

# Metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledováním subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury

2014



Milady Horákové 57

170 00 Praha 7

<http://www.gisat.cz>

Dedikace:

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu „ **Zhodnocení využitelnosti dat dálkového průzkumu Země pro použití v dopravě**“ realizovaného s finanční podporou TA ČR v rámci programu Beta (ev. č. projektu TB0100MD021).



Název:

**Metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledování subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury**

Hlavní řešitel:

Mgr. Jan Kolomazník, GISAT s.r.o.

Na vyhotovení metodiky spolupracovali:

Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky

Ing. Milan Lazecký, Ph.D., IT4Innovations, VŠB-TU Ostrava

Oponenti byli:

Ing. Markéta Potůčková, Ph.D., Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Ing. Juraj Papčo, Ph.D. STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodetických základov

Metodika byla certifikována osvědčením Ministerstva dopravy č.j. .... ze dne.....

© 2014 GISAT.s.r.o.

## OBSAH DOKUMENTU

1	ÚVOD.....	- 8 -
2	TEORETICKÁ ČÁST - REŠERŠE PUBLIKACÍ A DAT .....	- 9 -
2.1	SLEDOVÁNÍ NĚŽÁDOUCÍCH POHYBŮ A DEFORMACÍ POMOCÍ INSAR .....	- 9 -
2.2	DOPRAVNÍ APLIKACE INSAR .....	- 10 -
2.3	VYUŽITÍ UMĚLÝCH KOUTOVÝCH ODRAŽEČŮ.....	- 12 -
2.4	VÝBĚR DAT A METOD.....	- 13 -
2.5	DATA SAR.....	- 14 -
3	PRAKTICKÁ ČÁST .....	- 21 -
3.1	PS InSAR - PROVEDITELNOST A PRINCIPY .....	- 22 -
3.1.1	VYHODNOCENÍ PROVEDITELNOSTI MONITORINGU POMOCÍ InSAR .....	- 24 -
3.1.2	DOPORUČENÝ OBECNÝ POSTUP ZPRACOVÁNÍ .....	- 37 -
3.1.3	PŘESNOST A VALIDACE.....	- 44 -
3.1.4	INTERPRETACE VÝSLEDKŮ .....	- 48 -
3.2	UMĚLÉ KOUTOVÉ ODRAŽEČE .....	- 55 -
3.2.1	MATERIÁL, TVAR A ÚPRAVY ODRAZIVÝCH PLOCH ODRAŽEČE.....	- 55 -
3.2.2	ODVOZENÍ MINIMÁLNÍ ODRAZIVOSTI ODRAŽEČE PRO JEDNOTLIVÉ DRUŽICOVÉ SAR INSTRUMENTY (pásmo X, C a L).....	- 56 -
3.2.3	ODVOZENÍ POTŘEBNÉ PLOCHY, TVARU A ORIENTACE ODRAŽEČE PRO DRUŽICI SENTINEL-1 .....	- 57 -
3.2.4	NÁVRH ODRAŽEČE SLEDOVATELNÉHO VÍCE INSTRUMENTY.....	- 59 -
3.2.5	ZAMĚŘENÍ A INSTALACE ODRAŽEČE.....	- 60 -
3.2.6	UMÍSTĚNÍ ODRAŽEČŮ PRO SLEDOVÁNÍ PLOŠNÉHO JEVU DEFORMACE.....	- 61 -
4	EKONOMICKÉ ASPEKTY .....	- 63 -
5	ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA UDRŽITELNOSTI.....	- 65 -
6	VYJÁDŘENÍ K NOVOSTI POSTUPŮ .....	- 66 -
	PŘEHLED LITERATURY .....	- 67 -
	O AUTORECH .....	- 73 -

## SEZNAM ZKRATEK

A	Ascending (vzestupná) dráha
AOI	Area of Interest (zájmová oblast)
C	Pásmo C (vlnová délka 5,6 cm)
CLC	CORINE Land Cover (databáze krajinného pokryvu CORINE)
CSM	družice COSMO-SkyMed
ČGS	Česká Geologická Služba
ČR	Česká republika
D	Descending (sestupná) dráha
dB	Decibel
DEM	Digital Elevation Model (digitální výškový model)
DI	Dopravní infrastruktura
DLR	Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt (Německá agentura pro letectví a vesmír)
DN	Digital number (digitální číslo/hodnota)
DPZ	Dálkový průzkum Země
DS	Distributed Scatterer (distribuovaný odražeč)
DSM	Digital Surface Model (digitální model povrchu)
D InSAR	Diferenciální InSAR
EEA	European Environmental Agency (Evropská agentura pro životní prostředí)
EO	Earth Observation (pozorování země)
ESA	European Space Agency (Evropská kosmická agentura)
GMES	Global Monitoring for Environment and Security (nyní program Copernicus)
GPS	Globální poziční systém
HLOP	High Level Operational Plan (Vysokoúrovňový operační plán družice Sentinel-1)
HR	High-Resolution (data vysokého rozlišení)
HS	High-resolution SpotLight Mode (pořizovací mód družice TerraSAR-X)
InSAR	Interferometrický SAR
IPTA	Interferometric Point Target Analysis (Interferometrická analýza bodových odražečů; metoda zpracování trvalých odražečů)
IW	Interferometric Wide-swath Mode (pořizovací mód družice Sentinel-1)
KAT	Kompaktní aktivní transpondér
KM	Konvenční metoda
L	Pásmo L (vlnová délka 46 cm)
L1	Level 1 (úroveň zpracování na úrovni 1)
LOS	Line of Sight (směr pohledu)
MD	Ministerstvo dopravy
MR	Medium resolution (data středního rozlišení)
MTI	Multi Temporal Coherence (metoda multitemporální koherence)
PS	Persistent Scatterer (trvalý odražeč)
PS InSAR	Persistent/Permanent Scatterers InSAR (metoda trvalých odražečů)
RCS	Radar Cross Section (radarový průřez, průmět objektem resp. jeho míra detekovatelnosti radarem)
R-1/2	RADARSAT-1/2
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
S-1	družice Sentinel-1

---

Dokument č.: GST-TACRb-D2\_v1-0

Verze: D1.0 Datum: 9. prosince 2014

SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar se syntetickou aperturou)
SBAS	Small BAseline Subset method (metoda krátkých základen; metoda zpracování trvalých odražečů)
SL	SpotLight (pořizovací mód SAR)
SLC	Single Look Complex data (data SAR pořízená jako SLC)
SM	StripMap Mode (pořizovací mód SAR)
SNR	Signal-to-noise ratio (poměr signál/šum)
SqueeSAR	metoda zpracování trvalých a distribuovaných odražečů
StaMPS	Stanford Method for Persistent Scatterers (Stanfordská metoda zpracování PS InSAR; metoda zpracování trvalých odražečů)
STR	StripMap Mode (pořizovací mód v souvislosti s družicí CSM)
TAČR	Technologická agentura České republiky
TRE	TeleRivalmento Europa (firma)
TSX	družice TerraSAR-X
UA	Urban Atlas (databáze Urban Atlas)
UKO	Umělý koutový odražeč
VHR	Very High Resolution (data velmi vysokého rozlišení)
WMS	Web Map Service (webová mapová služba)
X	Pásmo X (vlnová délka 3,1 cm)

## SHRNUTÍ

Dokument Přehled jevů a dat pro použití v dopravě a Analýza přínosu je závěrečným výstupem z řešení projektu „**Zhodnocení využitelnosti dat DPZ pro použití v dopravě**“. Projekt s ev. č. TB0100MD021 byl realizován v rámci zakázky na základě veřejné soutěže v programu Technologické agentury České republiky (TAČR) Beta v letech 2013-2014. Příjemcem projektu byla společnost GISAT s.r.o., která při zpracování metodiky spolupracovala s odborníky z Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze a z centra IT4INNOVATIONS na Fakultě hornicko-geologické Vysoké školy báňské – Technické univerzitě v Ostravě.

Dokument navazuje na výstupy z první fáze projektu v roce 2013: **Přehled jevů a dat DPZ pro použití v dopravě** a **Analýza přínosu vybraných aplikací**. Zaměřuje se na aplikovatelnost metody trvalých odražečů radarové interferometrie (InSAR) pro sledování deformací a rizikových jevů v dopravě, které byly vybrány na základě konzultací s odborníky v oblasti dopravy z ŘSD a SŽDC. Metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledováním subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury předkládá ucelený *metodický rámec*, sloužící potenciálnímu *zadavateli služeb* pro pochopení problematiky výběru vhodných dat a metod radarové interferometrie z hlediska jejich dopadů na detekovatelnost sledovaných specifických rizikových jevů v dopravě (svahové deformace, poklesy, nežádoucí pohyby), dosažitelnou přesností, možností interpretace a v neposlední řadě na cenu takové služby

Teoretické fyzikální a matematické základy metody jsou v dokumentu omezeny na nezbytné minimum.

Dokument je strukturován následujícím způsobem:

- **Teoretická část** shrnuje *stav výzkumu a operačních aplikací* v dopravě pomocí InSAR. Stručná rešerše zahrnuje metodické směry zpracování a konkrétní aplikace v dopravě publikované v odborné literatuře.
- **Praktická část** představuje *metodický rámec postupu* při výběru dat a metod pro sledování deformací a poklesů při plánování sledování deformací podloží v okolí infrastruktury (v důsledku poklesů nebo svahových pohybů). Diskutována je také možnost sledování mostů a jejich deformací a možnosti instalace umělých koutových odražečů. ***Možnosti využití metody jsou demonstrovány na konkrétním příkladu zpracování archivních i nově pořízených dat***, které bylo řešiteli provedeno pro oblast zasaženou svahovými pohyby – svah mezi obcí Lysůvky a rychlostní komunikací R48 a v jejich širším okolí na Frýdecko-Místecku.
- **Ekonomické aspekty** jsou zhodnoceny s ohledem na udržitelnost aplikace v podmínkách ČR.

Metodika pracuje se zúženým výběrem z dostupných dat SAR, který lze dle potřeby rozšířit. Zúžení proběhlo s ohledem na aktuální dostupnost dat, ekonomické aspekty (především cena za data a jejich zpracování) a udržitelnost dané aplikace v podmínkách ČR, která s výslednou cenou služby úzce souvisí.

## CÍLE METODIKY A JEJÍ UPLATNĚNÍ

Předkládaná metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledováním subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury je koncipována především jako komentovaný ucelený *metodický rámec*, jehož **cílem** je posloužit potenciálnímu *zadavateli služeb* pro pochopení problematiky výběru vhodných dat a metod radarové interferometrie pro sledování specifických *rizikových jevů* v dopravě (svahové deformace, poklesy, nežádoucí pohyby). *Poskytovateli služeb* pak poslouží k identifikaci klíčových faktorů, které by měl zohlednit v rámci *vyhodnocení proveditelnosti* a diskutovat se zadavatelem před zahájením mapování.

Metodický rámec by měl sloužit především pro odpovědné technické pracovníky v organizacích zabývajících se správou infrastrukturní sítě (např. na ŘSD, SŽDC) vystupujících v roli zadavatelů služeb/zakázek na sledování rizikových jevů buď ve fázi projektové přípravy výstavby infrastruktury, nebo ve fázi provozu infrastruktury pokud dojde k nežádoucímu jevu. Jak bylo doloženo v dokumentu *Analýza přínosu vybraných aplikací*, InSAR díky své specifické schopnosti detekovat velmi přesně i velmi malé pohyby povrchu doplňuje konvenční metody sledování těchto jevů (např. inklinometrii, geodetická měření) především v situacích, kdy je třeba provést zpětné vyhodnocení rizik, doplnit či zacílit geologický průzkum, provádět dlouhodobý monitoring více objektů/oblastí najednou, mapovat nad rozsáhlým nebo nepřístupným územím.

Metodika se **uplatní** v procesu vyhodnocení proveditelnosti mapování deformací a souvisejícího rizika pomocí InSAR a přípravy zadání a zadávací dokumentace zakázky na mapování, které by měly vycházet ze znalosti problematiky:

- výběru vhodných dat SAR pro PS InSAR monitoring s ohledem na možnosti nejmodernějších družicových SAR senzorů
- výběru metody zpracování InSAR

a jejich dopadů na očekávané výsledky z hlediska:

- limitů
- detekovatelnosti
- přesnosti
- jejich interpretace
- ekonomického rámce nasazení.

Dále metodika poskytuje nezbytné penzum znalostí potřebných pro vedení diskuse s poskytovateli InSAR služeb před, v průběhu a během vyhodnocení zakázky, ohledně:

- jejich požadavků na referenční data
- interpretaci výsledků
- formu a podobu výsledků,

# 1 ÚVOD

Rozvoj sledování pohybů a deformací pomocí DPZ byl umožněn vývojem aktivních radarových senzorů, metod zpracování a výpočetního výkonu v posledních dekádách. Je relativně novým odvětvím, které využívá tzv. *radarové interferometrie* – *InSAR* (z angl. Interferometric Synthetic Aperture Radar). Nejmladší a současně nejprogresivnější technika InSAR využívá srovnání fázových rozdílů signálů pro vybrané stabilní body – tzv. trvalé odražeče – identifikované v sérii družicových snímků SAR pořízených v různém čase nad shodným územím a nazývá metoda *trvalých odražečů* – *PS InSAR* (z angl. Persistent Scatterers InSAR). Snímky sledovaného území jsou pořízeny opakovaně ideálně v pravidelném intervalu pomocí přesných senzorů umístěných na družicovém nosiči pohybujícím se na oběžné dráze ve výšce stovek kilometrů nad zemským povrchem. Technika umožňuje sledovat pohyby povrchu a objektů na něm až s přesností jednotek milimetrů za rok. Využití nachází technika v celé řadě vědních a aplikačních oborů, v souvislosti s dopravní infrastrukturou se jedná o:

- **Sledování a monitoring poklesů (*subsidence*) nebo zdvihů:** vlivem tektoniky, geologických a geofyzikálních faktorů, poddolování, svahových pohybů, sesedání vlivem poklesu spodní vody ad.
- **Plánování výstavby infrastruktury:** strategické plánování založené na zjištění míry stability podloží, rozsahu a intenzity pohybů a deformací před započítáním výstavby, identifikace potenciálně ohrožených ploch nebo úseků a podpůrný nástroj při plánování detailních geologických průzkumů.
- **Zjištění škody a rizik:** deformace infrastruktury nebo budov v důsledku výše uvedených faktorů např. vlivem stavby metra, tunelu, narušení geologické stability svahu nebo podloží ad.

PS InSAR nabízí typické výhody metod dálkového průzkumu: možnost sledování v nepřístupných oblastech, vysoký pokryv při přijatelné přesnosti, určení rozsahu detekovatelných pohybů nebo oblastí s poklesy či nežádoucími pohyby, možnost *kontinuálního* a *zpětného monitoringu*. Analýzou archivních družicových dat lze sledovat i historické deformace zpětně v čase a pomocí podrobných časových řad lze na základě předchozího vývoje odhadovat budoucí vývoj. To činí z dálkového průzkumu vhodný doplněk ke konvenčním měřicím metodám i tam, kde jsou tyto metody sice přesnější, ale kde by jejich plošné nebo preventivní nasazení bylo neefektivní, neekonomické nebo přímo neuskutečnitelné.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST – REŠERŠE PUBLIKACÍ A DAT

V rešeršní části je odkazováno na výzkumné práce a projekty zaměřené na aplikaci metod DPZ pro sledování deformací a poklesů v souvislosti s dopravní infrastrukturou. Cílem není podat vyčerpávající rešerši dostupné literatury na dané téma, ale doložit stav výzkumu v dané oblasti, na jehož základě byla rozvíjena a vypracována metodika popsána v praktické části.

### 2.1 SLEDOVÁNÍ NĚŽÁDOUCÍCH POHYBŮ A DEFORMACÍ POMOCÍ INSAR

Jak je doloženo dále v rešerši, metoda PS InSAR dnes v zahraničí představuje běžnou metodu pro dlouhodobé sledování jevů souvisejících s pohyby a deformacemi povrchů v řadě tematických oblastí včetně dopravy. V literatuře lze nalézt reference, které potvrzují její robustnost a aplikovatelnost s využitím časových řad družicových snímků s různým prostorovým rozlišením. Metoda umožňuje v rámci limitů své přesnosti detekovat jevy (pohyby, posuny), které jsou buď přírodního původu (v důsledku zemětřesení, sopečné aktivity, pohybů zemské kůry a nestability svahů), nebo antropogenního původu (poddolování), resp. pohyby samotného sledovaného objektu coby důsledek jeho stavu (stárnutí, deformace atd).

Metodický popis využívající bodů se stabilním projevem, tzv. *trvalých odražečů*, v sadě snímků pořízených během určitého časového intervalu byl publikován v roce 1999 výzkumníky z Milánské polytechniky a byl jimi dále rozveden a podrobně popsán v (Ferretti et al, 2001).

Dle (Hanssen, 2001), který podrobně popisuje teoretické základy a principy sady metod v rámci InSAR, se obecně pro sledování pohybů a deformací zpracovává dvojice či série dvojic radarových snímků, nasnímaných obvykle z družice (je však možná i letecká či pozemní varianta). Existuje řada variant metody InSAR: *D InSAR (diferenciální InSAR)*, který zpracovává dva nebo více snímků po dvojicích (každá dvojice se vyhodnocuje samostatně); vlastní *PS InSAR*, který využívá zpracování velké sady (série) dat, avšak ne celých snímků (pouze vybrané, „trvalé“ body) (Ferretti et al., 2001), *SBAS (metoda krátkých základěn-* z angl. Small BAseline Subsets) (Bernardino et al., 2002), *SqueeSAR* (Ferretti et al., 2011) a další, vesměs varianty předešlých, již méně významné. Použití konkrétních metod závisí na řadě faktorů vycházejících z mapovaného jevu a prostředí, dostupnosti dat, použitém softwaru a liší se i diskovými a výpočetními nároky.

Srovnání výkonu metod nebývá běžně prováděno. Validace a vzájemné porovnání jednotlivých přístupů (a metod) zpracování InSAR osmi různými týmy proběhlo v rámci projektu (PSIC4, 2007) na základě analýzy území bez jeho předchozí znalosti. Výsledky byly srovnatelné pouze částečně a byly velmi variabilní. Jak bylo na stejném ukázkovém příkladu doloženo v rámci projektu (TerraFirma, 2007), při a priori znalosti charakteru detekovaného jevu byly nezávislé týmy schopny přizpůsobit postup a parametrizaci různých používaných metod tak, že výsledky byly velmi přesné a vzájemně srovnatelné.

Další srovnání metod v menším rozsahu uvádí např. (Laukness, 2006), který porovnával SBAS s tradiční PS InSAR pomocí sady 20 snímků ze senzoru ERS-2 a v obou případech dosáhl srovnatelné přesnosti. Srovnání metod založených na rozdílných způsobech filtrace PS bodů (v průběhu zpracování často označovaných jako PS kandidáti) – prostorové versus temporální – se rozsáhle zabývají (Sousa et al, 2009, Sousa et al, 2011).

## 2.2 DOPRAVNÍ APLIKACE INSAR

Z pohledu dálkového průzkumu Země se v dopravě až na výjimky jedná o stavby liniové, kde jeden rozměr stavby řádově přesahuje rozměry ostatní. Výhodou je, že jde o umělé objekty, jejichž vlastnosti jsou pro účely PS InSAR nepoměrně příznivější než objekty přírodní - především co se týče stability objektů a jejich okolí. Výhodám PS InSAR pro zpracování pro liniové stavby se věnuje (Hanssen & Leijen, 2009), kteří zmiňují monitorování hráze v Nizozemí na základě široké časové řady 83 snímků z družic středního rozlišení (ERS-1/2), pořízených v letech 1992-2000.

Pro silniční a zvláště pro železniční infrastrukturu mohou být vážným problémem neplánované poklesy podloží, tzv. subsidence, případně svahové pohyby a sesuvy. Sledování těchto deformací je v InSAR tradiční. Z řady zdrojů se nicméně jen minimum věnuje přímo aplikacím v souvislosti s dopravou, jedná se ale o univerzální implementaci metod použitelných pro stanovení rizika v důsledku probíhajících pohybů nebo detekci rozsahu zasaženého území. Následující ukázky jsou vybrány pouze z dopravní domény.

Poklesy v oblasti koridoru rychlostní železniční trati způsobené čerpáním podzemní vody byly sledovány v rámci několika projektů - (Ge et al., 2009) s využitím snímků ze senzoru ASAR ze dvou drah (18 a 19 snímků) z let 2003-2004 metodou PS InSAR. Výsledky byly validovány pomocí nivelace. (Luo et al., 2011) použil 37 snímků z družice TerraSAR-X s velmi vysokým rozlišením z let 2009-2010. V rurální oblasti využil metodu SqueeSAR. (Chen et al., 2014) sleduje urbánní a naturální oblasti ohrožené svahovými pohyby pomocí SBAS nad daty PALSAR a TerraSAR-X. V druhém případě dosahuje o řád vyššího počtu bodů PS. I v oblastech s celkově rozmanitou a hustou vegetací byl schopen identifikovat dostatek distribuovaných odražečů a z TSX dosáhnout vysoké hustoty bodů - až 16000/km<sup>2</sup>. (Charboneau et al., 2013) sledoval sesuvy v okolí železniční infrastruktury a pohyby permafrostu. Ve velmi nepříznivém prostředí musel instalovat umělé koutové odražeče.

Podobně lze sledovat i poklesy v důsledku poddolování, např. v důsledku stavby tunelu metra. Čínské město Šanghaj je položeno v deltě řeky na jílech a pískách a detekcí poklesů pomocí PS InSAR v (Wang et al., 2011) zde byly získány přesné trasy nově postavených úseků metra, které do té doby nebyly zveřejněny. Pro účely studie bylo využito několika desítek snímků velmi vysokého rozlišení z družic Cosmo-SkyMed z let 2008-2010. V urbánním prostředí s dostatkem trvalých odražečů byla použita metoda SqueeSAR. Metodou InSAR byly též sledovány (Buckley et al., 2005) poklesy způsobené ražbou metra v Londýně, který je také situován na silných vrstvách jílu. Projekt demonstroval možnosti metodologie, tentokrát s využitím 31 snímků středního rozlišení z družic ERS-1/2 z let 1992-2001. Nevýhodou z hlediska pokrývnosti jednotlivými snímky může být délka liniové stavby, již nebo jejíž okolí chceme sledovat. Pokud stavba zasahuje do více sad sousedních snímků, je třeba provést zpracování pro každou sadu zvlášť - pro každou dráhu (track) družice budou i různá data snímání - a výsledky pak spojit; postup spojení detailně popisuje (Ketelaar, 2009). (Xudeong et al., 2011) tuto metodu aplikuje na sledování úzkého 3km širokého pásu okolí dálnice dlouhé přes 1600 km. Spjoval data z různých tracků pořízených senzorem ASAR.

V Itálii byly sledovány deformace v důsledku stavby tunelů (resp. infrastruktury nad tunely) (Pigorini et al., 2010), a to ze satelitů ERS-1/2 (1992-2001) a RADARSAT (2003-2008). Byly využívány jak klesající, tak stoupající dráhy, což umožnilo spolehlivěji odhadnout směr deformace.

Navíc je zde na případových studiích doložena aplikovatelnost PS InSAR při řešení problémů s pohyby v různých fázích výstavby železničních tunelů (projektovou, realizační – propady, svahové sesuvy, a monitorovací – sledování účinnosti aplikovaných opatření). (ASTRIUM, 2011) podobně jako (Pigorini et al., 2010), se snaží uvádět PS InSAR aplikace do industriální operační praxe, jak dokládá na příkladech monitorování subsidence pomocí TerraSAR-X snímků v souvislosti s výstavbou tunelů v Budapešti a Hong Kongu.

Zajímavé příklady především pro interpretaci výsledků uvádí (Cigna et al, 2011). Území na hranici městské zástavby postižené sesuvy regionalizuje a PS body detekované pomocí SBAS shlukuje nejen dle detekované rychlosti deformací, ale i podle interpretovaných deformačních režimů a srovnává je se zaznamenanými rozsahy sesuvů. Tento postup je aplikovatelný pro relativně omezené území.

I ke sledování deformací mostů ať již v důsledku strukturálních problémů nebo tektonické nestability bývají využívána data a metody InSAR. Dlouhodobému sledování tektonických pohybů v přípravné fázi před výstavbou mostní konstrukce se věnuje (Pacharidis et al., 2013), nicméně výhody takového monitoringu se projeví především v tektonicky aktivní oblasti. (Pacharidis et al., 2009) se zaměřili na sledování deformací mostní konstrukce nejdelšího zavěšeného mostu v Evropě: Rio-Antirio v Řecku. V 34 snímků dlouhé řadě snímků velmi vysokého rozlišení z TerraSAR-X v letech 2010-2012 byly na mostní konstrukci identifikovány i umělé odražeče na vrcholech mostních pylonů a podél nájezdů, které umožnily detekci pohybů pomocí implementace PS InSAR. Výsledky studie byly validovány s využitím rozdílné techniky PS InSAR v rámci evropského projektu TerraFirma.

(Cusson et al., 2012) se snaží rozlišit vícenásobné odrazy s využitím polarizace signálu. Zdůrazňuje potřebu rozlišení typu deformace – běžné pohyby od pohybů ničivých. Navíc testoval různé módy ze senzoru Radarsat-2 mj. pro sledování deformací mostů. Tímto demonstruje vliv rozlišení na výsledné měřítko a vhodnost pro jednotlivé aplikace. Dosahuje vysokých počtů identifikovaných PS bodů z dat vysokého rozlišení v pásmu C (stovky až tisíce) a vysoké míry korelace s kontrolními měřeními z nivelace. Detekované pohyby na úrovni mostních segmentů připisuje především termální dilataci. Podobně (Lazický et al, 2013) sledoval pohyby jednoho dálničního nadjezdu pomocí dat z TerraSAR-X. I s velmi malým počtem snímků (6) detekoval pomocí metod SBAS a SARPROZ deformace, které, jak ověřil, korelovaly s modelem termálních dilatací. Sledování termální dilatace bez širších souvislostí nebo snahy a detekci jiných deformací se s využitím dat z TerraSAR-X věnovali i (Fornaro et al., 2013) a (Monserrat et al, 2011).

(Shamshiri et al., 2013) ambiciózně sledovali deformace dálničního mostu pomocí různého počtu snímků z ASAR (10 a 20), PALSAR (10) a TerraSAR-X (18) s využitím metody SBAS. Detailní výsledky bohužel neuvádí. (Sousa & Bastos, 2013) pomocí dlouhé archivní sady snímků z ERS-2 dokumentují potenciál využití nižšího rozlišení pro sledování celkové nestability rizikové konstrukce mostu, který se později opravdu zřítíl. Kombinovaným PS InSAR a SBAS zpracováním byli schopni nalézt PS body a zpětně identifikovat problémový pilíř.

(Zhang et al, 2010) představuje zajímavou implementaci umožňující identifikovat PS body z malého počtu snímků (demonstruje na čtyřech) a jejich deformace bez nutnosti rozbalení fáze. Přesnost výstupu nicméně nediskutuje.

## 2.3 VYUŽITÍ UMĚLÝCH KOUTOVÝCH ODRAŽEČŮ

K zahuštění bodového pole trvalých odražečů v oblastech postižených tzv. dekorelací (především vlivem vegetace) nebo v případě potřeby vytvoření referenčního bodu v čase a prostoru se využívají instalace tzv. *umělých koutových (trvalých) odražečů* (UKO, *artificial corner reflectors*) nebo nejnověji *kompaktní aktivní transpondéry* (KAT, *compact active transponders*).

Ve studii (Morgan et al., 2011) je doloženo, že při nevhodné konstelaci terénu v kombinaci s povrchem pokrytým vegetací nelze pomocí InSAR dosáhnout uspokojivých výsledků: v příznivé části území bylo detekováno 160 PS bodů/km<sup>2</sup> pomocí SqueeSAR, v nepříznivé téměř žádné. Protože se jednalo o zpětné mapování, odražeče nebylo možné instalovat, nicméně pro budoucí mapování je zde navržen jejich počet a konstelace v sesuvném území případně v území dané velikosti. (Charboneau et al, 2013) detailně ukazují rozložení instalovaných odražečů v sesuvném území nad a pod železniční tratí. Rozložení UKO je dokumentováno i v (Zakharov et al., 2010) při sledování subsidence v okolí železnice vedoucí nad krasovou oblastí či potrubí na sesouvajícím se svahu. (Ketelaar, 2009) používá geodeticky zaměřené UKO instalované v linii s pravidelnými intervaly pro validační účely zpracování InSAR z ERS-1/2 a ASAR. Pravidelné rozložení v rastru (několika liniích) a hustota UKO pro referenční / validační účely na ploše postižené dekorelací při zpracování dat COSMO-SkyMED pomocí SqueeSAR je demonstrována ve (Falorni et al, 2012). Umístění UKO s nízkou hustotou rozložení v rozsáhlé oblasti postižené pohyby v důsledku těžby bylo implementováno pro monitoring z ERS-1/2 (Hlaváčová et al., 2011) a TerraSAR-X v (Halounová et al., 2013) .

Koutové odražeče trihedrálního typu byly použity při sledování poklesů v oblasti Groeningen pomocí interferometrického zpracování snímků senzoru ASAR – přesnost a rozdíl vůči geodetické nivelaci byl menší než 1.6 mm (Hanssen, 2001). Jednalo se o typický trihedrální odražeč s trojúhelníkovými stěnami, které zaručují vyšší stabilitu, např. vůči povětrnostním vlivům, než trihedrální konstrukce se čtvercovými stěnami. I značně perforovaný „trojúhelníkový trihedrální“ měl velmi vysokou odrazivost v projektu pro sledování svahových pohybů v nížině s hustým vegetačním pokryvem v Albertě (Froese et al. 2009). (Garthwaite et al., 2013) se pro projekt využívající X- i C-pásmové senzory rozhodl použít rovněž celkem 12 odražečů tohoto typu, s délkou strany 1, 1.5 a 2.5 m a perforací pomocí 5 mm děr ve vzdálenosti 12 mm od sebe.

(Ferretti et al., 2007) popisují svůj experiment s dihedrálními odražeči o délce hliníkové stěny 1 m opět pro odraz ze senzorů ASAR/RADARSAT. Dihedrály mají nižší toleranci vůči chybám v orientaci (či vůči použití pro více družic při jedné instalaci) než trihedrální odražeče, jejich výhodou je jednodušší konstrukce méně náchylná na chyby typu ohyb materiálu či nepřesná kolmost stěn. Bylo demonstrováno, že použitím dihedrálních odražečů je možno získat měření o přesnosti lepší než 1 mm (v testovacích podmínkách bez atmosférických rozdílů).

