

Metodika vyhodnocení proveditelnosti sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie

2016



Milady Horákové 57

170 00 Praha 7

<http://www.gisat.cz>

Dedikace:

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu „**Sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie**“ realizovaného s finanční podporou TA ČR v rámci programu Beta (ev. č. projektu TB0400MD003).



Název:

Metodika vyhodnocení proveditelnosti sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie

Hlavní řešitel:

Mgr. Jan Kolomazník, GISAT s.r.o.

Na vyhotovení metodiky spolupracovali:

Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D., GISAT s.r.o.

Ing. Milan Lazecký, Ph.D., GISAT s.r.o.

Ing. Marek Pelant, GISAT s.r.o.

Oponenti:

Prof.Dr. Ing. Karel Pavelka, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie

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

Ing. Jiří Sláma, ŘSD

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

© 2016 GISAT.s.r.o.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK	- 4 -
1 ÚVOD	- 5 -
1.1 Shrnutí	- 5 -
1.2 Cíle metodiky a její uplatnění	- 6 -
2 REŠERŠE	- 7 -
3 ZÁSADY A POSTUP VYHODNOCENÍ KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ A KRITÉRIÍ PROVEDITELNOSTI PRO DEFINICI SLUŽBY - 8 -	- 8 -
3.1 Specifikace služby sledování mostů pomocí InSAR	- 8 -
3.2 Vstupní informace pro vyhodnocení	- 9 -
3.2.1 Technické požadavky zadavatele	- 9 -
3.2.2 Technické parametry mostního objektu	- 10 -
3.2.3 Doplnkové parametry – měření meteorologických parametrů	- 11 -
3.2.4 Parametry družicového senzoru Sentinel-1	- 11 -
3.2.5 Nabídka služby	- 12 -
3.3 Identifikace klíčových limitů	- 12 -
3.3.1 Obecné technické limity metody InSAR	- 12 -
3.3.2 Limity z hlediska vlastností a konstrukce mostu	- 13 -
3.4 Vyhodnocení technické proveditelnosti	- 14 -
3.4.1 Příprava	- 14 -
3.4.2 Kategorizace sledovatelnosti	- 15 -
3.4.3 Vyhodnocení sledovatelnosti bez TKO	- 16 -
3.4.4 Vyhodnocení sledovatelnosti s TKO	- 19 -
3.5 Vyhodnocení rizik spojených s umístěním odražeče	- 28 -
3.5.1 Způsobení škod vlivem uvolnění a pádu	- 28 -
3.6 Vyhodnocení opatření ke snížení rizika krádeže	- 29 -
3.7 Vyhodnocení ekonomické proveditelnosti	- 32 -
4 NÁLEŽITOSTI PRO INSTALACI TRVALÉHO KOUTOVÉHO ODRAŽEČE	- 34 -
4.1 Design	- 34 -
4.2 Výroba odražeče	- 34 -
4.3 Schválení umístění odražeče	- 34 -
5 METODIKA MONITORINGU INSAR	- 36 -
5.1.1 Zpracování InSAR dat	- 36 -
5.2 Integrace výstupů ze statických a dilatačních modelů	- 38 -
5.3 Monitoring bez využití odražečů	- 38 -
5.3.1 Monitoring pohybů v definovaném směru	- 39 -
5.3.2 Monitoring 3D pohybů	- 40 -
5.4 Monitoring s využitím odražečů	- 41 -
5.4.1 Monitoring vertikálních pohybů	- 41 -
5.4.2 Monitoring 3D pohybů	- 42 -
6 PŘESNOST A VALIDACE	- 43 -
6.1 Validace výsledků	- 44 -
6.1.1 Porovnání s výsledky z geodetického měření	- 44 -
6.1.2 Vyhodnocení prostorové konzistence detekovaných pohybů	- 44 -
6.1.3 Porovnání výsledků z více družicových drah	- 45 -
6.1.4 Porovnání výsledků s výsledky z družice s vysokým rozlišením	- 46 -
6.1.5 Porovnání výsledků s výsledky pro stabilní oblast	- 46 -
Ekonomické aspekty	- 49 -
Uplatnění metodiky	- 49 -
Prohlášení o novosti postupů	- 49 -
Seznam použité související literatury	- 50 -
Příloha 1: Platné předpisy a normy	
Příloha 2: Metodický pokyn pro výrobu konstrukce trvalého koutového odražeče	
Příloha 3: Příklad žádosti a doložené dokumentace k umístění TKO na vybraný objekt infrastruktury	
Příloha 4: Metodický pokyn pro vyhodnocení a výpočet dilatace mostních objektů	

SEZNAM ZKRATEK

ASC	Ascending (vzestupná) dráha
AOI	Area of Interest (zájmová oblast)
BMS	aplikace Bridge Management System (http://bms.vars.cz)
C	Pásmo C (vlnová délka 5,6 cm)
ČHMÚ	Český hydro-meteorologický úřad
ČSN	Česká státní norma
DESC	Descending (sestupná) dráha
dB	Decibel
DEM	Digital Elevation Model (digitální výškový model)
DPSB	Detekce PS bodů
EO	Earth Observation (pozorování země)
ESA	European Space Agency (Evropská kosmická agentura)
GIS	Geografický informační systém
GPS	Globální poziční systém
HR	High-Resolution (data vysokého rozlišení)
InSAR	Interferometrický SAR
IWS	Interferometric Wide-swath Mode (pořizovací mód družice Sentinel-1)
JSDI	Jednotný systém dopravních informací
KAT	Kompaktní aktivní transpondér
LOS	Line of Sight (směr pohledu)
MIAS	Mapa indexu amplitudové stability
MREF	Mapa odrazivosti
NK	Nosná konstrukce
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)
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
S1	Služba vymezení prostorového rozsahu, rychlosti a dynamiky pohybů pomocí InSAR
S2	Služba Dlouhodobý monitoring rychlosti a dynamiky pohybů pomocí InSAR
S-1	družice Sentinel-1
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar se syntetickou aperturou)
SLC	Single Look Complex data (data SAR pořízená jako SLC)
SUS	Správa a údržba silnic
S-J	směr sever - jih
TAČR	Technologická agentura České republiky
TKO	(Umělý) Trvalý koutový odražeč
ÚKKS	Úsek kontroly kvality staveb na Ředitelství silnic a dálnic
VHR	Very High Resolution (data velmi vysokého rozlišení)
V-Z	směr východ - západ
WMS	Web Map Service (webová mapová služba)

1 ÚVOD

1.1 SHRUTÍ

Předkládaná metodika je koncipována jako metodický rámec aplikovatelný při vyhodnocení proveditelnosti a určení nejvhodnějšího postupu pro sledování nežádoucích trvalých pohybů a deformací mostů a přilehlých částí dopravní infrastruktury pomocí radarové interferometrie (InSAR). Metodika se zaměřuje především na možnost sledování s využitím dat z evropské konstelace družic středního rozlišení Sentinel-1, které jsou dostupné zdarma. Analýza dlouhých časových řad radarových družicových snímků umožňuje detekovat rychlost a průběh pohybů různých částí infrastruktury s velkou přesností. Analyzovat lze zpětně dle dostupnosti archivních dat nebo lze navrhnout službu na dlouhodobý monitoring infrastruktury. Vzhledem k charakteru družicové detekce pohybů, relativně nízkému rozlišení dat z družic Sentinel-1 a komplexitě konstrukčních variant a geometrických konstelací je nicméně sledování limitováno řadou omezení, které je třeba vyhodnotit v rámci definice parametrů služby.

Je definován rozsah informací, které je třeba vyhodnotit v rámci vyhodnocení proveditelnosti a pro nastavení odpovídajících parametrů služby včetně výběru vhodných radarových dat, návrhu doplňkových analýz a modelování a způsobu monitoringu projevů trvalých pohybů na příslušných stavebních částech objektu a infrastruktur. Jsou uvedeny dopady možných řešení vzhledem k obecným i specifickým limitům metody a dopady zvolených variant na proveditelnost. Zásadní dopad mají a musí být zohledněny konstrukční charakteristiky mostu určeného ke sledování, jeho výška, velikost, orientace a instalované příslušenství.

Pro umožnění sledování spodní stavby mostu nebo umožnění sledování mostů s velmi nízkou odrazivostí je vhodné na most instalovat umělý trvalý koutový odražeč (TKO) do vhodně zvoleného umístění. Metodika definuje možná umístění vč. kladů a záporů uvedeného řešení i variant, možných rizik spojených s provozem TKO, způsob jejich identifikace, vyhodnocení a eliminace a finanční dopady související s možnostmi zabezpečení. Součástí metodiky je i vymezení povinných náležitostí pro žádost o umístění a instalaci trvalého koutového odražeče na mostní objekt. Součástí metodiky jsou v přílohách uvedené podrobné výkresy a výrobní postup odražeče dle designu, který byl vyvinut v rámci projektu s ohledem na požadavky a připomínky ze strany ŘSD.

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu „**Sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie.**“ Projekt s ev. č. TB0400MD003 byl realizován hlavním řešitelem (GISAT s.r.o.) v rámci zakázky v programu Technologické agentury České republiky (TAČR) Beta v letech 2015-2016. Metodika navazuje na pilotní demonstraci ověření metody InSAR pomocí dat z družice Sentinel-1 v rámci řešení projektu. Ve spolupráci s pracovníky ÚKKS ŘSD a SUS Středočeského kraje vybrány mosty na Ostravsku (D1-433, D1-441, D1-442, 56-020) a ve středních Čechách (322-005, 125-034).

Výsledky prokázaly využitelnost přístupu InSAR pro sledování infrastruktury. U řady mostů byly detekovány probíhající pohyby s rychlostí v řádu jednotek milimetrů až centimetrů za rok. Pohyby byly detekovány ve směru (úhlu) radarového paprsku, nicméně představují výslednici svislých nebo 3D pohybů promítnutých do tohoto směru. Detekované trvalé pohyby pravděpodobně souvisí s nežádoucími pohyby v oblasti náspů mostů v jejich těsném předpolí. Pohyby vč. jejich rychlosti a

průběhu v čase byly detekovány na náspech (v oblasti opěr), mostech a přilehlých komunikacích jako výsledek odrazu od nosné konstrukce mostu a příslušenství na horní stavbě a přilehlých komunikacích.

Současně byly v říjnu 2016 instalovány tři koutové odražeče TKO na mostní objekt D1-441 v Ostravě-Svinově, které umožní ověření detekovatelnosti trvalých pohybů přímo na spodní stavbě mostu a vlivu instalovaného TKO na fázovou a amplitudovou stabilitu odraženého signálu.

1.2 CÍLE METODIKY A JEJÍ UPLATNĚNÍ

Cílem předkládané metodiky je poskytnout strukturovaný metodický rámec, který bude sloužit pro vyhodnocení proveditelnosti sledování dopravní infrastruktury pomocí družicové radarové interferometrie především s využitím analýzy dat z družice Sentinel-1. Metodický postup je nicméně aplikovatelný obecně, tedy i pro jiná družicová radarová data.

Předpokládané uplatnění metodiky je v dopravním stavebnictví na straně správců objektů dopravní infrastruktury, resp. jejich organizačních útvarů zodpovědných za definici technických požadavků na návrh řešení v rámci zadání zakázky na sledování pomocí interferometrie. Metodika definuje výčet parametrů, které je třeba poskytnout ze strany zadavatele, a kritérií, které je třeba zohlednit, požadovat a vyhodnotit při přípravě technických požadavků i při vyhodnocení nabídek uchazečů.

