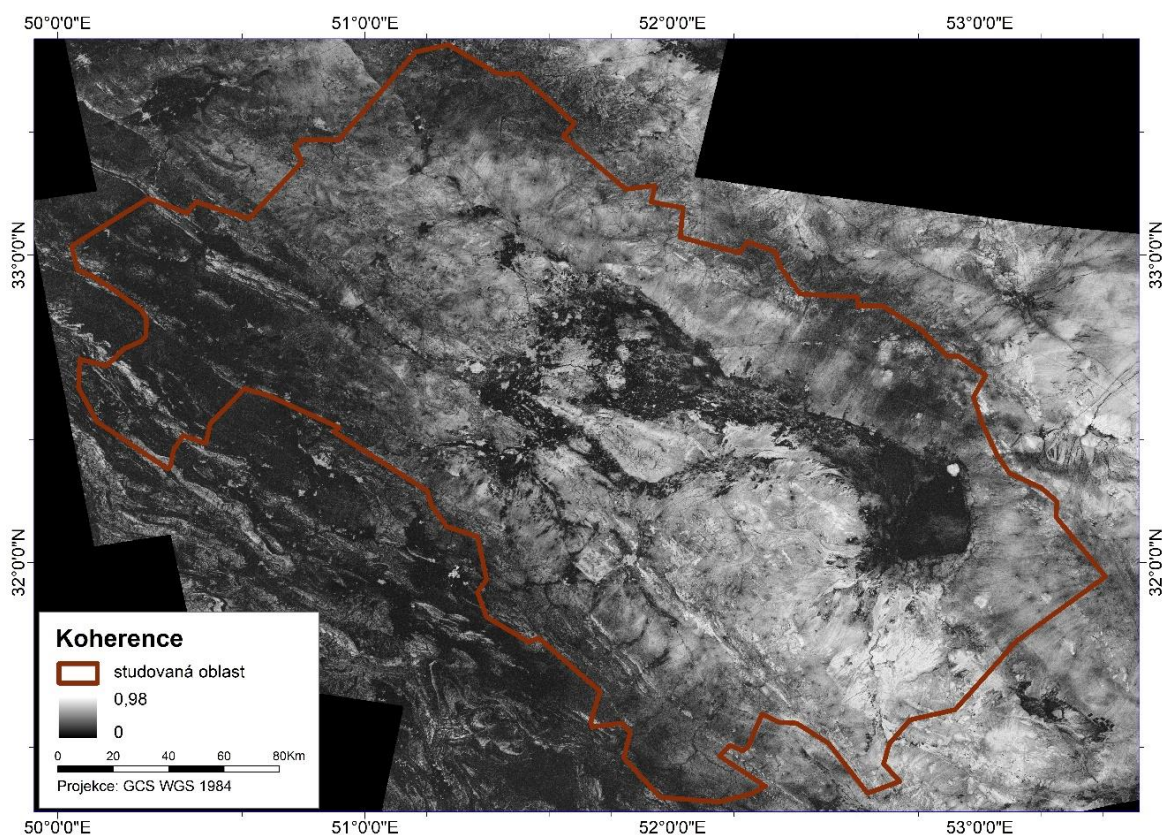
7 VÝSLEDKY

Jak je popsáno v metodickém postupu, pro zjištění míry *subsidence* v oblasti povodí řeky Zayandeh Rud byly použity především nástroje SNAP a SNAPHU. Bylo zpracováno celkově 30 párů snímků pokrývajících tuto oblast a to z drah snímání sestupných i vzestupných. Snímky byly zpracovány v interferometrických párech s časovou základnou 360 dní v období srpen až září roku 2018 a 2019.

V prostředí SNAP byly páry nejprve koregistrovány a následně byl formován interferogram, jenž umožnil určit změnu hodnoty fáze odražených paprsků mezi snímkem hlavním (2018) a snímkem vedlejším (2019). Po odstranění topografické fáze za pomoci Digitálního Modelu Povrchu (DMP) a opravě nekonzistentní velikosti pixelu, byla fáze rozbalena nástrojem SNAPHU. Následně byly odstraněny geometrické deformace a poté proveden přepočítání rozbalené fáze na jednotky délky, což umožnilo určit míru poklesu ve směru snímání a následně ve směru vertikálním. Celý proces byl automatizován pomocí GPT (*Graphic Processing Tool*) a postupů (graphs) zpracovaných nástrojem Graph Builder.