NPA Group v roce 2006 nabízela komerční aplikaci koutových odražečů (typu kovového trihedrálu o délce stěny 80 cm) pro radarovou interferometrii (InSAR) s měřením výškových změn přesnějším než 1 cm (Riedmann a Haynes, 2007). Firma k tomu využila i KAT. Odražeče instalovala v minimálním počtu 10 kusů ve vzdálenosti 100-750 m od sebe při použití senzorů z ASAR/RADARSAT (rozlišení okolo 20-25 m, pásmo C). Aktivní transpondéry byly vyvíjeny i při TU Delft, kdy byla v (Mahapatra et al., 2013) prokázána naprostá shoda (jen s 5% odchylkou) s

měření pomocí klasických UKO. Tímto experimentem byl potvrzen teoretický výsledek (Doering et al., 2007), podle kterého dosahuje nejistota v odrazivosti koutového odražeče typu „trojúhelníkový trihedrál“ hodnoty lepší než  $0,3 \text{ dB[m}^2]$ , zatímco u KAT je tato hodnota rovněž velmi malá:  $0,5 \text{ dB [m}^2]$ . Transpondéry KAT byly oproti koutovým odražečům v nevýhodě z důvodu, že využívaly jedinou nosnou frekvenci (byly tak použitelné pouze pro jediný typ družice) – dnešní KAT jsou již konstruovány pro multifrekvenční použití a s nízkým odběrem baterie, např. [7] či (Mahapatra et al., 2013). Díky svým malým rozměrům jsou kompaktnější pro přenos i odolnější vůči povětrnostním podmínkám. Nevýhodou vůči koutovým odražečům pak stále zůstává jejich vyšší pořizovací cena.

Nakonec (Medhavy et al., 2011) prokazují vhodnost koutových odražečů typu trihedrál (ať už s trojúhelníkovými či čtvercovými stěnami). Ty mají poměrně velkou toleranci vůči natočení - odrazivost se sníží na polovinu při cca  $13\text{-}15^\circ$  vychýlení u trihedrálu se čtvercovými stěnami a  $20\text{-}25^\circ$  v případě trojúhelníkového typu. Je tak možno takový odražeč použít pro průlety dvou různých družic, jejichž azimutální orientace se liší často o hodnoty  $1\text{-}2^\circ$ . V této práci autoři navrhují toleranci v kolmosti odražeče  $0.2^\circ$ , nerovnosti stěn do  $0.75 \text{ mm}$ , obojí pro použití pro X-band družici.

## 2.4 VÝBĚR DAT A METOD

V předchozích kapitolách řešerše bylo odkázáno na řadu publikací popisujících aplikace InSAR s využitím dat různých pásem, rozlišení, délky a frekvence časové řady a metod zpracování. Standardně ovšem nebývá popsán způsob výběru dat. To je mnohdy dáno výzkumným zaměřením uvedených prací, pro které je možné získat i komerční data buď zdarma, nebo s výraznou slevou z komerčních cen.

Operační aplikace nicméně musí kalkulovat s komerčními cenami (byť určité slevy při objednání většího počtu scén obvykle lze dosáhnout) a je proto klíčové, aby výběr dat byl prováděn na základě rozhodovacího rámce, který zohledňuje:

- Možnosti dat SAR a metod InSAR
- Limity dat SAR a metod InSAR
- Specifické požadavky aplikace
- Aspekt nákladů na pořízení konkrétní vybrané datové sady a její poměr cena/výkon

Z tohoto pohledu je vyhodnocení proveditelnosti před zahájením mapování / monitoringu nutností zmiňovanou v (TerraFirma, 2010) i (Morgan et al., 2011). Obecný rámec vyhodnocení proveditelnosti aplikace InSAR, který by popisoval proces výběru a rozhodovací faktory pro operační nasazení uceleným způsobem, nebyl doposud publikován ani v ČR, ani v zahraničních publikacích. Možnosti a limity jsou do značné míry dané a kvantifikovatelné, zatímco specifické požadavky představují vysoce variabilní proměnnou, která znemožňuje vytvoření vyčerpávající metodiky výběru.

Limitům a možnostem jak z geometrického hlediska, tak z hlediska hustoty bodů PS se věnují (Plank et al., 2011), (Plank et al., 2013), (Cigna et al., 2014). Popisují limity dané geometrií snímání v kombinaci s lokálními podmínkami při sledování pohybů na svazích. Dále kvantifikují, relativně

nebo absolutně, vhodnost jednotlivých tříd krajinného pokryvu z hlediska očekávané hustoty identifikovaných trvalých odražečů. Zatímco první autor se zaměřuje obecně na relativní porovnání vhodnosti pro senzory různých pásem, druhý tým na základě rozsáhlých sad PS bodů ve Velké Británii podrobně kvantifikuje pouze sensor pásma C středního rozlišení. Tyto výsledky jsou nicméně důležité především s ohledem na budoucí využití dat z družice Sentinel-1. (Barboux et al., 2011) kvantifikuje pouze geometrické faktory mající vliv na detekovatelnost svahových pohybů (sesuvů) a vyjadřuje je pomocí tzv. kompresního poměru.

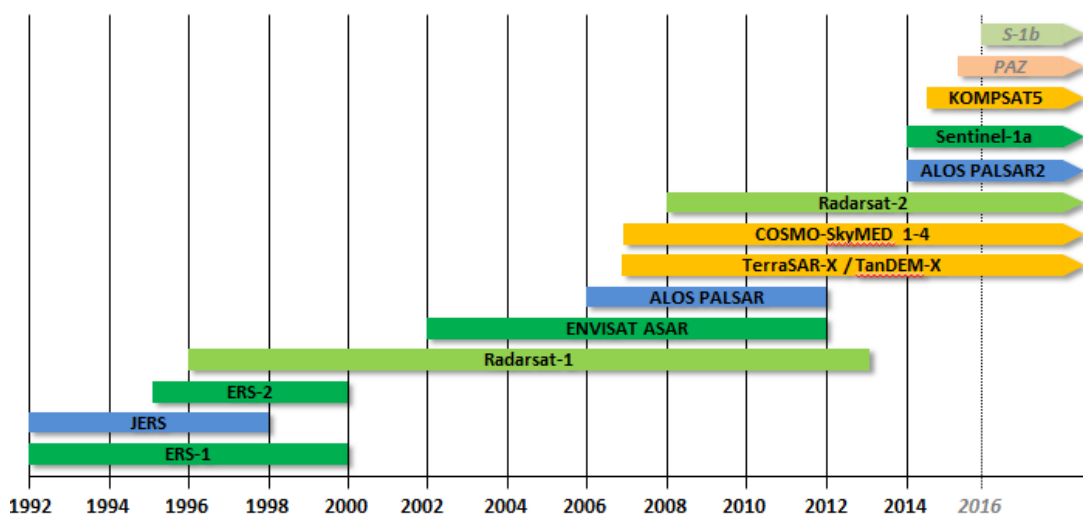
Velmi obecný rámec pro výběr dat, metod a interpretace výsledků je popsán v (TerraFirma, 2010), nicméně bez konkrétnějšího postupu a detailů, pouze s doporučením na vyžádání si těchto informací od poskytovatele služby. Konkrétnější je případová studie zaměřená na detekci svahových sesuvů ohrožujících dopravní infrastrukturu (Power et al., 2006), která dokonce uvádí stručný rozhodovací strom. Ten je ale zaměřen především na využití metody D InSAR, která v porovnání s pokročilejšími technikami PS InSAR pro většinu aplikací, nejen v dopravě, dnes již nachází minimální uplatnění.

Kvůli odhadu počtu bodů PS (Smith, 2013) dále doporučují provést před dlouhodobým (a tedy i drahým) monitoringem vyhodnocení proveditelnosti založené na zpracování 8 scén (pro nový monitoring) nebo 15 scén (pro monitoring zpětný). Vzhledem k cenám komerčních dat je tento postup nicméně diskutabilní a plně těžko realizovatelný.

## 2.5 DATA SAR

V současnosti je v provozu řada družic se senzory SAR, které umožňují zpracování InSAR. Pro interferometrické aplikace jsou relevantní radarová data distribuovaná jako tzv. **Single Look Complex** (SLC) produkt, který zahrnuje jak amplitudu (intenzitu) tak fázi odraženého signálu.

Archivy dat z družic funkčních i těch s ukončeným provozem představují unikátní zdroj informací umožňující **zpětné mapování sledovaných jevů**. Informace odvozené z dat různých družic stejného typu (zvýrazněné stejnou barvou v obr. 1) umožňují vzájemné srovnání a navázání časových řad.



Obrázek 1 Operační provoz SAR senzorů barevně rozlišených dle pásma a rozlišení

Při výběru dat je třeba uvažovat řadu parametrů, které se pro jednotlivé družice liší.

- **Prostorové rozlišení** určuje velikost detekovatelných objektů
- **Pásmo.** Frekvence kmitání respektive vlnová délka elektromagnetického signálu v použitém pásmu ovlivňuje charakter odraženého signálu a je důležitým parametrem při výběru vhodných dat pro konkrétní aplikace InSAR.
- **Polarizace** je schopnost detekovat směr kmitání odraženého signálu, který je ovlivněn interakcí s povrchem a závisí na jeho dielektrických vlastnostech.
- **Temporální rozlišení** dané **periodou snímání** (někdy také **nominální frekvencí snímání**) určuje, za jak dlouho bude moci být území danou družicí znovu nasnímáno. Jedná se o klíčový parametr pro aplikace založené na *monitoringu* - dlouhodobém a opakovaném pozorování vybraného jevu.
- **Šíře záběru** určuje plochu *pokryvnosti* v rámci jednoho snímku. Obecně platí, že vyšší prostorové nebo spektrální rozlišením jsou vykoupeny nižší pokryvností.
- **Mód pořízení**, který je dán způsobem skenování a ovlivňuje rozlišení, šíři záběru i **incidenční úhel** (úhel mezi směrem snímání a normálou)

Data SLC z komerčních družic nejsou standardně pořizována celoplošně. V závislosti na operačním akvizčním plánu bývají pravidelně sledována velké města, další oblasti pak na základě objednávek.

Data z nekomerčních družic (ERS-1/2, ASAR, Sentinel-1) naopak byla nebo jsou pořizována celoplošně pro vybraná území (Evropa ad.) v módu dle rámce a priorit definovaných provozovatelem družice. Např. v rámci *Vysokoúrovňového operačního plánu* družice Sentinel-1 (High Level Operation Plan – HLOP) [0] je definována strategie pro optimální využití zdrojů satelitu. Na jejím základě jsou zpracovány předdefinované operační scénáře pro pořizování dat v jednotlivých módech, kterým jsou přiřazeny priority podle typu snímaného povrchu (souše, moře), geografické oblasti (oblasti pro rutinní sledování, předdefinované rizikové oblasti) a typu požadavku.

Družice Sentinel-1 je z hlediska vývoje a udržitelnosti operačních aplikací InSAR zásadní. Data pořizována s pravidelnou periodou snímání budou evropským uživatelům dostupná zadarmo. Navíc, provoz konstelace družic Sentinel-1 je garantován na dlouhou dobu dopředu. Relevantní módy pořizující SLC produkty ze Sentinel-1 jsou:

- **Strip Map (SM)** – celkem 6 možných programovatelných incidenčních úhlů, pořizován bude pouze nad vybranými územími (se zvýšenými tektonickými a vulkanickými riziky) definovanými v HLOP nebo kdekoliv v případě závažné krizové události (povodně atd.).
- **Interferometric Wide Swath (IW)** – metodou skenování TopSAR (3 bloky s rozsahem incidenčních úhlů 29-46°. Nad kontinentální Evropou bude provádět celoplošné opakované skenování včetně SLC, jedná se tedy o relevantní mód i pro území ČR.

Parametry pro SLC produkty jsou sumarizovány v následující tabulce.

DRUŽICE			VLNOVÁ DÉLKA		PERIODA SNÍMÁNÍ	ROZLIŠENÍ		GEOMETRIE			SCÉNA			CENA za scénu (Kč)	
Název	Operační období	Akviziční mód	Pásmo	$\lambda$ (cm)	$f_N$ (dny)	Azimuth x Range (m)	Typ	Směr	Inklinace $\delta$	Incidence $\theta$	Šířka (km)	Délka (km)	Plocha (km <sup>2</sup> )	archivní	nová
JERS	1992-1998	Standard	L	23	44	18x18	MR	P	97.7	32-38	75	75	5 625	-	-
ALOS Palsar	2006-2011	FBS Fine Resolution	L	23	46	7až44	MR	P	98.2	10-50	70	70	4 900	16 440	-
ALOS Palsar	2006-2011	FBD Fine Resolution	L	23	46	14až88	MR	P	98.2	10-26	70	70	4 900	16 440	-
ALOS Palsar	2006-2011	P Fine Polarimetric	L	23	46	30x30	MR	P	98.2	8-30	30	70	2 100	16 440	-
<b>ALOS-2 Palsar-2</b>	<b>2014*</b>	<b>SpotLight</b>	L	23	<b>14</b>	<b>1x3</b>	<b>VHR</b>	<b>P i V</b>	<b>97.9</b>	<b>8-70</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>625</b>	<b>*</b>	<b>*</b>
<b>ALOS-2 Palsar-2</b>	<b>2014*</b>	<b>Ultra Fine</b>	L	23	<b>14</b>	<b>3x3</b>	<b>HR</b>	<b>P i V</b>	<b>97.9</b>	<b>8-70</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>2 500</b>	<b>*</b>	<b>*</b>
<b>ALOS-2 Palsar-2</b>	<b>2014*</b>	<b>High Sensitive</b>	L	23	<b>14</b>	<b>6x6</b>	<b>HR</b>	<b>P i V</b>	<b>97.9</b>	<b>8-70</b>	<b>6</b>	<b>50</b>	<b>300</b>	<b>*</b>	<b>*</b>
ALOS-2 Palsar-2	2014*	Fine	L	23	14	10x10	HR	P i V	97.9	8-70	10	70	700	*	*
<b>TerraSAR-L</b>	<b>*</b>	<b>StripMap</b>	L	23	<b>14</b>	<b>3až5x9</b>	<b>HR</b>	<b>P</b>	<b>97.4</b>	<b>*</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>1 600</b>	<b>*</b>	<b>*</b>
TerraSAR-L	*	ScanSAR	L	23	14	20x5	MR	P	97.4	*	200	200	40 000	*	*
ERS-1/2	1992-2000**	ERS-PRI	C	5,6	35	5x20	MR	P	98.5	19-26	100	100	10 000	0	-
Envisat ASAR	2002-2010	StripMap-Image	C	5,6	35	5x20	MR	P	98.4	15-45	100	100	10 000	0	-
RADARSAT-1	1996-2013	Fine	C	5,6	24	11až9x9	HR	P	98.6	37-39	45	50	2 250	69 840	-
<b>RADARSAT-2</b>	<b>2008-dosud</b>	<b>Spotlight A</b>	C	5,6	<b>24</b>	<b>1x1</b>	<b>VHR</b>	<b>P i V</b>	<b>98.6</b>	<b>10-60</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>400</b>	<b>164 390</b>	<b>166 740</b>
<b>RADARSAT-2</b>	<b>2008-dosud</b>	<b>Ultra-Fine</b>	C	5,6	<b>24</b>	<b>3x3</b>	<b>HR</b>	<b>P i V</b>	<b>98.6</b>	<b>30-50</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>400</b>	<b>104 760</b>	<b>116 400</b>
RADARSAT-2	2008-dosud	Wide Ultra-Fine	C	5,6	24	2,8x1,6až3,3	HR	P i V	98.6	29-50	50	50	2 500	151 320	162 960
<b>RADARSAT-2</b>	<b>2008-dosud</b>	<b>Multi-Look Fine</b>	C	5,6	<b>24</b>	<b>4,6až7,6x3,1až10,4</b>	<b>HR</b>	<b>P i V</b>	<b>98.6</b>	<b>29-50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>2 500</b>	<b>81 480</b>	<b>93 120</b>
RADARSAT-2	2008-dosud	Wide Multi-Look Fine	C	5,6	24	4,6až7,6x3,1až10,4	HR	P i V	98.6	29-50	90	90	8 100	145 500	157 140
RADARSAT-2	2008-dosud	Fine	C	5,6	24	11až9x9	HR	P i V	98.6	37-39	45	50	2 250	73 720	85 360
<b>Sentinel-1A a 1B</b>	<b>2014/2015*</b>	<b>strip mode</b>	C	5,6	<b>12</b>	<b>5x5</b>	<b>HR</b>	<b>P</b>	<b>98.2</b>	<b>20-47</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>6 400</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
<b>Sentinel-1A a 1B</b>	<b>2014/2015*</b>	<b>interferom. wide swath</b>	C	5,6	<b>12</b>	<b>20x5</b>	<b>MR</b>	<b>P</b>	<b>98.2</b>	<b>29-46</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>62 500</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
<b>TerraSAR-X, TanDEM-X</b>	<b>2007-dosud</b>	<b>Staring SporLight</b>	X	<b>3,1</b>	<b>11</b>	<b>0,24x0,85až1,77</b>	<b>VHR</b>	<b>P</b>	<b>97.4</b>	<b>20-55</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>15</b>	<b>17 331</b>	<b>69 325</b>
<b>TerraSAR-X, TanDEM-X</b>	<b>2007-dosud</b>	<b>High Resolution SpotLight</b>	X	<b>3,1</b>	<b>11</b>	<b>1x1</b>	<b>VHR</b>	<b>P</b>	<b>97.4</b>	<b>20-55</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>13 865</b>	<b>55 460</b>
<b>TerraSAR-X, TanDEM-X</b>	<b>2007-dosud</b>	<b>SpotLight</b>	X	<b>3,1</b>	<b>11</b>	<b>1x2</b>	<b>VHR</b>	<b>P</b>	<b>97.4</b>	<b>20-55</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>100</b>	<b>13 865</b>	<b>55 460</b>
<b>TerraSAR-X, TanDEM-X</b>	<b>2007-dosud</b>	<b>Stripmap</b>	X	<b>3,1</b>	<b>11</b>	<b>3x3</b>	<b>HR</b>	<b>P</b>	<b>97.4</b>	<b>20-45</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>1 500</b>	<b>13 865</b>	<b>41 595</b>
<b>COSMO-SkyMed 1 až 4</b>	<b>2007-dosud</b>	<b>SpotLight</b>	X	<b>3,1</b>	<b>16 (4)</b>	<b>1x1</b>	<b>VHR</b>	<b>P</b>	<b>97.8</b>	<b>25-57</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>100</b>	<b>78 615</b>	<b>78 615</b>

Dokument č.: GST-TACRb-D2\_v1-0  
Verze: D1.0 Datum: 9. prosince 2014



DRUŽICE			VLNOVÁ DÉLKA		PERIODA SNÍMÁNÍ	ROZLIŠENÍ		GEOMETRIE			SCÉNA			CENA za scénu (Kč)	
Název	Operační období	Akviziční mód	Pásmo	$\lambda$ (cm)	$f_N$ (dny)	Azimuth x Range (m)	Typ	Směr	Inklinace $\delta$	Incidence $\theta$	Šířka (km)	Délka (km)	Plocha (km <sup>2</sup> )	archivní	nová
COSMO-SkyMed 1 až 4	2007-dosud	SpotLight-2	X	3,1	16 (4)	1x1	VHR	P	97.8	25-57	7	7	49	51 162	51 162
COSMO-SkyMed 1 až 4	2007-dosud	StripMap-Himage	X	3,1	16 (4)	3x3až5x5	HR	P	97.8	25-57	40	40	1 600	29 948	29 948
Kompsat-5	2013*	High Resolution	X	3,1	28	1x1	VHR	P	97.6	*	5	5	25	*	*
Kompsat-5	2013*	Standard Mode	X	3,1	28	3x3	HR	P	97.6	*	30	60	1800	*	*
Kompsat-5	2013*	Wide Swath	X	3,1	28	20x20	MR	P	97.6	*	100	60	6000	*	*
PAZ SEOSAR	2014*	SpotLight	X	3,1	11	1x1	VHR	P	97.4	*	5	10	50	*	*
PAZ SEOSAR	2014*	StripMap	X	3,1	11	3x3	HR	P	97.4	*	30	30	900	*	*
PAZ SEOSAR	2014*	ScanSAR	X	3,1	11	15x15	MR	P	97.4	*	100	100	10000	*	*

Tabulka 1 Tabulka parametrů dat vhodných pro InSAR (SLC). Pozn.: Ceny bez DPH jsou platné ke dni 22. 11. 2014 dle aktuálního kurzu použitého pro přepočítání na CZK: 1 EUR = 27.7 CZK, 1 CAD = 19.57 CZK. Ceny dat komerčních poskytovatelů se mohou měnit v závislosti na vývoji kurzu a cenové politice poskytovatele. Ceny jsou započítány s aktuálními množstevními slevami pro SLC data

Záznamy označené: \* zatím nejsou známy; - nejsou pro daný senzor relevantní; \*\* po závadě gyroskopů jsou data použitelná pro PS InSAR pouze do r. 2010. Směr pohledu je vyjadřován vzhledem k směru letu družice: P - vpravo, L - vlevo

DRUŽICE			PERIODA SNÍMÁNÍ	ROZLIŠENÍ		SCÉNA			CENA za scénu (Kč)		CENA za 1km <sup>2</sup> (Kč)	
Název	Operační období	Akviziční mód	$f_N$ (dny)	Azimuth x Range (m)	Typ	Šířka (km)	Délka (km)	Plocha (km <sup>2</sup> )	archivní	nová	archivní	nová
RADARSAT-2	2008-dosud	Spotlight A	24	1x1	VHR	20	20	400	164 390	166 740	411	417
RADARSAT-2	2008-dosud	Ultra-Fine	24	3x3	HR	20	20	400	104 760	116 400	262	291
RADARSAT-2	2008-dosud	Fine	24	11až9x9	HR	45	50	2 250	73 720	85 360	33	38
TerraSAR-X, TanDEM-X	2007-dosud	High Resolution SpotLight	11	1x1	VHR	10	5	50	13 865	55 460	277	1109
TerraSAR-X, TanDEM-X	2007-dosud	Stripmap	11	3x3	HR	30	50	1 500	13 865	41 595	9	28
COSMO-SkyMed 1 až 4	2007-dosud	SpotLight-2	16 (4)	1x1	VHR	7	7	49	51 162	51 162	1044	1044
COSMO-SkyMed 1 až 4	2007-dosud	StripMap-Himage	16 (4)	3x3až5x5	HR	40	40	1 600	29 948	29 948	19	19

Tabulka 2 Porovnání absolutních a relativních cen bez DPH (za km<sup>2</sup>) pro porovnatelné módy s hlediska rozlišení. V dopravních aplikacích zaměřených na bodové sledování infrastruktury nebo malých ploch je relevantní absolutní cena, nicméně pro plošně rozsáhlé sledování je vhodné zvažovat i cenu relativní

Dále je uvedena dostupnost archivních SLC scén pro ČR. Stav pokrytí jsou uvedeny k 15.11.2014.

### **Radarsat-1 / Radarsat-2**

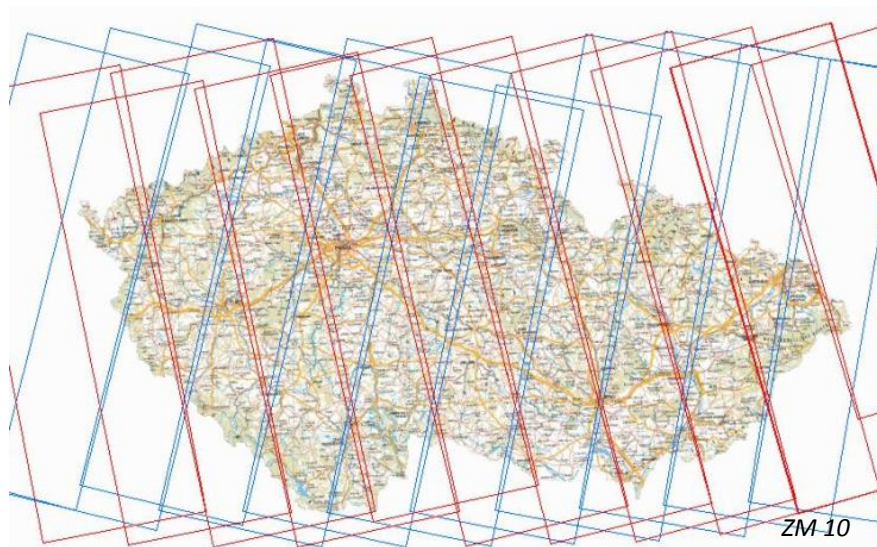
Informace o archivním pokrytí bohužel nejsou veřejně dostupné. Informace o pokrytí lze získat pouze na základě požadavku a specifikace pro konkrétní aplikaci u distributora dat MDA [1]

### **ERS-1/2**

Snímky ze senzoru poskytují kompletní pokrytí ČR daty ze dvou A a ze dvou D drah v pravidelných intervalech s nominální frekvencí 35 dnů. Snímky představují unikátní zdroj pro InSAR zpracování ve středním prostorovém rozlišení, kterým lze získat informace o deformacích v regionálním měřítku zpětně od roku 1992 do roku 2000. Katalog snímků je přístupný pomocí aplikace EOLI-SA [2], vyhledávání interferometrických párů po stažení archivu na lokální PC.

### **ENVISAT ASAR**

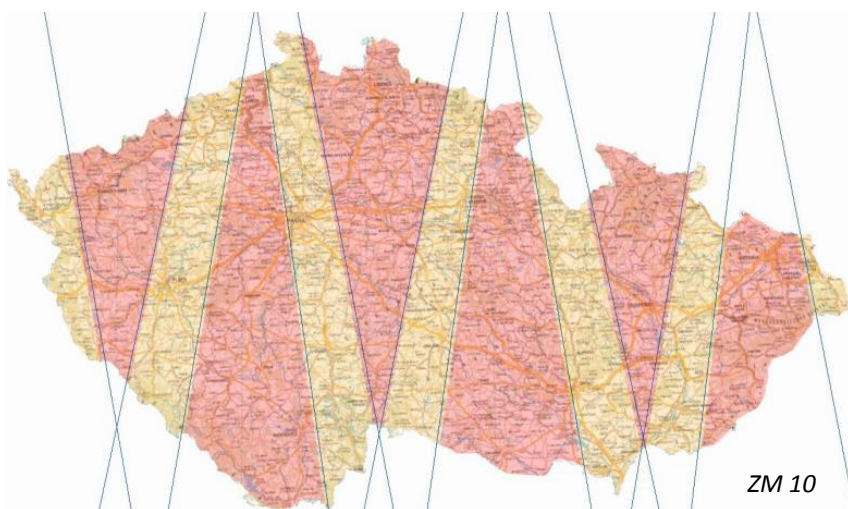
Snímky ze senzoru poskytují kompletní pokrytí ČR daty ze dvou sousedních A a ze dvou sousedních D drah s nominální frekvencí 35 dnů, bohužel často v nepravidelných intervalech s dlouhými mezerami mezi následnými akvizicemi. Snímky představují unikátní zdroj pro InSAR zpracování ve středním prostorovém rozlišení, kterým lze získat informace o deformacích v regionálním měřítku zpětně až od roku 2002 do roku 2010. Katalog snímků je přístupný pomocí aplikace EOLI-SA [2], vyhledávání interferometrických párů po stažení archivu na lokální PC.



*Pokrytí snímky ENVISAT ASAR a ERS-1/2 je prakticky totožné*

## Sentinel-1

První volně dostupné snímky ze Sentinelu-1 jsou dostupné přes Sentinel-1 Scientific Hub [3] (*nutná registrace*) od 1.10.2014. V rámci předoperační provozní fáze zatím nejsou snímky pořizovány operačně s nominální akviziční frekvencí. Operační perioda snímání by měla začít 1.1.2015. To znamená, že na začátku roku 2016 by měla být v ideálním případě k dispozici řada sad 30 snímků v IW módu pro ČR kompletně pokrývajících ČR. Každý bod území by měl být z důvodu částečného překryvu mezi sousedními tracky v A a D drahách pokryt 3 nebo 4 snímky najednou.

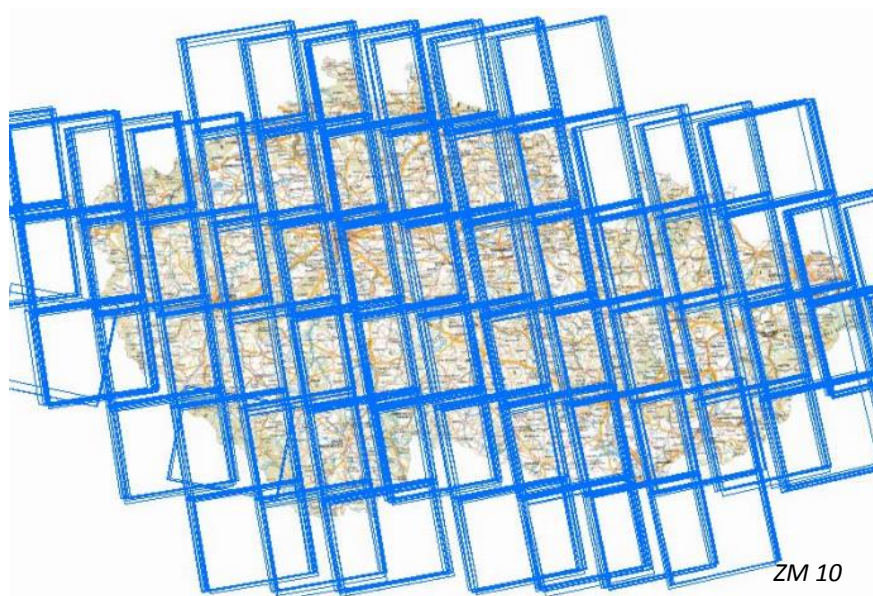


Červeně: 4 snímky

Oranžově: 3 snímky

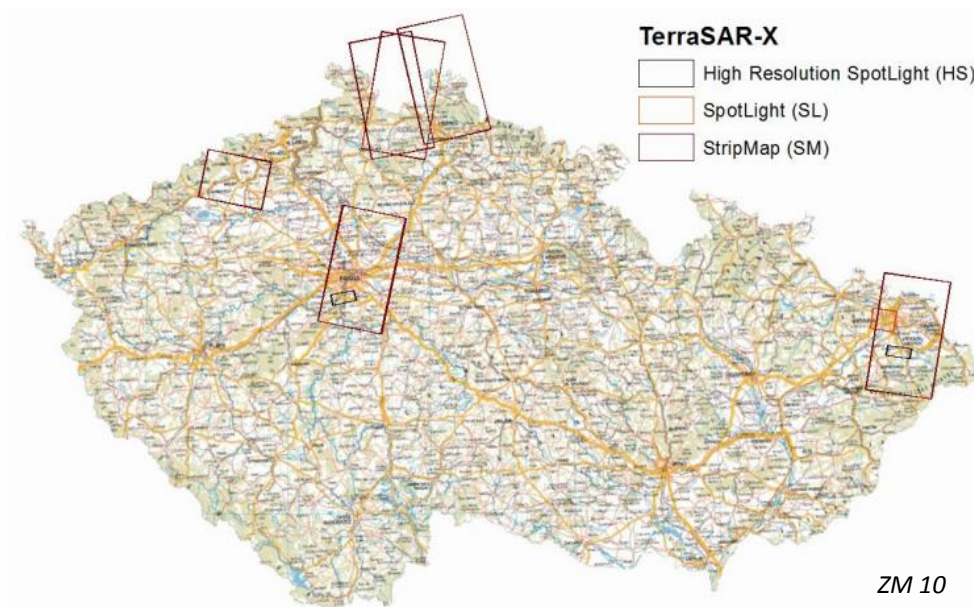
## ALOS PALSAR

Snímky ze senzoru PALSAR poskytují kompletní pokrytí ČR, pro většinu území ze dvou sousedních A drah s nominální frekvencí 46 dnů, bohužel často s mezerami mezi pořízením následujících snímků. Četnost snímků v jednotlivých časových řadách většinou kolísá mezi 12 – 13. Katalog snímků je přístupný na [4] včetně možnosti vyhledávat interferometrické páry.