Metodika se uplatní i na straně uchazečů a řešitelů zakázky (poskytovatelů služeb) na sledování pomocí InSAR: identifikuje klíčové faktory a limity, které musí být zohledněny v rámci návrhu služby a nabídky, a dále rozsah informací a požadavků, které je nutné diskutovat se zadavatelem před finalizací konceptu monitoringu před jeho zahájením. Součástí metodiky je závazná struktura žádosti o umístění TKO a v příloze jsou k dispozici výkresy a rámcový výrobní postup TKO dle schváleného a ověřeného designu.

Struktura dokumentu cílí na praktickou využitelnost metodiky.

- Specifikace služby, rozsah nutných informací a parametrů k vyhodnocení a postup jejich vyhodnocení, vyhodnocení vhodnosti a rizik ve spojitosti s instalací TKO jsou uvedeny v Kapitole 3, která je zásadní z hlediska zadavatele i poskytovatele služby.
- Kapitola 4 uvádí povinné náležitosti žádosti o instalaci TKO ze strany poskytovatele.
- Kapitola 5 shrnuje postup monitoringu zpracování metodou InSAR relevantní pro poskytovatele služby.
- Kapitola 6 shrnuje zásady určení přesnosti a návrhu vhodného způsobu validace dosažených výsledků.

Metodika je doplněna přílohami s uvedením seznamu relevantních technických norem a předpisů, výkresů TKO pro výrobní proces, ukázky žádosti o instalaci TKO na most ve vlastnictví ŘSD a podrobných metodických pokynů pro vyhodnocení teplotních pohybů projektantem pozemních staveb.

2 REŠERŠE

Postupy navržené v této metodice jsou založené na výzkumu a závěrech z praktického ověření a demonstrace technologie InSAR pro sledování dopravních infrastruktur v rámci projektu „Sledování nežádoucích pohybů a deformací dopravních infrastruktur prostřednictvím radarové interferometrie“ č. TB0400MD003. Z metodického hlediska výzkum navazoval na výzkumné a praktické výsledky dosažené v rámci projektu „Zhodnocení využitelnosti dat dálkového průzkumu Země pro použití v dopravě,“ č. TB0100MD021 (2014). „Metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledováním subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury“ definovala metodický rámec analýzy a vyhodnocení InSAR v obecnější rovině a v širším aplikačním záběru, především s ohledem na svahové pohyby. V rámci metodiky byla vypracována podrobná obecná rešerše metodik a přístupů analýzy metodami trvalých odražečů InSAR pro sledování různých typů pohybů vč. pohybů infrastruktury.

Zkušenosti získané z vlastních prací v rámci řešení minulých projektů umožnily shrnout některé podstatné informace ohledně sledování infrastruktur, především mostů. Pro zajištění přesnosti a spolehlivosti výsledků je zapotřebí dostatečná datová základna. V první řadě je nutné správně rozlišit zdroje fázových změn. Ty jsou obecně přisuzovány k fyzickým pohybům sledovaného objektu a k výškovým změnám vůči bezprostřednímu okolí. Již původní PS InSAR počítala s minimálním počtem alespoň 20 snímků v datové sadě pro toto základní rozlišení (Ferreti et al., 2001). V případě mostů je navíc zapotřebí rozlišit i vliv teplotní dilatace, tedy elastických (sezónních) pohybů. To je možné korelační analýzou vůči skutečným či modelovým hodnotám teploty. V případě datové sady pokrývající relativně krátké období jednoho roku (jeden sezónní cyklus) nebylo možné korektně rozlišit pohyb teplotní dilatací a neelastického pohybu lineárního v čase (Lazecký et al., 2015, Hlavacova et al., 2015). Postupným získáním dalších snímků se toto rozlišení podařilo – logicky se usuzuje na potřebu alespoň 1.5 násobku sezónního cyklu (Lazecký et al., 2016). To by mělo být dostatečné i pro vyhodnocení nelineárních pohybů specifickou metodikou pokročilé techniky PS InSAR (Bakoň et al., 2014), tedy za předpokladu dostatečně přesných teplotních údajů. Nutno podotknout, že pro sledování pohybů infrastruktury se použití InSAR potýká s obecnými problémy (Hanssen, 2001), jako jsou prostorové rozlišení, maximální spolehlivě identifikovatelná rychlost pohybu, dekorelace radarového signálu vlivem prezence a pohybu objektů v blízkosti sledované infrastruktury či přímo na ni (např. vegetace) apod. Již menším problémem je vnímání model atmosférických vlivů na radarový signál, vzhledem k možnosti zvolení blízkého referenčního bodu (vliv zpoždění průchodu atmosférou je v krátkých vzdálenostech zanedbatelný). Obecně je ve zmiňované literatuře doporučováno pro sledování mostů využít data vysokého prostorového rozlišení, například TerraSAR-X o rozlišení přibližně 3 m. Použití Sentinel-1 o středním rozlišení (cca 20 m) je diskutabilní a nebylo zcela ověřeno. Práce využívající družice Alos o rozlišení přibližně 10 m (Zhang et al., 2010) potvrdilo možnost sledování rozměrného mostu, ovšem vzhledem k nízkému počtu snímků nebylo možné rozlišit lineární a sezónní pohyb. Pokusy o využití historických dat středního rozlišení (jak v dimenzi prostorové, 25 m, tak i časové, 35 dnů) Envisat a ERS nedosahovalo potřebné spolehlivosti, ačkoli v některých případech bylo možné alespoň rozlišit obě pohybové složky (Crosetto et al., 2010). To je však vzhledem k rozlišení často možné jen v časových řadách reprezentovaných několika málo PS body (Lazecký et al., 2014).

3 ZÁSADY A POSTUP VYHODNOCENÍ KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ A KRITÉRIÍ PROVEDITELNOSTI PRO DEFINICI SLUŽBY

3.1 SPECIFIKACE SLUŽBY SLEDOVÁNÍ MOSTŮ POMOCÍ INSAR

Pro sledování trvalých rizikových pohybů mostních objektů případně jejich okolí, které je může negativně ovlivňovat, lze vymezit dva typy služeb založených na InSAR analýze dat z družicových senzorů.

S1: Vymezení prostorového rozsahu, rychlosti a dynamiky pohybů	
Jev	Existence jevu je neznámá nebo nepotvrzená, je třeba vymezit rizikové pohyby z hlediska rozsahu v prostoru, rychlosti a dynamiky v čase, případně směr pohybů.
Motivace	Vymezení rizikové oblasti a míry rizika
Specifikace analýzy	Zpětné vyhodnocení dostatečně dlouhé (historické) časové řady archivních snímků pořízených v minulosti (minimálně 18 měsíců nazpátek).
S2: Dlouhodobý monitoring rychlosti a dynamiky pohybů	
Jev	Existence jevu je známá, je třeba sledovat, zda nedochází k zrychlení pohybů či zvětšení rozsahu ovlivněné oblasti. V případě změny rychlosti pohybu dojde k upozornění zadavatele.
Motivace	Omezení rizika
Specifikace analýzy	Vyhodnocování snímků pořízených v budoucnosti v pravidelných intervalech (x- měsíčních), navazuje na zpětné vyhodnocení dostatečně dlouhé časové řady archivních snímků pořízených v minulosti a následně

Tabulka 1 Specifikace služeb vyhodnocení a monitoringu trvalých pohybů pomocí InSAR

Služba 1 analyzuje výhradně archivní data. Pro stabilitu metody je třeba časová řada snímků dlouhá alespoň 18 měsíců. Služba 2 také vyžaduje analýzu stejně dlouhé historické řady snímků, na kterou je posléze navázáno analýzou nově pořizovaných dat a jejich pravidelným vyhodnocením v intervalu, který umožní spolehlivě detekovat odchylku od stávajícího trendu. Služba 2 tedy může navazovat na analýzu provedenou v rámci Služby 1. Zpracování dostatečně dlouhé časové řady družicových SAR snímků je nutnou podmínkou pro zahájení monitoringu v pravidelných intervalech.

Výhodou služeb založených na analýze dat Sentinel-1 je, že tato data konzistentně pokrývají území České republiky v časové řadě delší než požadovaných 18 měsíců – pravidelné snímání s 12denní periodou bylo zahájeno na podzim 2014, od podzimu 2016 je k dispozici pravidelné snímání s 6denní periodou. Analýzy InSAR lze tedy provést zpětně v rámci pokrytého časového rozmezí pro identifikaci jevů v nedávné minulosti. Archivními komerčními daty s vyšším prostorovým rozlišením je pokryta pouze malá část území republiky. Mapy pokrytí jednotlivými družicovými senzory jsou prezentované v Metodice z projektu TB0100MD021 (2014).

S využitím trvalých koutových odražečů lze objekt monitorovat až od data jejich instalace. Minimální délka intervalu pro vyhodnocení signifikantních odchylek od trendu je daná nutností potvrdit změnu trendu z několika po sobě následujících měření: minimálně ze 3 ale lépe ze 6. Tj. 1-2 měsíce, dle užití 6denní nebo 12denní periody snímání.

Detailní specifikaci služeb provede poskytovatel služby na základě zadání požadavků od zadavatele a vyhodnocení technických a finančních limitů.

3.2 VSTUPNÍ INFORMACE PRO VYHODNOCENÍ

3.2.1 Technické požadavky zadavatele

Pro vypracování návrhu služby, technické a finanční nabídky je třeba vycházet z požadavků a příslušných kritérií definovaných v zadávací dokumentaci zakázky. Rozsah uvedených kritérií samozřejmě musí respektovat limity dané např. povinnou mlčenlivostí na straně zadavatele.

Kód	Požadavek / parametr	Poznámka	Cíl. Služba
P1	Vymezení objektu	Kód, název - pro jednoznačnou identifikaci v systému BMS	S1+S2
P2	Vymezení požadovaného rozsahu sledování	Celý most, část, stavební části, objekty v okolí	S1+S2
P3	Požadavek na službu zpětného vyhodnocení	NE / ANO -> parametry služby	S1
P3.1	Délka		
P4	Požadavek na dlouhodobý monitoring	NE / ANO -> parametry služby	S2
P4.1	Délka		
P4.2	Frekvence vyhodnocení	Požadavek z hlediska zadavatele	
P5	Provedené stavební úpravy	NE / ANO -> parametry	S1+S2
P5.1	Typ		
P5.2	Rozsah		
P5.3	Termín(y) - délka		
P6	Plánované stavební úpravy	NE / ANO -> parametry	S2
P6.1	Typ		
P6.2	Rozsah		
P6.3	Termín(y) - délka		
P7	Sledovaný trvalý pohyb	Je-li známý a nepodléhá utajení -> parametry	S1+S2
P7.1	Směr pohybu	Předpokládaný / požadovaný směr detekce	
P7.2	Rozsah		
P7.3	Rychlost		
P7.4	Charakter a dynamika (trend)	Lineární / nelineární průběh v čase	
P7.5	Začátek		
P8	Geodetická či geotechnická měření	K dispozici? NE / ANO -> parametry	S1+S2
P8.1	Typ		
P8.2	Sledovaný směr		
P8.3	Zahájení		
P8.4	Frekvence		
P9	Požadavky na formu výstupů	Mapy, report, on-line služba, typ informace (rychlost, průběh pohybu)	S1+S2
P10	Majitel mostu, správce dokumentace (mostní list)	Kontakt, je-li k dispozici	S1+S2
P12	Měření teploty na čidlech	Svolení k přístupu a využití dat z JSDI	S1+S2
P11	Maximální nabídkovou cenu		S1+S2

Tabulka 2 Definice požadavků zadavatele pro zadávací dokumentaci zakázky InSAR

V případě, že některé informace nejsou známy, podléhají utajení nebo mlčenlivosti, je při technickém návrhu služby možné vyjít z **minimálního vymezení nutných požadavků v rozsahu P1-P6** s vědomím možných dopadů na kvalitu služby a spolehlivost výstupů

3.2.2 Technické parametry mostního objektu

Pro identifikaci klíčových limitů a vyhodnocení proveditelnosti je dále nutné zvážit kritéria, která souvisí s druhem, typem, parametry, konstrukcí a okolím mostního objektu určeného ke sledování pomocí InSAR.