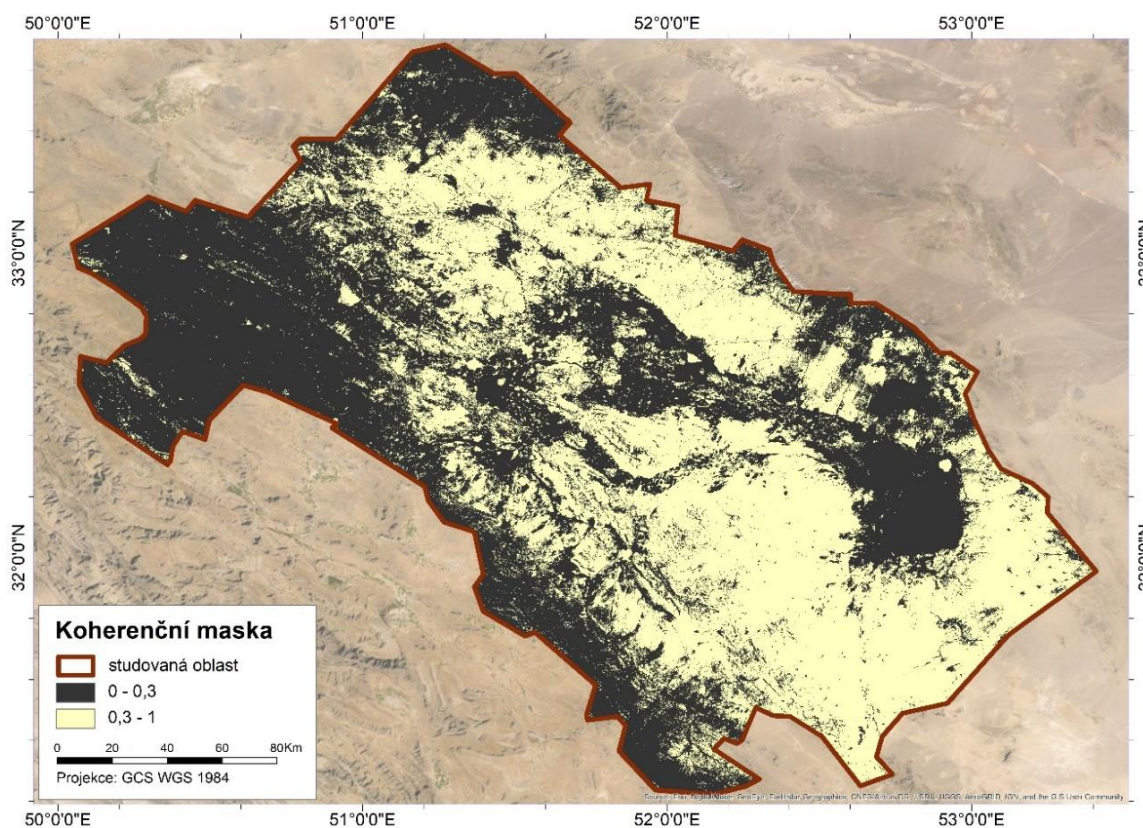
7.1 Koherence

Pro dosažení kvalitnějších výsledků studie, byla vstupní data hodnocena dle parametru koherence. Následující mapa (obr. 7.1) zobrazuje míru koherence neboli spolehlivosti interferogramu na základě korelace hlavního a vedlejšího snímku páru. Hodnoty koherence se pohybují se mezi 0 (pouze šum) až 1 (bez šumu) a jsou znázorněny odstíny šedi. Černá barva odpovídá hodnotám blízkým nule a jedná se o tzv. dekorelaci. Naopak bílá barva znázorňuje hodnoty s vysokou mírou korelace.



Obr. 7.1 Mozaika míry koherence

Pro prvotní odstranění extrémních a okrajových hodnot byla během celého procesu zpracování použita data s koherencí $\geq 0,05$. Pro přesnější výsledné výstupy byla dále vytvořena koherenční maska s hodnotou koherence $\geq 0,3$. Tato maska je zobrazena na následující mapě (obr 7.2). Žlutá barva označuje místa, kde míra koherence je vyšší nebo rovna minimální hodnotě 0,3, a která jsou tedy vhodná pro další zpracování. Černá barva naopak označuje místa, která jsou vyjmuta z výsledků zpracování z důvodu příliš nízké míry koherence.



Obr.7.2 Maska studované oblasti dosahující stanovené míry koherence.

Nízká míra korelace snímků páru je v oblasti kolem města Isfahan a je způsobena převážně vegetačním pokryvem a jeho změnou v čase na zemědělsky využívaných oblastech. V Západní části je dekorelace při pohoří Zagros.