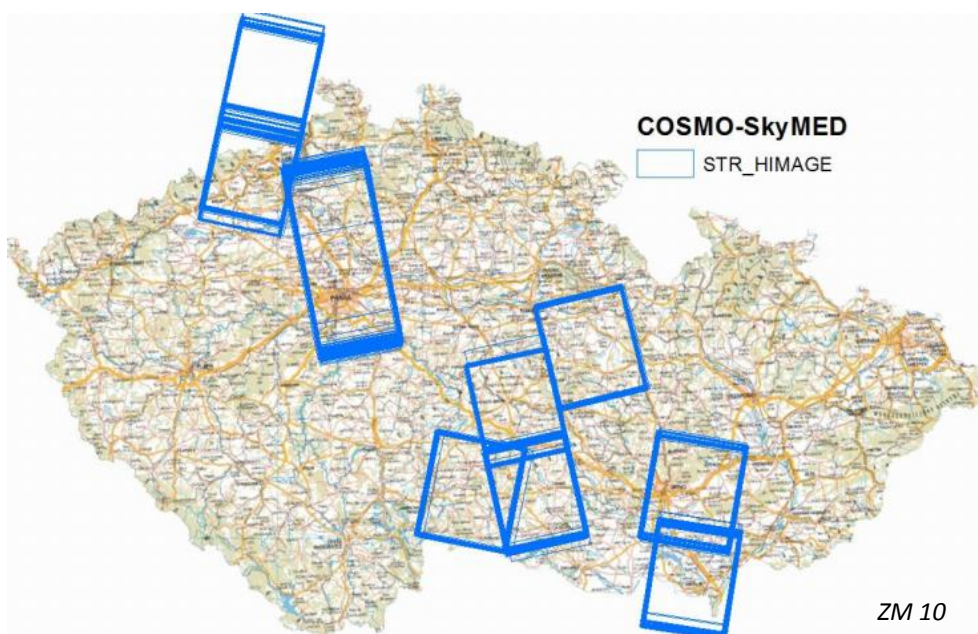
## TerraSAR-X

Pokrytí lze průběžně sledovat v on-line katalogu [5], který nicméně neumožňuje provést výběr scén vhodných pro interferometrii (*daná možnost byla do 15.11.2014 nefunkční, poznámka aut.*). Stav pokrytí k 15.11.2014 je uveden na obrázku níže. Praha, Ostrava a část severních Čech je pokryta interferometrickými sadami snímků s ne příliš pravidelnou frekvencí v módech StripMap a SpotLight.



## COSMO-SkyMED

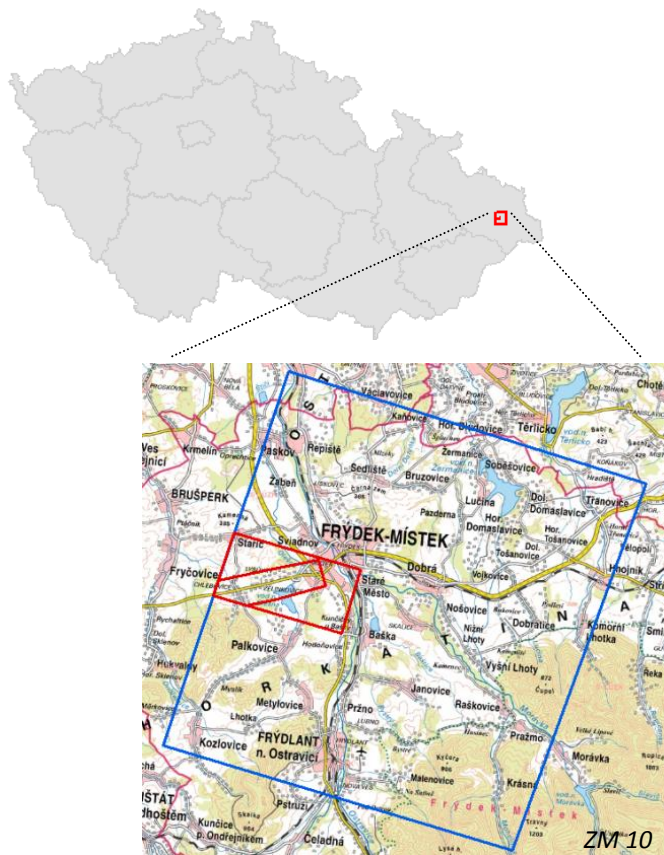
Pokrytí lze průběžně sledovat v on-line katalogu [6] (nutná registrace), který nicméně neumožňuje provést implicitní výběr scén vhodných pro interferometrii. Stav pokrytí k 15.11. je uveden na obrázku níže. Praha, Brněnsko, část severních Čech a Vysočiny jsou pokryty interferometrickými sadami snímků s nepřilíh pravidelnou frekvencí v módu StripMap (HIMAGE).



### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Popisované metody, jejich principy a některé závěry jsou v rámci praktické části dokumentovány pomocí konkrétního příkladu zpracování archivních i nově pořízených dat, které bylo řešiteli provedeno pro oblast zasaženou svahovými pohyby – svah mezi obcí Lysůvky a rychlostní komunikací R48, a v jejich širším okolí na Frýdecko-Místecku:

- AOI: oblast v katastru obce Lysůvky
- Popis: oblast sledovaných svahových deformací v důsledku geologické nestability kvartérního podloží, které přímo ohrožovaly rychlostní silnici R48 na úseku Rychaltice – Frýdek-Místek.
- Data a metody:
  - ENVISAT ASAR: dráha 222, 30 snímků (z období 2003 – 2010) v módu IMP, metoda SBAS
  - TerraSAR-X: 8 snímků (z období květen 2014 – říjen 2014) v módu SL, metoda SqueeSAR
  - Sentinel-1 – plánován s využitím předoperačně pořizovaných dat (od října 2014), data bohužel nebyla pro AOI pořízena
  - Praktický test instalace a identifikace umělého koutového odražeče



Obrázek 2 Oblast praktické demonstrace AOI Lysůvky. V dolním obr. modře rozsah (výřez) zpracování z ENVISAT ASAR, červeně rozsah (výřez) zpracování z TerraSAR-X

### 3.1 PS InSAR – PROVEDITELNOST A PRINCIPY

Metoda zpracovává velké sady snímků a v nich jsou vybírány pouze body, které jsou považovány za nejpřesnější a z hlediska detekovatelnosti za *stabilní v čase*: typicky body s vysokou odrazivostí, malými změnami v odrazivosti a malými variacemi fáze vzhledem k apriornímu modelu deformací (typicky lineární v čase). V rámci iterativního postupu se tato množina bodů obvykle dále zmenšuje na základě postupných výsledků zpracování. Metoda umožňuje na základě statistického vyhodnocení trendů v datové sérii odhadnout a opravit chyby způsobené nepřesnostmi použitého DSM a také nerovnoměrností atmosférického zpoždění. Oprava chyb v každém snímku vede ke zvýšení přesnosti.

Před zahájením monitorování zájmové oblasti pomocí PS InSAR, které je nákladné z hlediska ceny dat, ceny práce, času a v neposlední je v něj vkládáno nemalé úsilí a očekávání, je třeba vyhodnotit řadu komplexních faktorů, které ovlivňují detekovatelnost, interpretovatelnost a přesnost získané informace. Niže jsou stručně shrnuty principy, ze kterých je třeba při vyhodnocení proveditelnosti vycházet:

- **Vzdálenost mezi sousedními zpracovanými body (PS)** je dána vzdáleností bodů s vysokou intenzitou a stabilitou, která je typicky několik pixelů v zastavěných oblastech s vysokou hustotou detekovaných trvalých odražečů (100-ky / km<sup>2</sup>), ale pouze desítky až stovky pixelů v oblastech pokrytých vegetací.
- **Velikost pohybu** (deformace) je detekována pro každý identifikovaný PS bod pouze ve směru úhlu pohledu paprsku (*line of sight, LOS*), tj. v závislosti na družici cca 20-45 stupňů od svislice a v kolmých směrech na azimut směru letu (inklinace dráhy družice obvykle činí 95-110°) pro sestupnou (*Descending, D*) respektive vzestupnou (*Ascending, A*) dráhu
- Měření rozdílů vzdáleností (deformací) je založeno na principu porovnání doměrků do vlnové délky radaru (fáze) mezi dvěma snímky pořízenými z přibližně shodného místa v různém čase. Časový rozdíl pořízení dané dvojice snímků se nazývá **časová základna** ( $B_T$ ).
- **Rychlost pohybu** (někdy též *velocita*) je obvykle vztažena k délce sledovaného období a je spočtena jako průměrná rychlost za dané období. Graf průběhu deformací ve sledovaném časovém úseku dává další informace o charakteru pohybu: linearita/nelinearita, akcelerace, skokovitost, cykličnost sezónních trendů.
- Maximální detekovatelný pohyb: mezi dvěma sousedními (zpracovanými) body, pro rozdíl dvou po sobě následujících snímků nesmí deformace (ve směru LOS) být vyšší než polovina vlnové délky. Důvodem je mnohoznačnost metody: z principu nelze rozlišit případy, kdy oproti hodnotě  $a$  došlo ke změně o hodnotu  $a \pm \lambda/2$  (kde  $\lambda$  je vlnová délka) – hovoříme o tzv. **ambiguitě**. Pokud je skutečný pohyb větší/prudší, bude odhadnutá hodnota nižší.
- Při opakovaném pořizování snímků ze stejné dráhy se družice nepohybuje po zcela totožné trajektorii. Kolmá vzdálenost mezi dvěma LOS se nazývá **kolmá základna** ( $B_p$ ). Je-li příliš dlouhá, pohyby nelze sledovat.
- Fázová stabilita je vztažena k tzv. **koherenci**. V případě, že došlo k pohybu pouze části oblasti zahrnuté v jednom pixelu, či došlo ke změně odrazivých vlastností (rozorání pole, pohyb vegetace ve větru a podobně), dochází ke snížení koherence, někdy

nazývané **dekorelace**. Náchylnost k dekorelaci závisí dále na vlnové délce radaru, časovém rozdílu mezi pořízením snímků a také typu povrchu resp. jeho odrazivých vlastnostech.

- Rozdíl fází kromě pohybů obsahuje i další složky: hodnotu úměrnou topografické výšce, atmosférické zpoždění a šum. Pro dosažení spolehlivých výsledků je třeba tyto složky odstranit resp. potlačit: pomocí přesného digitálního modelu povrchu (*DSM*) a výběrem snímků v dostatečně dlouhé časové řadě (v závislosti na pásmu a metodě a implementaci zpracování, jako ideální minimální počet se udává 20-30 snímků (Smith, 2013).
- V případě značného vlivu atmosféry (bouřka, silný déšť) je vhodné daný snímek vyloučit ze zpracování.
- Sněhová pokrývka InSAR nevylučuje, ale v tom případě sledujeme výšku sněhu, což není žádoucí (interferogram z dvojice snímků, z nichž na jednom sněhová pokrývka je, zatímco na druhém není, je obvykle silně dekorelovaný).
- Metoda InSAR je relativní v čase i prostoru - výsledky je třeba vztáhnout k referenčnímu bodu, který buď leží ve stabilní oblasti, nebo jsou jeho pohyby známy.

V závislosti na výše uvedených principech je ve spolupráci s uživatelem/zadavatelem třeba před vlastním zahájením mapování provést **vyhodnocení proveditelnosti**. V jejím rámci jsou hodnoceny možnosti metody a její limity z hlediska vlastností a konstelace sledovaného jevu či objektu. Pro výběr vhodných dat SAR a metody zpracování pro konkrétní aplikaci je třeba uvažovat řadu kritérií souvisejících s vlastnostmi jevu, které mají dopad na výběr parametrů dat k jejich sledování:

Kritérium jevu	Vlastnosti jevu	Kritéria výběru
<b>Prostorový rozsah pohybu / deformační režim</b>	metry – kilometry	prostorové rozlišení, metoda, a priori informace
<b>Rychlost pohybu</b>	milimetry – centimetry – decimetry	pásmo, frekvence snímání
<b>Časový průběh (dynamika)</b>	lineární, nelineární, skokový, cyklický, délka trvání	frekvence snímání, metoda
<b>Směr pohybu</b>	vertikální, horizontální, složený	pásmo, dráha, a priori informace
<b>Prostorový kontext / topografie</b>	plošný, liniový, izolované body; orientace prvku/svahu, propojenost, zakrytí	prostorové rozlišení, metoda, dráha
<b>Půdní / krajinný pokryv</b>	pokryv (vegetace) klíma (sníh, voda)	pásmo, nutnost umělých odražečů
Dostupnost dat	-	archivní data / nové pořízení pravidelnost pořízení mezery v časovém pokrytí

Tabulka 3 Kritéria pro vyhodnocení proveditelnosti

V (Kolomazník et al, 2013) byla sumarizována řada deformačních jevů, které představují riziko pro dopravní infrastrukturu. Na základě konzultací s potenciálními uživateli InSAR služeb a charakteru jevů byly identifikovány 2 typy uživatelských úloh pro sledování nežádoucích jevů, které jsou

uvažovány v rámci metodiky vyhodnocení proveditelnosti, doporučeného výběru zpracovatelské metody, interpretace a validace výsledků v následujících kapitolách:

- 1) monitoring oblasti s nestabilním podložím (vlivem poklesů, svahových pohybů atd.)
- 2) monitoring mostních konstrukcí

Z řady SAR dat jsou uvažovány především aktuálně dostupná data a jejich módy. Metodika je doplněna obrázky z vlastního zpracování v rámci AOI Lysůvky, na kterém se metodika testovala a vyvíjela.

### 3.1.1 VYHODNOCENÍ PROVEDITELNOSTI MONITORINGU POMOCÍ InSAR

Navržená metodika vyhodnocení proveditelnosti a výběru dat odráží výše uvedené principy a kritéria, která vychází z a priori znalosti charakteru sledovaného pohybu: jeho **přibližný směr** a **rozsah**.

#### 3.1.1.1 Prostorový rozsah pohybu

Velikost zájmového objektu respektive oblasti, na které dochází k nežádoucímu pohybu, vymezuje jeho detekovatelný rozsah. Zatímco detekované pohyby mostů mohou být důsledkem nestability podloží v širším okolí, přirozených (dilatace) nebo nežádoucích pohybů konstrukce, v případě svahových pohybů a poklesů se jedná především o důsledek geologických nestabilit (strukturální, mělké, hluboké) nebo důlní činnosti. A priori znalost charakteru nestability a jejího možného rozsahu je důležitá pro rozhodnutí o výběru rozlišení scény InSAR (a tedy i maximálního prostorového pokryvu daného velikostí scény, která je závislá na senzoru, pořizovacím módu a tedy i rozlišení).

Rozhodnutí provedeme na základě předpokládaného rozsahu pohybu a jeho prostorové variability:

- Lokální objekty/plochy (10ky – 100ky metrů) -> **VHR**
- Plochy (100ky metrů – kilometry) -> **HR, VHR**
- Rozsáhlé plochy / plochy kolem dlouhých linií (kilometry – 10ky kilometrů) - **MR, HR**
- Rozhodujícím faktorem ve sporných případech je frekvence respektive variabilita pohybů na relativně ploše: velká variabilita -> vyšší rozlišení

#### 3.1.1.2 Rychlost pohybu a časový průběh

Známost / očekávanou maximální rychlostí (magnitudou) pohybu použijeme k výběru vlnové délky (pásma) SAR dat. Kritická rychlost nesmí překročit polovinu vlnové délky mezi dvěma observacemi a sousedními body, resp. celkově za období  $t$  násobek počtu observací:

$$v_{LOS} < v_{krit}; \quad v_{krit} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{t}{f} \quad (1)$$

#### Časový průběh

Délku časových intervalů je třeba určit v závislosti na očekávané rychlosti deformací a limitu daného vlnovou délkou vybraného pásma. Pro sledování pomalých pohybů je možné prodloužit intervaly mezi observacemi násobkem nominální frekvence snímání ( $n \cdot f_N$ ), čímž ale také



prodloužíme celkovou dobu pozorování, chceme-li dosáhnout dostatečné přesnosti, závislé na počtu použitých scén. V případě nelineárních, cyklicky fluktuujících pohybů nebo očekávaných skokových pohybů je nicméně vhodné zvýšit danou frekvenci (zkrátit frekvenci pořizování), aby došlo k co nejpřesnějšímu zachycení průběhu deformace v čase a minimalizovala se možnost ambiguit v případě skokové změny.

Tabulka 3 sumarizuje maximální detekovatelné pohyby v LOS a pomocí  $f$  přepočtenou maximální detekovatelnou rychlost za rok pro vybrané SAR instrumenty. Je zřejmá závislost na  $\lambda$  a  $f$ .

Senzor	Akviziční mód	Pásmo	Rozlišení - azimut [m]	Rozlišení - range [m]	Frekvence snímání $f$ (dnů)	Vlnová délka $\lambda$ (cm)	Min detekovatelný rozdíl v LOS (mm)	Max detekovatelný rozdíl v LOS (cm)	Max detekovatelná rychlost v LOS (cm/rok)
ASA, ERS	IMS	C	5	30	35	5.6	1-5	2.8	28.1
R-2	UltraFine	C	3	3	24	5.5	1-5	2.8	41.6
R-2	Fine	C	8	8	24	5.5	1-5	2.8	41.6
TSX	SL	X	1	1	11	3.1	1-5	1.5	50.8
TSX	SM	X	3	3	11	3.1	1-5	1.5	50.8
K-5	SM	X	1	1	11	3.1	1-5	1.6	51.2
PAZ	SL	X	1	1	11	3.1	1-5	1.6	51.3
AP	Fine	L	10	10	46	23.6	1-5	11.8	82.6
S-1	SM	C	5	5	12	5.6	1-5	2.8	84.0
S-1	IW	C	20	5	12	5.6	1-5	2.8	84.0
CSM	SM	X	5	5	4	3.1	1-5	1.6	141.2
CSM	SL	X	1	1	4	3.1	1-5	1.6	141.2
AP-2	SL	L	1	3	14	23.6	1-5	11.8	306.9
AP-2	SM	L	3	10	14	23.6	1-5	11.8	306.9

Tabulka 4 Minimální a maximální detekovatelná rychlost v LOS. Hodnoty jsou indikativní - platily by za idealizovaného stavu

### 3.1.1.3 Směr pohybu

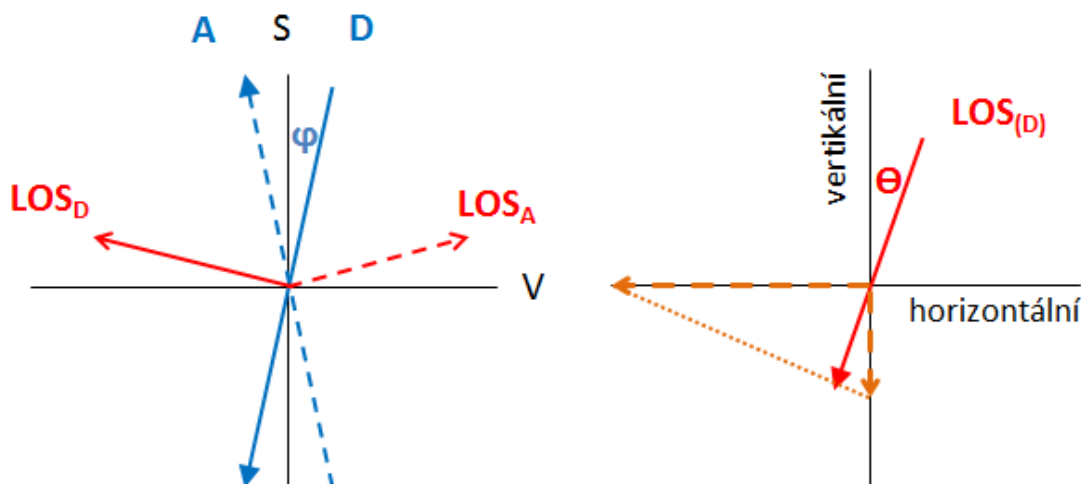
Metoda InSAR umožňuje detekovat pohyby ve směru LOS, resp. projekci pohybu  $S$  (komplexního pohybu ve 3D složeného z jednotlivých komponent - pohybových vektorů ve směrech os souřadného systému) do směru LOS. **Citlivost ve směrech os souřadného systému** ( $x, y, z$ ) získáme výpočtem tzv. jednotkového vektoru senzitivity  $e_{LOS(x,y,z)}$ , jehož jednotlivé složky se dají interpretovat jako procentuální citlivosti detekované deformace v LOS vůči pohybu, který by se odehrával v daném směru (Cigna, 2011):

$$e_{LOSx} = \cos(90 - \theta) \cdot \sin \alpha_{LOS} \quad (2)$$

$$e_{LOSy} = \cos(90 - \theta) \cdot \cos \alpha_{LOS} \quad (3)$$

$$e_{LOSz} = \sin(90 - \theta) \quad (4)$$

kde  $\alpha_{LOS}$  je azimut LOS pro A nebo D dráhu (směr letu družice( $\varphi$ ) +  $90^\circ$ ) a  $\theta$  je incidenční úhel. Odhadnuté deformace z InSAR v LOS jsou nižší než skutečné.



Obrázek 3 Geometrie snímání. Vlevo průmět v horizontální rovině, vpravo boční pohled

Například pro sestupnou dráhu družice s azimutem  $188^\circ$  a běžným incidenčním úhlem  $26^\circ$  je vektor senzitivity roven (0.43, 0.06, 0.9). Senzitivita je 90 % ve vertikálním směru a pouze 6 % v severojižním směru (senzitivita ve směru kolmém na LOS je 0 %). To znamená, že pokud by byl sledovaný pohyb pouze horizontální v S-J směru, bude deformace detekovaná v LOS představovat pouze 6 % z jeho reálné rychlosti.

**Citlivost vůči pohybu v definovaném směru**  $e_S$  je daná kompresí rychlosti  $Rd_S$ , kterou dopočítáme pomocí jejich směrových kosinů (Barboux et al., 2011), (Cigna et al., 2011):

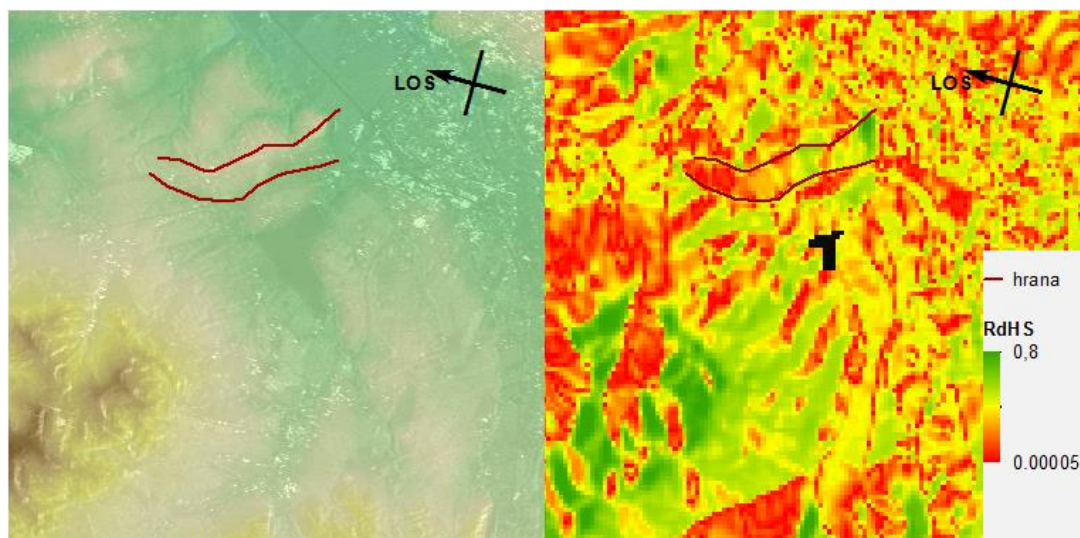
$$e_{Sx} = \cos \beta \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

$$e_{Sy} = \cos \beta \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

$$e_{Sz} = \sin \beta \quad (7)$$

$$Rd_S = \frac{d_{LOS}}{d_S} = e_{LOS} \cdot e_S = e_{LOSx} \cdot e_{Sx} + e_{LOSy} \cdot e_{Sy} + e_{LOSz} \cdot e_{Sz} \quad (8)$$

kde  $\beta$  je úhel vektoru pohybu ve vertikální rovině (např. sklon svahu) a  $\alpha$  je azimut vektoru pohybu v horizontální rovině (např. orientace svahu, mostu viz dále). Komprese rychlosti v procentech udává celkovou citlivost vzhledem k definovanému směru. Pokud se směry pohybů mění v prostoru a pokud známe jejich směr a velikost, můžeme proměnlivou citlivost vizualizovat např. v prostředí GIS.



Obrázek 4 Topografie v rámci testovacího území (AOI Lysůvky) a vizualizovaná komprese rychlosti. Horní a dolní hrana zájmového svahu zvýrazněna hnědě.

Pokud nás nezajímají směrové kosiny (citlivosti rozložené do jednotlivých směrů), ale pouze velikost deformace v LOS, použijeme zjednodušený vzorec upravený dle (Ketelaar, 2009):

$$d_{LOS} = d_v \cdot \cos \theta + d_h \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha_R \quad (9)$$

kde  $\theta$  je úhel dopadu radarového paprsku,  $\alpha_p$  úhel (ve vodorovné rovině) mezi směrem deformace a směrem letu družice,  $v_v$  je vertikální složka deformací a  $v_h$  složka horizontální. Velikost  $Rd_s$  pak dopočteme jako poměr  $d_{LOS}$  k  $d_s$  dle (3.8).

#### 3.1.1.4 Lokalita

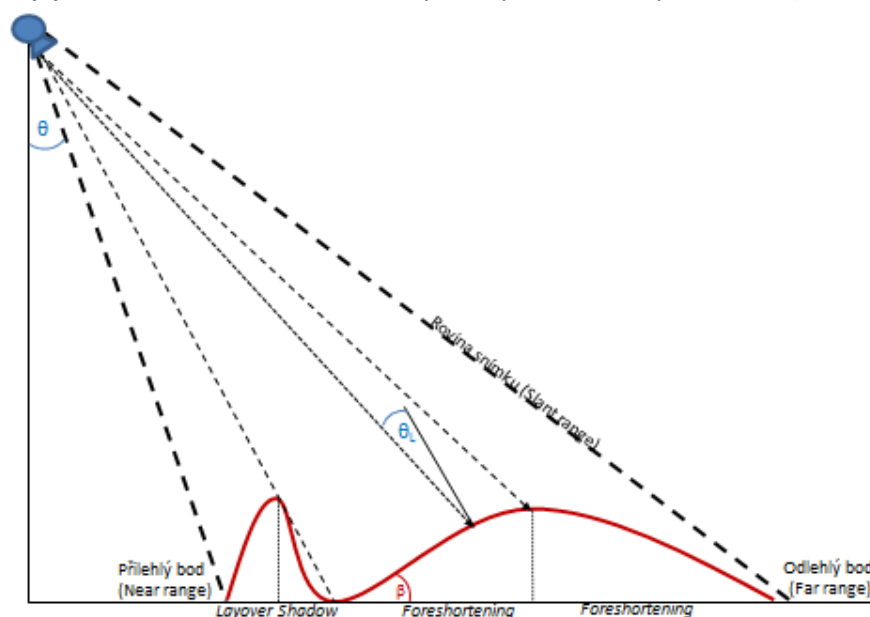
##### Geometrická omezení

Při plánování monitoringu svahových pohybů je třeba zvážit omezení, která vyplývají z geometrie snímání (azimut směru pohledu a incidenční úhel) a lokálních vlastností svahu (sklon, orientace). Oblasti, kde dochází k **zastínění** (*shadow*) a **převrácení obrazu** (*layover*) nelze pomocí InSAR sledovat. Na ostatních svazích, přivrácených i odvrácených, s menším než kritickým sklonem dochází ke zkrácení resp. **zkrácení velikosti pixelu (kompresi)** při převodu do roviny snímku (*foreshortening*). Zde sice jsou měření možná, ale dochází zde ke značné dekorelaci a tedy snížení počtu a hustoty PS bodů. Efekt narůstá na svazích, jejichž sklon se blíží velikosti incidenčního úhlu a s prodlužující se  $B_p$ .

V rámci vyhodnocení proveditelnosti monitoringu především v horských nebo jinak výškově členitých oblastech doporučujeme provést GIS analýzu s využitím digitálního modelu povrchu DSM a metadat družicového snímku. Je vhodné porovnat parametry pro A a D dráhu a vybrat vhodnější variantu. Dále, je-li to možné, vyžadovat kratší kolmé základny.

- Svahové parametry - sklon ( $\beta$ ) a orientaci ( $\alpha$ ) svahu - spočítáme pomocí standardních funkcí GIS. Velikost prostorové jednotky (pixelu) bude odpovídat rozlišení DSM.

- Azimut inklinace dráhy družice resp. LOS dopočítáme ze známých metadat pro daný instrument SAR. Je vhodné počítat s lokálním incidenčním úhlem, který je možné zkalkulovat pro scény většiny družicových SAR instrumentů v rámci volně šiřitelného softwaru *Sentinel-1 Toolbox* [11] s využitím implicitního SRTM DEM nebo uživatelem dodaného přesnějšího DSM. Pokud není k dispozici ekvivalentní scéna z dané dráhy a rámce (pravděpodobně v případě komerčních družic), lze o hodnotu pro dané AOI požádat poskytovatele dat nebo lze pro rastr o velikosti scény zkalkulovat incidenční úhly lineárním natažením jejich nominálního rozsahu mezi přilehlým a vzdáleným bodem (viz Tabulka 1).