Příslušné parametry lze získat pro jednoznačně definovaný most na základě požadavků zadavatele v on-line aplikaci Bridge Management System (BMS) provozované firmou VARS na adrese <http://bms.vars.cz>.

Kód	Parametr	Poznámka	Zdroj
M1	Druh objektu	Druh mostu z hlediska materiálu, dopravy, přemostění	BMS
M1.1	Typ objektu	Typ mostu z hlediska statického systému	BMS
M1.2	Počet těles		BMS
M1.3	Šířka tělesa		BMS
M1.4	Délka přemostění		BMS
M1.5	Azimut orientace osy tělesa	V případě půdorysného zakřivení zakres z GIS v místě polohy podpěr	BMS, GIS
M1.6	Výška nivelety nad terénem		BMS
M1.7	Výška tělesa náspu		BMS
M2	Nosná konstrukce		BMS
M2.1	Popis		BMS
M2.2	Počet a rozpětí polí		BMS
M2.3	Úložná výška		BMS
M2.4	Dilatační závěry	Zákras umístění	BMS
M2.5	Ložiska	Typ a zákras umístění	BMS
M2.6	Materiál	Mostního svršku, třída betonu říms	BMS - M4
M2.7	Mostní vybavení na mostním svršku	Poloha, typ, materiál	BMS, GIS, rekognoskace
M3	Spodní stavba		
M3.1	Podpěry	Počet a zákras umístění	BMS - M4
M3.2	Konstrukční výška a tvar podpěr		BMS - M4
M3.3	Přesah NK od boku podpěry		BMS - M4
M3.4	Materiál	Podpěr, opěr, plentovacích zídek	BMS - M4
M4	Výkresy		BMS
M4.1	Půdorys		BMS
M4.2	Podélný řez	Osou spodní stavby	BMS
M4.3	Příčný řez	V místě podpěry	BMS
M5	Náspy		GIS, rekognoskace
M5.1	Délka		GIS, rekognoskace
M5.2	Výška		GIS, rekognoskace
M5.3	Sklon		GIS, rekognoskace
M5.4	Povrch		GIS, rekognoskace
M6	Okolí		GIS, rekognoskace
M6.1	Přemostěné vodní toky a plochy	Zákras polohy	GIS, rekognoskace
M6.2	Zastínění	Zákras polohy budov, stožárů, stromů, sloupů el. vedení	GIS, rekognoskace
M6.3	Přemostěné komunikace	Zákras polohy silnic, cest, železnice	GIS, rekognoskace
M6.4	Přemostěné produktovody	Zákras polohy a vedení linie teplovodů, plynovodů, parovodů	GIS, rekognoskace
M6.5	Elektrické vedení	Zákras polohy a vedení linie vedení	GIS, rekognoskace

Tabulka 3 Definice technických parametrů mostu k vyhodnocení technické proveditelnosti spolu s požadavky zadavatele

3.2.3 Doplnkové parametry – měření meteorologických parametrů

Pro analýzu InSAR objektů, které jsou kromě trvalých pohybů předmětem tepelných pohybů, je doporučeno získat doplňkové meteorologické parametry, především z měření teplot vzduchu z co možná nejbližší meteorologické stanice nebo dostupných teplotních čidel.

Kód	Parametr	Poznámka	Zdroj
T1	Meteorologické parametry		
T1.1	Teplota vzduchu	Hodnoty z kontinuálního měření	JSDI, CHMU
T1.2	Teplota vozovky	Hodnoty z kontinuálního měření	JSDI
T1.3	Doba slunečního svitu	Hodnota pro den	CHMU
T1.4	Atmosférické srážky	Typ a sloupec	CHMU

Tabulka 4 Definice doplňkových meteorologických parametrů

3.2.4 Parametry družicového senzoru Sentinel-1

V následující tabulce jsou uvedeny parametry snímků z konstelace družic Sentinel-1a a Sentinel-1b relevantní pro vyhodnocení limitů a technické proveditelnosti.

Kód	Parametr	Hodnota
D1	Vlnová délka	5.55 cm (C-band)
D2	Perioda pořizování dat (<i>frekvence</i>)	S1a: 12 dnů / S1a+b: 6 dnů
D3	Rozlišení	
D3.1	Rozlišení ve směru letu (<i>azimut</i>)	20 m (přibližně, proměnné)
D3.3	Rozlišení kolmo na směr letu (<i>range</i>)	5 m (přibližně, proměnné)
D4	Směr pohledu (<i>Line-of-sight, LOS</i>)	
D4.1	Režim snímání	IWS (TOPS, 3 pásy / dráhu)
	Incidenční úhel pro jednotlivé pásy	29-37° (IW1) / 34-42° (IW2) / 40-46° (IW3)
	Počet drah na lokalitu	2-4: 1-2 stoupající (<i>ascending, ASC</i>), 1-2 klesající (<i>descending, DESC</i>)
D4.2	Dráha (<i>Track</i>)	ASC: snímání ve směru od západu na východ, cca 17:00 UTC DESC: snímání ve směru od východu na západ, cca 5:00 UTC
D5	Archív dat	S-1a: od října 2014 / března 2015 do současnosti (12denní perioda) S-1a+b: od října 2016 (6denní perioda) kontinuita konstelace Sentinel a pořizování dat zajištěna na příštích 10 let
D6	Dostupnost a cena dat	zdarma (pro registrované evropské uživatele na ESA Sentinel Hubu)

Tabulka 5 Specifikace parametrů dat Sentinel-1 snímaných v módu IWS

Kombinace hodnot incidenčního úhlu a azimutu snímání udává směr snímání – LOS. LOS závisí na poloze družice a poloze sledovaného objektu ve snímku až na extrémně výjimečné případy není totožný se směrem trvalého pohybu. Je možné ho zjistit z metadat snímku ve specializovaném softwaru na zpracování dat InSAR. V případě návrhu sledování jiným senzorem dodavatel doplní potřebné parametry obdobným způsobem (pro archivní nebo nově pořizovaná data).

3.2.5 Nabídka služby

Dodavatel služby provede vyhodnocení proveditelnosti služeb v rozsahu, který umožňují dodané požadavky a dostupné informace o mostě dle definice v Tabulkách 2, 3 a 4 a parametry senzoru dle Tabulky 5. Technická část nabídky bude obsahovat následující sekce:

- Identifikace a diskuse klíčových limitů
 - vyplývajících z podstaty metod InSAR
 - vyplývajících z konstrukce, charakteristik (výška, šířka, orientace) a údržby mostu
- Návrh družicových dat
 - senzor
 - rozlišení
 - počet drah a geometrie snímání
 - frekvence snímání
- Parametry služby
 - Specifikace
 - Frekvence vyhodnocení (S2)
 - Specifikace výstupů
- Návrh validace

Instalace a detekce pohybů pomocí trvalých koutových odražečů v rámci služby InSAR musí být zváženy jak s ohledem na potenciální přínosy, tak finanční aspekty a limity. Návrh jejich použití nebo vyloučení jejich využití proto musí být v nabídce řádně zdůvodněn v rámci specifikace.

3.3 IDENTIFIKACE KLÍČOVÝCH LIMITŮ

3.3.1 Obecné technické limity metody InSAR

Obecné limity jsou determinované fyzikálním principem snímání a metody detekce trvalých pohybů pomocí InSAR. Podrobný výčet všech limitů je prezentován a diskutován v metodice z projektu TB0100MD021 (2014). Následující tabulka uvádí stručný přehled nejpodstatnějších limitů relevantních pro sledování mostů pomocí InSAR.

Omezení	Popis	Kód parametru	Kapitola
Rozlišení dat	Ovlivňuje velikost detekovatelného objektu a hustotu PS bodů ve výsledku analýzy a přesnost georeference	P2, 7.2, M1.2, 1.3, 1.4, D3	3.4.3
Počet snímků	Se zvětšujícím se počtem snímků vzrůstá stabilita a přesnost dosažených výsledků	P3.1, 4.1, 5.3, 6.3, 7.5, D2, D5	3.1
Délka sledování	Souvisí s počtem snímků, u mostů s dilatující konstrukcí minimálně 18 měsíců	P3.1, 4.1, 5.3, 6.3, 7.3, 7.5, D5	3.4.3
Frekvence snímání	Musí být dostatečná k zachycení trendu trvalého pohybu	P7.3, M2, D2	3.1, 3.4.3
Směr detekce	Detekce projevu pohybu probíhá pouze ve směru snímání LOS, odkud sledovaný objekt nesmí být zastíněn. Do reálného směru pohybu je rychlost nutné přepočítat	P7.1, M2, 1.5, D4	3.4.3, 3.4.4

	na základě apriorní znalosti reálného směru a citlivosti ve směrech komponent 3D pohybu, nebo lze směr odhadnout při rozkladu výsledků z více drah		
Koherence	PS body se detekují pouze na površích se stabilními odrazivými vlastnostmi.	M1.1, 2.6, 2.7, 5.4	3.4.3, 5.1.1
Vlnová délka	Ovlivňuje maximální detekovatelnou rychlost pohybu mezi dvěma sousedními body a observacemi. Pro Sentinel-1 činí maximální rozdíl polohy v LOS 1,4 cm za 6 dnů, což je hodnota rychlosti řádově přesahující běžné (nekatastrofické) trvalé pohyby konstrukce.	D1	TB0100MD021 (2014)
Rychlost pohybu	Hodnota rychlosti musí být z rozsahu 1-2 mm - 42 cm / rok	P7.3	TB0100MD021 (2014)
Trend pohybu	Pro spolehlivé určení rychlosti by měl být lineární. V dostatečně dlouhé a husté řadě měření lze pomocí metody monitorovat i průběh nelineárních pohybů.	P7.4	5.1
Referenční bod	Metoda je relativní, výsledky jsou spočítány vzhledem k referenčnímu bodu s předpokládanými nulovými pohyby	P2	3.4.3, 5.1.1

Tabulka 6 Obecné limity

3.3.2 Limity z hlediska vlastností a konstrukce mostu

Dalšími limitujícími faktory jsou vlastnosti mostu – z hlediska požadavků na místo měření, geometrické uspořádání měření vzhledem k orientaci mostu a předpokládaných směrů trvalých pohybů, a v neposlední řadě konstrukční charakteristiky, které determinují charakter vratných pohybů vlivem teploty.