7.2 Vertikální posun zemského povrchu

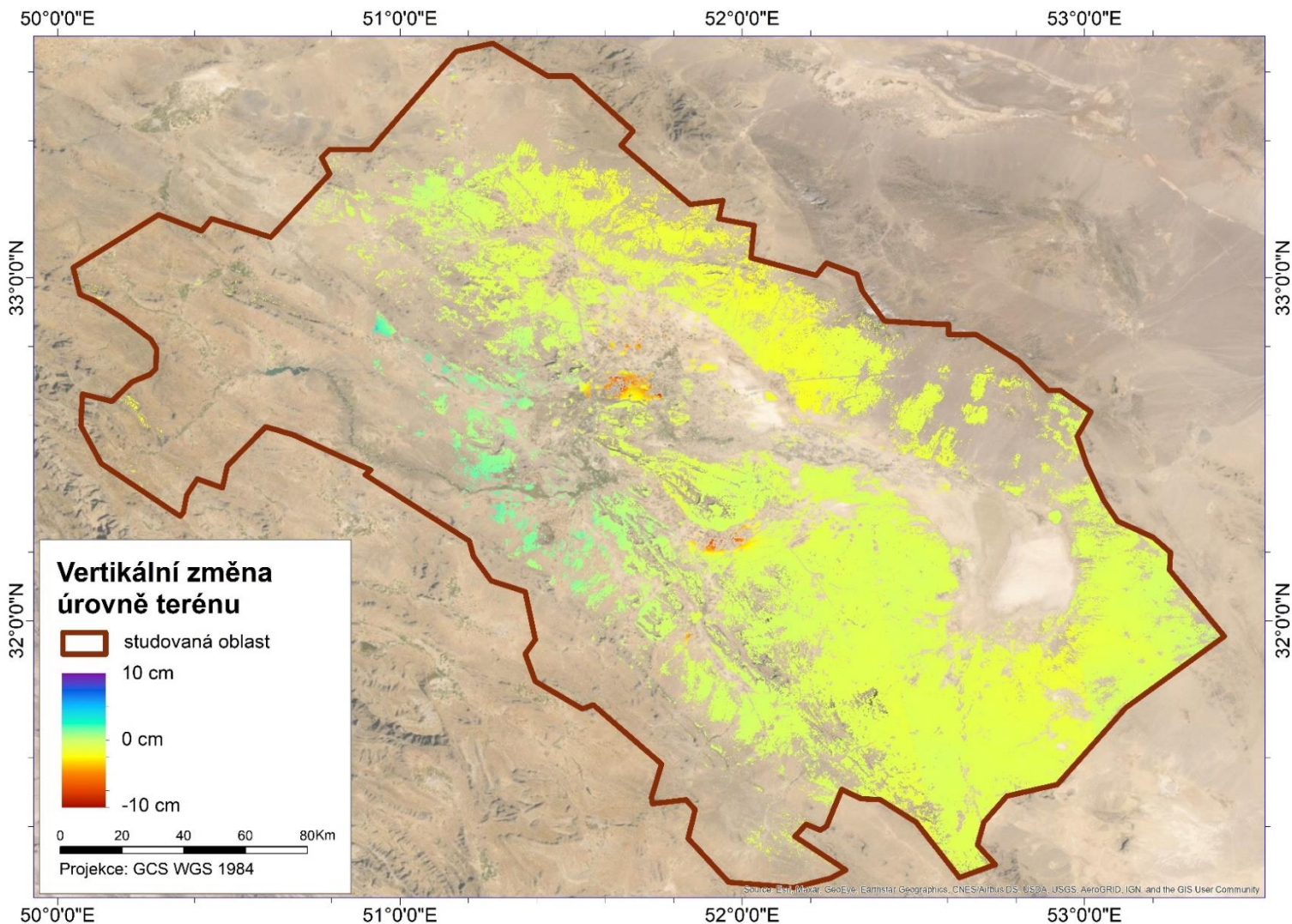
Vertikální posun byl získán výpočtem, který je založený na složení dat sestupných i vzestupných drah a znalosti jejich parametrů. Byly tedy získány hodnoty míry poklesu či vzestupu zemského povrchu.

Tato studie však poukázala na systémové chyby, vznikající v důsledku rozsáhlosti studované oblasti. Jedná se převážně o chyby způsobené zpožděním odraženého signálu v troposféře nebo dalšími atmosférickými vlivy, a dále také okrajovým zkreslením. Většina těchto chyb je méně výrazná při studiích zahrnujících menší oblast např. jediného snímku nebo několika pulsů (*bursts*). Bodové hodnoty subsidence zde tedy není možné považovat za absolutní v přesnosti na milimetry, jak je tomu v jiných případech použití metody diferenční interferometrie. Zpřesnění výsledků pro celou oblast by bylo možné za předpokladu vysoké časové i výpočetní náročnosti.