Obrázek 5 Vliv terénu

Před použitím v GIS je třeba rastr lokálního i zenitového úhlu převzorkovat do rozlišení rastru DSM. Následuje postup výpočtu ze známých parametrů:

- Pro A i D dráhu identifikace
  - Odvrácených svahů

$$\alpha_{LOS} + 90 > \alpha > \alpha_{LOS} - 90 \quad (10)$$

- Přivrácených svahů

$$\alpha_{LOS} + 90 < \alpha < \alpha_{LOS} - 90 \quad (11)$$

- Identifikace masky zastíněných svahů - K zastínění dochází na prudkých svazích odvrácených od LOS a těsně za nimi.

$$\beta > (90^\circ - \theta) \quad (12)$$

- Identifikace masky svahů s převráceným obrazem – k převrácení dochází na svazích přivrácených k směru pohledu, jejichž sklon převyšuje incidenční úhel.

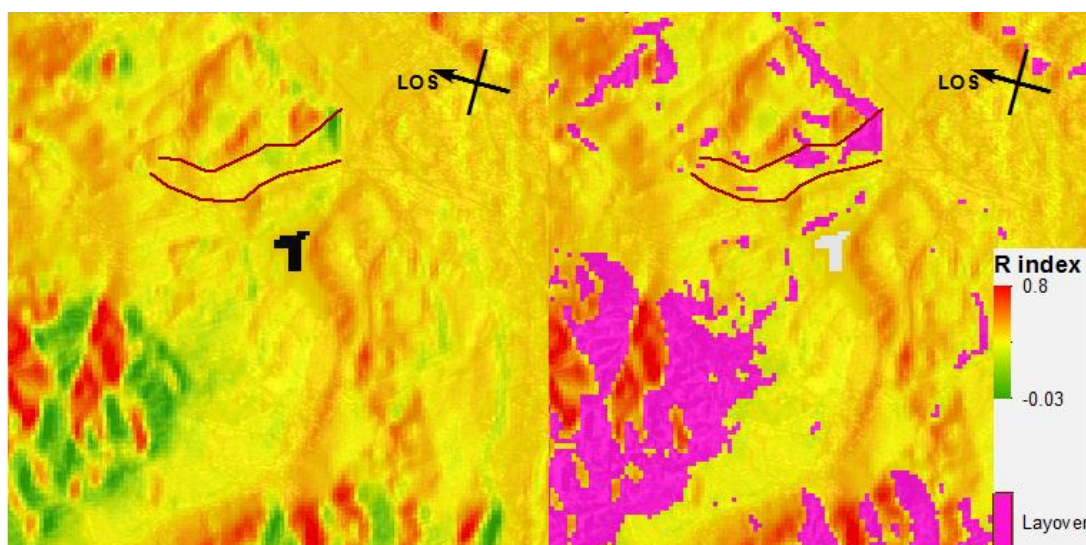
$$\beta > \theta \quad (13)$$

- Svahy, kde dochází ke kompresi, lze jednoduše identifikovat, je-li  $\beta < \theta$ , nicméně je vhodnější uvažovat i vliv orientace. Toho docílíme doplněním předešlých masek pomocí *topografického indexu R*, jehož hodnoty (z rozmezí 0-0.4) indikují míru komprese pixelu v rovině snímku v důsledku sklonu svahu při započtení vlivu jeho orientace a LOS (Cigna et al., 2014):

$$R = \sin(\theta - \beta \cdot \sin(A)) \quad (14)$$

$$\text{pro A dráhu: } A = \alpha - \varphi$$

$$\text{pro D dráhu: } A = \alpha + \varphi + 180$$



Obrázek 6 Identifikace topografických omezení - R index a detekovaný Layover pro AOI Lysůvky

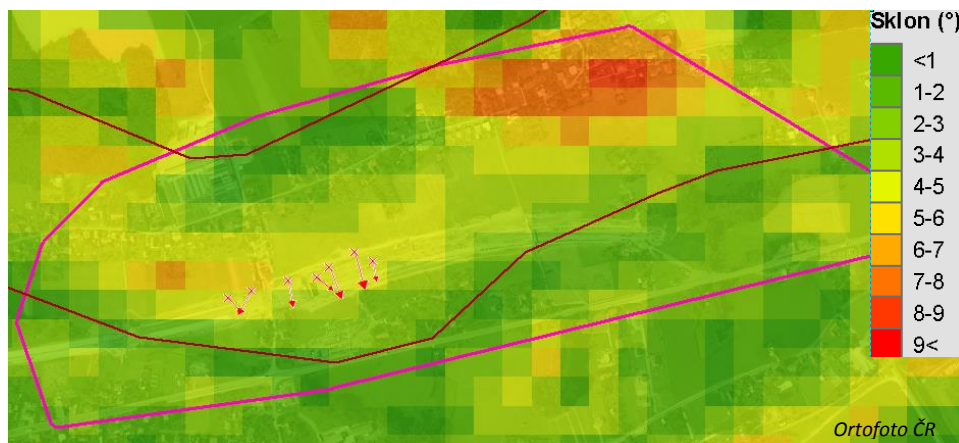
### Orientace a sklon svahu substituující směr pohybu

Pokud na svahu dochází k pohybu, jehož směr není ověřen konvenčními způsoby (např. pomocí inklinometrie), lze v hornatém terénu předpokládat sesuvné pohyby ve směru výslednice orientace svahu a jeho maximálního sklonu (Barboux et al., 2011). V případě jedné lokality je nejrychlejší výslednici určit na základě interpretace digitálního modelu a odvozených svahových parametrů ručně. V případě plošné analýzy je vhodné potlačit variabilitu aplikací filtru s využitím plovoucího okna:

- Hledajícího lokální maximum v případě sklonu svahu
- Hledajícího průměr nebo medián v případě orientace svahu

Výsledné hodnoty (filtrované nebo nefiltrované) můžeme použít pro výpočet komprese rychlosti  $Rd_s$  dle (8), která nám pro každý pixel udává lokální citlivost vůči směru idealizovaného pohybu vzhledem ke geometrii snímání.

Je zřejmé, že pro sledování pomocí InSAR se hodí především východní a západní svahy (z A nebo D dráhy). Citlivost InSAR na severních nebo jižních svazích (resp. na pohyby v S-J směru) je minimální. Citlivost lze zvýšit metodou zpracování založenou na spojení výsledků sledování jak z A tak D dráhy. Zvýšení ale není zásadní a především je zde nutné uvažovat nejen s téměř dvojnásobnými náklady za zpracování a interpretaci, ale v případě komerčních dat i s dvojnásobnými náklady na jejich pořízení (za 2 datové sady).



Obrázek 7 Sklonitost svahu a ukázka reálných směrů a magnitud pohybů detekovaných na vybraných inklinometrických vrtech v AOI Lysůvky. Vektory deformací nejsou v měřítku.

#### Vliv okolí, objektů a jejich orientace

Při plánování monitoringu objektu (budovy, mosty) je třeba se ujistit, že není ve směru LOS zastíněn:

- Např. vysokou budovou – zjistíme kontrolou nad ortofotem
- Svahem – na svahu, který je postižen stínem nebo v údolí v blízkosti detekované masky radarového stínu (délku přilehlého zastínění dopočítáme trigonometricky pomocí výškového rozdílu a incidenčního úhlu)

Obecně pro směrovou detekovatelnost mostů (= liniové objekty) platí podobná pravidla, jako pro svahy:

- Při dostatečném počtu detekovaných bodů PS na horní ploše mostu je možné vertikální pohyby je sledovat pro jakkoliv orientované mosty
- Maximální detekovatelnost vychýlení nebo náklonu v horizontálním směru je možné sledovat pouze pro mosty orientované v S-J směru (bok mostního pole a pilíře jsou pak orientovány kolmo vzhledem ke směru LOS). Detekovatelnost klesá s funkcí rozdílu mezi azimutem pohybu v horizontálním směru a LOS.

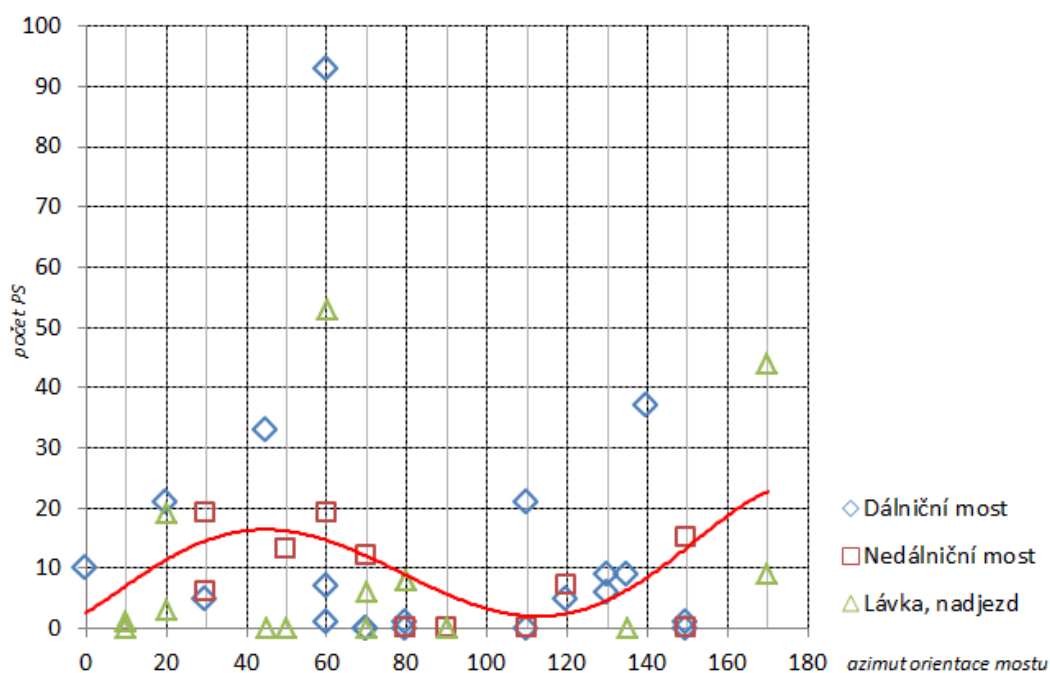
$$\cos(\alpha_{\text{HOR}} - \alpha_{\text{LOS}}) \quad (15)$$

- V případě mostních konstrukcí kolmých na LOS je nad vodní hladinou pravděpodobný dvojnásobný (družice - voda – most – družice) nebo trojnásobný odraz (družice – hladina – most – hladina - družice; družice – most – pylon - družice). V případě mostu se jedná o odraz od spodní stavby (opěr, pilířů) nebo boku nosné konstrukce. Každopádně je v takovém případě detekována i změna výšky vodní hladiny, která nabývá větších rozsahů než změny mostní konstrukce.

- Vícenásobné odrazy v sobě nesou informaci o případných posunech všech elementů a nelze je od sebe jednoduše odlišit
- V opačném případě by mělo docházet pouze k odrazům od horní části (plochy) mostu

Vliv orientace na počet identifikovaných PS bodů můžeme ukázat na omezeném počtu mostů v rámci InSAR zpracování datové sady ze senzoru ENVISAT ASAR (dráha 222) metodou SBAS. V grafu jsou vykresleny počty identifikovaných bodů při variantě s maximálním zrelaxováním kritérií a byť byl použit relativně malý vzorek (počet mostů), trend závislosti s velkými odchylkami je zřetelný.

Vysoké koncentrace PS u některých malých objektů (lávky) jsou pravděpodobně způsobeny příspěvkem okolí (v rámci relativně velkého pixelu) – husté zástavby a železničních kolejí v těsné blízkosti konstrukce.



Obrázek 8 Demonstrace závislosti počtu detekovaných PS bodů na orientaci mostního objektu v rámci testu pro rozšířené AOI Lysůvky

### 3.1.1.5 Hustota trvalých odražečů

#### Svahové pohyby a subsidence

Krajinný pokryv má zásadní vliv na detekovatelnou hustotu trvalých odražečů. Výběr PS kandidátů je založen na intenzitě a stabilitě radarového signálu odraženého od objektů na povrchu. Ty jsou ovlivněny dielektrickými vlastnostmi materiálů, stálostí resp. proměnlivostí v čase, drsností a velikostí vzhledem k vlnové délce použitého radarového pásma a orientací vzhledem ke geometrii pořízení snímku.

- Nízkou zpětnou odrazivost vykazují hladké, rovné povrchy (klidná vodní hladina, silnice, velmi rovné přírodní nebo umělé plochy)
- Proměnlivé odrazivé vlastnosti vykazují povrchy, kde dochází k změnám: antropogenními (rozorání, těžba, odkryv zeminy, navážka, broušení a pokládka vrstvy asfaltu) nebo přírodními (růst vegetace, pohyb vegetace ve větru, zatopení, zamokření).

Výsledkem je dekorelace signálu, neboť zde je rozdíl fáze pro různé body odlišný a nelze jej interpretovat.

Podle odhadnuté hustoty odražečů je třeba udělat rozhodnutí, zda je předpokládaná hustota dostatečná pro provedení PS InSAR analýzy vzhledem k očekávanému rozsahu pohybů. K odhadu je nutné vyhodnotit převládající typ krajinného pokryvu a jeho prostorovou kompozici.

- U zpětného mapování lze odhad provést na základě zpracování PS InSAR na omezeném počtu archivních snímků (6 – 10), které indikuje (nahodnoceně oproti plnému setu snímků) přibližný počet PS kandidátů. Je třeba zvážit ekonomické aspekty – cenu dat (v případě komerčních) a cenu za zpracování.
- V případě plošně malého území provedeme vyhodnocení na základě interpretace nejaktuálnějšího ortofota, např. připojením do GIS pomocí WMS služby [12] nebo kontrolou přímo v terénu.
- V případě plošně velkého území provedeme hrubé vyhodnocení v GIS pomocí volně dostupné vrstvy Corine Land Cover - CLC2006/2012 ([13], pro měřítko 1:100,000) nebo ve větším detailu pomocí vrstvy ZABAGED ([12], ČUZK – 1:10,000), DKM ([12], ČUZK – 1:2,000) nebo UrbanAtlas [14]. EEA – 1:10,000), která je dostupná pro část území ČR a jejíž výhodou je kompatibilita s nomenklaturou CLC.

Kvantifikaci hustoty PS pro různé třídy Land Cover (a na různé úrovni definici tříd a jejich hierarchické agregace) CLC se věnuje řada autorů (Plank et al., 2010), (Cigna et al., 2014), (Colombo, 2006).

Kategorie / pásmo (metoda)	Plank et al, 2010			Cigna et al, 2014				Colombo et al., 2006	Test autorů (2014)	
	X	C	L	C (PS InSAR+SBAS+SqueeSAR)				C (PSInSAR)	C (SBAS)	X (SqueeSAR)
(agregované dle CORINE 2006)	Vhodnost pro PS InSAR			Min	Max	Avg	Validací	PS	PS	PS+DS
Městská souvislá zástavba	1	1	1	300	1400	836	159	1160	70	2921
Městská nesouvislá zástavba	1	1	2	200	640	414	72	-	75	1436
Industriální a komerční plochy	-	-	-	160	620	392	66	-	75	3463
Silniční a železniční síť	1	1	2	160	620	218	35	-	23	3287
Městská zeleň	-	-	-			149	30	-	41	297
Sportovní a rekreační areály	-	-	-			54	7	-	30	1614
Skály	2	1	1	10	400	41	-	290	-	-
Štěrka a písek	3	2	2	-	-	38	10	-	-	-
Louky a pastviny	4	3	2	0	150	31, 59	4	110	11	-
Lesy	6	5	3	0	100	20	4	30	5	29
Zemědělské plochy	6	6	6	10	40	30	4	30	8	18
Voda	6	6	6	0	0	0	0	0	-	10

Tabulka 5 Kategorizace vhodnosti povrchu pro PS InSAR (Plank): 1-nejvhodnější, 6-nejméně vhodný; dále srovnání detekovaných hustot bodů PS v třídách krajinného pokryvu

Obecně uznávané rozdělení agregovaných tříd dle CLC do kategorií dle vhodnosti pro sledování deformací pomocí InSAR v daných pásmech uvádí (Plank, 2010). Toto rozdělení jsme převzali a



uvádíme v tabulce 5, spolu s rozsahy a průměry hustot pro dané třídy spočítané pomocí databáze PS bodů získaných zpracováním mnoha datových sad ERS-1/2 v rámci projektu TerraFirma pro celou Velkou Británii (Cigna et al, 2014). Podobných výsledků dosáhl (pro některé třídy i (Colomo, 2006). V rámci testovacího vyhodnocení pro scény ze senzoru ENVISAT ASAR (track 222 – 30 scén, track 494 – 31 scén, metoda SBAS) jsme v oblasti severního podhůří Beskyd dosáhli výrazně nižších hustot bodů PS při spodních hranicích rozsahů uvedených v této publikaci, jak je pro srovnání uvedeno v tabulce. To odpovídá výsledkům validace v rámci tohoto projektu, kde pomocí omezeného počtu datasetů v rámci validačních AOI zjistili výrazně nižší hustoty bodů PS.



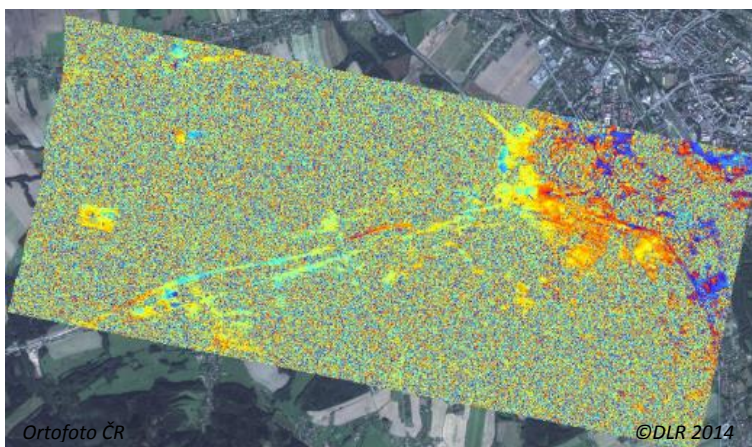
**Obrázek 9** *Hustota detekovaných bodů PS pomocí: (a) SBAS z ASAR nad daty CLC (náhled), (b) SBAS z ASAR nad daty Urban atlasu (detail) (c) SqueeSAR z TSX nad daty Urban Atlasu (detail) - AOI Lysůvky*

Relaxování kritérií, popsané v další kapitole, nevedlo ke zvýšení počtu bodů v rámci povrchů ovlivněných vegetací a dekorelací. Jak bylo ověřeno v rámci dalšího testu pro AOI Lysůvky

s využitím dat z družice TerraSAR-X (Spot Light, 9 scén) metodou SqueeSAR, která umožňuje nejlépe detekovat i *distribuované odražeče* (DS, *distributed scatterers*), použití většího rozlišení a pokročilejší metody zpracování sice vedlo k navýšení počtu PS a DS kandidátů, ale pouze v třídách kategorie 1 a 2. Pole a lesní porosty zůstaly dekorelované bez detekovaných kandidátů.

Výše uvedené skutečnosti je nutné brát v úvahu při plánování PS InSAR pro sledování nežádoucích pohybů (svahové, sesuvy, subsidence) spolu s následujícími závěry:

- Nežádoucí (svahové) pohyby jsou velmi často lokalizovány právě v oblastech, kde lze z důvodu vegetace nebo zemědělské půdy očekávat velmi nízké hustoty PS bodů.
- Vyšší rozlišení má zásadní vliv na hustotu detekovaných bodů (jak v C, tak v X pásmu), díky níž lze analyzovat deformace ve větším měřítku a zachytit jejich lokální variabilitu, nicméně stále je zásadně ovlivněno vlivem dekorelace na plochách s vegetací nebo zemědělstvím, kde nepřináší zásadní zlepšení.
- Výrazně lepší výsledky na plochách s vegetací lze očekávat u dat z pásma L, nicméně zde je výběr zatím omezen pouze na jednu družici s výrazně delší akviziční frekvencí.
- U dat ze Sentinelu-1 lze očekávat mírně lepší výsledky (z fázové stability dané úzkým orbitálním tubusem a kratších period snímání) ve srovnání s publikovanými a validovanými hustotami získaných analýzou dat z ERS-1/2 a ENVISAT ASAR, a to především v méně příznivých podmínkách (povrchy s vegetačním krytem).
- Ve srovnání s pásmem X lze u dat ze Sentinel-1 o shodné periodě snímání očekávat nižší dekorelaci vlivem řídké vegetace díky delší vlnové délce, je ale třeba počítat s menším rozlišením.
- Metody zpracování vedoucí ke zvýšení počtu detekovaných PS a DS bodů zde lze zvážit, pokud se jedná o ideální svah z hlediska orientace a pokud je potvrzeno (interpretací, terénním šetřením), že se v oblasti nachází dostatek objektů, vůči kterým mohou být citlivé (sloupy elektrického napětí, řídká vegetace s častými skalními výčnělky nebo balvany atd.).
- V opačném případě je nutné zvážit využití instalace umělých odražečů: UKO nebo KAT.



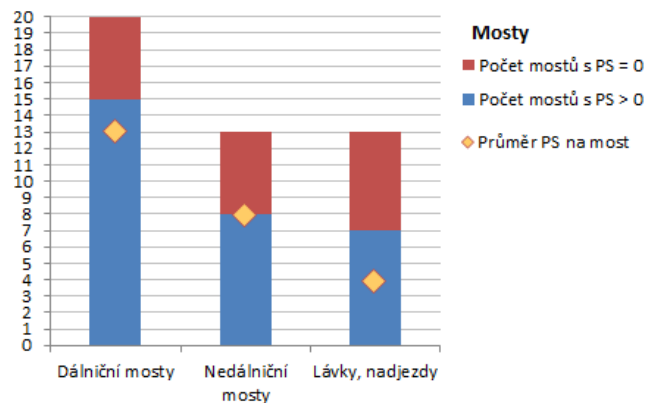
Obrázek 10 Dekorelace v interferogramu nad dvojicí snímků z TSX

## Mosty

Z publikací uvedených v rešerši vyplývá, že v případě sledování mostů pomocí InSAR je pro hustotu detekovaných PS bodů klíčové rozlišení dat. Pásmo není klíčové z hlediska detekovatelnosti nebo hustoty bodů, ale zůstává důležité z hlediska rozlišení magnitudy deformací v konjunkci s akviziční frekvencí dat.

- Při použití dat velmi vysokého rozlišení (jak v pásmu X, tak v pásmu C) lze očekávat počty detekovaných bodů na most v řádu stovek až (výjimečně tisíců) na km<sup>2</sup>. To umožňuje sledovat stav *strukturální kondice* mostní konstrukce a její lokální fluktuaace.
  - Rozlišení a citlivost umožňuje sledovat i cyklické termální dilatace.
  - Klíčovým faktorem pro úspěšné sledování rizik je rozlišení těchto přirozených (dilatace) a nepřirozených (rizikových) deformací
- Použití dat středního rozlišení (ze Sentinel-1) je omezené nicméně možné pro dlouhodobý *monitoring případných rizik* vlivem nestability pilířů nebo podloží (např. vlivem dlouhodobého podemílání nebo podemletí v důsledku jednorázové události během povodní)
  - Omezení plynou z velikosti pixelu a tudíž nízké hustoty detekovaných PS bodů vzhledem k velikosti a ploše mostu.
  - Georeference může být problematická vzhledem k velikosti pixelů, doporučujeme provést kontrolu na úrovni rastru (intenzit) a detekovaných bodů pro zjištění nutnosti případné opravy.
  - Problémem je určitá náhodnost a nepravidelnost lokalizace PS kandidátů ve srovnání s vyšším rozlišením. Je možné instalovat TKO nebo KAT na zájmové místo.
  - Pokud se podaří identifikovat PS body na nebo bezprostředně u pylonů, může monitoring sloužit k dlouhodobému sledování jejich stability a v případě velkého výkyvu (deformace) vyvolat alarm (Sousa & Bastos, 2012).
  - Je třeba vyhodnotit kombinace podmínek: dostatečně velký most, ideální orientace, ideálně dostupnost datových sad z více drah (A+D) pro vzájemnou relativní validaci.

Sledování pomocí středního rozlišení je v tomto kontextu třeba považovat za problematické. Jak bylo předběžně ověřeno v rámci demonstrace pro AOI Lysůvky na datech z ENVISAT ASAR, zpracováním 2 nezávislých sad, při standardním postupu SBAS byly i při maximálním zrelaxování kritérií (navýšení počtu PS bodů) detekovány jejich nízké počty pro jednotlivé mosty. Pro řadu mostů (především nevhodné orientace) PS body nebyly detekovány vůbec. Lokalizace bodů v rámci mostu a jejich počet byly v rámci testu náhodné a nepravidelné, nicméně z následujícího grafu je zřejmé, že počet bodů (a jejich hustota) detekovaných z MR dat kromě orientace samozřejmě závisí i na velikosti a typu mostní konstrukce.



Obrázek 11 Porovnání mostů s detekovanými a nedetekovanými PS pro jejich kategorie z dat ASAR (metodou SBAS). Počty závisí na orientaci (viz obrázek6) ale také na typu mostu a jeho okolí.



Obrázek 12 Hustota PS bodů ze zpracování SBAS ENVISAT ASAR (D dráha) s maximální relaxací ( $D_A < 0.75$ ,  $Coh > 0.4$ ). Je patrná nerovnoměrnost detekovaných bodů v prostoru a variabilita magnitud deformací. Z obou snímků je patrná citlivost ve směru kolmo na LOS.

V tomto kontextu je třeba zaměřit další výzkum především na využití dat z družice Sentinel-1.

### 3.1.1.6 Dostupnost dat

Dostupnost dat je pro úspěšné provedení aplikace dalším klíčovým faktorem.

- V rámci procesu přípravy **budoucího monitoringu** je třeba data vybrat a nastavit jejich volitelné parametry na základě předešlého vyhodnocení proveditelnosti a finančních možností.
  - Data pak jsou pořizována v rámci zákazníkem **objednaných nových akvizic** s vybranou frekvencí snímání ( $n.f_N$ ) v rámci objednávky u komerčního poskytovatele dat (tzv. *programování*).
  - Zákazník data stahuje v okamžiku jejich **dostupnosti po pořízení** v případě, kdy data jsou (ERS-1/2, ASAR) nebo budou dostupná zadarmo (Sentinel-1)

Jak u dat Sentinel-1 tak u komerčních dat může dojít k nepořízení objednané scény v případě konfliktu s objednávkou vyšší priority nebo urgencye. Tyto případy a jejich řešení je popsáno v operačních pořizovacích plánech.

- V případě návrhu **zpětného mapování** historických deformací je třeba analyzovat obsah archivu dat opět v návaznosti na předešlé vyhodnocení proveditelnosti. V tomto případě je dostupnost dána a budeme ji hodnotit z hlediska:
  - **Prostorového pokrytí:** zda je AOI pokryto
  - **Časového pokrytí:** zda se shoduje s potřebným časovým rozsahem
  - **Pravidelnosti pokrytí:** zda a případně jak velké jsou mezery mezi termíny pořízení dat v archivu. V případě velkých mezer hrozí nejednoznačnost odhadu a snížená možnost identifikace případných nelineárních změn. Dlouhé časové základny také budou mít vliv na výběr a přesnost metody zpracování. Časové základny je vhodné vizualizovat jako např. v obr 18 případně porovnat s časovým pokrytím referenčními měřeními nebo známým průběhem deformací.
  - **Kolmé základny:** lze zjistit z volně dostupných metadat u dat zadarmo nebo na základě požadavku na poskytovatele. U zpětného zpracování dat ze senzorů ERS-1/2 a ASAR mají spolu s časovými základnami zásadní vliv výběr vhodných interferometrických párů v rámci vybrané metody zpracování.

### 3.1.2 DOPORUČENÝ OBECNÝ POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola se věnuje popisu klíčových kroků a rozhodovacích bodů, které je třeba před zpracováním zvážit s ohledem na výběr dat, předpokládanou hustotu trvalých odražečů a požadovanou přesnost.

Konkrétní postupy zpracování se bude vždy lišit podle použité softwarové implementace a algoritmu. Mezi těmi mohou být poměrně značné rozdíly ve způsobech filtrování a výběru trvalých odražečů, aplikaci atmosférických a topografických korekcí a také v pořadí prováděných úkonů. Navržené kroky je proto třeba chápat v obecné rovině a snažit se o jejich naplnění v rámci použitého softwaru.

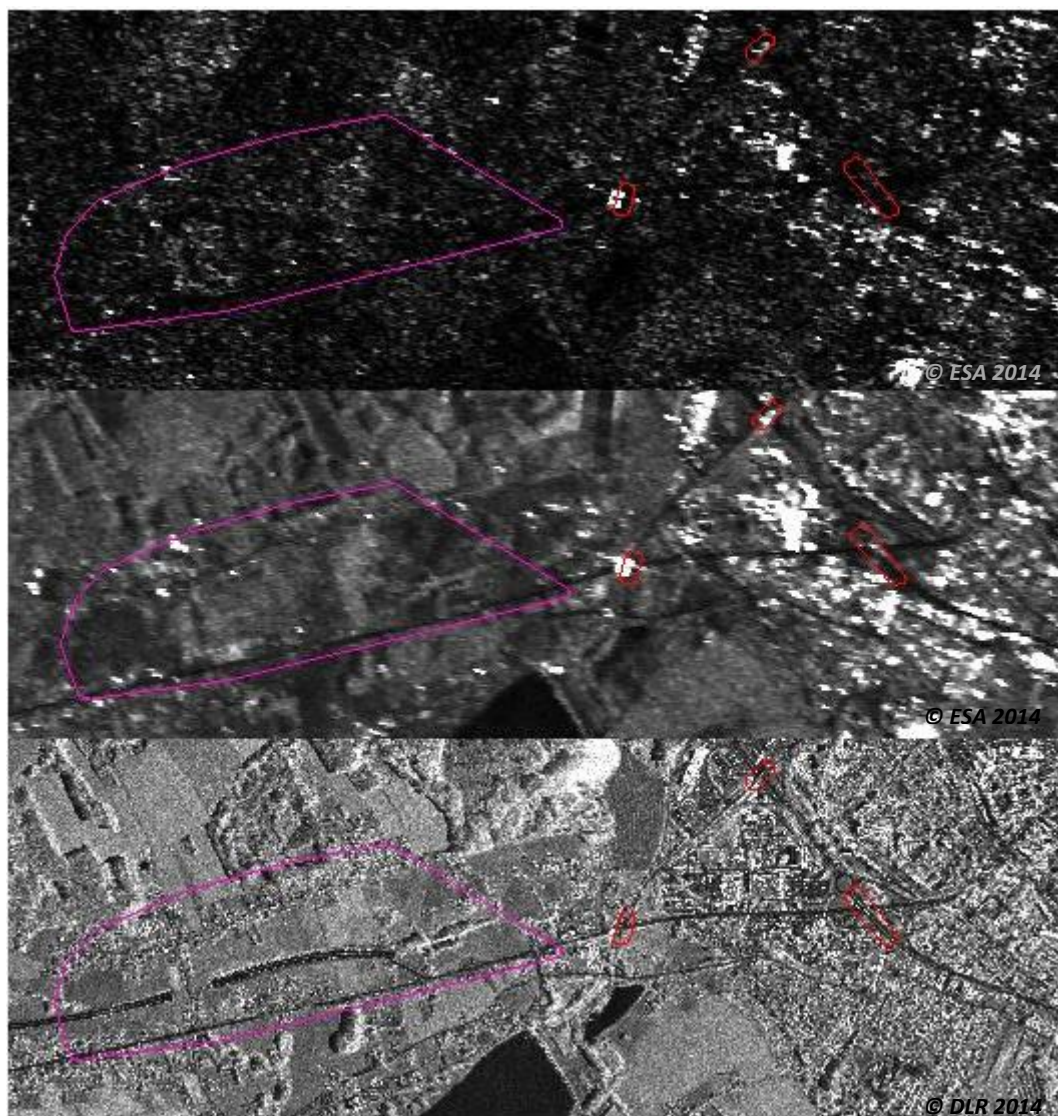
#### Georeference a ko-registrace

Přesnost georeference je jedním z prvků se zásadním vlivem na přesnost lokalizace výsledné vrstvy bodových odražečů. Závisí na:

- Přesnosti orbit - orbitální poloha družice je součástí dodaného snímku (v metadatech), zpracovatel musí zjistit, zda jsou externě k dispozici přesnější orbity a použít je (v případě ENVISAT ASAR a ERS-1/2, v případě TerraSAR-X je lze požadavek zadat při objednávce dat; u družice Sentinel-1 nejsou tyto detaily dosud známy).
- Přesnosti časování ve směru range a azimutu – přesnost automatického odhadu chyb závisí na softwaru, ne vždy je korekce dostatečně přesná. Posuny lze očekávat především ve směru azimutu

Pokud automatika použité implementace nefunguje, provedeme korekci pomocí sběru vlíčovacích bodů:

- Doporučujeme především pro VHR data, kde jsou jednotlivé objekty lépe referencovatelné vzhledem k objektům viditelným v referenčních optických datech (ortofoto) nebo DEM.
- Data nižšího rozlišení mají možnosti přesné reference omezené vlivem velikosti pixelu a vícenásobných odrazů. Georeferenci je vhodné provést buď pomocí **multitemporálního kompozitu intenzit (MTI)** získaného průměrováním nebo až po InSAR zpracování pomocí interpretace vrstvy výsledných PS bodů (s dostatečnou hustotou), z jejichž sady by měly být identifikovatelné dlouhé liniové prvky (silnice, železnice) a jejich případné posuny vůči referenčním datům, jsou-li větší než 1 pixel.