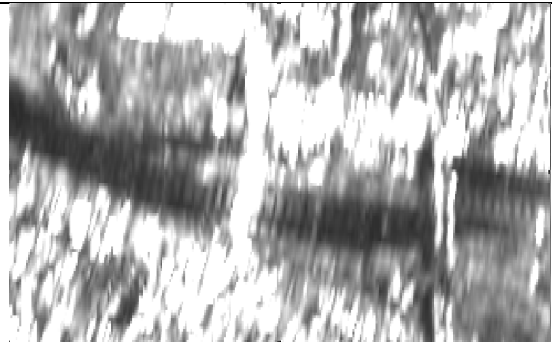
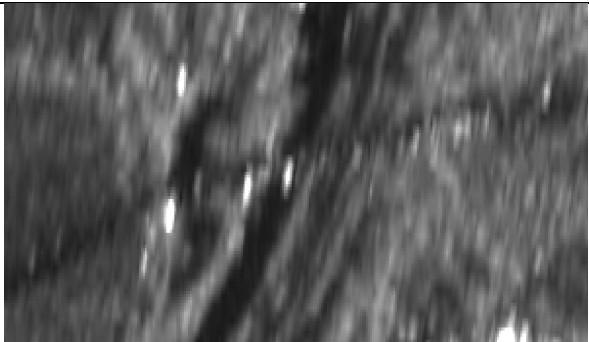
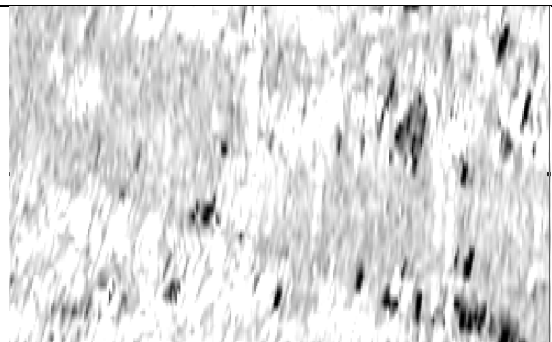
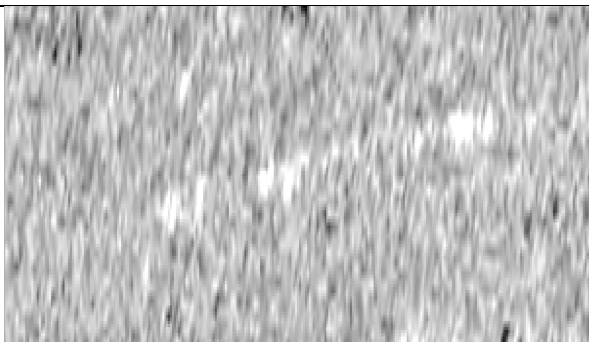
Omezení	Popis	Kód parametru	Kapitola
Požadované místo sledování	Princip snímání a odrazu radarového signálu umožňuje sledovat bez TKO prakticky výhradně pohyby horní stavby projevující se změnou polohy mostního svršku. Nosná konstrukce je ale předmětem komplexních rušivých tepelných pohybů, které znesnadňují nebo znemožňují detekci trvalých pohybů. Trvalé pohyby spodní stavby je možné spolehlivě sledovat pouze s využitím TKO.	P2, M1.2, 1.3	3.4.3 3.4.4
Orientace	Orientace mostu vzhledem k LOS je zásadním faktorem s vlivem na další omezení. Určité orientace umožňují lépe detekovat některé směry pohybů, jiné jsou naopak citlivější na převládající směr dilatace a složitější na detekci trvalých pohybů.	M1.5, 2.7	3.4.3 3.4.4
Typ a způsob uložení nosné konstrukce	Tyto parametry mají zásadní vliv na charakter a průběh dilatace vlivem teploty. Dilatační pohyby znesnadňují nebo znemožňují detekci trvalých pohybů.	M2.1-M2.5	3.4.3 3.4.4
Výška podpěr	U vysokých podpěr (např. vysoký pilíř) je nutné zohlednit jejich dilataci. Dále u vysokých mostů je vyšší riziko radarových artefaktů daných výškou a rušivých odrazů od podpěr.	M3.1, 3.2	3.4.3 3.4.4
Příslušenství	Díky instalovanému příslušenství je možné sledovat nejen pohyby mostů, ale i dalších objektů infrastruktury: obecně silnice, nájezdy, sjezdy a v neposlední řadě i vlastního příslušenství (např. protihlukové stěny), jehož pohyby mohou indikovat pohyby a nestabilitu podloží. Materiál, struktura a orientace příslušenství ale může zásadně měnit geometrii odrazu a znesnadňovat interpretaci reálného směru trvalého pohybu ve 3D.	M2.6, 2.7, M1.5	3.4.4
Dopravní zatížení	Má vliv na dilataci, vibrace a kmitání nosné konstrukce, které mohou znesnadňovat detekci trvalých pohybů.		3.3.3

3.4 VYHODNOCENÍ TECHNICKÉ PROVEDITELNOSTI

3.4.1 Příprava

Aby bylo možné provést komplexní vyhodnocení proveditelnosti, je před jejím zahájením dodavateli služby doporučeno pro zvažované tracky pokrývající zájmový objekt provést pokusné zpracování alespoň 20 snímků (časově pokrývající různé roční období) a vygenerovat pro malé území okolo objektu:

- **MREF: Mapu reflektivity [dB]** – primární ukazatel k zjištění sledovatelnosti pomocí průměrné odrazivosti objektu a jeho okolí. Průměrnou hodnotu intenzity použitých snímků je třeba radiometricky zkalibrovat; pro srovnání odrazivosti TKO s touto hodnotou je třeba navíc navrženou odrazivost TKO kalibrovat pro dané rozlišení.
- **MIAS: Mapu indexu amplitudové stability** – doplňkový ukazatel k zjištění sledovatelnosti pomocí kolísání (variability) odrazivosti objektu a jeho okolí. Amplitudová stabilita je dána jako doplněk poměru směrodatné odchylky amplitudy a její střední hodnoty do jednotky.
- **DPSB: Detekci PS bodů** – sekundární ukazatel k vyhodnocení hustoty detekovaných bodů a jejich koherence, rychlé identifikaci vícenásobných odrazů a odhadu rozlišitelnosti PS bodů podle zdroje odrazu (z horní stavby vs. vícenásobné odrazy od povrchu a spodní stavby či boku horní stavby). Je třeba provést kompletní InSAR zpracování časové řady snímků, ale není třeba body interpretovat a filtrovat.

Most 125-034 Kolin. DESC dráha	Most D1-444 Ostrava. DESC dráha
	
	



Obrázek 1 Ukázka MREF, MIAS, DPSB před filtrací pro most orientovaný přibližně kolmo (Kolín - most vpravo) a přibližně paralelně (Ostrava) na LOS.

PS nebyly filtrovány dle koherence, pouze vybrány dle lokálního maxima odrazivosti. V obou případech relativně nízká hustota PS bodů detekovaných na mostě, ale s vysokou koherencí.

3.4.2 Kategorizace sledovatelnosti

Následující tabulka uvádí kategorie mostů (resp. obecně objektů infrastruktury) s ohledem na jejich sledovatelnost s a bez instalace TKO. Detaily vyhodnocení jsou uvedeny v další kapitole.

Kategorie sledovatelnosti	Mosty
NELZE SLEDOVAT	Zastíněné ve směru LOS (analogicky, nelze sledovat s TKO zastíněná místa)
	Nerozeznatelné v průměrovaném snímku MREF (odraz od mostu je zašuměn odrazem od okolí - týká se jen úzkých/krátkých mostů)
	S trvalým pohybem ve směru S-J
	Bez referenčního PS bodu
LZE SLEDOVAT S OMEZENÍM	S referenčním bodem PS zvoleným přímo na mostě (výsledky budou relativní)
	S výrazně nelineárním projevem dilatace v závislosti na teplotě (nutná modelace dilatace)
LZE SLEDOVAT (BEZ TKO)	S referenčním bodem realizovaným mimo most pomocí TKO
	S vysokou odrazivostí oproti okolí v MREF (pokud se odrazný prvek, svodidlo, zábradlí atd. pohybuje spolu s mostem)
	S nízkou odrazivostí a dobře rozeznatelné oproti okolí v MREF, nebo v případě mostů dostatečně širokých/dlouhých v SAR souřadnicích
	Obecně pohyby projevující se na horní stavbě
LZE SLEDOVAT S TKO	Nerozeznatelné v MREF kvůli nízké odrazivosti nebo malé velikosti
	Nevhodné orientace vzhledem k detekci dostatečné hustoty PS bodů (vhodným natočením hlavy instalovaného TKO)
	Pohyby projevující se na spodní stavbě (pokud TKO není zastíněn nebo rušen odrazem od horní stavby)
SPORNÉ PŘÍPADY	S velmi vysokou odrazivostí - složitá kovová konstrukce: lze sledovat, koherence vysoká, ale není jasné, odkud je odraz - s horní mostovkou - s dolní mostovkou zavěšenou nebo visutou

Tabulka 7 Kategorizace mostů dle sledovatelnosti pomocí InSAR

3.4.3 Vyhodnocení sledovatelnosti bez TKO

V každé z následujících tabulek je uveden krok vyhodnocení kritérií ze strany dodavatele služby. Pořadí kroků je (přibližně) dáno uvedeným pořadí tabulek v kapitole.

Časové vymezení jevu – minimální délka sledování	
Doba od dokončení stavby - VČ. osazení příslušenství a dokončení povrchu vozovky - Pokud probíhá konsolidační pohyb, bude se mísit s případnými nežádoucími trvalými pohyby	→ Vyhodnocení dostatečně dlouhé časové řada snímků - Časovou řadu sledování bez TKO lze začít až po skončení úprav - S TKO pouze za předpokladu relativně nízké odrazivosti po osazení příslušenství
Proběhly stavební úpravy snižující koherenci? - výměna povrchu (frézování) – obecně změna výšky - výměna svodidel - osazení svodidel / protihlukových zdí	→ Vyhodnocení dostatečně dlouhé časové řada snímků - Časovou řadu sledování začít až po skončení úprav nebo na základě znalosti o termínech úprav lze sledované období zpracovat po částech (vyžaduje dostatek snímků) → Vyhodnocení DPSB: koherence a hustota PS - stavební úpravy se obvykle projeví nízkou koherencí a hustotou použitelných PS bodů
Rektifikace výšky uložení NK – nelineární pohyb (snižuje koherenci) - obvykle v případě sedání většího než 10 mm	→ Vyhodnocení DPSB: koherence, hustota a průběh časové řady PS
Rychlost jevu (je-li známá) a požadavek na rychlost varování v případě změny trendu	→ 6 – 12 denní interval je dostatečný pro vyhodnocení jevů o rychlostech v řádu mm – desítek mm / rok

Požadované prostorové vymezení sledování / vymezení části konstrukce, kde se jev projevuje	
Spodní stavba – až na výjimky není z S-1 sledovatelná bez TKO	→ Vyhodnocení proveditelnosti pomocí TKO
Horní stavba - bývá sledovatelná z S-1 u většiny velkých mostů, u malých mostů sledovatelnost problematická	→ Vyhodnocení pomocí MREF, MIAS, DPSB: koherence a hustota PS
- Komplexní rozsah pohybů horní stavby: trvalé pohyby se mísí s teplotními pohyby	→ Vyhodnocení orientace mostu a pohybu → Vyhodnocení konstrukčních dopadů

Šířka a délka mostu	
Sledovatelnost závisí na šířce mostu a jeho orientaci vzhledem k dráze družice. - Pro vyhodnocení šířky vezmeme <i>minimum</i> z hodnot d_{ran}, d_{az}, l_{ran}, l_{az} - Pro vyhodnocení délky vezmeme <i>maximum</i> z uvedených hodnot - Pro mosty orientované paralelně (nebo téměř paralelně) se směrem LOS ve vzorci vynecháme dělení cosinem a sinem	Indikátor pro apriorní odhad rozeznatelnosti ve směru přepočtený do směru <i>range</i> a <i>azimut</i> [px]: $d_{ran} = d / \cos \alpha / res_{ran}$ $d_{az} = d / \sin \alpha / res_{az}$ $l_{ran} = l / \cos \alpha / res_{ran}$ $l_{az} = l / \sin \alpha / res_{az}$ <i>l, d</i> délka a šířka mostu (m) <i>res</i> rozlišení v range resp. azimut (m) <i>α</i> úhel mezi směrem letu družice a orientací mostu
LZE sledovat mosty, pokud - šířka a délka nad 2px	Mosty OBECNĚ sledovatelné → Ověřit odrazivost / rozeznatelnost v MREF
LZE s OMEZENÍM SLEDOVAT Malé / úzké mosty - šířka pod 1px	→ Ověřit odrazivost / rozeznatelnost v MREF - Je-li nízká: NELZE SLEDOVAT BEZ TKO → Vyhodnocení proveditelnosti pomocí TKO
Most se 2 tělesy (typický dálniční most) - Tělesa LZE sledovat samostatně u širokého mostu orientovaného kolmo na LOS - Tělesa NELZE sledovat samostatně u výrazně jinak orientovaného mostu (odrazy se mísí)	→ Ověřit rozeznatelnost 2 těles v MREF → Ověřit hustotu PS bodů v DPSB → Vyhodnotit orientaci mostu