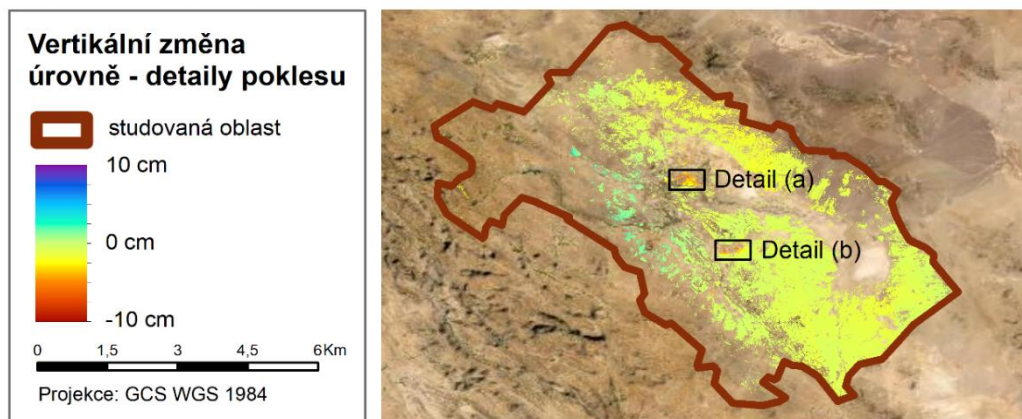
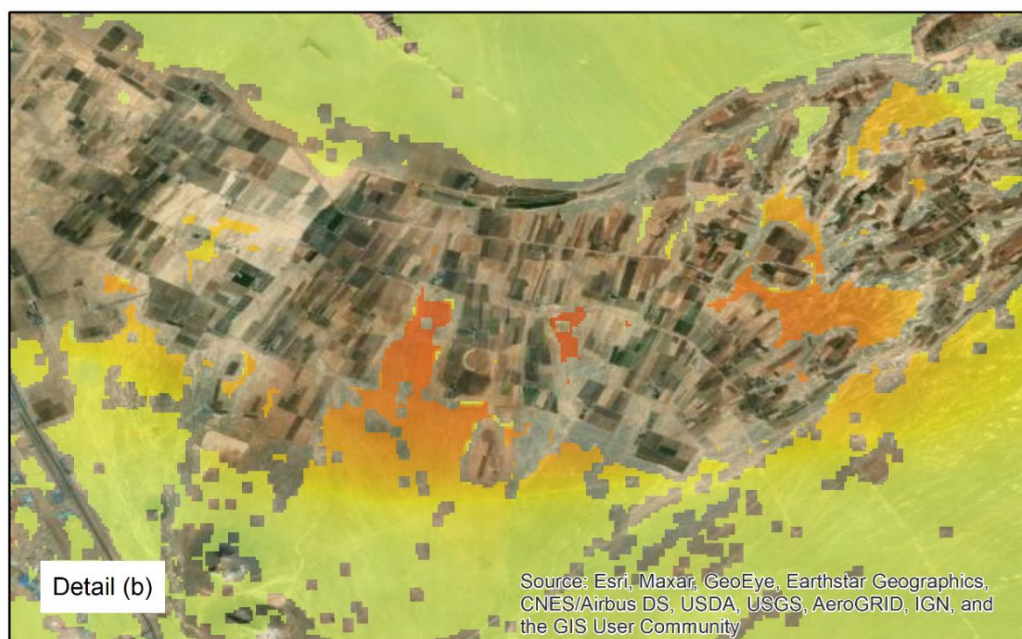
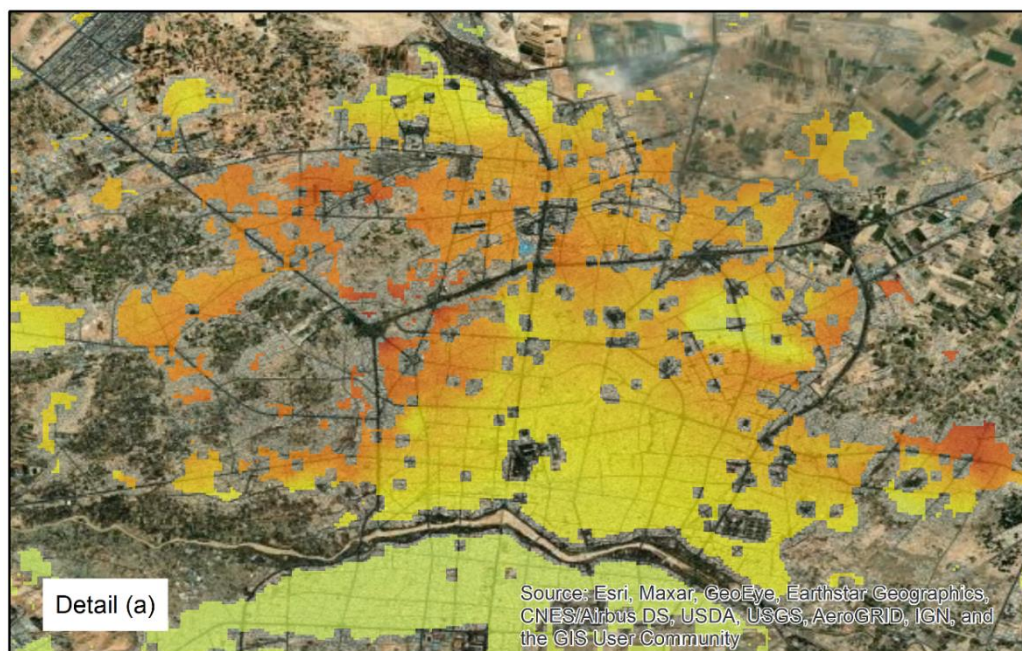
Vybraným postupem zpracování nebylo tedy dosaženo přesné kvantifikace míry subsidence. Bylo však možné nalézt trend deformace napříč celou oblastí. Neboli není takto možné přesně určit míru, ale lze velmi přesně identifikovat ohrožená místa. Toto vymezení však výrazně usnadňuje další monitoring a lokální studie.

Následující obrázek (obr.7.3) zobrazuje míru deformace terénu v řádu centimetrů. Dochází zde k výraznému poklesu ve dvou oblastech a to až do výši 10 centimetrů za rok. Naopak směrem k pohoří Zagros dochází k velmi mírnému plošnému zdvihu terénu. Ostatní plocha povodí je blízká nulových hodnot deformace.

Obr. 7.3 Míra ročního vertikálního posunu v rámci studované oblasti – vertikální displacement



Obr.7.4 zobrazuje dvě lokality identifikované touto metodou jako lokality, kde dochází k výrazné lokální deformaci. První lokalita je centrum města Isfahán na levém břehu řeky, druhou je zemědělská oblast u města Mahyar.