Obrázek 13 Vliv rozlišení a způsobu zpracování na detekovatelnost. Nahoře intenzita z jednoho snímku ASAR, uprostřed multitemporální kompozit intenzit (30 snímků ASAR), dole multitemporální kompozit intenzit (8 snímků TerraSAR-X). AOI Lysůvky fialově, mosty červeně

### Výběr interferometrických dvojic

Z vybraných interferometrických párů je kalkulován interferogram, jehož kvalita zásadně ovlivňuje přesnost a spolehlivost interferometrické analýzy. Z možných kombinací interferogramů je proto

nutné vybrat takové, které jsou dostatečně kvalitní. Kvalita interferogramu a koherence je negativně ovlivněna:

- Dlouhými kolmými základnami  $B_p$  (způsobují geometrickou dekorelaci)
- Dlouhými časovými základnami  $B_T$  (způsobují temporální dekorelaci)

Délku obou základen je proto vhodné volit co nejkratší. Délka kolmých základen je daná variacemi trajektorií družice při opakovaných průletech v rámci tzv. orbitálního tubusu. Novější družice SAR jsou navrženy s ohledem na potřebu užšího tubusu a tedy i kratších (příznivějších) kolmých základen. Současně mají nové družice kratší periodou přeletu – frekvenci snímání a tedy i kratší časové základny.

Trend vysoké frekvence a pravidelného snímání spolu s nízkými kolmými základnami zásadně usnadňuje výběr vhodných interferometrických párů, které jsou méně ovlivněny dekorelací. Snaha o vysokou temporální frekvenci u komerčních dat může vést k zvýšení nákladů na jejich pořízení a je proto kromě požadavku na časové základny a charakter jevu v čase nutné uvažovat i finanční aspekty a požadovanou přesnost, která se odvíjí od počtu zpracovaných scén. Kolmé základny nejsou při objednávání scén z TSX nebo CSM standardně k dispozici, proto je nutné si je vyžádat.

ASAR a ERS dosahují maximálních kolmých základen v řádu 1.5 km, maximální přípustné základny jsou v řádu 1.1 km. U TerraSAR-X nepřekračují 500m a u Sentinel-1 dokonce 200m. Při sledování zastavěné oblasti je možno párovat scény s kolmou základnou až do 1 km (neplatí pro vysoké budovy) a max. časové základny (při dlouhém sledování) zde obvykle není nutné vůbec omezovat. Pro sledování oblasti zatrávněné doporučujeme omezit kolmé základny na max. 300-400 m, časové pak zkrátit s ohledem na výraznou dekorelaci ve srovnání s body ze zastavěných oblastí.

### **Výběr metody zpracování s dopadem na identifikaci trvalých odražečů**

Metodu zpracování je třeba vybrat v závislosti na následujících kritériích: (předpokládané) hustotě trvalých odražečů a velikosti a rozložení kolmých a časových základen.

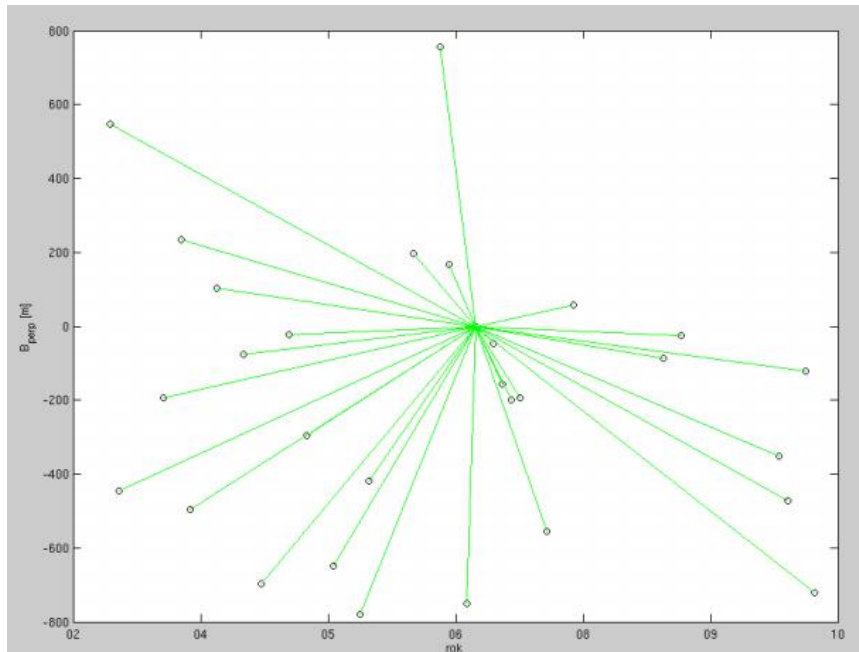
Použití různých implementací (metod) má za následek obvykle obdobnou detekovanou rychlost deformace, ale liší se hustotou zpracovaných PS (Sousa et al., 2009).

Postup by měl vycházet z klíčových rozhodovacích bodů:

- Pokud je zájmová oblast pro monitoring zastavěná a tedy s vysokou hustotou odražečů či jsou-li kolmé i časové základny dostatečně krátké (viz sekce Výběr interferometrických párů), lze použít **klasickou metodu PS InSAR**. Ta využívá:
  - výběr jedné hlavní (master) scény a její párování s ostatními,
  - s ohledem na co nejkratší (a nejrovnoměrněji rozložené) základny - jak kolmé, tak časové, s uvážením koherence (koherence může být výrazně zhoršena např. sněhovou pokrývkou).

Příkladem aplikace v tomto případě je sledování subsidence v urbánním prostředí vlivem poddolování nebo ražby tunelů, případně sledování infrastrukturních prvků (mosty, nadjezdy). Hustotu bodů lze v tomto prostředí očekávat v řádu stovek PS/km<sup>2</sup> pro HR a tisíců pro VHR, což je v obou případech dostatečné.

Při vhodné konstelaci osy mostu vzhledem ke geometrii snímání bude řada bodů odražečů detekována na jeho povrchu, počet bude záviset především na rozlišení dat.



Obrázek 14 Graf základen pro standardní PS InSAR

- Pokud leží zájmové území v oblasti, kde převládají distribuované odražeče (*DS body*), nebo pokud převládají příliš dlouhé základny, není vhodné nebo možné použít PS InSAR. Problém základen je každopádně nutné řešit aplikací rozdílné metody zpracování - **metody SBAS** (*metoda krátkých základen*).

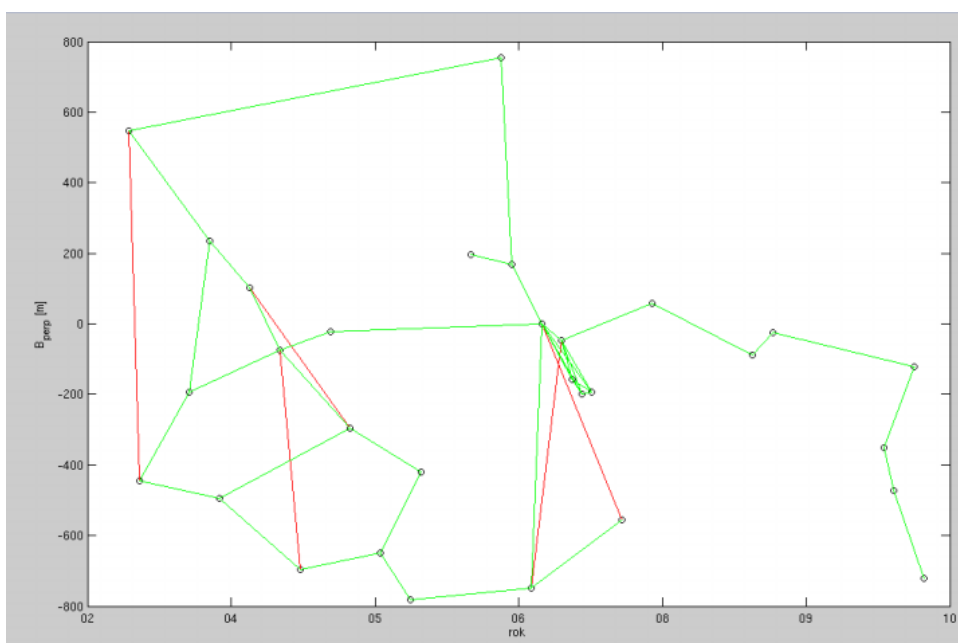
Vlastního zahuštění *pole trvalých odražečů* můžeme docílit několika způsoby:

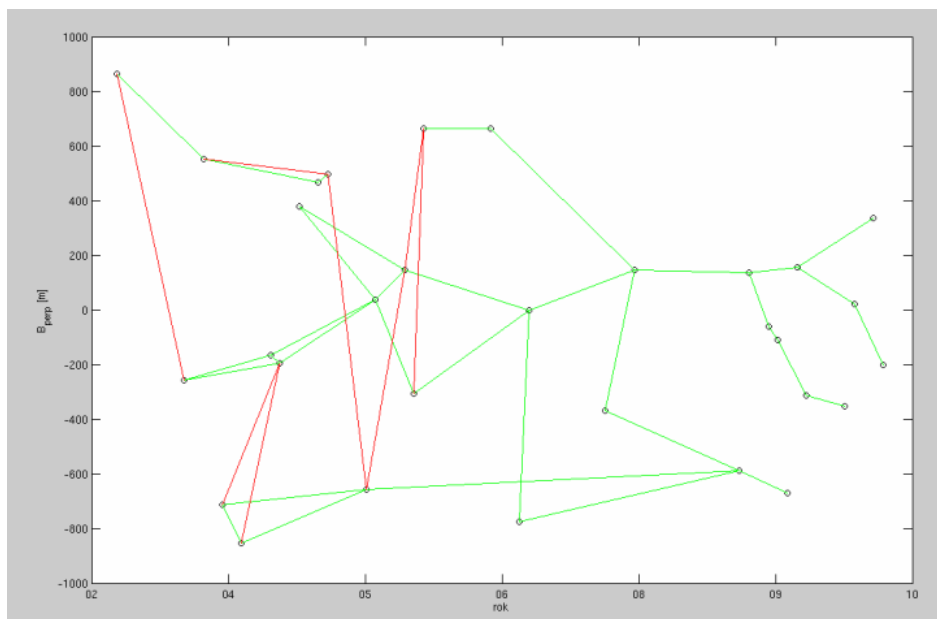
- 1) **Použitou metodou zpracování**, která umožňuje detekovat více trvalých nebo distribuovaných odražečů. Výhodou je aplikovatelnost na libovolný (i archivní) dataset a nezávislost na instalaci umělých odražečů. Lze vybrat z více metod.
  - Výše zmíněná **SBAS** standardně zahrnutá v řadě softwarových implementací, která umožňuje vytvořit více kombinací párů scén při méně výhodné konstelaci základen nebo (současně) v případě nízkého počtu scén (<20, konkrétní číslo však závisí na použité softwarové implementaci); obecně doporučujeme SBAS použít v případě, že selže metoda PS InSAR. Ze své podstaty je SBAS citlivá i na DS body, proto umožňuje identifikovat vyšší počet bodů (PS+DS) (Colesanti & Wasowska, 2006).
  - **ISBAS** – rozšíření metody SBAS, dosahuje podle (Novellino et al., 2014) lepších výsledků při identifikaci distribuovaných odražečů než standardní SBAS, ale doposud nebylo ověřeno operační praxí.
  - **SqueeSAR<sup>TM</sup>** – proprietární a patentovaná metoda firmy TRE (Ferretti et al., 2011) pro detekci trvalých a distribuovaných odražečů ověřená v operační praxi jak na VHR, tak HR (X, C a L-band) datech.



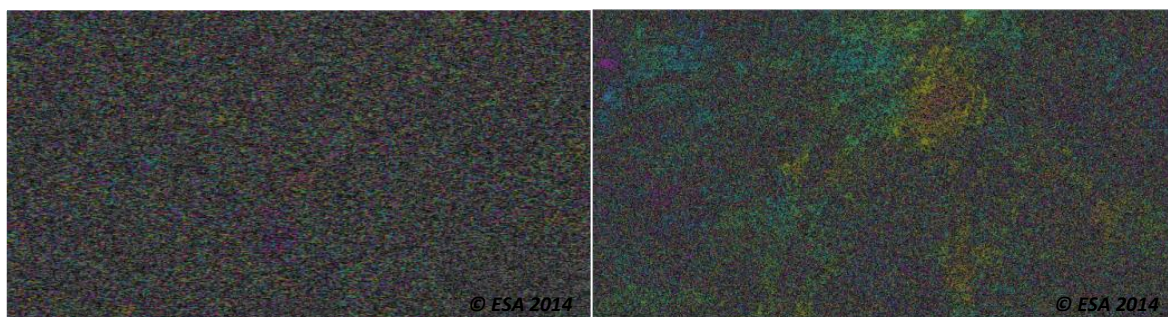
Výběrem párů scén je třeba vytvořit vzájemná propojení – provádí se pomocí tzv. **grafu základen** (viz obrázek 14).

- Výběr záleží na softwarové implementaci: některé vyžadují celkové propojení jen pro vyčíslení časových řad deformací, u některých je to nutná podmínka pro zpracování.
- Je-li z grafu zřejmá vysoká vzájemná odlehlost (dlouhé časové či kolmé základny) některé scény, je vhodné danou scénu či scény ze zpracování vyloučit (za cenu zhoršení temporálního rozlišení či doby sledování).
- Za účelem propojení doporučujeme vizuálně zkontrolovat možné interferogramy a vybrat ty s co nejvyšší koherencí (tzn. kvalitou fázové informace). Interferogramy s velmi nízkou kvalitou je vhodné vyloučit.
- Není vhodné vylučovat ty interferogramy, kde jsou již spojení koherentní, nebo zvyšovat množství párů použitím interferogramů s nižší koherencí (ani když je tato vyšší než koherence nejslabších článků systému, které byly ale zařazeny s ohledem na nutnost propojení celé sady).
- Master scénu je v tomto případě vhodné volit tak, aby měla co nejvíc přímých či kvalitních propojení na co nejvyšší počet ostatních scén.
- Při inkluzi interferogramů s nízkou koherencí je pak při interpretaci třeba brát v úvahu možnou (výraznější) odchylku scén, které jsou k master scéně propojeny přes takový pár.





Obrázek 15 Porovnání grafů základěn metodou SBAS pro datové sady z různých drah (stejného území) z ENVISAT ASAR. Zelená propojení byla po vizuální kontrole interferogramů zachována, červená vyloučena.



Obrázek 16 Vizuální porovnání vhodnosti interferogramů z dat ASAR - levý je nekoherentní a byl ze zpracování vyloučen, pravý zachován

Počet PS bodů lze dále navýšit upravením prahů, tj. *uvolněním kritérií*, které slouží k jejich výběru na začátku nebo v průběhu zpracování. PS body se vybírají/vylučují na základě předběžného odhadu jejich kvality. Zde je vhodné dodat, že konkrétní způsoby filtrace se liší v jednotlivých implementacích (někde je parametrizace součástí zpracování, jinde je po vyhodnocení třeba provést celé zpracování znovu) a vždy je třeba ad hoc posoudit, která kritéria nebo jejich kombinace je vhodná z hlediska charakteru jevu:

- **Amplitudová disperze ( $D_A$ )** – obvykle základní kritérium pro výběr bodů pro zpracování, počítaná jako poměr směrodatné odchylky intenzity ku její střední hodnotě, pro daný bod pro všechny použité scény.
- **Fázová stabilita (koherence)** – vypočtená v časové nebo prostorové doméně (na základě podobnosti s okolními body), vždy až po zpracování: ve standardní metodě PSInSAR (Ferretti 2001) je koherence měřítkem podobnosti časového průběhu deformací na bodě

oproti modelu. V některých implementacích PSInSAR/SBAS (StaMPS, Sousa et al., 2011) závisí koherence na vlastnostech daného bodu v prostoru i v čase.

- **Směrodatná odchylka odhadnuté rychlosti** – vypočtená z reziduí oproti apriornímu modelu, pouze v časové doméně. U některých implementací sm. odchylka rychlosti přímo souvisí s hodnotou koherence.

Při úpravě prahů pro filtrování (tedy inkluzi nebo exkluzi kandidátů) musí zpracovatel vzít v úvahu i následující skutečnosti:

- Přípustná směrodatná odchylka je ovlivněna možným nesouhlasem sledovaných deformací s (lineárním) modelem: rezidua mohou být vyšší jen z důvodu použití nevhodného modelu deformací (který je obvykle v softwaru implementován bez možnosti změny).
- V softwarech zohledňujících okolí bodu může být nižší koherence způsobena odlišným charakterem (magnitudou) deformace úzké stavby (např. dálnice) ve srovnání s okolím, zvláště při použití scén s nižším rozlišením.
- Zvyšování povolené  $D_A$  obvykle nemá na konečný počet PS bodů zásadní vliv, neboť body s vyšší  $D_A$  jsou vyloučeny v dalších krocích zpracování kvůli nízké stabilitě fáze.
- Úpravu hustoty bodů v softwarech, které ji umožňují omezit, doporučujeme jako neproblematickou.
- Úpravou prahů v závěrečné části zpracování zvýšíme počet PS bodů o body obvykle méně kvalitní, tzn. s deformacemi méně odpovídajícími modelu či o body s deformacemi nepodobnými bodům sousedním. Takové body je třeba interpretovat s opatrností.

Zvyšování počtu bodů, resp. zahrnutí bodů s očekávaně nízkou kvalitou má z hlediska zpracování negativní konsekvenci:

- V případě sousedních bodů se může jednat o body z bočních laloků u silných odražečů, u kterých byly nesprávně vypočteny korekční složky vzhledem k nesprávné poloze (Ketelaar, 2009)
- Zvýšení výpočetní náročnosti vč. zatížení paměti úložné kapacity.

**Konečné rozhodnutí, zda do výsledku prezentovat vyšší hustotu PS (a DS) bodů, která se ale pravděpodobně projeví snížením přesnosti a věrohodnosti, je na zpracovateli. Ten by měl postup, jeho dopady a interpretaci konzultovat s uživatelem!**

2) **Instalací UKO nebo KAT.** Instalací se vytvoří síť trvalých odražečů v předem určených lokalitách (více v kapitole 3.2). Pokrytí rozsáhlého území s velkou hustotou je nicméně značně nákladné.

Z hlediska metody zpracování území s UKO nebo KAT je vhodné zvážit bodové zpracování (tedy pouze informace z odražečů) a interpolaci polohy i fáze v rámci pixelu, což má vliv na zvýšení přesnosti (Ketelaar, 2009). Nevýhodou bodového zpracování je absence prostorového kontextu nutného pro odhad atmosférického zpoždění a v případě větších deformací též absence prostorové spojitosti pro odhad celočíselných násobků poloviny vlnové délky (která vede k nejednoznačnosti řešení úlohy zjištění velikosti deformací). Rozhodování mezi metodami

PSInSAR a SBAS se v tomto případě provádí podle výše zmíněných kritérií, bez ohledu na původ odražečů.

UTO a KAT nelze instalovat zpětně pro monitoring pomocí archivních dat a nikdy nelze vyloučit riziko zcizení, vandalismu nebo pohnutí odražeče, které by znehodnotilo drahou analýzu založenou výhradně na jejich využití. Dále je třeba zajistit jejich pravidelnou údržbu (čištění, u KAT též výměna baterií).

## Referencování

Metoda InSAR je relativní v čase a prostoru, proto je třeba výsledky vztáhnout (referencovat) ke vztažnému bodu. Referencování v čase se provádí výběrem master snímku (viz výše), jehož hodnota pak představuje nulovou hodnotu deformace v grafu průběhu posunů. Referencování v prostoru výběrem referenčního bodu či oblasti by mělo být konzultováno se zadavatelem či znalcem oblasti.

- Referenční bod by měl být stabilní či monitorovaný jinou metodou.
- Z hlediska přesnosti je vhodné, aby se referenční bod/oblast nacházel do 1-2 km od posuzované oblasti, a nebyl od ní oddělen nekoherentní oblastí (např. řekou). Tuto podmínku nelze vždy zrealizovat, jako problematická se jeví především u plošného sledování liniových staveb, jejich protáhlého okolí nebo související infrastruktury (mosty).
- Použití umělého koutového odražeče coby referenčního bodu je možné, není však vhodné, aby byl tento součástí referenční oblasti, kde by byl obklopen mnoha distribuovanými odražeči. V takovém případě je vhodné jej použít jako referenční bod, nikoli oblast.
- Referenční bod pro mostní objekt je třeba definovat mimo most samotný nebo na konstrukční části mostu, u které máme jistotu, že na ní k deformacím nedochází (pilíř).

### 3.1.3 PŘESNOST A VALIDACE

#### Přesnost odhadu deformace

Podle (Ketelaar, 2009) u odhadů deformací rozlišujeme jejich **přesnost**, za kterou považuje rozptyl určité veličiny kolem střední hodnoty, a **spolehlivost**, kterou definuje jako „citlivost pro nedostatky modelu a schopnost je odhalit“. Zatímco přesnost lze z vyrovnání přímočaře kvantifikovat (s použitím apriorního modelu deformací, je vztažena k směrodatné odchylce odhadu rychlosti), spolehlivost nelze nikdy získat ze samotného zpracování. Spolehlivost metody, odhadnuté rychlosti deformací či časové řady deformací závisí na více faktorech a je obtížné ji odhadnout.

Na celkovou přesnost odhadovaných deformací mají vliv tyto faktory:

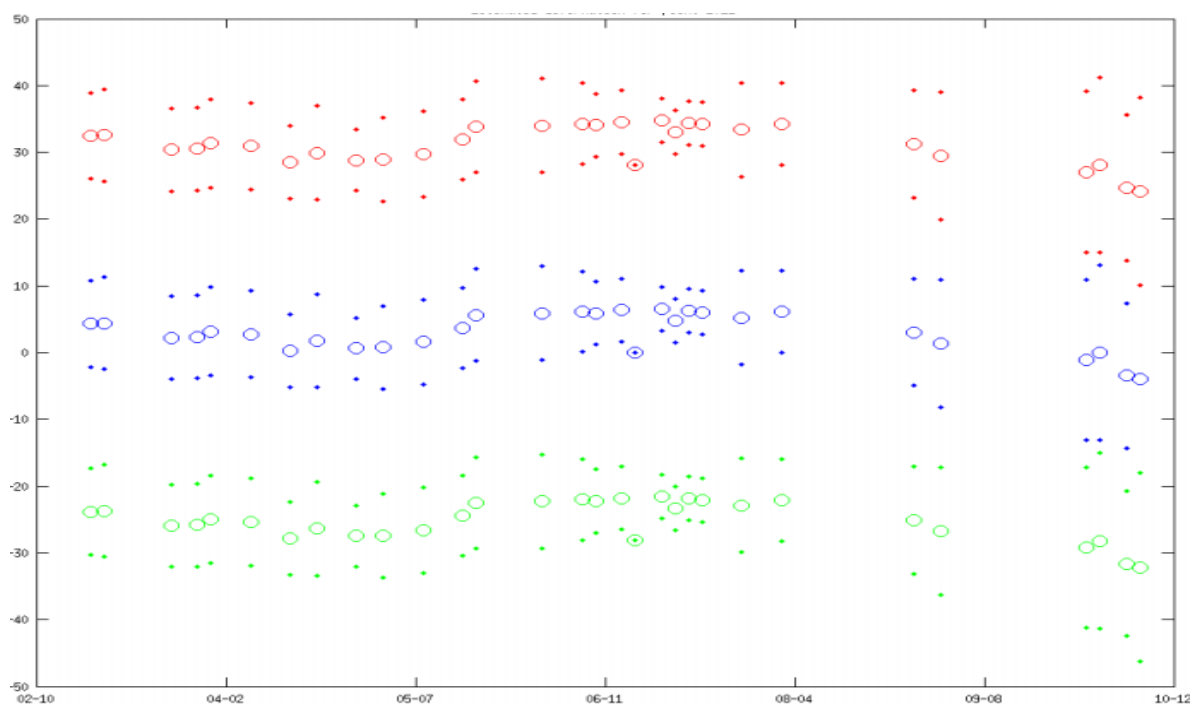
- Počet snímků a rovnoměrnost pokrytí období snímků
- Hustota a distribuce PS
- Klimatické podmínky v době pořízení snímků
- Vzdálenost zájmové oblasti od referenčního bodu/oblasti
- Šum

Přesnost bývá v PS InSAR odhadována pomocí metody VCE (*variance component estimation*) (Ketelaar, 2009), (Mahapatra et al., 2014). Výsledkem je směrodatná odchylka jednoho měření či

směrodatná odchylka referencovaného měření (v prostoru) – tzv. *dvojitá diference*. Tuto metodu považujeme vzhledem k použité metodice SBAS za nevypovídající, protože všem časovým okamžikům (a všem bodům ve výřezu) přisuzuje stejnou přesnost - sm. odchylku. Přesnost nicméně závisí koherenci bodu, resp. jeho charakteru - jde-li o koutový či distribuovaný odražeč. V případě použití metody SBAS je navíc přesnost měření různá pro jednotlivá data snímání.

Pro odhad přesnosti časových řad tedy navrhuje použít praktickou metodu:

- Nalezení zastavěné oblasti (v případě demonstračního testování v části Frýdku-Místku), kde je vysoká hustota PS kandidátů, které splňují předpoklad stability.
- Vymezení referenční oblasti dle dostatečného počtu PS kandidátů z dané v oblasti (100ky – tedy oblast plošně v km)
- Rozdělení vybraných PS kandidátů do skupin podle hodnoty koherence a kalkulace sm. odchylky deformací v jednotlivých časových horizontech pro každou z nich. Jako správnou hodnotu vybrat střední hodnotu deformace ze skupiny bodů s nejvyšší koherencí.
- Aplikace referenční směrodatné odchylky pro odhadnuté deformace bodů v celém AOI podle hodnoty jejich koherence a časových horizontů vztažených vůči odpovídající referenční skupině.



**Obrázek 17** Graf průběhu posunů. Prázdné body jsou detekované posuny. Plné body indikují rozsah směrodatné odchylky - je zřejmý trend korelace odchylky v čase v druhé půli časového období. Zobrazeny posuny: detekovaný (modře),  $+\lambda/2$  (červeně),  $-\lambda/2$  (zeleně)

Pro dosažení milimetrové přesnosti (směrodatné odchylky) odhadů udává (Ferretti et al., 1999) jako minimum použití 15 snímků při použití přesného DSM. (Salvi et al., 2012) v souvislosti se Sentinelem-1 zmiňuje minimum 20 snímků. Konkrétní minimální počet snímků z hlediska zpracovatelnosti záleží na konkrétní softwarové implementaci, rozložení snímků v čase a kvalitě interferogramů. Pomocí SBAS lze zpracovávat i sady s menším počtem snímků, je však třeba

počítat s dopadem na přesnost výsledku. (Smith, 2013) na základě operační praxe uvádí obecně platný počet 20-30 snímků pro dosažení přesnosti 1 mm se bývá uváděna potřeba 20 – 30 snímků. S přihlédnutím k podmínkám ve střední Evropě, kdy lze očekávat mezery v pokrytí vlivem sněhové pokrývky, zde pro dosažení této přesnosti bude třeba alespoň roční řada snímků při maximální možné pořizovací frekvenci 3 snímky/měsíc.

### Geometrická přesnost

Přesnost geometrická je v případě InSAR dat dána dvěma složkami:

- **Relativní přesnost koregistrace.** Je nutná subpixelová přesnost koregistrace jednotlivých scén na master scénu a mezi sebou. Toho je dosaženo standardním postupem v softwarech pro zpracování SAR dat.
- **Absolutní přesnost** umístění v souřadném systému. Závisí na velikosti pixelu, přesnosti orbitálních parametrů jednotlivých družic, modelu pro ortorektifikaci a přesnosti použitého DSM. Pečlivým výběrem vhodných kontrolních bodů lze dosáhnout až přesnosti 1 px.

### Validace

Validaci výsledků monitoringu pomocí InSAR lze provést několika způsoby, buď s využitím konvenčních metod (absolutně) nebo s využitím vlastních InSAR dat (relativně).

Pokud je monitorované území předmětem dlouhodobého sledování **konvenčními metodami** (KM), je vhodné využít jeho výsledky. Je-li možné ovlivnit frekvenci monitorování konvenčním způsobem, je vhodné frekvenci synchronizovat s frekvencí pořizování dat InSAR. To ale může být nerealistické z hlediska nákladů.