Zastínění	
NELZE sledovat z dané dráhy (ani s TKO) - Je-li objekt celý zastíněný - Zastíněné části objektu	→ Vykreslení stínících objektů v GIS: - Terén - Budovy - Stožáry - El. vedení - Stromy / les / vegetace → Kontrola zastínění objektu mostu ve směru LOS ve všech dostupných drahách pomocí - ortofota - digitálního modelu terénu (DEM) - 3D vizualizace (např. v Google Earth)

Konstrukční charakteristiky s dopadem na dilataci	
NELZE spolehlivě sledovat malý podíl mostů s velmi netypickým projevem teplotních pohybů v čase - složitý odhad nerovnoměrného prostorového projevu teplotních pohybů, obvykle probíhající ve více směrech - s nepravidelným / prudkým efektem na působení rovnoměrné složky teploty, které neodpovídá klasickým konvencím a v důsledku se perioda projevu zásadně nekryje s periodou snímání InSAR	→ Vyhodnocení v součinnosti s projektantem mostních a inženýrských konstrukcí
Směr - Je determinován uspořádáním ložisek (jsou-li použity) nebo statickým působením konstrukce - Převládá pohyb v podélné ose mostu od rovnoměrné složky teploty vzhledem k referenční teplotě, při které byla konstrukce osazena na ložiska Svislý směr - Pohyb NK ve svislém směru přítomný v případě působení nerovnoměrné či lineárně proměnné složky teploty - Pohyb NK ve svislém směru vlivem rovnoměrné složky teploty jako sekundární projev v případě některých typů uložení - Do 0,5 ‰ rozpětí (max dle normy) v závislosti na uložení, vetknutí - Dále pohyb ve svislém směru vlivem dilatace vysokých podpěr (do 1 ‰ délky) - Maximální průhyb dle ČSN EN – celkový (vlivem dopr. zatížení) dle rozpětí pole (L): - o Lávky: L/250 (200) - o Silniční mosty: L/500(400) - o Železniční mosty: L/600 Prostorový projev - Konvexní či konkávní tvar deformace NK ve svislém směru - Vliv dilatace vysokých podpěr - Vliv umístění pevného (pevných) bodu: dilatace jednoho nebo obou konců NK, průhyb Časový projev - Rovnoměrná složka teploty: hod. / dny; dlouhodobé působení (rovnovážný stav, kdy je nízký teplotní gradient a teplota konstrukce je ve svém objemu ideálně stejná) - Nerovnoměrná složka teploty: min./hod.	→ Vyhodnocení v součinnosti s projektantem mostních a inženýrských konstrukcí → Modelování teplotních pohybů (rovnoměrné i nerovnoměrné složky) K eliminaci - vlivů nerovnoměrné složky - možných vlivů dopravy je vhodné preferovat monitoring z DESC drah, které jsou pořizovány v ranních hodinách (5h UTC) za stálých teplotních podmínek → Vyhodnocení orientace mostu

Orientace mostu a směr trvalého pohybu vzhledem k orientaci	
Jedná se o zásadní faktor. Na sledovatelnost horní stavby bez TKO mají provázaný vliv orientace mostu, orientace a charakter teplotních pohybů a směr trvalého pohybu. Je důležité si uvědomit, že většina PS bodů je detekována díky odrazům od příslušenství na mostním svršku, resp. komunikaci: zábradlí, svodidla, koleje, zdi. Při dostatečném počtu detekovaných bodů PS na horní ploše mostu je možné vertikální pohyby sledovat pro jakkoliv orientované mosty.	
Mosty orientované kolmo na směr LOS (přibližně S-J) - vysoká hustota PS bodů v šířce mostu (range): až 5 m rozteč mezi body - nízká hustota PS bodů v podélném směru osy mostu (azimut): min 20 m rozteč mezi body	
LZE sledovat <i>vertikální pohyby</i> - při dostatečné hustotě PS bodů - jsou minimálně ovlivněny průběhem teplotních pohybů ve směru osy mostu	→ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - při nízké hustotě vyhodnotit proveditelnost pomocí TKO: - o na římsách v místech předpokládaných pohybů - o na bocích podpěr / opěr
LZE sledovat <i>3D pohyby (vychýlení, náklon)</i> - nejvyšší citlivost ve směru paralelním s LOS (kolmém na osu mostu) - citlivost klesá se zvyšujícím se úhlem mezi LOS a osou mostu - pohyb ve směru V->Z ideálně z DESC dráhy - pohyb ve směru Z->V ideálně z ASC dráhy	→ Vyhodnocení pokrytí tracky a příslušnými pásy: - v IW3 lepší citlivost pro detekci vodorovných pohybů, horší citlivost pro detekci vertikálních pohybů než IW1 - a naopak → Vyhodnocení okolí: přítomnost vodní hladiny - pravděpodobné dvoj- a troj- násobné odrazy, potenciálně problematické pokud hladina kolísá pouze o jednotky cm
NELZE sledovat <i>3D pohyby kolmé na LOS</i> (tedy přibližně ve směru S-J) a v blízkých směrech - díky tomu je i nízká citlivost na pohyby vlivem teploty v tomto směru – výhoda pro sledování svislých trvalých pohybů	NELZE SLEDOVAT
Mosty orientované paralelně na směr LOS (přibližně V-Z) - vyšší hustota PS bodů v podélném směru osy mostu (azimut): až 5 m rozteč mezi body - nízká hustota PS bodů v šířce mostu (range): min 20 m rozteč mezi body	
LZE sledovat <i>vertikální pohyby</i> - při dostatečné hustotě PS bodů - velmi ovlivněny teplotními pohyby ve směru osy mostu	→ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - při nízké hustotě vyhodnotit proveditelnost pomocí TKO na římsách v místech předpokládaných pohybů → Vyhodnocení vlivu tepelných pohybů - při krátké době sledování (do 18 měs) se doporučuje MODELOVAT teplotní pohyby, doporučuje se maximálně prodloužit dobu sledování
NELZE sledovat <i>3D pohyby (vychýlení, náklon)</i> - ve směru kolmém na LOS	NELZE SLEDOVAT
LZE s omezením sledovat <i>3D pohyby paralelní s LOS</i> - při dostatečné hustotě PS bodů - splývají s teplotními pohyby ve směru osy mostu	→ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - tepelné pohyby jsou odhadnuty vyrovnáním na základě měřených teplot
Mosty orientované v jiném směru na LOS	
LZE sledovat <i>vertikální pohyby</i> - při dostatečné hustotě PS bodů	→ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - při nízké hustotě vyhodnotit proveditelnost pomocí TKO: - o na římsách v místech předpokládaných pohybů - o na bocích podpěr / opěr
Sledovatelnost se zvyšuje / snižuje pro jednotlivé směry pohybů analogicky se změnou orientace od směru kolmého po paralelní na LOS	Citlivost klesá s funkcí rozdílů mezi azimutem pohybu v horizontálním směru a LOS. $senz \sim \cos(\alpha_{HOR} - \alpha_{LOS})$

Odrazivost mostu	
LZE sledovat	→ Vyhodnocení MREF pro všechny dráhy / pásy

- most je identifikovatelný v MREF - intenzita mostu v MREF je vyšší, než má okolí; odrazy od: - o svodidel, zábradlí, protihlukové zdi, koleje - o vícenásobná odrazy (tyto body nelze interpretovat) - intenzita mostu je homogenně nižší, než má okolí (jeví se jako souvislá černá čára) - o vozovka má nízkou odrazivost ale koherentní signál	- intenzita odrazu může být pro každou dráhu jiná v závislosti na rozdílné geometrii odrazu a umístění příslušenství ➔ Vyhodnocení DPSB: koherence a hustota PS
NELZE jednoznačně určit (SPORNÉ PŘÍPADY)	
Most s intenzitou v MREF podobnou jako okolí - nelze rozeznat okem ani dle hodnot - u malých mostů nelze jednoznačně přiřadit PS bod k mostu	➔ Vyhodnocení MREF pro všechny dráhy / pásy ➔ Ověřit detekci PS bodů pomocí DPSB + ➔ + Vyhodnocení zastínění - u malých mostů nutná rekognoskace na místě - <i>Nezastíněn a detekován(y) PS body?</i> LZE sledovat, ověření až na dlouhodobé časové řadě - <i>Nezastíněn a PS body nedetekován(y)?</i> ➔ Vyhodnocení proveditelnosti pomocí TKO
Most s velmi vysokou intenzitou v MREF (> 5 dB) - složitější kovové konstrukce nad mostovkou, kde dochází k vícenásobným odrazům, které se mohou výrazně lišit v závislosti na malé změně inc. úhlu - PS body sice mají vysokou koherenci, ale problematické je především jejich přesná geolokace, interpretace a rozlišení různých míst na mostě (u orientace kolmé na LOS) - detekovaná šířka je obvykle výrazně větší než šířka reálná - vyvinutí metod na sledování těchto mostů vyžaduje další výzkum	NELZE sledovat pomocí TKO

Určení směru a rychlosti pohybu bez jeho apriorní znalosti

Pro odhadnutí neznámého směru pohybu v rámci limitů daných citlivostí vůči pohybům v daných směrech vzhledem k LOS: - je nutné zkombinovat odhadnuté rychlosti pohybu alespoň ze dvou protilehlých drah (nevyhodnocuje se pohyb v S-J směru)	➔ Vyhodnocení citlivosti v jednotlivých směrech (vzorec uveden v kap. 5.3.2) - k vyhodnocení s ohledem na orientaci mostu ➔ Vyhodnocení MREF pro všechny dráhy ➔ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence PS pro všechny dráhy - hustota koherentních bodů by měla být co nejvyšší v co nejvíce drahách
---	--

Výběr referenčního bodu

Pro zpětnou (retrospektivní) analýzu (služba S1) - je třeba najít referenční bod v mapě PS bodů - v blízkosti mostu - musí být stabilní - musí mít vysokou koherenci (ideálně > 0.95)	➔ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - v případě nenalezení vhodného bodu lze vzít jako referenci i průměr ze stabilní oblasti
Pro analýzu v rámci budoucího monitoringu (služba S2) - je třeba najít referenční bod v mapě PS bodů - nebo ho nainstalovat v okruhu do 2 km od sledovaného objektu	➔ Vyhodnocení pomocí DPSB: hustota a koherence - v případě nenalezení vhodného bodu lze vzít jako referenci i průměr ze stabilní oblasti ➔ Vyhodnocení vhodných ploch či objektů pro instalaci TKO jako ref. PS odražeče - rovné a málo odrazivé - konsolidované - ohrazené (zabezpečené) - upevněné v nezámrzné hloubce, je-li to relevantní

3.4.4 Vyhodnocení sledovatelnosti s TKO

Výkresy TKO a způsobu ukotvení dle designu vyvinutého v rámci projektu TB0400MD003 jsou uvedeny v příloze č. 2. Při vyhodnocení a sledovatelnosti a možnosti instalace je třeba brát v potaz řadu faktorů a kritérií, která jsou uvedena v následujícím textu.