Obr. 7.4 Detaily vybraných oblastí s vyšší mírou deformace

8 DISKUZE

8.1 Zhodnocení použitých nástrojů a metody

Tato práce představuje analýzu terénní deformace v oblasti Isfahánské pánve prostřednictvím open-source nástrojů a volně dostupných dat Copernicus, pořízených družicí Sentinel-1. Míra přesnosti se zde pohybuje v řádech centimetrů při plošném prostorovém rozlišení 60 m.

Metody zpracování InSAR publikované v literatuře se liší převážně v závislosti na dostupnosti dat či nástrojů. Nicméně i při velmi podobných metodických postupech dochází k výrazným rozdílům a odlišné kvalitě jednotlivých studií, a to zejména v důsledku volby počtu zpracovávaných interferometrických párů, velikosti území či velikosti časové základny. Zásadní je také časová či finanční náročnost nebo problematika obrovského objemu dat. Většina studií zpracovávající data Sentinel-1, se soustředí spíše na lokální analýzu středního měřítko pro oblasti jednoho města, či například jednoho dolu, kde není potřeba větší mozaika snímků. V interferometrickém páru je tedy zpracován zpravidla pouze jeden snímek sestupné dráhy a jeden snímek vzestupné dráhy, ale s využitím velkého množství párů v delší časové řadě. Tímto postupem je po zprůměrování dat dosaženo velmi přesných výsledků při vysokém plošném rozlišení. Je tedy jasné, že počet snímků v časové řadě a časová základna interferometrických párů má obecně velmi vysoký vliv na kvalitu výstupů. Rozsáhlost území o každý další snímek pak mnohonásobně zvyšuje časovou náročnost zpracování a objem zpracovávaných dat. Pro dosažení dostatečně kvalitních výsledků splňující účel studie je tedy nutné dobře zvážit poměr velikosti území a potřebné přesnosti výsledných hodnot míry deformace.

Tato myšlenka je potvrzena i výsledky této analýzy, kdy lze tedy říci, že za pomoci pouze několika málo setů interferometrických párů o časové základně jeden rok a pokrývajících oblast přes 41 000 km², není zvoleným postupem a nástroji možno dosáhnout vysoké přesnosti pro určení absolutní míry subsidence. Je však možné identifikovat trend a prostorové rozložení deformací na velmi rozsáhlém území v relativně krátkém čase, což může být velmi významným přínosem. Metoda a zvolený zpracovatelský řetězec zde umožnili seznámení s oblastí, před-zpracování dat a lokalizaci míst pro podrobnější průzkum. Funkce této práce je tedy převážně experimentální, a to jak z hlediska míry deformace, tak z hlediska použití zvolené metody. Její důležitost se však nachází právě v usnadnění a přípravě dalších podrobnějších lokálních studií.

Dalšími kroky, které by následovaly za předpokladu možnosti pokračování této studie, by bylo tedy zmenšení oblasti, zaměření na vybrané lokality, a zvýšení počtu snímků v delší časové řadě. Pro přesnější výsledky by koregistrované páry byly dále zpracovány metodou PSI pomocí nástroje StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers). Zásadním krokem by byla také troposférická korekce pro zmírnění topograficky korelované atmosférické fáze. Tato korekce byla rozvinuta a použita např. ve studii, jenž se zabývá měřením urbánní subsidence Římské Metropole (Delgado Blasco *et al.*, 2019). Dále použití dalších bodových metod, jako GPS či nivelační měření by napomohlo normalizaci a zvýšilo přesnost výsledků. Zmíněná integrace InSAR s geodetickým průzkumem byla použita i např. při studii míry subsidence provincie Yazd (Irán), kde umožnila ověření přesnosti InSAR deformačních map (Amighpey and Arabi, 2016).

Pro obecnější posouzení metody je důležité dodat, že schopnost skutečně sledovat jevy se výrazně zvýšila díky systematické dostupnosti dat Copernicus Sentinel-1. Společně s využitím open source nástrojů se otevřely obrovské možnosti detekovat a měřit pohyby zemského povrchu se značnou přesností a v relativně krátkém čase. Srovnatelné studie v minulosti by vyžadovali dlouhá pozorovací období, aby bylo možné shromáždit dostatek dat k získání stejně obsáhlých řešení. Toto nabízí široké možnosti využití v monitoringu geohazardů.

8.2 Zhodnocení míry deformace

Zájmová oblast vykazuje různé míry deformace. Mezi nejvýznamněji subsidencí zasažené oblasti patří město Isfahán, zejména pak přilehlé zemědělské oblasti a dále zemědělská oblast 50 km jižně od hlavního města u města Mahyar. Ve většině případů lze nejspíše deformaci půdy připisat místním geologickým podmínkám, jako je zhutňování měkkých sedimentů, nicméně i zatížení městskými stavbami může být jedním z hlavních posilovacích faktorů (Chen *et al.*, 2019). Bylo by však potřeba dalších analýz, které by charakterizovaly jevy vyvolané poklesem a jejich časový vývoj ve srovnání s minulými měřeními posunu. V závislosti na poloze lokalit s nejvyšší mírou deformace, lze však z této studie vyvodit, že stejně jako v mnoha dalších iránských regionech, pokles ovlivňuje hlavně způsob zemědělství, založený na čerpání podzemních vod.