- **Absolutní porovnání**

Porovnání provedeme v prostoru, pro rychlost nebo posun k srovnatelnému časovému úseku. Pokud bod(-y) z referenčního měření KM nelze vztáhnout ke konkrétnímu bodu PS, provedeme porovnání např. následujícím způsobem:

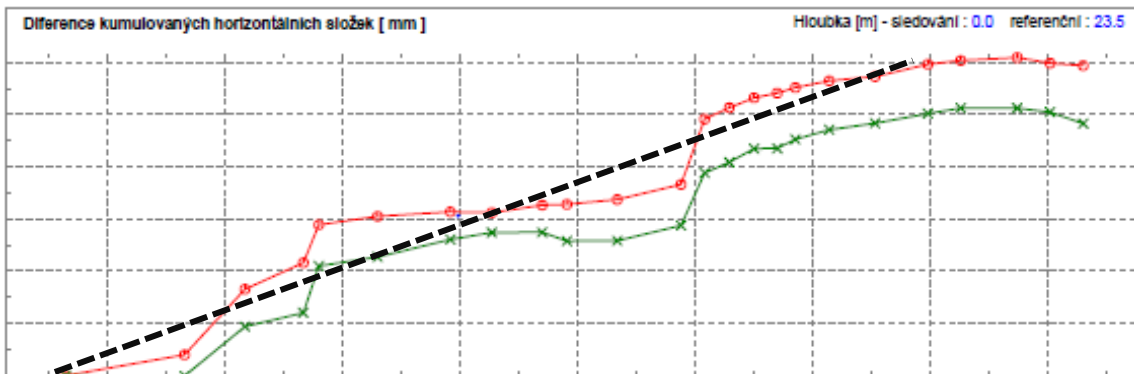
- Na v prostoru interpolovaných hodnotách rychlostí (interpolované KM vs. interpolované PS, KM vs. Interpolované PS nebo interpolované KM vs. PS).
- Srovnáním hodnoty rychlosti bodu z KM s průměrnou rychlostí z odražečů detekovaných InSAR v jeho okolí (je-li dostatečná hustota PS bodů).

Srovnání trendů v čase je vhodné provést vykreslením průběhů posunů v grafu průběhu posunů. Metody KM můžeme rozdělit na:

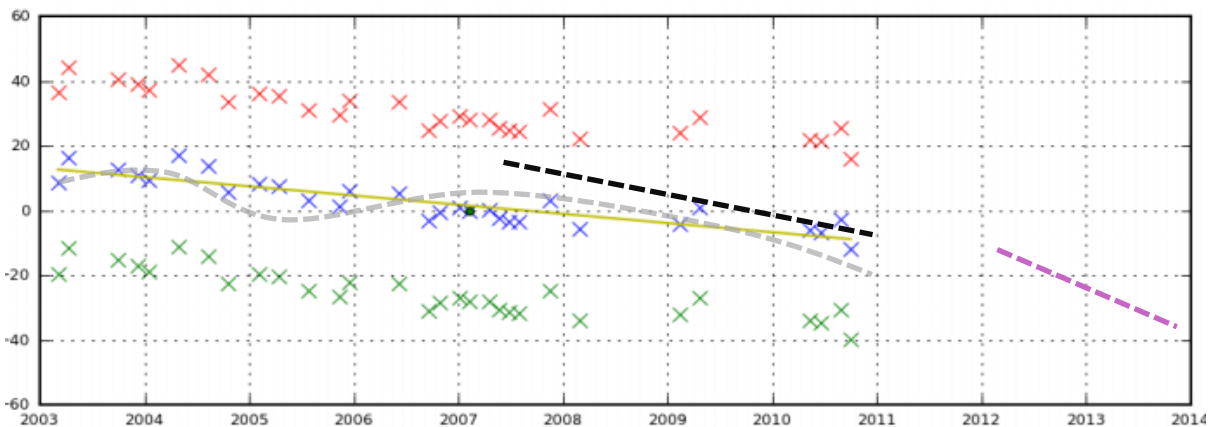
- **Měření GPS** – Pomocí statických diferenčních metod měření GPS lze dosáhnout vysoké přesnosti, nicméně přesnost 5mm je obtížně dosažitelná. InSAR je třeba s hodnotami naměřenými z GPS porovnávat ve vertikální komponentě.
- **Nivelaci** – méně operativní, umožňuje porovnávat pouze vertikální komponentu pohybu, což omezuje využití pro svahové pohyby s výraznou horizontální komponentou.
- **Inklinometrie** – častý konvenční způsob měření posunů v souvislosti se svahovými nestabilitami. Měří velikosti a rychlosti posunů podle instalace, obvykle v horizontálním směru (2D). Je nutné zjistit citlivost InSAR na daný směr a

detekované posuny nebo rychlost převést pomocí vztahů (5-7) na komponentu v měřeném směru.

- **Měření hladiny podzemní vody** – (cyklické) bobtnání horninového podkladu vlivem sezónních výkyvů se projevuje v měření InSAR, pokud je pořizováno s dostatečnou frekvencí k zachycení těchto fluktuací. Pokud je v AOI měřena hladina podzemní vody, lze její kolísání porovnat v grafu průběhu posunů s vývojem deformací v čase a korelované hodnoty od výsledku odečíst, je-li tato vlastnost považována za chybový vliv.



Obrázek 18 Ukázka odečtu rychlosti posunu z grafu kumulovaných horizontálních posunů z inklinometrického měření. Lze použít k odhadu charakteru deformace v čase a aproximace průměrné referenční rychlosti pro kumulované posuny - zde vyjádřené pro dva body nebo směry červenou a zelenou křivkou - lineárním modelem (zde černou úsečkou pro červenou křivku). Zdroj: ARCADIS Geotechnika s.r.o.



Obrázek 19 Ukázka porovnání InSAR s referenčními měřeními (rychlosti převedenými do LOS). Porovnávat průběh posunů s referenčním průběhem (šedě), průměrnou rychlost z InSAR (žlutě) s průměrnou rychlostí z referenčního měření v průběhu InSAR monitoringu (černá) nebo před/po monitoringu (fialová) v grafu průběhu posunů. Posuny platné k danému datu (oproti předchozímu) zobrazeny pomocí bodů: detekovaný (modře),  $+\lambda/2$  (červeně),  $-\lambda/2$  (zeleně)

Při dostatečném počtu dvojic bodů referenční KM – PS lze jejich hodnoty vykreslit v korelačním diagramu a spočítat korelaci.

### Relativní porovnání

Výsledky InSAR lze validovat relativně srovnáním s dalšími výsledky z InSAR:

Srovnání se sadou z jiného senzoru. Je nutné srovnat se zpracováním z družice se stejným nebo vyšším rozlišením a uvažovat další podmínky: fyzické rozdíly odrazivosti a ambiguitu pro rozdílná pásma, rozdíly v akvizici geometrii. Oblasti s koherentními odražeči a jejich dostatečnou hustotou by měly vykazovat podobné deformace.

- Srovnání se shodnou sadou zpracovanou jinou metodou InSAR při zvážení rozdílů v metodice a limitů a jejich dopadů na výsledky.
- Srovnání se sadou ze stejné družice z jiné dráhy:
  - Sousední – bude se mírně lišit inc. úhel, ale nikoliv azimut LOS
  - Protější dráhy (A vs. D) – bude se lišit inc. úhel i azimut LOS (pokud je to možné z hlediska orientace sledovaného území apod.)

Doporučený způsob především u dat poskytovaných zdarma. Většina lokalit v ČR bude pokryta daty Sentinel-1 ze 3 – 4 různých drah. Vzhledem ke shodnosti vlnové délky a podobné geometrie existuje riziko korelace chyb z obou sad.

- **Ověření věrohodnosti**

Rozsah a hranice velké oblasti detekovaných pohybů je vhodné ve fázi interpretace validovat srovnáním s doplňkovými, především geologickými mapami. Níže jsou uvedeny příklady WMS služeb, vzhledem k hrubému měřítku podkladů ČGS (1:250.000) se hodí maximálně pro regionální analýzy. Pro detailnější analýzy je nutné použít mapy velkého měřítko.

- Zlomy (ČGS, [15] - Geologická mapa České republiky)
- Kvartérní horniny a depozity (ČGS, [15] - Mapa kvartérního pokryvu)
- Poddolovaná území (ČGS, [15] - Vlivy důlní činnosti)
- Sesuvná území (ČGS, [16] - Mapa svahových nestabilit)
- Silniční infrastruktura (ŘSD, [17] - Ředitelství silnic a dálnic ČR)

Ukázka porovnání rozložení interpolovaných hodnot rychlostí s mapou poddolovaných území je uvedena v obrázku 18.

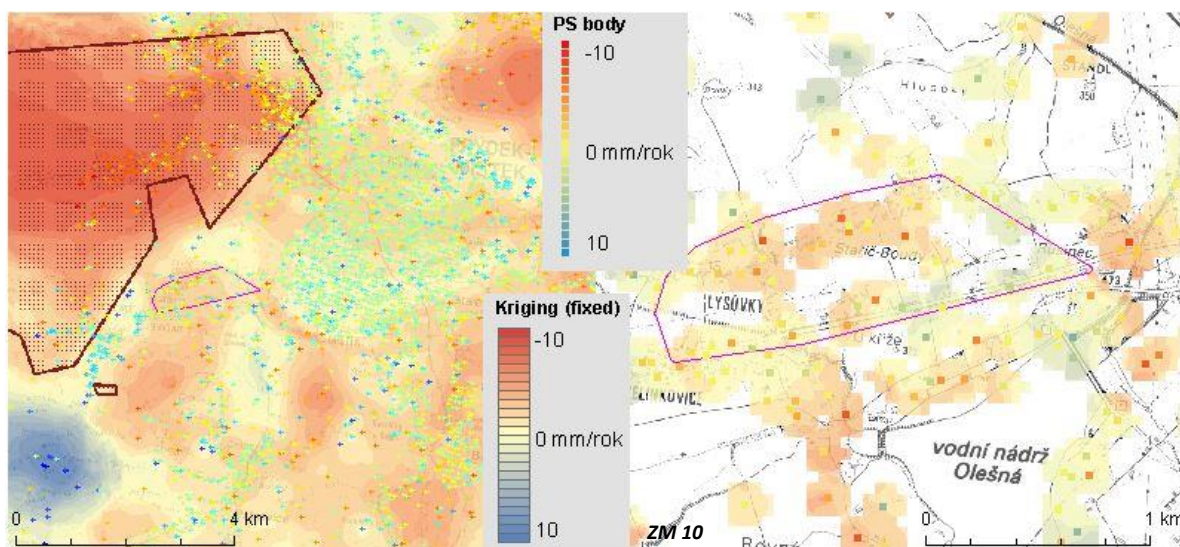
### 3.1.4 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

#### Rozložení deformací v prostoru

Standardním výsledkem zpracování InSAR bývá mapa zobrazující vybraný parametr: nejčastěji rychlost deformací v LOS. Vizualizovat lze i další parametry vztahované ke kvalitě (koherence, směrodatná odchylka) nebo průběhu deformace v čase (pravidelnost, akcelerace). V mapě jsou zobrazeny buď jednotlivé PS body (kategorizované dle vybraného parametru) nebo spojitá plocha interpolovaná z PS bodů.

Interpolované hodnoty je třeba interpretovat s opatrností – kvalita interpolace je nízká v oblastech s velmi variabilními hodnotami parametru nebo v oblasti s nízkou hustotou bodů PS. Zvláště v lokálním měřítku je proto doporučeno interpolované hodnoty zobrazovat pouze do vybrané vzdálenosti od PS bodů v lokalitách s jejich dostatečnou hustotou (TerraFirma, 2010).



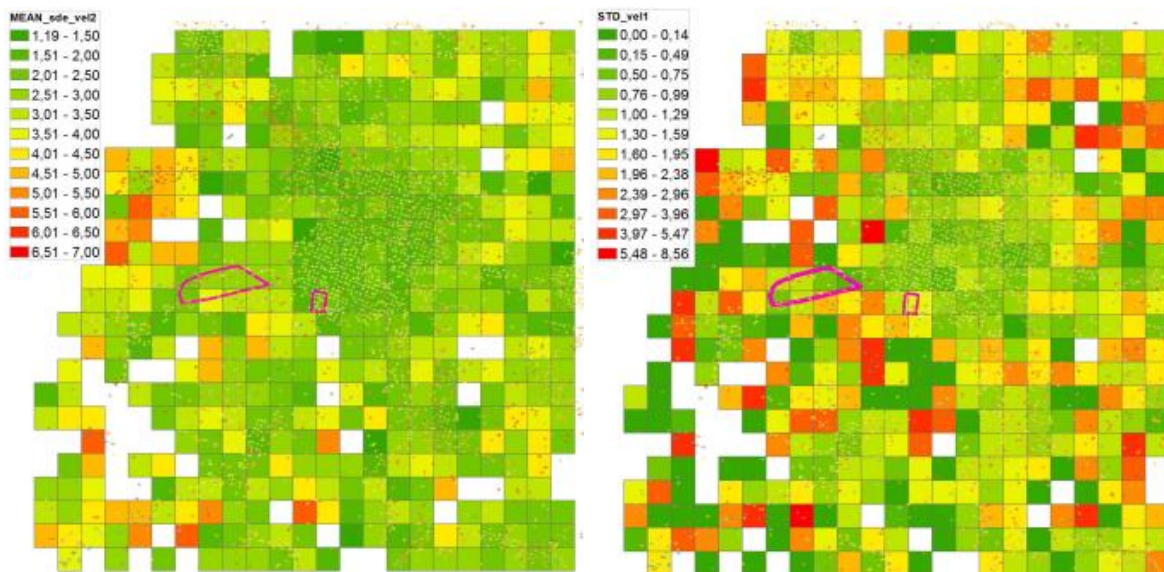


**Obrázek 20** Interpolace pro rozsáhlé území (vlevo) a omezení interpolace na 100m okolí v detailu (vpravo). Validace vzhledem k rozsahu poddolovaného území (oblast v hnědém rámcí) dolu Staříč. Homogennost deformací a relativně vysoká hustota bodů PS zde indikují vysokou spolehlivost, zatímco menší lokální anomálie s nízkou hustotou bodů jsou výrazně méně spolehlivé co do rozsahu a tvaru interpolované deformace. Výsledky ze zpracování ASAR

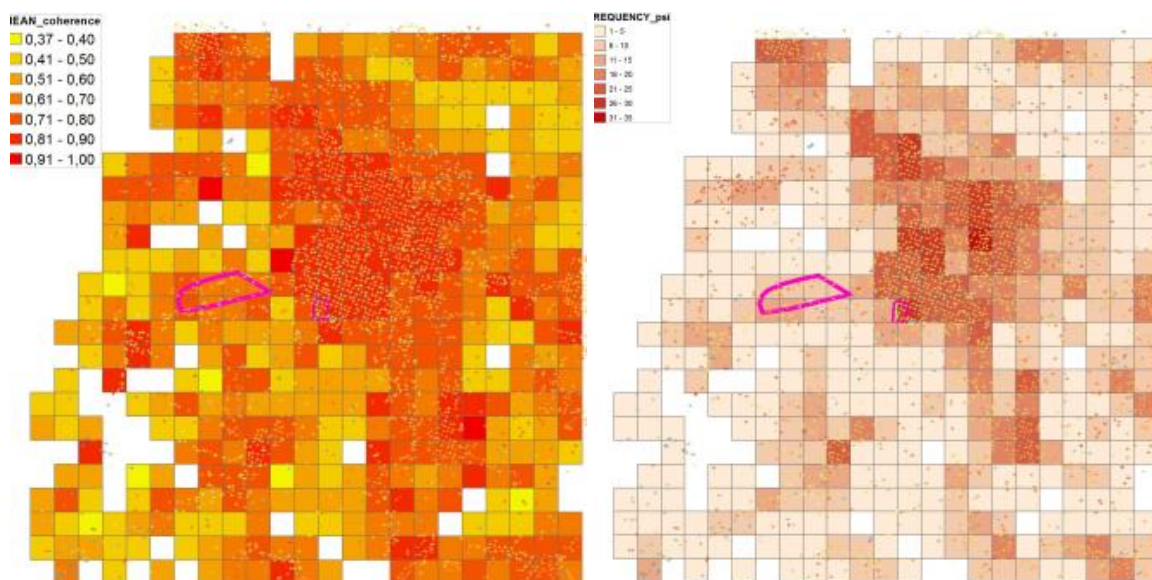
V těchto oblastech může docházet ke snížení věrohodnosti informace, proto je vhodné mapu rizika (rozložení intenzit deformací vyjádřených jejich rychlostí) doplnit mapou vyjadřující zonální distribuci věrohodnosti. Tu vyjádříme například agregací kvantitativních a kvalitativních parametrů vztahených k PS bodům v rámci dlaždic o vhodně zvolené velikosti hrany. Dlaždice vizualizované dle zalkulovaných měř polohy/variability vybraných parametrů složí k intuitivnímu porovnání relativně v rámci daného území a datové sady nebo mezi různými datovými sadami:

- Střední hodnota, směrodatná odchylka rychlostí nebo alternativních rychlostí (kalkulovaných ze subsetu časové řady, viz dále).
- Medián a interkvantilové rozpětí – nejsou zatíženy případnými hrubými chybami/extrémy (Catalao et al., 2009)
- Střední hodnota koherence, směrodatná odchylka koherence
- Frekvence PS bodů

Lze použít koncept pravidelných dlaždic, jejichž velikost je v relaci s měřítkem a požadovaným detailem analýzy InSAR (Catalao et al., 2009) nebo tzv. Quadtree kompozici, kde velikost jednotlivých dlaždic závisí na obsahu zvoleného parametru – počtu PS bodů, variabilitě rychlostí atd. (Hanssen, 2001, Ketelaar, 2009).



Obrázek 21 Vizualizace zonálních statistik PS bodů z ASAR v 500m gridu pro AOI Lysůvky: vlevo střední hodnota směrodatné odchylky rychlosti, vpravo směrodatná odchylka rychlosti



Obrázek 22 Vizualizace zonálních statistik PS bodů z ASAR v 500m gridu pro AOI Lysůvky: vlevo střední hodnota koherence, vpravo hustota bodů PS

Vysoká variabilita intenzit deformací (rychlostí) obvykle indikuje spíše sníženou věrohodnost – z hlediska prostorové autokorelace by deformace měly korelovat se vzájemnou blízkostí bodů. Pokud k ní nicméně dochází na omezené ploše, může také indikovat potenciální nestability (např. selektivní poklesy základů budov).

### Reálný směr a rychlost deformace

Platí, že odhadnuté hodnoty deformací (a rychlostí) v LOS jsou nižší než skutečné (viz vzorec (9)), pokud není směr deformací identický s LOS (v takovém případě jsou stejné). Výpočet přesného

směru a velikosti pohybu ve 3D z LOS nelze provést bez doplňujících informací o jeho charakteru. V závislosti na jeho znalosti do mapy rizika zobrazíme:

- Deformace v LOS: vhodné především při svahových pohybech a různých orientacích svahů v různých místech nebo je-li sledováno rozsáhlé území, kde lze očekávat variabilitu ve směrech možných deformací.
- Deformace přepočtená do známého směru pro lokálně vymezený jev:
  - Poddolované území
  - Svah o konstantním sklonu a orientaci či známého a konstantního sklonu svahu v případě sesuvu) přepočítat deformace v LOS na daný směr (s upozorněním, že v případě jiného směru mohou být deformace výrazně odlišné)
  - Most

V plochem území je interpretace relativně snadná:

- Subsidence se projevuje zápornými hodnotami v LOS
- Vyzdvižení se projevuje kladnými hodnotami v LOS.
- Pokud k subsidenci dochází v prohlubni (např. důl), je situace komplexnější o pohyby, které se projevují i v horizontální komponentě při okrajích (na „svazích“) poklesové „mísy“.

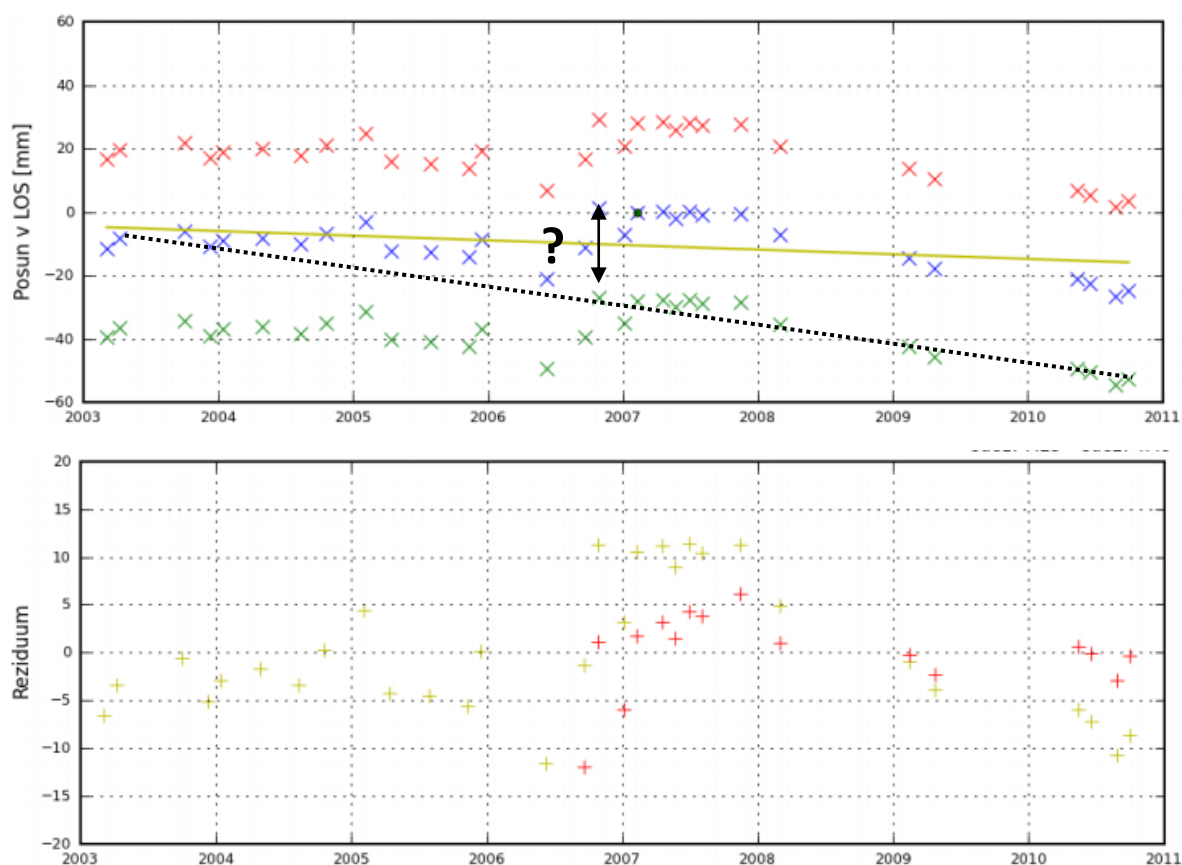
U pohybu ve 3D velikost v očekávaném směru dopočítáme dle vzorců z kapitoly 3.1.1.2. V případě svahů je ale interpretace komplexní vzhledem k variabilitě možných pohybů:

- Na vrcholu svahu pravděpodobně převládá pohyb ve vertikálním směru
- Na svahu pravděpodobně převládá pohyb ve směru spádnice (nebo smyku geologických vrstev)
- Na úpatí pak převládá pohyb v horizontálním směru, který se při nízkém sklonu a orientaci proti azimutu LOS bude jevit jako vyzdvižení (kladné hodnoty v LOS)
- Výpočet směru a velikosti deformace zpracování sad z více družic či jejich drah a výsledky spojit (princip dle Ketelaar, 2009).
  - Ani konstelace z více drah není citlivá na pohyby v nepříznivém směru (především v severojižním směru, kde nepomůže ani kombinace A a D dráhy).
  - Každou další sadou dat získáme jednu dimenzi navíc (tj. ze dvou sad dat můžeme v ideálním případě získat dvě ze tří prostorových složek).
  - Nevýhodou je směrová omezenost A a D drah družic - všechny družice létají přibližně po stejných drahách - a omezený rozsah úhlů dopadu: u dvou sousedních drah (např. obě klesající) jedné družice se úhel pohledu liší typicky o 3 stupně, tj. přesnost některých složek výsledného vektoru bude velmi sporadická.
  - Interferometrické softwary možnost skládání deformací z více družicových drah či více družic neřeší, stejně jako neřeší převod deformací do jiného směru. Tuto úlohu je třeba řešit po zpracování InSAR samostatně algebraicky.

## Průběh deformace a její model

Průběh časové řady deformací, který je klíčový pro odhad rychlosti deformace, je pro každý PS bod vyrovnán na základě vybraného modelu. Funkcionální i stochastický model vyrovnání je podrobně popsán v (Hanssen, 2001, Ketelaar, 2009). Jedná se o nedostatečně určenou úlohu, tzn., že v rámci zpracování (rozbalení fáze) lze ke každému jednotlivému měření přičíst či odečíst jakýkoli celočíselný násobek poloviny vlnové délky (tzv. ambiguity) a tento nelze odhadnout jinak než na základě předem určeného modelu. Chybně odhadnutý násobek nazýváme *chybou z rozbalení fáze*.

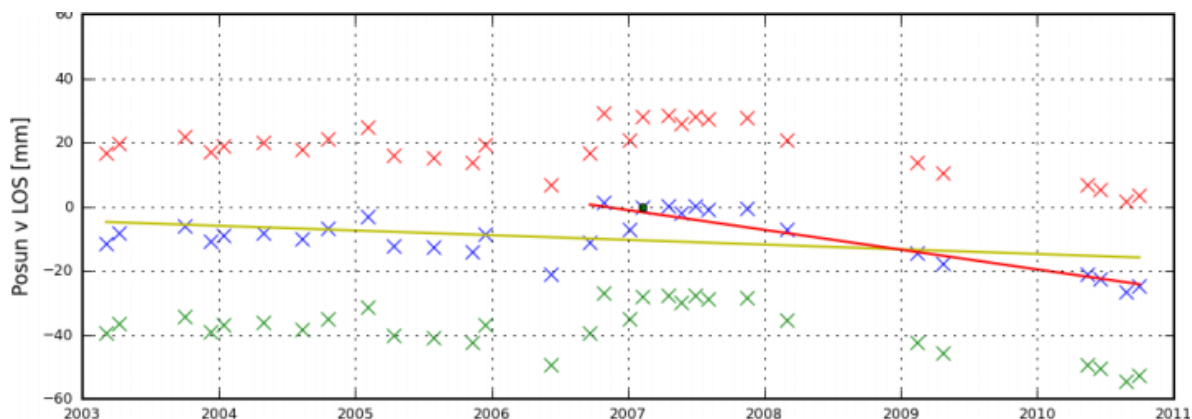
Abychom eliminovali možnost, že časová řada obsahuje chyby z rozbalení fáze, zobrazujeme v časovém průběhu tři časové řady, z nichž prostřední je referencována k nule (pro referenční čas) a obě ostatní jsou ve stejný referenční čas referencovány k polovině vlnové délky radaru (kladné i záporné). V případě viditelných chyb z rozbalení fáze je tedy možné při interpretaci do prostřední řady vetknout i některé body z řady horní či dolní. Odhadnutá rychlost a její sm. odchylka je ale automaticky vždy vypočítána pouze z řady prostřední.



Obrázek 23 *Nejednoznačnost odhadu rychlosti vlivem ambiguity (nahore), dole srovnání reziduí mezi odhady rychlosti a posuny*

Model deformací může být teoreticky jakýkoli (lineární, periodický/sezonní, exponenciální, zlomový), ale InSAR softwaru obvykle implementují pouze lineární model. Nelineární část deformací bývá v těchto případech považována za chybu (zvyšující směrodatnou odchylku). Při odhadu rychlosti je vyhodnoceno více variant ambiguity a vybrána je ta s nejmenšími rezidui, resp.

jsou-li rezidua příliš vysoká, dochází v závěru zpracování k vylučování bodů z výsledné množiny PS. V obou případech tímto může dojít k vyloučení reálného průběhu.

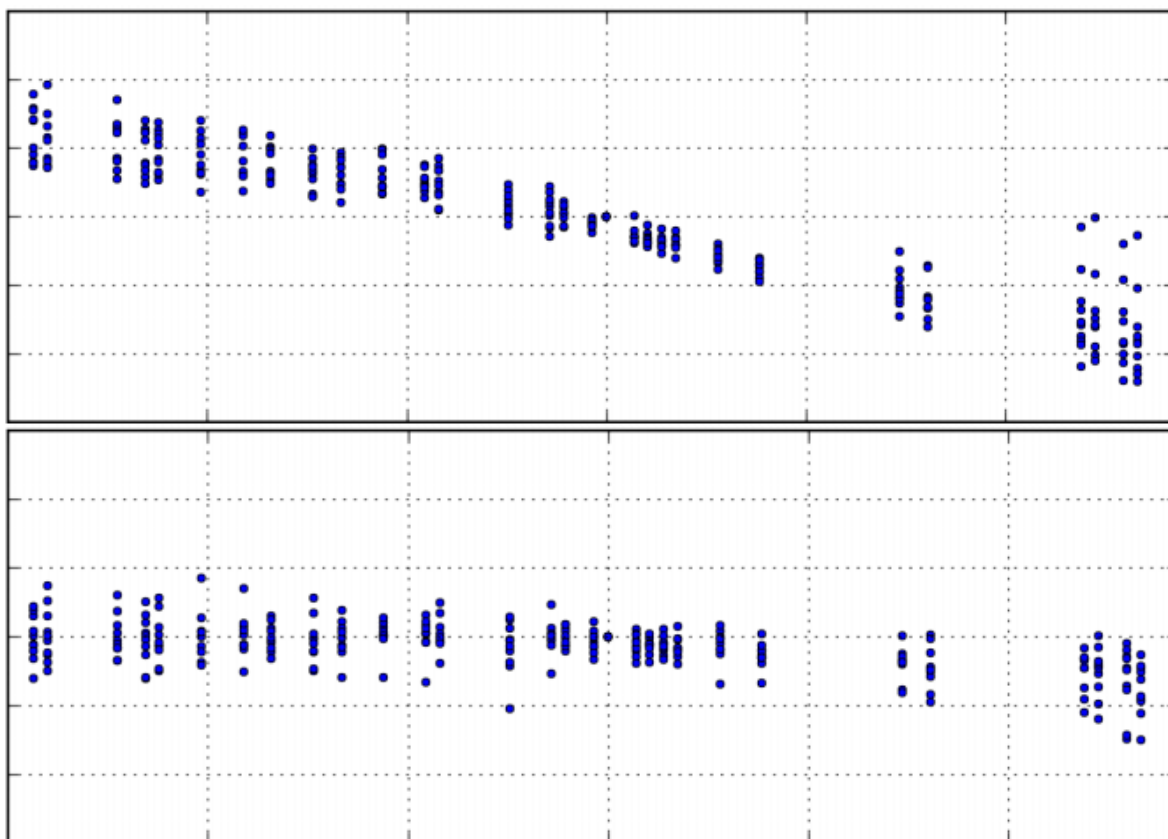


Obrázek 24 Rozdílná rychlost odhadnutá ze subsetu (červeně). Druhá část řady a tedy i z ní odvozená rychlost je nicméně méně věrohodná v důsledku nepravidelných akvizic s dlouhými mezerami.