Obecné výhody instalace TKO jsou:

- Instalace na konstrukční prvek spodní stavby umožňuje (s limity) sledovat pohyby spodní stavby
- Umožňuje sledovat body s nízkou odrazivostí, které by bez TKO nebyly pomocí InSAR sledovatelné
- Vyšší fázová stabilita odraženého signálu a tedy vyšší přesnost sledovaného bodu ve srovnání stejného bodu bez TKO

Nevýhody:

- Diskretizace metody, která je z podstaty založená na kontinuálním plošném měření
- Vyrušení fázové homogenity okolních PS bodů – znemožnění pokračování ve sledování těchto bodů
- Omezené možnosti instalace vzhledem ke konstrukci mostu, zastínění a konfliktům
- Riziko krádeže a vandalizmu
- Navýšení nákladů

Viditelnost a orientace	
Vzhledem k možnosti natočení hlavy odražeče v libovolném směru je nezastíněný odražeč instalovaný na boku horní stavby mostu viditelný ze směru z rozsahu 180°.	→ Vyhodnocení zastínění → Vyhodnocení umístění instalace
Pro zvolenou prioritní dráhu je třeba myšlenou osu odražeče zorientovat na LOS dané dráhy. - Směr osy odražeče je uveden v konstrukční dokumentaci - Přesnost orientace je dostatečná v mezích $\pm 5^\circ$ v horizontální a vertikální rovině - Bylo experimentálně prokázáno, že odražeč je viditelný i ze sousední dráhy s rozdílem $LOS_{az} < 2^\circ$ a rozdílem $LOC_{inc} < 10^\circ$	→ Vyhodnocení zastínění v požadovaném směru

Na základě konzultací s UKKR ŘSD a statikem pozemních staveb byly navrženy následující obecné polohy umístění instalace na horní nebo spodní stavbě mostu. Při výběru umístění je třeba zvážit řadu faktorů popsanych v dalších sekcích:

- Projev pohybu na prvku, na které je navrženo umístění TKO
- Intenzita odrazivosti v okolí umístění
- Zastínění
- Konflikty v místech křížení s komunikacemi a produktovody
- Omezení z hlediska kotvení

Umístění instalace TKO s ohledem na konstrukční charakteristiky

Horní stavba

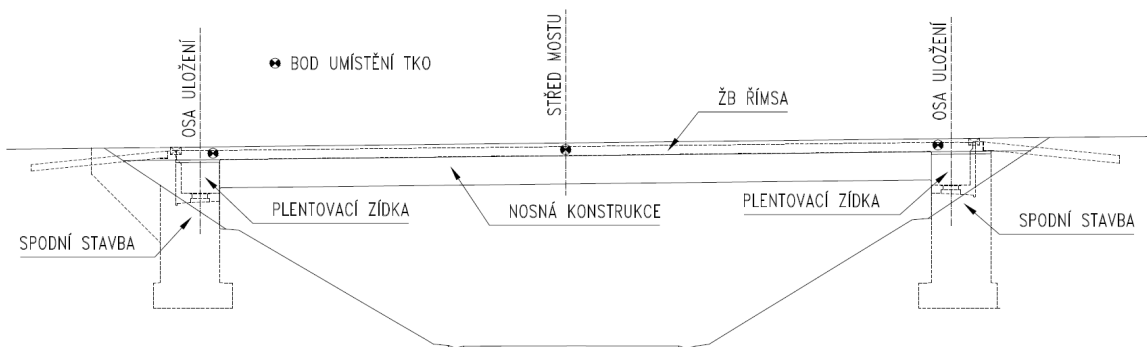
Umístění TKO na ŽB římse v místě podpor (mimo mostní závěry)

- + Vliv dilatace ve vodorovném směru závisí na vzdálenosti od pevného bodu: je-li na podpěře, je minimalizován
- + Středně velká pravděpodobnost krádeže a vandalizmu
- + Nízká pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy a ohrožení bezpečnosti
- V případě prostého uložení polí mohou být závěry v podporách
- Vliv dilatace ve svislém směru je ovlivněn výškou podpěry a současně omezen její tuhostí

Umístění TKO na ŽB římse ve středu NK

- + Nízká pravděpodobnost krádeže a vandalizmu
- Nejvyšší pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy překonávaných komunikací a ohrožení bezpečnosti
- Vliv dilatace ve vodorovném směru závisí na vzdálenosti od pevného bodu: velká vzdálenost a vysoká míra ovlivnění dilatací
- Umístění je nejvíce náchylné na pohyby vlivem dopravního zatížení

Podélný řez

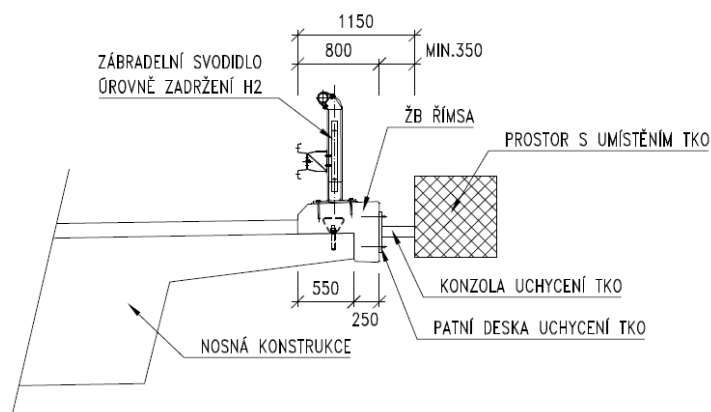


ŽB římse: Minimální šířka Mostní vybavení: Zábradelní svodidlo

- možnost vysoké odrazivosti od svodidla

- Vyhodnocení konstrukčních charakteristik a teplotních pohybů
- Vyhodnocení orientace
- Vyhodnocení odrazivosti z MREF
- Vyhodnocení konfliktů
- Vyhodnocení rizik

Příčný řez

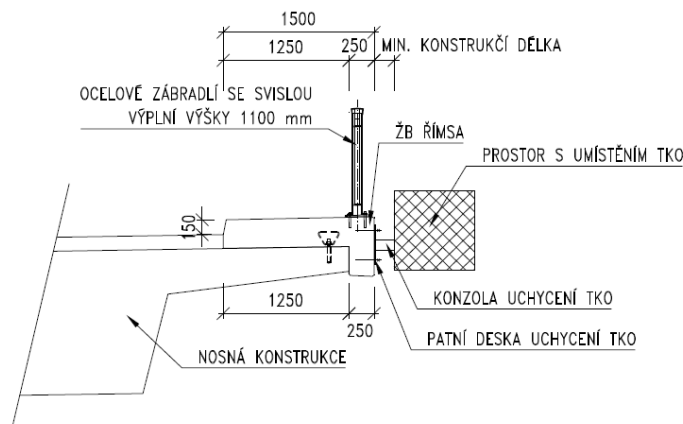


ŽB římse: Chodník Mostní vybavení: Zábradlí

- možnost vysoké odrazivosti od svodidla

- Vyhodnocení konstrukčních charakteristik a teplotních pohybů
- Vyhodnocení orientace
- Vyhodnocení odrazivosti z MREF
- Vyhodnocení konfliktů
- Vyhodnocení rizik

Příčný řez



Spodní stavba – nízké opěry

Umístění na plentovací zídky nebo

- + Nezávislé na komplexních pohybech horní stavby
- + Velmi nízký vliv dilatace podpěry
- + Nízká pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy a ohrožení bezpečnosti
- Relativně větší dostupnost a možnost krádeže a vandalismu

Umístění na úložný práh, případně na stativo pilíře

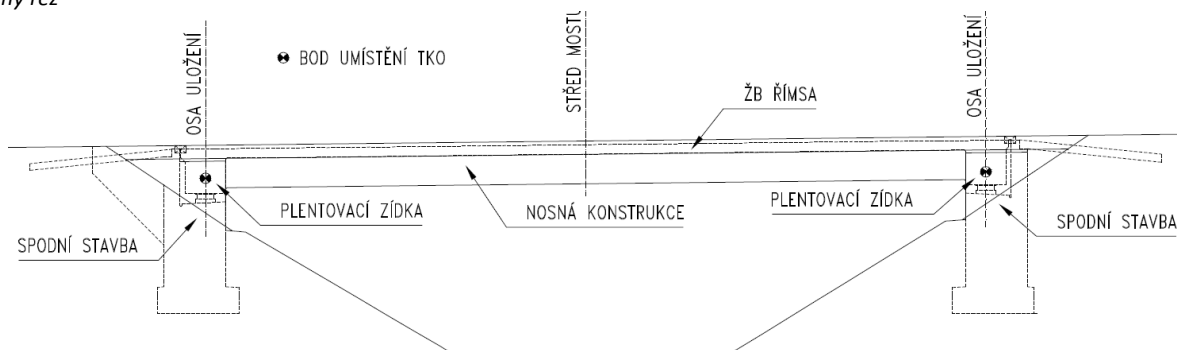
- + Nezávislé na komplexních pohybech horní stavby
- + Nízká pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy a ohrožení bezpečnosti
- Velmi vysoká dostupnost a možnost krádeže a vandalismu

→ Vyhodnocení odrazivosti z MREF

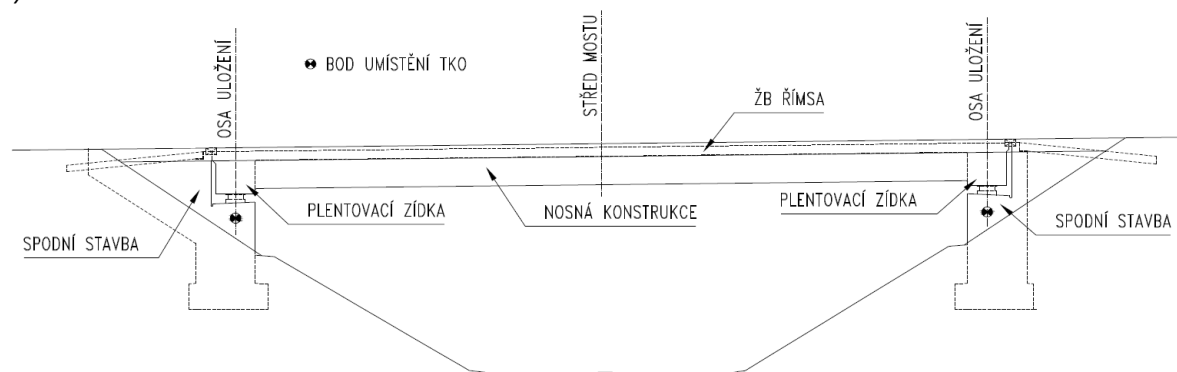
→ Vyhodnocení zastínění

→ Vyhodnocení konfliktů a rizik

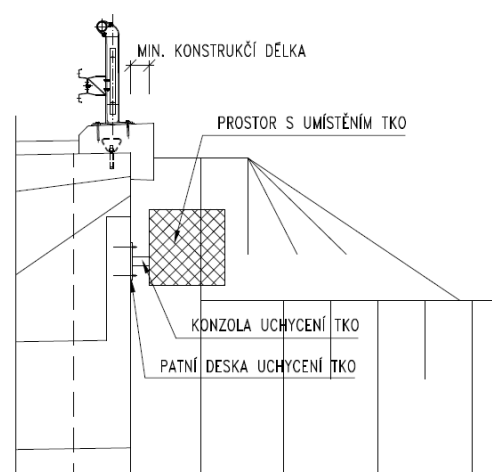
Podélný řez



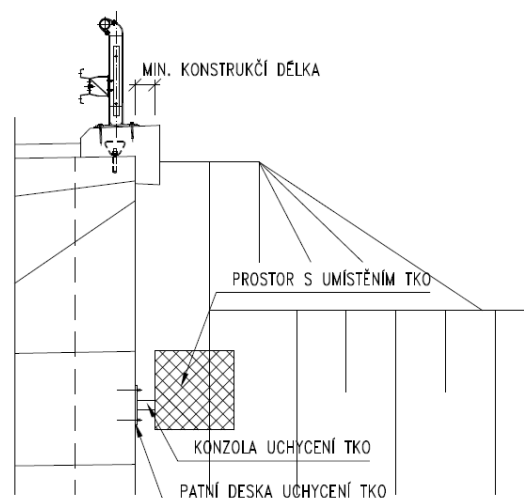
Podélný řez



Příčný řez



Příčný řez



Spodní stavba – vysoké podpěry

Umístění na plentovací zídce

- + Nezávislé na komplexních pohybech horní stavby
- + Nízká pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy a ohrožení bezpečnosti
- + Velmi malá dostupnost a možnost krádeže a vandalizmu
- Velmi špatná dostupnost pro instalaci a servis
- Ovlivněno dilatací dříku vysoké podpěry