Z důvodu vysoké míry subsidence v Iránu, byla již v roce 2008 provedena rozsáhlá celostátní studie míry deformace. Studie identifikovala několik nejvíce postižených oblastí, mezi nimiž tehdy Isfahanská pánev nebyla. Jednalo se především o Tehránskou plošinu, Rafsanjan, Mashad Valley, Yazd, Kerman a Kasmár. Nejvyšší míra deformace dosahovala v Západním Tehránu až 14 cm poklesu za období 140 dní od poloviny června do konce října 2004. Dle této studie byl Irán označen za zemi, která má jedny z nejvíce subsidencí postižených a nejrychleji klesajících údolí a pánví (Motagh *et al.*, 2008). Další studie v pozdější době prokázaly, že tento trend se nadále nemění. V Roce 2017 lokální analýza ukázala, že Tehránská plošina je zasažena subsidencí na ploše až 525 km² a posledních 25 let čelí deformaci až 36 cm za rok (Pirouzi and Eslami, 2017).

Nižší míru deformace Isfahánské pánve lze přisoudit odlišným geologickým podmínkám. Nicméně v detekovaných lokalitách se hodnoty subsidence pohybují v řádu několika centimetrů za rok, a to i v rámci městských oblastí, což rozhodně není zanedbatelné. To zvláště v případě, kdy trend využívání podzemních zdrojů vody neklesá, ale naopak díky vysokému tlaku na zemědělství neustále roste.

9 ZÁVĚR

Využitím dat SAR mise Sentinel-1 bylo analyzováno území Isfahánské pánve v širším kontextu povodí Zayandeh Ruh. Analýza umožnila zpracování plošného přehledu ročního poklesu a tím také identifikaci významněji zasažených oblastí deformací. Byly stanoveny dvě oblasti, které by byly vhodné k dalšímu zpracování lokální analýzy. Míra deformace těchto území dosahuje hodnot několika centimetrů poklesu za období mezi srpnem 2018 a 2019. Pro získání přesných hodnot by však bylo nutné provedení podrobnější lokální studie o delší časové řadě.

Na začátku práce bylo vytyčeno několik cílů. Prvními bylo nastudování problematiky subsidence, radarové interferometrie a metod vhodných pro monitoring deformací zemského povrchu. Na základě těchto získaných informací mohla být následně vybrána vhodná data a zpracován vlastní zpracovatelský řetězec, vedoucí k výpočtu vertikálního posunu terénu. V prostředí SNAP bylo takto zpracováno celkem 30 interferometrických párů, pokrývajících celou oblast povodí. Podrobně bylo tak představeno využití volně dostupných dat a open-source nástrojů pro pokročilé interferometrické zpracování v oblasti geohazardů.

Jako další cíl bylo stanoveno i seznámení se studovanou oblastí, které napomohlo k lepšímu pochopení místních podmínek. Díky tomu, byla data zpracována v širším měřítku, aby bylo možné nejprve identifikovat nejvíce zasažené zemědělské oblasti.

Celé uzavřené povodí má mnohá specifika a je velmi rozmanité. Řeka je zde nejdůležitějším vodním zdrojem, který však kvůli špatnému vodnímu managementu není nadále schopen uspokojit poptávku po vodě. V důsledku mnoha tlaků, jakými je například velký rozvoj zemědělství a nárůst obyvatelstva se zde přístup k nakládání s vodou namísto zlepšování účinnosti systémů a spravedlivějšího rozdělování vody orientuje na jiné zdroje – podzemní vodu. Tato práce, stejně jako další zabývající se touto či jinou zasaženou oblastí, může upozornit na rizika tohoto způsobu hospodaření. Monitoring deformací povrchu v důsledku nadměrného čerpání podzemních vod a hlubší porozumění této problematice je proto jednou z důležitých prerekvizit pro nalezení vhodného řešení ke zmírnění vodní krize v oblasti.