Proto, pokud víme nebo máme podezření na nelineární deformace, je nutné neposuzovat výsledky podle snadno kvantifikovatelných kritérií (rychlost a její směrodatná odchylka), ale navíc interpretovat časovou řadu deformací vykreslených v grafu průběhu posunů. Lze tak odhalit například iniciaci deformace v důsledku podnětu (např. v důsledku zahájení stavby) a zpřesnit odhad rychlosti aplikací modelu pouze v části časové řady. To se pojí s rizikem menší věrohodnosti výsledku dané menším počtem snímků, je na zpracovateli, aby tuto možnost konzultoval se zadavatelem, zda je v AOI reálná.

Přiblížení realitě lze obvykle docílit použitím většího počtu pravidelně pořízených snímků. Při dostatečně dlouhé časové řadě může i její subset splňovat nároky na dosažení vysoké přesnosti. To umožňují nové komerční družice TSX, CSM a také Sentinel-1.

I průběhy můžeme vyhodnocovat z hlediska zonální variability. Jednotlivé zóny lze porovnat z hlediska variability trendu pomocí grafů s agregovanými průběhy posunů, kde jsou vykresleny průběhy pro všechny PS v rámci zóny.



Obrázek 25 V horním grafu agregovaných průběhů posunů je zřejmá přítomnost bodů s chybami z rozbalení fáze, nicméně trend poklesu je pro danou oblast jednoznačný. Slabý trend poklesu je viditelný i v grafu pro druhou zónu, nevznívá ale tak jednoznačně.

### Shrnutí

Je zřejmé, že interpretace výsledků je komplexní proces, do kterého by měl být zapojen nejen zpracovatel, ale i zadavatel resp. odborník se znalostí lokálních specifik daného území, geologie a především možných deformačních charakterů.

Mapa rizika by měla také vzniknout po konzultaci, kdy je třeba stanovit, jak velká deformace je v daném kontextu ještě únosná a jaká již představuje riziko, případně jak rychlost deformace do vyjádření rizika rozškálovat.

Kromě rizika/rychlosti deformací by mapa měla být doprovázena (přímo v mapě nebo v doplňkového reportu) podklady umožňujícími plnohodnotnou interpretaci:

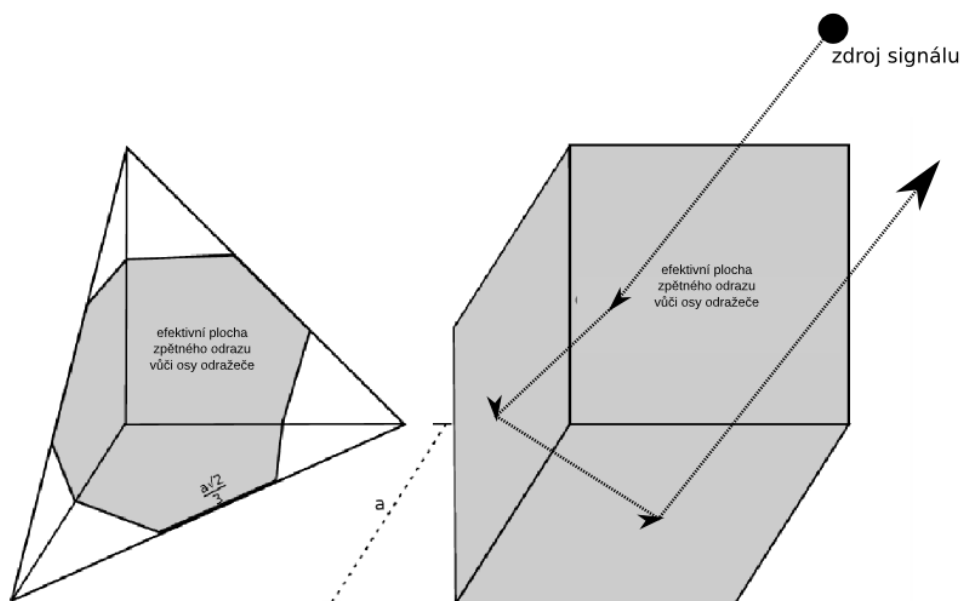
- Kvantifikaci kvality/přesnosti (v prostoru)
- Typický nebo výběr typických deformačních režimů vykreslených v grafu průběhu posunů

## 3.2 UMĚLÉ KOUTOVÉ ODRAŽEČE

### 3.2.1 MATERIÁL, TVAR A ÚPRAVY ODRAZIVÝCH PLOCH ODRAŽEČE

Vysoká odrazivost pasivního koutového odražeče je založena na využití vhodného materiálu o vysoké odrazivosti radiového signálu a vhodné geometrii odražeče, která při správném natočení odražeče umožní majoritní odraz směrem zpět k radarové anténě. Takové zrcadlení signálu je docíleno dvojitým či trojitým odrazem v rámci koutového odražeče. Jako tři základní tvary pro koutový odražeč budou dále posuzovány: **dihedrální odražeč**, **trihedrál s trojúhelníkovými stěnami** a **trihedrál se čtvercovými stěnami**. Speciální typy tvarů odražečů jako je trihedrál s pentagonálními či hexagonálními stěnami (Sarabandi a Chiu, 1996) a jiné se od principu a vlastností uvedených základních tvarů zásadně neliší.

Nejčastěji používaným odražečem je odražeč trihedrálního tvaru, kde dochází k troj-odrazu signálu zpět k anténě. Ačkoli trihedrál se čtvercovými stěnami má mnohem větší efektivní zpětně odrazivou plochu (ke zpětnému odrazu dochází v každém bodě odražeče), bývá často v praxi konstruován trihedrál se stěnami trojúhelníkovými, který má mírně vyšší toleranci vůči přesnosti orientace (Sarabandi a Chiu, 1996) a svou kompaktností je odolnější vůči porывům větru. Princip trihedrálu je znázorněn schematicky na obr. 24. Pro konstrukci demonstračního odražeče byl zvolen čtvercový trihedrál.



Obrázek 26 Princip a rozdíl v rozložení odrazivé plochy trihedrálů s trojúhelníkovými a čtvercovými stěnami.

Nejvhodnějším materiálem pro konstrukci odražeče je kvůli vysoké odrazivosti radiového signálu kov nebo dielektrikum (D'Agostino et al., 1999). Kovové objekty mají vysokou vodivost, neabsorbují elektromagnetickou energii, nýbrž většinu z ní odrazí. V případě použití nekovových objektů je vhodné vyhledat tabulku materiálové propustnosti a permitivity, vhodnost různých typů materiálu je pak dále popsána v kapitole 5 knihy (Richards, 2009).

Každá stěna odražeče by měla zůstat především kolmá, aby došlo ke kýženému zpětnému odrazu. V případě čtvercového trihedrálu se dle (Bonkowski et al., 1953) odraz sníží na polovinu při celkovém odchylení o  $0.4 \lambda$  od kolmosti, což odpovídá odchylce o velikosti  $0.24 \lambda$  na každou stěnu.

Z praktických důvodů je vhodné koutový odražeč perforovat – jedná se o snížení odporu vůči větru, který by mohl neperforovaný odražeč rozkmitávat. Rovněž je perforací vyřešen problém s akumulací dešťové vody. Perforací odlehčený odražeč navíc svou vlastní vahou nebude způsobovat klamná měření vlivem vlastního sedání. Pro perforaci je nutné dodržet určitá pravidla: otvor by měl být teoreticky menšího průměru, než je  $1/8$  vlnové délky použitého radiového signálu, a poměr mezi plným a perforovaným materiálem stěny by měl být alespoň 60 %, aby byl zabezpečen stále silný odraz (Qin et al., 2013). Prakticky byl prokázán kvalitní odraz i při perforaci o průměru  $1/3$  vlnové délky (Parizzi et al., 2005).

### 3.2.2 ODVOZENÍ MINIMÁLNÍ ODRAZIVOSTI ODRAŽEČE PRO JEDNOTLIVÉ DRUŽICOVÉ SAR INSTRUMENTY (pásma X, C a L)

Jakmile na objekt dopadne elektromagnetická vlna, dopadnutá energie se odrazí všemi směry. Pro popis odrazivosti objektu v jednom směru, tj. ve směru opačném (tzv. monostatický radarový odraz), používá se parametr *radar cross section* (RCS), který vyjadřuje podíl mezi energií dopadnutou na objekt a energií odraženou zpět k radaru (resp. přijatou radarem). RCS je ovlivněna vlastnostmi objektu (geometrie či elektrické vlastnosti) a vlastnostmi signálu (vlnová délka, polarizace). RCS pro radiové vlny dosahuje hodnot od minimálních, blízkých 0 (např. odrazivost hmyzu) až po vysoká čísla v  $10\,000+m^2$  (kovové objekty). Výpočet RCS ( $\sigma$ ) se provádí dle rovnice 3.1:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2 \quad (16)$$

kde  $A$  je efektivní plocha zpětného odrazu objektu a  $\lambda$  vlnová délka použitého radarového signálu.

Pro praktické účely bývá hodnota RCS ( $\sigma$ ) přepočítávána do  $\text{dB}[m^2]$ , dle rovnice 3.2:

$$\sigma_{\text{dB}[m^2]} = 10 \cdot \log_{10} \sigma_{m^2} \quad (17)$$

Na příkladu čtvercového trihedrálu je možné demonstrovat, že při zcela správné orientaci je signál na ploše  $A_1=a^2$  odražen k druhé straně opět o ploše  $A_2=a^2$ , odkud se ze všech míst plochy signál odrazí následně ke třetí straně  $A_3=a^2$  - odtud je již odražen zpět k radarové anténě, tudíž výsledná plocha  $A=A_1+A_2+A_3$ . Zpravidla se dá říci, že v případě čtvercového trihedrálního koutového odražeče při vlnové délce odpovídající Sentinel-1 (0.055 cm) bude odrazivost RCS dvojnásobně menší (-5dB) při vychýlení orientace o  $\pm 12^\circ$  od osy symetrie odražeče (Sarabandi a Chiu, 1996) – to je platné pro horizontální i vertikální směr. Koutový odražeč bude plnit svou funkci v případě, že bude umístěn v lokalitě, která bez koutového odražeče reflektuje signál s podstatně nižší intenzitou - okolí by mělo mít odrazivost minimálně třikrát nižší (-10 dB či -12 dB) vůči RCS (Ugsang et al., 2001). Vhodným srovnávacím faktorem je parametr *signal-to-clutter ratio* (SCR), kterým lze vypočítat i teoretickou chybu z příspěvku okolí odražeče (např. v rámci buňky rozlišení) – disperzi měřeného pohybu  $\delta$  (Ketelaar et al., 2004), dle rovnice (18). Například při  $\text{SCR}=20$  dB bude při



použití X-band SAR teoretická disperze měření pomocí radarové interferometrie submilimetrová:  $\delta = 0.17$  mm, při SCR=10 dB však může okolí odražeče způsobit disperzi již  $\delta = 0.55$  mm.

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot SCR}} \quad (18)$$

$$SCR = RCS_{\text{odražeč}} / RCS_{\text{pixel}} \quad (19)$$

Na základě těchto aparátů je možné odvodit minimální potřebnou odrazivost koutového odražeče pro jednotlivé SAR instrumenty – viz Tabulka 6. Je nutné si však uvědomit, že tyto údaje jsou platné při dokonalé orientaci odražeče a v praxi se budou lišit z důvodu dalších příspěvků k odrazu z okolí či rozptylu signálu v atmosféře apod.




Družice	Vlnová délka	RCS při 0.6 m	RCS při 0.8 m	RCS při 1.0 m	RCS při 1.2 m
TerraSAR-X	0,0311 m (X)	37,1 dB	42,1 dB	45,9 dB	49,1 dB
Sentinel-1	0,0555 m (C)	31,9 dB	36,9 dB	40,8 dB	44,0 dB
Alos-1	0,236 m (L)	19,4 dB	24,4 dB	28,3 dB	31,5 dB

Tabulka 6 Odrazivost trihedrálního koutového odražeče se čtvercovými stěnami (odvozeno pro mód StripMap, pro mód SpotLight jsou hodnoty RCS vyšší)

Podmínku výrazně nižšího signálu okolí může být problematické splnit, pokud dojde k rozorání půdy v okolí odražeče. Ornice pak (dočasně) vytváří velmi silný odraz znesnadňující nalezení UKO.

### 3.2.3 ODVOZENÍ POTŘEBNÉ PLOCHY, TVARU A ORIENTACE ODRAŽEČE PRO DRUŽICI SENTINEL-1

Teoretické maximální hodnoty odrazivosti vůči družici Sentinel-1 vyjádřené parametrem RCS pro tři základní druhy tvarů odražečů při různých délkách strany jsou uvedeny na obr. 4.1, podle (Curlander a McDonough, 1991).

		výpočet RCS	RCS [dB] pro $\lambda=0.055$ m (Sentinel-1)		
			a(b)=60 cm	a(b)=80 cm	a(b)=1 m
dihedrál		$8\pi a^2 b^2 / \lambda^2$	30.3 dB	35.3 dB	39.2 dB
trojúhelníkový trihedrál		$\frac{4}{3}\pi a^4 / \lambda^2$	22.5 dB	27.5 dB	31.4 dB
čtvercový trihedrál		$12\pi a^4 / \lambda^2$	32.1 dB	37.1 dB	41 dB

Obrázek 27 Výpočet RCS hlavních typů odražečů na příkladu parametrů Sentinel-1.

Oproti svým předchůdcům ERS a Envisat je technologické řešení radaru v Sentinel-1 již velmi pokročilé a dá se říci, že maximální odraz tato syntetická apertura získává z kolmého směru téměř bez odchylek (tzv. squint angle). Proto je výpočet orientace odražeče vůči severu poměrně jednoduchý – jako vstupní parametr je zapotřebí znát pouze orbitální inklinaci družice (ta je vzhledem k charakteru subpolární dráhy družice téměř neměnná) a vypočítat pozici družice v okamžiku, kdy je odražeč pozorován ze směru kolmého k orbitální dráze, například pomocí rovnice 20 – upraveno v (Lazecký, 2011) dle (Xia et al., 2008):

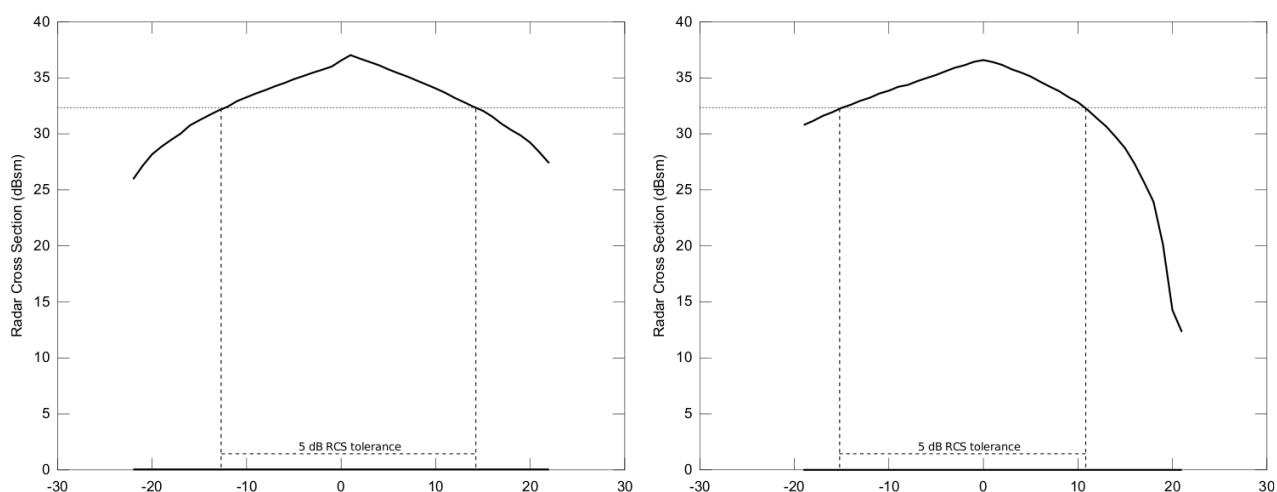
$$\theta = \arccos\left(\frac{\cos(\iota)}{\cos(\phi_{sat})}\right) \quad (20)$$

kde  $\iota$  je orbitální inklinace družice (v případě Sentinel-1:  $98.2^\circ$  [7]),  $\phi_{sat}$  je zeměpisná šířka polohy družice při snímání - možné vypočítat na základě úloh goniometrických funkcí, viz např. (Seeber, 2003).

Pro vyšší přesnost je možné získat další parametry orbitální dráhy družice pomocí popisu ve formátu „two-line element set“ databáze NORAD SATCAT [8] a následný výpočet provést i se zohledněním vlivu zemské rotace (ta v oblasti ČR způsobuje odchylku okolo  $4^\circ$ ).

Vertikální orientaci odražeče je nutno připravit na základě použité geometrie odražeče. Lokalita odražeče bude snímána z tzv. incidenčního úhlu – jeho hodnota se pohybuje v případě Sentinel-1 IW módu mezi  $29^\circ$  a  $46^\circ$  [9] a je možné ji získat na základě metadat například z již existujícího snímku z totožné dráhy.

Tolerance vůči chybám v orientaci je pro trihedralní koutový odražeč se čtvercovými stěnami poměrně vysoká. Obrázek 26 znázorňuje vliv odchylky na změnu v RCS (dB) pro Sentinel-1 a koutový odražeč o délce strany 80 cm. Výpočet byl proveden dle postupu uvedeném v Appendix B v (Sarabandi a Chiu, 1996).



**Obrázek 28** Vliv horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) odchylky od úhlu symetrie trihedralního koutového odražeče se čtvercovými stěnami o velikosti stěny 80 cm platné pro vlnovou délku 0.055 m.

### 3.2.4 NÁVRH ODRAŽEČE SLEDOVATELNÉHO VÍCE INSTRUMENTY

Pro multifrekvenční použití je vhodný pasivní koutový odražeč viditelný dvěma (či více) instrumenty – aktivní transpondéry jsou použitelné pouze pro jedinou nosnou frekvenci, vícefrekvenční transpondéry by byly technicky náročné a ekonomicky nevýhodné.

Výpočtem je možno ověřit využití koutového odražeče v kombinaci Sentinel-1 a TerraSAR-X, jejichž nosná frekvence radaru i dráha orbity se významně liší. Návrh je popsán na demonstračním příkladu pro AOI Lysůvky: jako nosník odražeče byl zvolen stávající inklinometrický vrt (kódové označení INV16) umístěný na souřadnicích zeměpisné délky 18,30147° a šířky 49,66748° (WGS-84). Je třeba vypočítat horizontální orientaci osy odražeče vůči severu pro TerraSAR-X pro orbitální dráhu A (asc)/D (desc) jako  $\vartheta_{TSX,asc} = 256,12^\circ$  a  $\vartheta_{TSX,desc} = 103,88^\circ$ . V případě Sentinel-1 jsou odpovídající hodnoty určeny jako  $\vartheta_{S-1,asc} = 254,89^\circ$  a  $\vartheta_{S-1,desc} = 105,11^\circ$ . Je zřejmé, že horizontální úhel se v obou orbitálních případech liší o  $\Delta\vartheta = 1,23^\circ$  což je v mezích přípustnosti použitého koutového odražeče.

Vertikální orientaci odražeče je třeba určit na základě lokálních incidenčních úhlů již existujících snímků pro lokalitu INV16. Demonstraci lze naplánovat pro očekávané snímání družice Sentinel-1 dne 19.11.2014 v 5:01 UTC, tzn. v 6:01 SEČ, z D dráhy a rovněž pro snímání družice TerraSAR-X dne 23.11.2014 v 5:09 UTC (tj. 6:09 SEČ), opět v klesajícím směru orbity. Při tomto módu bude lokalita INV16 snímána v incidenčním úhlu  $\theta$  u Sentinel-1  $\theta_{S-1,desc} = 35,69^\circ$  a u TerraSAR-X  $\theta_{S-1,desc} = 26,77^\circ$ . Rozdíl mezi těmito úhly je  $\Delta\theta = 8,92^\circ$ . Teoreticky se RCS odražeče snižuje při vertikálním odchylení orientace o  $\sim 12^\circ$  dvojnásobně. Vzhledem k tomu, že RCS je pro družici TerraSAR-X podstatně vyšší než pro Sentinel-1 a bude vyšší i při natočení ideálním pro Sentinel-1, doporučujeme při natočení používat hodnoty spočtené pro Sentinel-1.



### 3.2.5 ZAMĚŘENÍ A INSTALACE ODRAŽEČE

Instalace odražeče závisí především na typu odražeče a místních podmínkách pro instalaci. Zpravidla je nutno umístit odražeč pevně a stabilně – např. připravením betonového základu do nezámrazné hloubky (o hloubce v případě sesuvu rozhoduje geolog). Například je možné připravit betonový základ o 1x1x1 m zasahující do hloubky 0.9 m pod povrchem. V případě koutového odražeče instalovaného v rámci demonstračního testu lze využít existující hydrogeologický vrt, na který je možné odražeč upevnit třemi šrouby.

Návrh instalace a orientace demonstračního je založen na obecně uplatnitelném postupu měřických prací, rozdělených do tří dnů:

- 1) V prvním dni bude provedeno zaměření tří dočasně stabilizovaných měřických bodů metodou GNSS.
  - Získaná poloha těchto tří bodů bude sloužit jako základna pro přesné vytýčení výškových a směrových poměrů koutového odražeče.
  - Z metod GNSS bude použita rychlá statická metoda, při této metodě doba observace na jednom bodu trvá přibližně 20 minut. Na každém bodu je potřeba měřit i minimálně jedno opakované nezávislé měření. Za nezávislé měření se považuje nové zaměření polohy bodů stejnou metodou s časovým odstupem minimálně 1 hodiny. Přesnost této metody závisí na okamžitých atmosférických podmínkách a případných rušivých vlivech prostředí. Řádově se přesnost této metody pohybuje v hodnotách okolo 3 mm v poloze určovaného bodu.
  - Součástí měřických prací prvního dne bude také zaměření polohy dosud neorientovaného koutového odražeče za účelem zjištění jeho aktuální polohy a natočení v prostoru.
- 2) V druhém dni bude provedeno vytýčení výškových a směrových poměrů koutového odražeče z vypočtených vytyčovacími prvky. Vytyčovacími prvky jsou délky a úhly, které jsou vztaženy k vytyčovací síti měřických bodů základny.
  - Parametry přesnosti uváděné výrobcem jsou pro délkové měření s hranolovým odrazným systémem 1 mm, pro měření horizontálních úhlů v jedné poloze dalekohledu 0,6 mgon a pro měření vertikálních úhlů také 0,6 mgon. Použitý přístroj je zobrazen na obr. 1 vpravo.
  - Koutový odražeč bude aretován do požadovaných směrových a výškových poměrů.
- 3) Ve třetím dni bude provedeno kontrolní měření výškových a směrových poměrů koutového odražeče v době před průletem družice. V případě zjištění vychýlení od požadovaných výškových a směrových poměrů bude natočení koutového odražeče včas rektifikováno.

Po instalaci nikdy nelze zcela vyloučit možnost zcizení nebo vandalismu, zvláště je-li instalovaný odražeč volně přístupný. Při instalaci s řídkou hustotou se osvědčilo umístění na technických budovách zadavatele nebo v rámci jejich oplocených pozemků (Hlaváčová et al., 2011)



Obrázek 30 V rámci zaměření a orientace při demonstrační instalaci koutového odražeče v AOI Lysůvky byly použity přístroje: RX1250XC Leica (vlevo, krok 1), TCR 1202 Leica (vpravo, krok 2).

### 3.2.6 UMÍSTĚNÍ ODRAŽEČŮ PRO SLEDOVÁNÍ PLOŠNÉHO JEVU DEFORMACE

Odražeče je vhodné umístit do míst, kde neexistuje žádný jiný stabilní dominantní odražeč a jejich počet a hustota rozmístění by měla umožnit vytvořit model plošné deformace. Pro takový model je možné použít i další stabilní dominantní odražeče z okolí, například odrazy od budov, betonových sloupů a podobných stabilních konstrukcí (nejsou doporučovány rozměrnější kovové konstrukce z důvodu teplotní roztažnosti – např. mosty).

Základním předpokladem pro rozmístění odražečů je znalost očekávaných pohybů a požadavku na přesnost analýzy. Na základě této a priori znalosti a rovněž s ohledem na charakter použité družice, především její detekční limity (Hanssen, 2001), je možné odborně připravit základní strukturu sítě bodů pro korektní analýzu dle geodetických optimalizačních metod (Kuang, 1996). Nejvhodnější umístění koutových odražečů v rámci PS analýzy je pak možno určit dle metodiky předpokládající kvalitní znalost očekávaných plošných deformací popsané v (Mahapatra et al., 2014).

Uvažujeme-li použití Sentinel-1 v typickém módu IW, není zcela přímočaré určit detekční limity. V tomto módu má družice rozlišení ve svém úhlu pohledu (LOS) cca 20 m ve směru paralelně s letem družice (*azimuth*) a cca 5 m v ground range ve směru kolmém k letu. Demonstrace níže je ukázána na lokalitě AOI Lysůvky. Nestabilní svah nad dálnicí je pokryt zčásti vegetací a zčásti ornou půdou. Jak bylo ověřeno, radarový signál v pásmu C i X je zde značně dekorelován. Zčásti koherentní výsledek o by mohl být získán pouze kombinací dat pořízených v podzimním či zimním období (v případě, že svah nebude pokryt sněhem). V případě teoretické 100% korelace oblasti by bylo možné pro Sentinel-1 počítat s detekčním limitem pohybu o rychlosti  $D_{LOS,crit} = 9,2$  mm/m za sledované období, vypočteno dle (Hanssen, 2001). Svah je obklopen za dvou stran vesnickou zástavbou a z jedné strany dálničním tělesem včetně asociovaných stavebních prvků – podpůrné stěny, portál tunelu atd. Ve vesnici a v menší míře na dálnici lze očekávat detekci PS bodů z dat MR v pásmu C, z dat VHR (v pásmu X nebo C) lze vysokou hustotu bodů očekávat v obou případech. Geologická stabilita podloží vesnice není známa, nicméně existuje podezření na její nestabilitu. Koutové odražeče je pro analýzu vhodné rozmístit v místech očekávaného svahového pohybu nejlépe tak, aby mezi jednotlivými odražeči mohlo dojít k pohybu ve směru LOS maximálně o  $\lambda/4=1.4$  cm za sledované období 12 dnů (Hanssen, 2001) a zároveň tak, aby mezi odražeči mohl zůstat ve výsledném radarovém snímku prostor neovlivněný jeho odrazem, alespoň o velikosti 2

pixelů, tedy odražeče by měly být rozmístěny alespoň 40 m, ale lépe 60 m od sebe ve směru paralelním s dráhou letu družice a alespoň 12 m od sebe ve směru kolmém k dráze letu družice. Rovněž se doporučuje umístit odražeče tak, aby blízké odražeče netvořily linii zcela paralelní či zcela kolmou k letu družice, jelikož se tím jejich signál může vzájemně silně ovlivňovat.

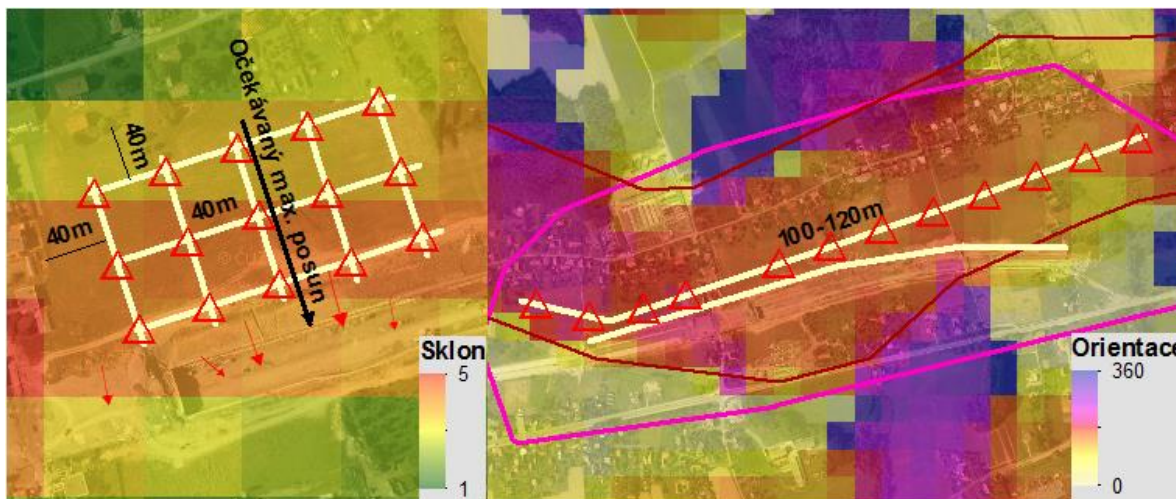
Na sledovaný svah lze za výše uvedených podmínek umístit maximálně 15 odražečů v pravidelném rastru. Takto umístěné odražeče by umožnily detekovat rozsah pohybů v rámci celého nestabilního svahu a porovnat je s případnými posuny detekovanými v zástavbě a podél dálničního tělesa. V praxi, z důvodů finančních i majetkoprávních (získání souhlasu s umístěním na soukromém pozemku atd.), by měla smysl realizace omezená na jednu nebo kombinaci možností:

- Odražeče v ose maximálního očekávaného posunu (3)
- Odražeče v podélné ose středem svahu nebo v ose na hraně zářezu. (4)
- Hvězdovitě (5) nebo čtvercově (9) v okolí středového odražeče v ose posunu

V případě podezření na pohyby v rámci celého svahu je vhodné odražeče umístit v linii jeho podélné středové osy (tedy doprostřed mezi případné PS body na silnici a v zástavbě) nebo v ose nad hranou plánovaného (nebo již hotového) zářezu:

- Doporučíme rozmístění v pravidelných vzdálenostech respektujících finanční možnosti
- Umístění by ale mělo respektovat potenciální lokální maxima posunů – daných sklonem a současně různé lokální orientace sekcí svahu a místa inflexe.

V tomto kontextu je vhodné konzultovat rozmístění vždy s geologem a uzpůsobit umístění jednotlivých odražečů známé geologické situaci (zlomy, úpady, smykové plochy atd.).



Obrázek 31 Návrh strategie rozmístění UKO v rámci AOI Lysůvky pro sledování různých scénářů.