Umístění na dříky vysokých podpěr

- + Nezávislé na komplexních pohybech horní stavby
- + Nízká pravděpodobnost konfliktu s ochrannými pásmy a ohrožení bezpečnosti
- + Malá dostupnost a možnost krádeže a vandalizmu
- Špatná dostupnost pro instalaci a servis
- Při variantním umístění do výšky ovlivněno dilatací dříku vysoké podpěry

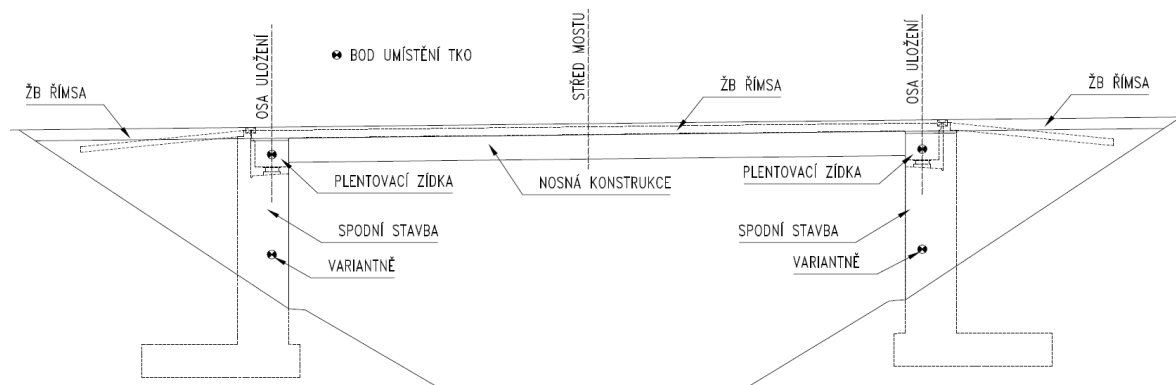
→ Vyhodnocení konstrukčních charakteristik a teplotních pohybů

→ Vyhodnocení odrazivosti z MREF

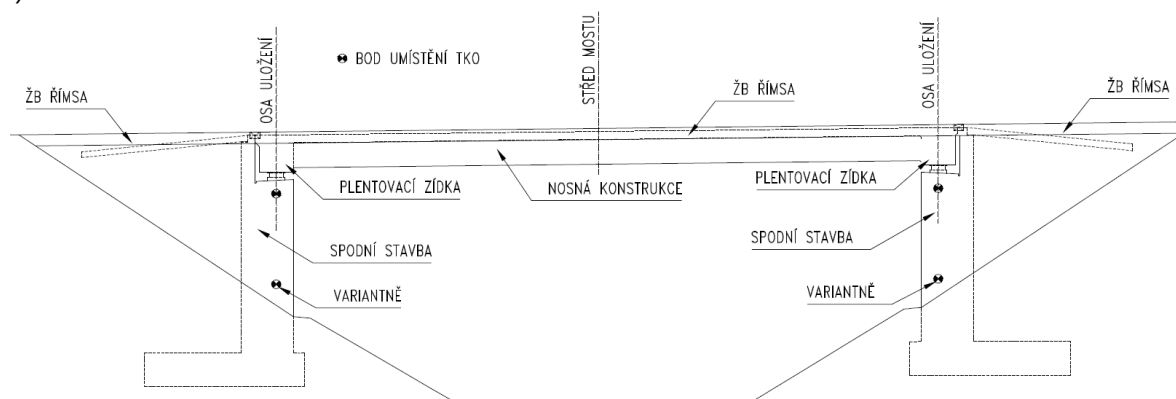
→ Vyhodnocení zastínění

→ Vyhodnocení konfliktů a rizik

Podélný řez



Podélný řez



Intenzita odrazu

NELZE instalovat a sledovat z dané dráhy v místech

- kde je velmi vysoká odrazivost
- kde je velmi rozkolísaná odrazivost
- kde je detekovaná vysoká hustota PS bodů

→ Vyhodnocení pomocí MREF, MIAS, DPSB: hustota PS bodů s velkou koherencí

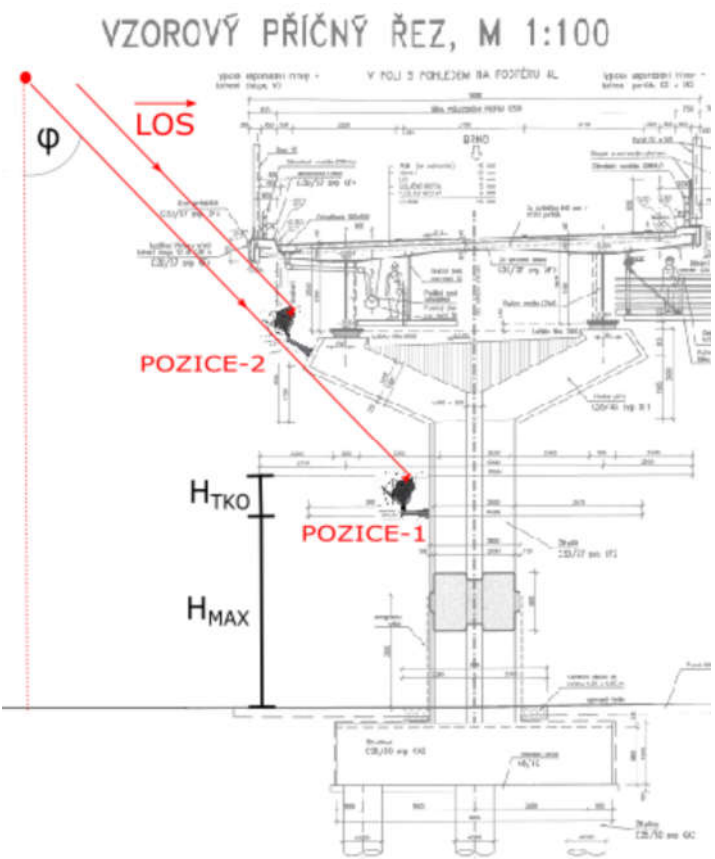
- Minimální rozdíl odrazivosti mezi TKO a okolím je 10 dB, ideální je 15 dB
- TKO je navržen na odrazivost 7-10 dB, proto by maximální odrazivost pixelů v jeho okolí neměla překročit 0 dB

NELZE instalovat odražeče blízko sebe z důvodu vzájemného rušení signálu

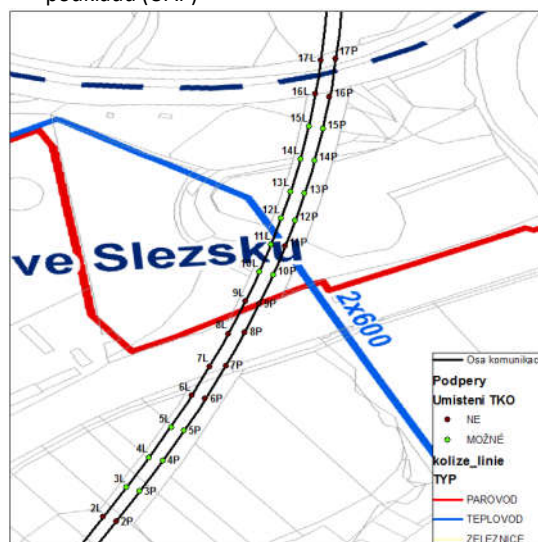
- Platí pro odražeče sledované ze stejné dráhy nebo

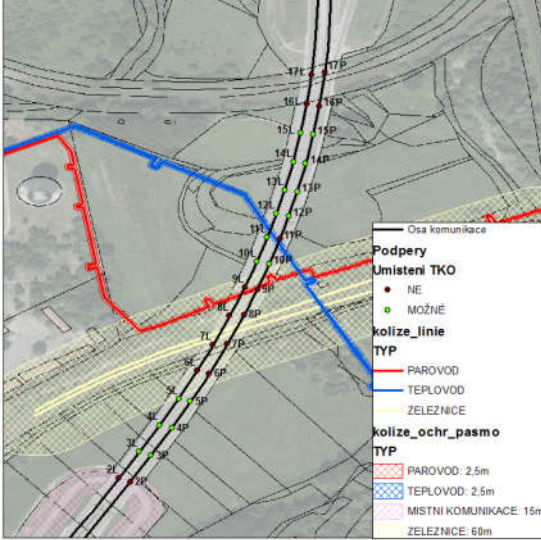
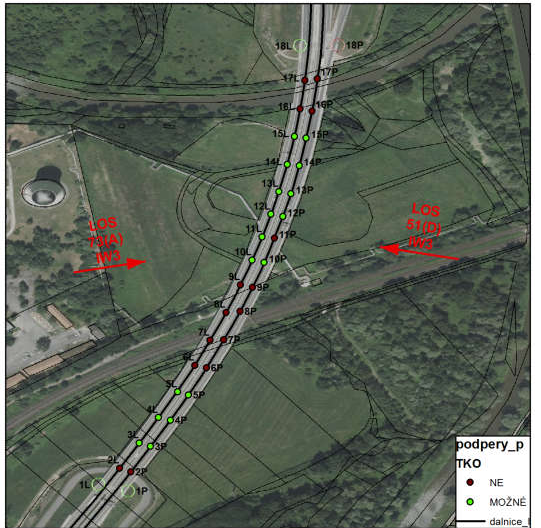
→ Vyhodnocení navrhovaných umístění instalací TKO s ohledem na požadavek minimální vzdálenosti

sousední dráhy (buď v ASC, nebo v DESC) - Teoreticky, je-li odražeč viditelný z protilehlých drah, může rušit signál v protější dráze - Min. odstup je ideálně 5 pixelů - Tzn. min 25 m ve směru range a 100 m ve směru azimutu	
---	--

Zastínění	
NELZE sledovat z dané pozice, je-li TKO zastíněn - dalším objektem ve směru LOS	→ Vyhodnocení zastínění <i>Viz. vyhodnocení sledovatelnosti bez odražečů</i>
NELZE sledovat z dané pozice, je-li TKO zastíněn - částí konstrukce mostu - Při instalaci na vymezená místa horní stavby tento případ zastínění nehrozí Při instalaci na spodní stavbu hrozí zastínění horní stavbou (přesahem mostovky) nebo částí podpěry - většina nižších podpěr nebo podpěr s vysokým přesahem mostovky není sledovatelná mimo ideálních úhlů orientace - pokud je viditelná polovina odražeče, poklesne RCS o 3 dB	→ Výpočet maximální výšky instalace H_{MAX} s ohledem na orientaci mostu a TKO → Vyhodnocení umístění
	Parametry: - Azimut $LOS\varphi$ (Požadovaná orientace TKO pro zvolenou dráhu) - Azimut orientace mostovky v místě podpěry - Výška TKO (H_{TKO}) - Výška podpěry - Úložná výška / odhad výšky nejzazšího okraje římsy - Přesah mostovky / části podpěry od boku podpěry - Orientace mostovky v místě podpěry Výpočet trigonometricky. - S rostoucím incidenčním úhlem se zvyšuje H_{MAX} - S rostoucím odklonem osy TKO od směru kolmo na osu mostu a s rostoucím přesahem se H_{MAX} snižuje Zdroj podkladu: BMS, Ortofoto ČR (© ČUZK)