10 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- Amighpey M., Arabi S., (2016): Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 4, p. 1–8.
- Chen X.-T., Zhu X., Wang X., Cai Y., (2016): INSAR Flat-earth Phase Removal Approach Based on DEM to Settlement Area. *ITM Web of Conferences*, vol. 7, p. 09004.
- Chen Y., Zhao W., Huang Y., Jia P., (2019): Investigation of Land Subsidence Based on the Column Element Settlement Model in a Soft-Soil Area. *Geofluids*, vol. 2019
- Copernicus / Homepage, (©2018): (online) [cit. 04/03/2020], dostupné z <<https://www.copernicus.eu/en>>.
- Dai K., Liu G., Li Z., *et al.*, (2015): Extracting vertical displacement rates in Shanghai (China) with multi-platform SAR images. *Remote Sensing*, vol. 7 (8), p. 9542–9562
- Delgado Blasco J., Fomelis M., Stewart C., Hooper A., (2019): Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*, vol. 11 (2), p. 1–17.
- Dobrovolný P., (1998): *Dálkový průzkum Země; Digitální zpracování obrazu*, Masarykova Univerzita, Brno, 218 p.
- Domenico P. A., Mifflin M. D. (1965): Water from Low-Permeability Sediments and Land Subsidence. *Water resources research*, vol. 1 (4), p. 563–566.
- ESA, (2016): Sentinel Online - User Guides - Sentinel-1 SAR - Interferometric Wide Swath (online) [cit. 07/03/2020], dostupné z <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>>.
- ESA, (2018): Sentinel-1 - Sentinel Online. (online) [cit. 03/03/2020], dostupné z <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>>
- Faunt C. C., Sneed M., Traum J., Brandt J. T., (2016): Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal*, vol. 24 (3), p. 675–684
- Ferretti A., Monti-Guanieri A., Prati C., Fabio R., (2007): *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39 (1), p. 8–20.
- Galloway D. L., Jones D. R., a Ingebritsen S. E., (1999): Land subsidence in the United States. *U.S. Geological Survey Circular*, vol. 1182, Denver, CO
- Gisat, (2018): *Radarová interferometrie* (online) [cit. 16/03/2020], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/zpracovani-dat/radarova-interferometrie>>.
- Gohari A., Eslamian S., *et al.*, (2013): Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, vol. 442, p. 405–419

- Goldstein R. M., Werner C. L., (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, vol. 25(21), p. 4035–4038
- Haghighi M. H., Motagh M., (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, vol. 142 (4), p. 245–256
- Haghighi M. H., Motagh M., (2018): Nation-wide Detection and Measurement of Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Iran. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 20
- Hanssen R. F., (2001): *Radar Interferometry - Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht, 308 p.
- Horlemann L., Besalatpour A., Götz, G., *et al.*, (2018): Integrated Water Resources Management in the Zayandeh Rud catchment , Iran. *Water Solutions*, (2), p. 76–85.
- IWRM - Zayandehrud, (2018): (online) [cit. 19/03/2020], dostupné z <<https://www.iwrm-zayandehrud.com/?lang=en>>.
- Karvánek M., (2016): Využití dat Sentinel-1 pro tvorbu digitálního modelu terénu metodou radarové interferometrie. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha (diplomová práce). "nepublikováno". dep. IS.cuni.
- Lernerová T. (2010): Mapování sesuvů metodou diferenční interferometrie. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha (diplomová práce). "nepublikováno". dep. IS.cuni.
- Li Z. W., Ding X., Huang C., *et al.*, (2006): Filtering method for SAR interferograms with strong noise. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27 (14), p. 2991–3000.
- Li Z. W., Ding X., Huang C., *et al.*, (2008): Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 63, p. 621–634.
- Mehdy S., Shahdany H., Firoozfar A., *et al.*, (2018): Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management*, vol. 204, p. 234–246.
- Mohajeri S., Horlemann L., Sklorz S., *et al.*, (2016): Integrated water resource management in Isfahan: The Zayandeh Rud catchment. in *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*, Springer International Publishing, p. 603–627.
- Mohajeri S., Horlemann L., (2017): *Reviving the dying giant: integrated water resource management in the Zayandeh Rud Catchment, Iran*. 1st edn., Springer International Publishing, Cham, 268 p.
- Moreira A., Prats-Iraola P., Marvan Y., *et al.*, (2013): A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1 (1), p. 6–43.
- Motagh M., Shamschiri R., Haghini M. H., *et al.*, (2017): Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, p. 134–151.

- Motagh M., Walter T. R., Sharifi M. A., *et al.*, (2008): Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical research letters*, vol. 35 (16)
- Nazemi N., Foley R., Louis G., *et al.*, (2019): Divergent agricultural water governance scenarios: The case of Zayanderud basin, Iran. *Agricultural Water Management*, vol. 229, 105921.
- NOAA, (2019): What is subsidence? (online) [cit. 18/02/2020], dostupné z <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/subsidence.html>>.
- Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A., (2020): Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sensing*, vol. 12 (2) a.242.
- Pepe A., Calò F., (2017): A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*, vol. 7 (12), 39 p.
- Pirouzi A., Eslami A., (2017): Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *International Journal of Geo-Engineering*, vol.8 (1) 30 p.
- Raber W., Mohajeri S., (2017): Current and Future Industrial Water Use in the Zayandeh Rud Catchment. in Mohajeri, S. and Horlemann, L. (eds) *Reviving the Dying Giant: Integrated Water Resource Management in the Zayandeh Rud Catchment, Iran*, p. 95–115.
- Richards J. A., (2009): *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer, Berlin, Heidelberg. 361p.
- Rosen P. A., (2000): Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, vol. 88 (3), p. 333–380.
- Rott H., (2009): Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science. *Progress in Physical Geography*, vol. 33 (6), p. 769–791.
- RUS Training / Land Subsidence mapping with Sentinel-1 (2018): (online) [cit. 02/03/2020], dostupné z <<https://rus-training.eu/training/land-subsidence-mapping-with-sentinel-1>>.
- Sarhadi A., Soltani S., (2013): Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. *Journal of Arid Enviroments*, vol 98, p. 27-40.
- Sarti F., (2009): Reminder about SAR - course (Bucharest), ESA.
- Schramm E., Sattary E., (2014): Scenarios for Closed Basin Water Management in the Zayandeh Rud Catchment Area, Institut für sozial-ökologische Forschung Frankfurt/Main (report).
- Slačíková J. (2010): Hodnocení vlivu interpolace při koregistraci radarových snímků. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha (diplomová práce). "nepublikováno". dep. IS.cuni.
- SNAP software /help-operator/ [cit 07/03/2020]
- Stanford.edu, (2019): SNAPHU. (online) [cit 07/03/2020], dostupné z <<https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>>.