V případě sledování liniového sesuvu nebo nestability ve směru spádnice svahu doporučujeme umístit odražeče:

- Podél osy spádnice s maximálním pohybem/sklonem/údolnice za předpokladu, že UKO nebudou stíněny vegetací nebo terénem.
- Případně poblíž hrany očekávaného rozsahu (ale stále v sesuvném území).

## 4 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Cena za zavedení uvedené metodiky nelze jednoznačně vyčíslit. Uvedený postup vychází ze zavedených postupů, jejichž zvládnutí a náklady spojené se zavedením těchto postupů jsou tedy na straně zpracovatele - poskytovatele služeb.

Provedení první části metodického postupu (**vyhodnocení proveditelnosti**) vyžaduje alespoň základní znalosti principů radarové interferometrie, základního zpracování dat SAR v softwarech k tomu určených (např. pro zjištění incidenčních úhlů pro AOI z archivních dat), zpracování a analýzu dat v GIS. Je na zadavateli, zda uvedené činnosti provede sám nebo nechá vypracovat externě, např. v rámci zadání zakázky vybranému zpracovateli. V druhém případě by se v závislosti na komplexitě zadaného území, jeho rozsahu a členitosti cena za vyhotovení vyhodnocení proveditelnosti pohybovala v komerčních cenách v rozsahu:

- **10000 – 15000 Kč bez DPH,**

je však pravděpodobné, že cena za vyhodnocení bude v takovém případě zahrnuta v celkové ceně služby zpracování InSAR.

Části metodiky, které se týkají interpretace výsledků a konstrukce umělých koutových odražečů, nelze vyčíslit z hlediska ceny, znalost její aplikace a vyhodnocení jednotlivých variant z hlediska dopadů na přesnost a dosažitelnost požadovaných výsledků je nicméně zásadní pro účelné využití vynaložených prostředků. Ekonomický přínos lze tedy vyčíslit z hlediska redukce možnosti/rizika neúčelného využití prostředků za pořízení a zpracování dat v situaci, kdy nelze dosáhnout požadovaných výsledků nebo přesnosti.

V tabulce 7 jsou kvantifikovány jednotlivé položky nákladů na pořízení a zpracování dat radarovou interferometrií s a bez využití umělých koutových odražečů.

- Ceny dat vycházejí z neaktuálnějších standardních nabídek (včetně zohlednění množstevních slev) komerčních poskytovatelů uvedených v Tabulce 1.
- Cena za zpracování je odhadem komerční ceny za zpracování založeným v českých podmínkách, založená na odborném odhadu v rámci zpracovatelského týmu, a současně je v souladu s finančními odhady, které byly na základě zpracování velkého počtu území pomocí InSAR provedeny v rámci evropského projektu GMES **TerraFirma**. Projekt vyvíjel služby založené na technice PS InSAR pro monitoring geohazardů, subsidence a svahových sesuvů. Součástí bylo i zhodnocení nákladů služby monitoringu<sup>1</sup>. Je nicméně třeba upozornit, že uvedená cena může být výrazně vyšší při zpracování proprietární metodou vlastněnou zahraniční firmou (např. SqueeSAR).
- Cena za výrobu a instalaci trvalých odražečů je založena na praktických zkušenostech členů zpracovatelského týmu z předešlých projektů a v rámci demonstračního testování v rámci AOI Lysůvky.

---

<sup>1</sup> TerraFirma. Stage 2: Final Report (2011)

Produkt	Položka	Cena		Komentář
		30 scén (ARCHIV)	30 scén (NOVÁ AKVIZICE)	
Data	TerraSAR-X, TanDEM-X SL	415 950	1 663 800	
	TerraSAR-X, TanDEM-X SM	415 950	1 247 850	
	COSMO-SkyMed SL2	1 534 860	1 534 856	
	COSMO-SkyMed STR_HIMAGE	898 440	898 452	
	RADARSAT-2 SL A	4 931 700	5 002 200	
	RADARSAT-2 UltraFine	3 142 800	3 492 000	
	RADARSAT-2 Fine	2 211 600	2 560 800	
	<b>MAX komerční data</b>	<b>4 931 700</b>	<b>5 002 200</b>	
	<b>MIN komerční data</b>	<b>415 950</b>	<b>898 452</b>	
	<b>Sentinel-1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
		orientační rozsah	orientační rozsah	
Zpracování PS InSAR	Metodou SBAS nebo PS InSAR	200 000 - 400 000	200 000 - 400 000	Orientační komerční cena za zpracování 1 datové sady. Nižší cena je relevantní pro zpracování a interpretaci malého území/objektu, vyšší pro zpracování rozsáhlého území (větší plochy, délky); vč. studie proveditelnosti, korekce a koregistrace snímků a interpretace v součinnosti se zadavatelem
		1 odražeč (UKO)	10 doražečů (UKO)	
Výroba a instalace UKO	Výroba a materiál	20 000 - 30 000	200 000 - 300 000	Uvažována je jednoduchá konstrukce (trihedrál) bez mechanismu umožňujícího dodatečnou/opakovanou změnu nastavení (orientace, aretace.)
	Instalace	2 000	10 000	Cena je orientační, zahrnuje: práce, doprava
	Zaměření	6 000	30 000 - 50 000	Cena je orientační, zahrnuje geodetické zaměření (GPS rychlou statickou metodou)
		orientační rozsah	orientační rozsah	
CELKEM	Maximální varianta s komerčními daty	5 131 700 - 5 331 700	5 442 200 - 5 762 200	MAX z hlediska dat a 10 UKO (není relevantní pro zpětné mapování - archiv!)
	Optimální varianta s komerčními daty	615 950 - 815 950	1 338 452 - 1 658 452	MIN z hlediska dat a 10 UKO (není relevantní pro zpětné mapování - archiv!)
	Varianta se Sentinel-1 daty	200 000 - 400 000	440 000 - 760 000	S-1 a 10 UKO (není relevantní pro zpětné mapování - archiv!)

Tabulka 7 Kalkulace nákladů za službu sledování deformací pro různé varianty vybraných datových vstupů (funkční družice), s a bez využití UKO. Ceny bez DPH. Aktuální data z Palsar-2 (jediný funkční senzor v pásmu L) zatím nebylo možné do srovnání zahrnout, protože komerční cena zatím není zveřejněna



## 5 ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA UDRŽITELNOSTI

Z tabulky 7 a metodiky lze vyvodit následující závěry s ohledem na **finanční a praktickou udržitelnost aplikace** InSAR v ČR pro sledování deformací infrastruktury nebo v jejím okolí:

- Cena za data tvoří při použití komerčních dat nejvyšší nákladovou položku
- Díky dostupnosti zadarmo je varianta s daty ze Sentinel-1 ve srovnání s komerčními daty vždy nejlevnější.
  - > **V rámci vyhodnocení proveditelnosti by proto měla být data ze Sentinel-1 v pásmu C vždy zvažovanou preferovanou variantou.**
  - > Pouze pokud se ukáže, že aplikace není ze Sentinel-1 proveditelná (z důvodu rozlišení - rozsahu sledovaných jevů, magnitudy pohybů či očekávané dekorelace), měla být zvážena alternativní (dražší) VHR data z komerčních družic (X, C nebo L).
- Archivní komerční data jsou nabízeny za výrazně nižší ceny než nové akvizice, ale nejsou pořizována systematicky a celoplošně pro území ČR.
  - > To znamená, že v případě objednání nové komerční akvizice lze získat přesné výsledky zpracováním až přibližně po jednom roce (v závislosti na frekvenci).
  - > Na konci roku 2015 by měl být k dispozici **roční archiv dat ze Sentinel-1 pravidelně a rovnoměrně pokrývající ČR** daty z několika překrývajících se drah.
  - > Díky tomu bude možné nad daty Sentinel-1 v případě potřeby okamžitě zahájit zpětné zpracování datové sady a získat výsledky v horizontu týdnů až měsíců.
  - > Data ze Sentinel-1 jsou prostorovým rozlišením a použitým pásmem srovnatelné s daty z ERS-1/2 a ENVISAT ASAR, dostupnými zadarmo. Při zohlednění omezení vyplývajících z mezer v temporálním pokrytí a rozdílných pořizovacích frekvencí lze provést analýzu deformací zpětně až do 90. let.
- Výroba a instalace umělých koutových odražečů představuje významnou nákladovou položku.
  - > Jejich využití by proto mělo být vždy pečlivě zváženo s ohledem na očekávaná omezení detekovatelnosti trvalých odražečů ve vzhledem ke krajinnému pokryvu zájmové oblasti.
  - > Umělé koutové odražeče nelze použít pro zpětné mapování.
  - > Je-li to možné z hlediska kolmých základen nebo je-li nutné zpracovávat archivní data, je vhodné zvážit a aplikovat metodu zpracování, která umožní identifikovat vyšší počet trvalých a distribuovaných odražečů.
  - > To umožní data z moderních komerčních družic (TSX, CSM a další) a **především data ze Sentinel-1**, jehož velmi krátké základny (jak časové, tak kolmé) jsou vhodné pro zpracování metodami založených na SBAS. **Při jejich použití lze očekávat velmi dobré výsledky z hlediska detekce trvalých a distribuovaných odražečů a nižší temporální dekorelace.**
- Zpracování dat z více drah může dodat důležité doplňující informace z hlediska směru deformace případně validace výsledků. Je třeba zvážit efekt z hlediska nákladů.
  - > Při použití dvou drah z komerčních družic ale zdvojnásobuje náklady za data i zpracování.
  - > Při použití dvou drah ze Sentinel-1 zdvojnásobuje náklady pouze za zpracování.

## 6 VYJÁDŘENÍ K NOVOSTI POSTUPŮ

Přes rozšiřující se počet odborných publikací ve vědeckých časopisech, které se zabývají zpracováním InSAR dat včetně dopravní domény, nebyl publikován rámec, který by problematiku výběru dat a přípravy pořizování InSAR popisoval souhrnně a s ohledem na aktuální data.

Metodický rámec splňuje kritérium novosti z hlediska:

- **Aplikace v dopravní doméně v podmínkách České republiky.**
- Zaměření postupu s ohledem na **nejaktuálnější data SAR a metody** zpracování ve srovnání s podobnými postupy doloženými v rámci teoretické rešeršní části, a to především s výhledem především na **operační nasazení družice Sentinel-1** a pro tematicky zaměřenou úlohu v dopravě.
- Vytvoření komplexního rámce pro návrh designu trvalých koutových odražečů.

Rámec vychází z dosažených výsledků výzkumu v oblasti interferometrie dokumentovaných rešeršní části. Na jeho základě byla sestavena metodika výběru dat a metod, která shrnuje obecné a dokumentované předpoklady a současně zohledňuje možnost operačního nasazení dat především z družice Sentinel-1. Ta zásadním způsobem změní ne nutně vlastní metody zpracování, ale především jejich aplikovatelnost, možnosti monitoringu deformací a jejich ekonomické dopady.

Navržený metodický postup byl **prakticky testován v rámci zpracování dat SAR pro testovací území** v ČR – AOI Lysůvky (viz úvod kapitoly 3).

## PŘEHLED LITERATURY

### **PUBLIKACE, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE**

Kolomazník, J., Hlaváčková, I., Bartaloš, T, Šuster, J.: *Přehled jevů a dat DPZ pro použití v dopravě & Analýza přínosu vybraných aplikací. Projektový výstup v rámci projektu TAČR TBO100MD021. Prosinec 2013.*

### **METODY, DOPRAVA, PROVEDITELNOST**

Barboux, C., Delaloye, R., Collet, C., Strozzi, T., Raetz, H.: *TSX InSAR Assessment for slope instabilities monitoring in alpine periglacial environment. ESA-ESRIN | Frascati (Rome), Italy. September 2011.*

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E.: *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11):2375–2383, 2002.*

Buckley, S. M., Vincent, P., Yang, D.: *New ground truth capability from InSAR time series analysis. 27th Annual Seismic Research Review, NNSA, Sept. 2005.*

Catalão J, Nico G, Hanssen R, Catita C: *Integration of INSAR and GPS for vertical deformation monitoring: a case study in Faial and Pico islands. In: Proc. Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 30 November – 4 December 2009.*

Colesanti, C., Wasowska, J.: *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry, Engineering Geology, Volume 88, Issues 3–4, 15 December 2006, Pages 173–199*

Colombo, A., Mallen, L., Pispico, R., Giannico, C., Bianchi, M., & Savio, G. (2006). *Mappatura regionale delle aree monitorabili mediante l'uso della tecnica PS. 10th National Conference ASITA, 14–17 November 2006 (Bolzano, Italy).*

Cigna, F., Del Ventisette, C., Liguori, V., Casagli, N.: *Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 865–881, 2011.*

Cigna, F., Bateson, L.B., Jordan, C.J., Dashwood, C.: *Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery. Remote Sensing of Environment 152 (2014) 441–466.*

Colesanti, C., Wasowska, J.: *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry, Engineering Geology, Volume 88, Issues 3–4, 15 December 2006, Pages 173–199*

Cusson, D., Ghuman, P., Gara, M. McCardle, A.: *Remote monitoring of bridges from Space. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, Maceió-Alagoas, Brazil, 8-11 October, 2012.*

Charbonneau, F., Singhroy, V., Couture, R., Locat, J., Li, J., Murnaghan, K.: *TerraSAR-X InSAR monitoring of Landslides along Transportation and Energy Corridors. Proceedings of 5th TerraSAR-X Science Team Meeting German Aerospace Center (DLR). June 2013*

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: *Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (1):8-20, 2001.*

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A.: *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(09): 3460 - 3470, 2011.*

Fornaro, G., Reale, D., Verde, S.: *Bridge Thermal Dilation Monitoring With Millimeter Sensitivity via Multidimensional SAR Imaging, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 10 (2013), pp. 677-681*

Ge, D., Wang, Y., Xia, Y.: *Land Subsidence Investigation Along Railway Using Permanent Scatterers SAR Interferometry, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS, Volume 2): II-1235 - II-1238, IEEE International, 2008.*

- Halounová, L., Hlaváčová, I., Svobodová, K.: *Semi-automatic processing of InSAR data from artificial reflectors. Proceedings of 5th TerraSAR-X Science Team Meeting German Aerospace Center (DLR). June 2013.*
- Hanssen, R. F.: *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001*
- Hanssen, R. F., van Leijen, F. J.: *One-dimensional radar interferometry for line infrastructure, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS, Volume 5):V-9 - V-12, IEEE International, 2009.*
- Hlaváčová, I., Halounová, L., Knechtlová, B.: *Sledování poklesů na výsypce v severních Čechách metodou radarové interferometrie, Geodetický a kartografický obzor. 2011, roč. 57, č. 10, s. 241-243.*
- Ketelaar, V. B. H.: *Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques. Springer Verlag, Press, Oxford, 2009.*
- Lauknes, T. R., Dehls, J., Larsen, Y., Høgda, K. A., and Weydahl, D. J., 2005, *A comparison of SBAS and PS ERS InSAR for subsidence monitoring in Oslo, Norway: In Proc. Fringe 2005 Workshop, ESA ESRIN, Frascati, Rome.*
- Lazecky, M., Rapant, P., Perissin, D., Bakoň, M.: *Deformations of highway over undermined Ostrava-Svinov areamonitorred by InSAR using limited set of SAR images. CENTERIS 2014 - Conference on ENTERprise Information Systems, 2014.*
- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Li, Q., Duering, R.: *Railway subsidence monitoring by high resolution INSAR time series analysis in Tianjin, 19th International Conference on Geoinformatics, 2011.*
- Monserrat, O., Crosetto, M., Cuevas, M., Crippa, B.: *The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, no. 5, September 2011.*
- Morgan, J., Falorni, G., Bohane, A., Novali, F.: *Advanced InSAR Technnology (SqueeSAR (TM) ) for Monitoring Movements of Landslides. FLH Publication No. FHWA-CFL/TD-11-005. 2011.*
- Novellino, A., Ahmed Dhahir Athab, Mhd Asyran bin Che Amat, Moh Fifik Syafiudin, Andrew Sowter, Stuart Marsh, Francesca Cigna, Luke Bateson: *Intermittent SBAS ground motion analysis in low seismicity areas: case studies in the Lancashire and Staffordshire coalfields, Seismology from Space: Geodetic observations and early warning of earthquakes, London. 2014.*
- Parcharidis, I., Benekos, G., Foumelis, M., Stramondo, S.: *High-Resolution Interferometric Observations/Measurements over the Rio-Antirio Cable-Stayed Bridge (Greece), Living Planet Symposium 2013, Edinburg.*
- Parcharidis, I., Foumelis, M., Kourkoli, P., Wegmuller, U.: *Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area (Western Greece) for the period 1992–2000. Journal of Applied Geophysics 68 (2009) 348–355.*
- Pigorini, A., Ricci, M., Sciotti, A., Giannico, C., Tamburini, A.: *Satellite remote-sensing PSInSAR(TM) technique applied to design and construction of railway infrastructures, 2010.*
- Plank, S., Singer, J., Minet, Ch. & Thuro, K. (2011): *Suitability evaluation of the differential radar interferometry method for detection and deformation monitoring of massmovements. – Proceedings of: 4th TerraSAR-X Science Team Meeting, German Aerospace Center (DLR). June 2011.*
- Plank, S., Singer, J. & Thuro, K.: *Assessment of number and distribution of persistent scatterers prior to radar acquisition using open access land cover and topographical data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 85, 132-147.*
- Power, D., Youden J., English, J., Russell, K., Croshaw, S., Hanson, R.: *INSAR Applications For Highway Transportation Projects. FLH Publication No. FHWA-CFL/TD-06-002. 2006.*

- Salvi, S., Stramondo, S., Funing, G., Ferretti, A., Sarti, F., Mouratidis, A.: *The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle. Remote sensing of environment*. 2012.
- Shamshiri, R., Motagh, M., Baes, M., Sharifi, M.: *Differential movement of bridge approach embankments in north-west Iran constrained from C-BAND, L-BAND AND X-BAND INSAR measurement. Proceedings of 5th TerraSAR-X Science Team Meeting German Aerospace Center (DLR)*. June 2013.
- Sousa, J. J., Hooper, A., Hanssen, R. F., & Bastos, L.: *Comparative study of two different PS-InSAR approaches: DePSI vs. StaMPS. Proceedings of FRINGE 2009. Workshop, Frascati, 2009*.
- Sousa, J., Hooper, A. J., Hanssen, R. F., Bastos, L. C., Ruiz, A. M.: *Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria, Remote Sensing of Environment* 115 (2011), pp. 2652–2663
- Sousa, J. J., and Bastos, L. C.: *Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1–9, 10.5194/nhess-13-659-2013, 2013.
- Ghuman, P. and McCardle, A.: *Bridge Health Monitoring using PSI, Eur. Space Agency Spec. Publ., SP-697, ISBN 978-92-9092-261-2, 2012*.
- Wang, Z., Perissin, D., Lin, H.: *Subway tunnels identification through Cosmo-SkyMed PSInSAR analysis in Shanghai, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): 1267-1270, IEEE International, 2011*.
- Xuedong, Z., G. Daqing, M. Weiyu, Z. Ling, Y. Dapeng, G. Xiaofang: *Study the land subsidence along JingHu highway (Beijing-Hebei) using PS-InSAR technique, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): 1608 - 1611, IEEE International, 2011*.
- Zakharov, A., Mashurov, S., Dragunov, A.: *Application of TerraSAR-X Data for Monitoring of Potential Landslide and Karst Areas in Railway and Pipeline Corridors, 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010*.
- Zhang, L., Ding, X. L., and Lu, Z.: *Monitoring of bridge deformation with InSAR: An experimental study, XXIV FIG International Congress, Sydney, Australia, 11–16 April 2010*.

## **UMĚLÉ KOUTOVÉ ODRAŽEČE**

- Bonkowski, R. R., Lubitz, C. R., Schensted, C. E. (1953): *Studies in Radar Cross-Sections-VI. Cross-sections of corner reflectors and other multiple scatterers at microwave frequencies. Tech. rep. University of Michigan. Radiation Laboratory, 1953*.
- Chen, F., Lin, H., Hu, X.: *Slope Superficial Displacement Monitoring by Small Baseline SAR Interferometry Using Data from L-band ALOS PALSAR and X-band TerraSAR: A Case Study of Hong Kong, Chin. Remote Sens.* 2014, 6(2), 1564-1586; doi:10.3390/rs6021564
- Curlander, J.C. and R.N. McDonough (1991): *Synthetic aperture radar - Systems and signal processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991, p. 396.
- D'Agostino, F., C. Gennarelli, and G. Riccio (1999): *PO Evaluation of the field backscattered by a trihedral corner with a resistive face. In: Microwave and Optical Technology Letters* 21.3 (1999), pp. 173–177.
- Döring, B., Schwerdt, M., Bauer, R. (2007): *TerraSAR-X calibration ground equipment. Proceedings of the Wave Propagation in Communication, Microwave Systems and navigation (WFMN'07)*, 91-96.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000): *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38.5 (2000), pp. 2202–2212.

- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Rocca, F. (2007): Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(5), 1142-1153.
- Froese, C. R., Poncos, V., Murhagan, K., Hawkins, R., Skirrow, R., Singhroy, V. (2009): Integrated corner reflector InSAR, SI and GPS characterization of complex earth slide deformations, Little Smoky River, Alberta, Canada. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 11. 2009.
- Garthwaite, M. C., Thankappan, M., Williams, M. L., Nancarrow, S., Hislop, A., Dawson, J. (2013): Corner reflectors for the Australian Geophysical Observing System and support for calibration of satellite-borne synthetic aperture radars. In *IGARSS 2013* (pp. 266-269).
- Gong, L., Zhang, J., Zeng, Q., Luo, Y., & Yan, S.: *Detection of Artificial Corner Reflector on SAR Images*.
- Hanssen, R. F. (2001): *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, Kluwer Academic, Dordrecht, 308 pp., 2001, ISBN 0792369459.
- Ketelaar, G., Marinkovic, P., Hanssen, R. F. (2004): Validation of point scatterer phase statistics in multi-pass InSAR, in *Proceedings of CEOS SAR Workshop*, Ulm, Germany, May 2004.
- Kuang, S. (1996): *Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications*, Ann Arbor Press Chelsea, 1996.
- Lazecký, M. (2011): *Monitoring of Terrain Relief Changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry: Application of SAR Interferometry Techniques in a Specific Undermined Ostrava-Karviná District*, PhD thesis, VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2011.
- Li, Z.: *Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MERIS Data*. PhD thesis. University College London, 2005.
- Mahapatra, P. S., Samiei-Esfahany, S., van der Marel, H., Hanssen, R. F. (2013). *On the Use of Transponders as Coherent Radar Targets for SAR Interferometry*, IEEE 2013.
- Mahapatra, P., Samiei-Esfahany, S., Hanssen, R. (2014): *Geodetic network design for InSAR using reflectors and transponders*, at *IGARSS 2014, Quebec, Kanada, 13.-18. červenec 2014*.
- Medhavy, T., Williams, M. L., Dawson, J. (2011): *Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System and Support for Calibration of Satelliteborne Synthetic Aperture Radars*. *CEOS SAR Calibration Validation Workshop*, 7-9 November 2011, Fairbanks Alaska.
- Parizzi, A., Perissin, D., Prati, C., Rocca, F. (2005): *Artificial scatterers in SAR interferometry*, in *Proceedings of Dragon Symposium, Santorini, Greece, June-July 2005*.
- Qin, Y., Perissin, D., Lei, L. (2013): *The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong*. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, Article ID 191685, 8 pages, 2013. doi:10.1155/2013/191685
- Richards, J.A. (2009): *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer Verlag, 2009. isbn: 3642020194.
- Sarabandi, K. and T.C. Chiu (1996): *Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars*. In: *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 44.10 (1996), pp. 1348–1361. issn: 0018-926X.
- Riedmann, M., Haynes, M. (2007): *Developments in synthetic aperture radar interferometry for monitoring geohazards*. *Geological Society, London, Special Publications*, 283(1), 45-51.
- Seeber, G. (2003): *Satellite geodesy*. Walter De Gruyter Inc, 2003. isbn: 3110175495.
- Xia, Y., H. Kaufmann, X. F. Ge, and X. D. Yang (2008): *CR-Based TerraSAR-X Interferometry for Landslide Monitoring*. In: *3rd TerraSAR-X Science Team Meeting*. DLR. Oberpfaffenhofen 2008.
- Hlaváčová, I., Halounová, L., Svobodová, K., Blín, J.: *Výsledky sledování deformací metodou InSAR v severních Čechách*, *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 60-102 (2014), číslo 11

## **PROJEKTY A FIREMNÍ PROMO**

*ASTRIUM. Space monitoring for Hong Kong settlement. TunnelTalk, 2011.*

*ASTRIUM. Using radar satellites for monitoring underground construction.*

*PSIC4 Persistent Scatterers Interferometry Independent Validation and Intercomparison of Results. Final Report. 2007.*

*TerraFirma: PROVENCE INTER-COMPARISON. Final Report. 2007.*

*TerraFirma: User Guide. 2010*

*Smith, M.: ERCB Special Report #2: InSAR Feasibility Report by TRE. 2013*

## **INTERNETOVÉ ZDROJE**

[0] <https://sentinel.esa.int/documents/247904/351367/Sentinel+High+Level+Operations+Plan/530fd782-6386-4d26-9e05-36970bf91b85>

[1] <http://gs.mdacorporation.com>

[2] <http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>

[3] <http://scihub.esa.int>

[4] <https://cross-ex.info/cross-ex/topControl?language=en-US>

[5] <http://terrasar-x-archive.infoterra.de>

[6] <http://87.241.31.78/index.php>

[7] <http://www.n2yo.com/satellite/?s=39634>

[8] <http://www.celestrak.com/NORAD/elements>

[9] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

[10] <https://earth.esa.int/web/sentinel/sentinel-1-sar-wiki/-/wiki/Sentinel%20One/Interferometric+Wide+swath+SLC>

[11] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>

[12]

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fgeoportal.cuzk.cz%2Fdefault.aspx%3FIn%3DCZ%26mode%3DTextMeta%26text%3DWMS.verejne.uvod%26side%3DWMS.verejne%26menu%3D311%26head\\_tab%3Dsekce-03-gp&ei=dh59VLC0CirAPKmsGjGf&usq=AFQjCNEBSF1iQzTodFyQvhuLHPNV8rjT9g&sig2=4WrYqfB4AhNb2i2XG8Po4g](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fgeoportal.cuzk.cz%2Fdefault.aspx%3FIn%3DCZ%26mode%3DTextMeta%26text%3DWMS.verejne.uvod%26side%3DWMS.verejne%26menu%3D311%26head_tab%3Dsekce-03-gp&ei=dh59VLC0CirAPKmsGjGf&usq=AFQjCNEBSF1iQzTodFyQvhuLHPNV8rjT9g&sig2=4WrYqfB4AhNb2i2XG8Po4g)

[13] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>

[14] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-3>

[15] <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/wms>

[16] [http://mapy.geology.cz/svahove\\_nestability/](http://mapy.geology.cz/svahove_nestability/)

[17] <http://www.rsd.cz/mapy/wms-sluzby>

## **PODĚKOVÁNÍ**

*Konzultace (Ing Jiří Sláma, RNDr. Karel Ondra, Tele Rilevamento Europa)*

*ARCADIS Geotechnika - Závěrečná zpráva o monitoringu objektů SO 251, SO 252 a SO 601*

***DORIS** (Kampes B., Hanssen, R., Perski.Z.: Radar Interferometry with Public Domain Tools presentation (paper pdf). Given at Fringe 2003, 1-5 Dec, Frascati, Italy;*

*Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B.: A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, Geophys. Res. Lett., 31, 2004.)*

***Delft precise orbits** (Scharroo, R. and P. N. A. M. Visser, and G. J. Mets, Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, J. Geophys. Res., 103, C4, 8113-8127, 1998.)*

***StaMPS** (Hooper, A., Segall, P., Zebker, H.: Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos, J. Geophys. Res., 112, 2007.)*

***ESA orbity** (ID projektu 28216)*

***ENVISAT ASAR data** (ESA 2014, ID projektu 26829)*

***TerraSAR-X data** (DLR 2014, ID projektu LAN2376 )*



## O AUTORECH

### **Mgr. Jan Kolomazník**

*Jan Kolomazník má více než 7 let zkušeností na pozici specialisty a analytika DPZ ve firmě GISAT, specializuje se na vývoj, implementaci a kontrolu kvality služeb satelitního mapování, zpracování družicových dat a prostorové analýzy. Je zodpovědný za technické vedení mapovacích a výzkumných projektů řešených v rámci FP7 a pro ESA.*

*Mgr. Kolomazník se podílel na vypracování rešeršní, datové a praktické části a na zpracování vyhodnocení proveditelnosti. Podíl práce na předložené metodice: 50%*

### **Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D.**

*Dr. Ivana Hlaváčová se více než 10 let věnuje výuce, vědecké a publikační činnosti na Katedře geomatiky Stavební fakulty ČVUT. Specializuje se na interferometrické zpracování radarových dat DPZ, metody trvalých odražečů DPZ a jejich aplikace v ČR i zahraničí. Dlouhodobě se podílela řadě mezinárodních i národních grantových projektů zaměřených na toto téma.*

*Dr. Hlaváčová se podílela na vypracování jak rešeršní, tak praktické části, především v části zaměřené na metody zpracování, validace a interpretace, a na praktickém zpracování dat InSAR pro AOI Lysůvky. Podíl práce na předložené metodice: 40%*

### **Ing. Milan Lazecký, Ph.D.**

*Dr. Milan Lazecký se od roku 2008 zaměřuje na využití družicových radarových dat pro sledování deformací - poklesů, sesuvů, deformací jednotlivých objektů typu přehrada či dálniční most. Podílel se na několika projektech s mezinárodním konsorciem využívající družicovou radarovou interferometrii. V současné době je zaměstnán na národním superpočítačovém centru IT4Innovations při VŠB-TU Ostrava.*

*Dr. Lazecký se podílel na vypracování metodiky v kapitole 3.2 a na praktické demonstraci instalace umělého koutového odražeče v AOI Lysůvky. Podíl práce na předložené metodice: 10%*

### **GISAT s.r.o.**

*GISAT je česká společnost, která se dlouhodobě specializuje na vývoj a poskytování geoinformačních služeb a aplikací DPZ. Pracovní tým vysoce kvalifikovaných pracovníků čerpá ze zkušeností s vedením a řízením projektů, konzultační činností a poskytováním široké škály GIS a DPZ aplikací nejrůznějších tematických oblastí včetně aplikací v dopravě. Za dobu svého působení na trhu dodal GISAT desítky služeb národním i zahraničním zákazníkům z řad státní správy i soukromé sféry a množství služeb vyvinutých v rámci programu GMES/Copernicus. Řešil řadu národních i mezinárodních výzkumných projektů (v rámci FP7, pro Evropskou kosmickou agenturu a další). GISAT je držitelem certifikátu integrovaného systému managementu jakosti a systému environmentálního managementu podle standardu ISO 9001:2008 a ISO 1400:2004.*