- THE CEOS DATABASE : CATALOGUE OF SATELLITE INSTRUMENTS* (2020): (online) [cit. 19/03/2020], dostupné z <<http://database.eohandbook.com/database/instrumenttable.aspx>>.
- Todd D., Mays L. (2005): *Groundwater Hydrology*. 3rd edn, John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, 656 p.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., *et al.*, (2012): GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, p. 9–24.
- Urban P., (2002): Radarová interferometrie. *Geodetický a kartografický obzor*, vol. 48/90 (12), p. 227–231.
- USGS, (2016): Land Subsidence. (online) [cit. 07/03/2020], dostupné z <[https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/land-subsidence?qt-science center objects=0#qt-science center objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/land-subsidence?qt-science+center+objects=0#qt-science+center+objects)>.
- USGS, (2018a): Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). (online) [cit. 07/03/2020], dostupné z <[https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar?qt-science center objects=0#qt-science center objects](https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar?qt-science+center+objects=0#qt-science+center+objects)>.
- USGS, (2018b): Spirit Leveling. (online) [cit. 07/03/2020], dostupné z <[https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/spirit-leveling?qt-science center objects=0#qt-science center objects](https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/spirit-leveling?qt-science+center+objects=0#qt-science+center+objects)>.
- USGS, (2018c): Measuring and Monitoring. (online) [cit. 07/03/2020], dostupné z <<https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/measuring-and-monitoring>>.
- Yague-Martinez N., Prats-Iraola P., *et al.*, (2016): Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54 (4), p. 2230–2234.
- Zamani O., Grundmann P., Libra J., *et al.*, (2019): Limiting and timing water supply for agricultural production-The case of the Zayandeh-Rud River Basin, Iran. *Agriculture Water Management*, vol. 222, p. 322–335.
- Žubrietovský L., Švábová L., Šváb O., (2017): *Uživatelská příručka CollGS - Sentinel Collaborative Ground Segment*. (online) [cit. 28/02/2020], dostupné z <<https://collgs.czechspaceportal.cz/uzivatelska-prirucka/>>.

11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tab.5.1 Přehled základních parametrů snímacích režimů Sentinel-1

Tab.5.2 Parametry S1 SLC produktů pořízených IW snímacím režimem

Tab.5.3 Přehled hlavních snímků sestupných drah

Tab.5.4 Přehled vedlejších snímků sestupných drah

Tab.5.5 Přehled hlavních snímků vzestupných drah

Tab.5.6 Přehled vedlejších snímků vzestupných drah

Tab.6.1 Snímky sestupných drah (DES)

Tab.6.2 Snímky vzestupných drah (ASC)

Obr.3.1 Elastická deformace vodonosného systému

Obr.3.2 Zhutnění vodonosné vrstvy - trvalá deformace

Obr.3.3 Geometrie snímání a pozemního prostorového rozlišení SLAR

Obr.3.4 Princip virtuální antény SAR

Obr.3.5 Geometrie InSAR

Obr.3.6 Možné varianty tvorby diferenčního interferogramu

Obr.4.1 Povodí Zayandeh-Rud v rámci Iránu; znázornění prostorových souvislostí v rámci povodí

Obr.4.2 Hlavní zavlažovací systémy povodí

Obr.5.1 Sentinel 1 - pokrytí a časové rozlišení

Obr.5.2 Sentinel 1 – snímací režimy

Obr.5.3 Sentinel 1 – snímací režimy, pozorovací geometrie a polarizace

Obr.5.4 Snímky pokrývající zájmové území v sestupném a vzestupném směru

Obr.6.1 Zpracovatelský řetězec v prostředí SNAP a SNAPHU

Obr.6.2 Rozdělení SLC snímku módu IW na subpásy a pulsy

Obr.6.3 Obrazový kanál koherence produktu AB1_DES před a po Multilookingu s parametry 16:4

Obr.6.4 Porovnání produktu AB1_DES před filtrací a po filtraci fázovým operátorem Goldstein_Phase Filtering

Obr.6.5 Zobrazovací geometrie satelitního SAR systému podél vzestupných a sestupných drah a vztah mezi posunem ve směru LOS a 3D vektorovými komponenty

Obr.6.6 Orientační znázornění překrytí snímků sestupné a vzestupné oběžné dráhy

Obr.7.1 Mozaika míry koherence

Obr.7.2 Maska studované oblasti dosahující stanovené míry koherence

Obr.7.3 Míra ročního vertikálního posunu v rámci studované oblasti – vertikální displacement

Obr.7.4 Detaily vybraných oblastí s vyšší mírou deformace