Konflikty	
Podmínky pro umístování cizích předmětů a zařízení na mostních objektech upravuje závazná norma ČSN 736 201 Projektování mostních objektů dle Vyhlášky MDS č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích. Zařízení především nesmí být umístěno, pokud by svým provozem nebo náhlými poruchami mohlo způsobit zničení nebo poškození mostního objektu, bránit jeho údržbě nebo ohrozit bezpečnost provozu na mostě.	
Průjezdni a průchozí profily	
Přemostění pozemních komunikací TKO bude osazen na konstrukci mostu tak, aby žádnou svou částí nezasahoval do průjezdního či průchozího prostoru přemostované komunikace dle ČSN 73 6201.	→ Zkontrolovat rozsah průjezdních prostorů ve výkresech a příslušné dokumentaci → Vykreslit průběh požadovaných prvků v GIS nad podkladem ortofota ČR (ČUZK) s využitím příslušných krajských územně analytických podkladů (ÚAP)
Přemostění železniční tratě TKO bude osazen na konstrukci mostu tak, aby žádnou svou částí nezasahoval do volného mostního prostoru definovaného volným mostním průřezem (VMP) dle ČSN 73 6201 nebo nebyl v kolizi s ochranou proti dotyku dle ČSN 73 6223 nebo se nenacházel ve vzdušné vzdálenosti od živých částí trakčního vedení dle TNŽ 34 3109.	
Plavební cesta TKO bude osazen na konstrukci mostu tak, aby žádnou svou částí nezasahoval do průjezdního prostoru přemostované plavební cesty.	
Ochranná pásma	
Silnice, dálnice a místní komunikace Silniční ochranná pásma jsou určena zákonem č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích, § 30, platí pro dálnice, silnice a místní komunikace I. a II. třídy; mimo souvislé zastavění obcí. Rozumí se jimi prostor ohraničený svislými plochami do výšky 50 m a ve vzdálenosti: - 100 m od osy přilehlého jízdního pásu dálnice, rychlostní silnice nebo rychlostní místní komunikace anebo od osy větve jejich křižovatek; pokud by takto určené pásmo nezahrnovalo celou plochu odpočívky; tvoří hranici pásma hranice silničního pozemku, - 50 m od osy vozovky přilehlého jízdního pásu ostatních silnic I. tř. a ostatních místních komunikací I. tř. - 15 m od osy nebo od osy přilehlého jízdního pásu silnice II. třídy nebo III. tř. a místní komunikace II. třídy.	→ Vykreslit průběh požadovaných prvků v GIS nad podkladem ortofota ČR (ČUZK) s využitím příslušných krajských územně analytických podkladů (ÚAP)
Železniční trať Ochranné pásmo dráhy je určeno zák. č. 266/1994 Sb., o dráhách. Rozumí se jím prostor: - u dráhy celostátní a u dráhy regionální 60 m od osy krajní koleje, nejméně však ve vzdálenosti 30 m od hranic obvodu - u vlečky 30 m od osy krajní koleje	
Elektroenergetika: Ochranná pásma zařízení pro výrobu elektřiny a rozvodná vedení elektřiny jsou určena zák. č. 222/1994 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o Státní energ. inspekci, § 19. Ochranné pásmo venkovního vedení je vymezeno svislými rovinami vedenými po obou stranách vedení ve vodorovné vzdálenosti měřené kolmo na vedení, která činí od krajního vodiče vedení na každou stranu - u napětí nad 1kV do 35kV včetně 10m - u napětí nad 35kV do 110kV včetně 12m - u napětí nad 110kV do 220kV včetně 15m - u napětí nad 220kV do 400kV včetně 20m - u napětí nad 400kV 30m Ochranné pásmo podzemního vedení: - do 110kV včetně a vedení řídicí, měřicí a zabezp. techniky činí 1 m po obou stranách krajního kabelu - nad 110kV činí 3m po obou stranách krajního kabelu. Ochranné pásmo elektrické stanice: - je vymezeno svislými rovinami vedenými ve vodorovné vzdálenosti 20m kolmo na oplocenou nebo obezděnou hranici	



objektu stanice.	
Plynovod Ochranná pásma pro plynovody jsou určena §68 zák. č. 458/2000, energetický zákon. Plynárenská zařízení jsou chráněna ochrannými pásmy k zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu. Ochranným pásmem se pro účely tohoto zákona rozumí souvislý prostor v bezprostřední blízkosti plynárenského zařízení: - u nízkotlakých a středotlakých plynovodů a plynovodních přípojek, jimiž se rozvádí plyn v zastavěném území obce 1 m na obě strany od půdorysu, - u ostatních plynovodů a plynovodních přípojek 4 m na obě strany od půdorysu, - u technologických objektů 4 m od půdorysu. V ochranném pásmu je zakázáno provádět činnosti, které by mohly ohrozit plynárenská zařízení, jejich spolehlivost a bezpečnost provozu. Při provádění veškerých činností v ochranném pásmu i mimo ně nesmí dojít k poškození plynárenského zařízení. Rozsah bezpečnostních pásem stanovuje §69 takto: - U regulačních stanic vysokotlakých 10 m. - U regulačních stanic velmi vysokotlakých 20 m. - U vysokotlakých plynovodů do DN100 15 m. - U vysokotlakých plynovodů do DN250 20 m. - U vysokotlakých plynovodů nad DN250 40 m.	 → Vyhodnocení překryvu zákresu poloh možných / navržených umístění instalace TKO se zákresem profilů a ochranných pásem. → Klasifikace odražečů (LZE / NELZE)
Teplovod Ochranná pásma jsou stanovena zákonem č. 458/2000 Sb., energetický zákon, jsou: Z § 87 vyplývá: - Ochranné pásmo je vymezeno svislými rovinami vedenými po obou stranách zařízení na výrobu či rozvod tepelné energie ve vodorovné vzdálenosti měřené kolmo k tomuto zařízení a vodorovnou rovinou, vedenou pod zařízením pro výrobu nebo rozvod tepelné energie ve svislé vzdálenosti, měřené kolmo k tomuto zařízení a činí 2,5 m. V ochranném pásmu i mimo ně je každý povinen zdržet se jednání, kterým by mohl poškodit zařízení pro výrobu nebo rozvod tepelné energie nebo omezit nebo ohrozit jeho bezpečný a spolehlivý provoz a veškeré činnosti musí být prováděny tak, aby nedošlo k poškození zařízení pro výrobu nebo rozvod tepelné energie.	
Stokové sítě a související objekty Ustanovení o ochranném pásmu je uvedeno v čl. 4.6.23. ČSN 76 6101. Neurčí-li vodohospodářský orgán jinak: je šířka ochranného pásma 3m od okrajů půdorysných rozměrů stok a souvisejících objektů.	
Vodovod Ochranné pásmo vodovodu je 2m po obou stranách vedení.	
Telekomunikační zařízení Ochrana telekomunikačních zařízení je upravena zákonem č. 110/1964 Sb., o telekomunikacích, ve znění pozdějších předpisů, oddíl V. Způsob vymezení ochranných pásem určuje § 11. Telekomunikační zařízení, které se organizace spojů, vojenská správa nebo organizace ministerstva vnitra rozhodla ochránit, mají určena ochranná pásma. Tato pásma vymezuje jmenovitě příslušný orgán územního plánování. Existence a rozsah ochranného pásma telekomunikačního zařízení se zajistí u správce příslušného zařízení, případně u územně příslušného orgánu územního plánování.	

Omezení z hlediska kotvení		
Zajištění dostatečného prostoru kolem hlavy TKO - umožnění natáčení - umožnění naklápění - zamezení kontaktu hlavy s povrchem mostu (s dostatečnou rezervou alespoň 10 cm)	→ Vyhodnocení výkresů a dokumentace, případně rekognoskace → porovnat přesah prvků s délkou konzole a nejzazším rozsahem okraje hlavy TKO při nízkém incidenčním úhlu	
Dodržení minimální vzdálenosti krajního kotevního šroubu TKO od okraje betonu - d_{MIN}	→ Vyhodnocení typu a stavu betonu → Statický posudek kotvení	
Dodržení minimální tloušťky prvku, do kterého je kotvení instalováno - d_{tMIN}	→ Vyhodnocení výkresů a dokumentace, případně rekognoskace → Statický posudek kotvení	
Vrt mimo ocelové výztuže	→ Doladění přesného umístění kotvení na základě měření profometrem	

Obtížnost instalace a servisu TKO	
Pro určené umístění instalace bude vyhodnocena náročnost úkonu instalace odražeče	→ Konzultace s expertem na výškové práce
Vyhodnocení rizik spojených s umístěním odražeče	→ Konzultace se znalci lokálních specifik
Stanovení nutných servisních úkonů a sezónní údržby:	→ Konzultace s expertem na výškové práce
- Rozsah - o Elektronika - o Čistění od listí / sněhu / ledu - o Kontrola dotažení - Frekvence	→ Zhodnocení požadavků elektronických opatření

3.5 VYHODNOCENÍ RIZIK SPOJENÝCH S UMÍSTĚNÍM ODRAŽEČE

3.5.1 Způsobení škod vlivem uvolnění a pádu

Konstrukce TKO, jeho uchycení a kotvení do betonu jsou ze statického hlediska navrženy s dostatečnou rezervou s ohledem na povětrnostní podmínky běžné v ČR a dodatečné zatížení způsobené např. sněhem či námrazou. Bohužel, nelze vyloučit např. možnost uvolnění TKO vlivem vandalizmu. V ohrožení pak jsou objekty nebo osoby v dopadové zóně pod TKO nebo v její bezprostřední blízkosti. Instalaci je třeba vyloučit v místech, odkud by došlo k ohrožení majetku či bezpečnost osob pod mostním objektem. Příslušné technické normy upravují možnost umístění předmětů na mostní objekty a definují ochranná pásma dle typu přemostované překážky, které je nutno striktně respektovat (kap. 3.4.4, Vyhodnocení konfliktů).

Pro vyloučení potenciálních škod na dalších objektech bez definovaných ochranných pásem je vhodné pro identifikaci těchto objektů provést rekognoskaci místa umístění, případné škody popsat do žádosti o umístění a konzultovat se zadavatelem.

Dopadovou zónu lze vymezit rozšířeným půdorysem TKO minimálně o 2,5m.

3.5.1.1 Krádež a vandalismus

Vzhledem k váze a použitému materiálu představují TKO možný cíl krádeže nebo vandalizmu. Riziko lze snížit aplikací kombinace pasivních a aktivních opatření. Je nutné zvážit efektivitu zvoleného řešení s ohledem na finanční náklady a dále akceptovat fakt, že riziko nikdy nelze eliminovat úplně.

Zásadní vliv na míru rizika má nepřímo především legislativní a praktická opatření státu na omezení výkupu kovů a jejich výkupní cenu. Při zvažování aktivních a pasivních opatření je vhodné zvážit i aktuální vývoj řešení problematiky výkupu a jeho prosazování v regionálním kontextu.

Rizikový faktor	Vyhodnocení / Skóre	Možná opatření
R1: Přístupnost TKO odspodu	Dostupnost ovlivňuje výška instalace nad povrchem a částečně sklon povrchu pod odražečem.	Je vhodné odražeč umístit do pozice s maximální možnou výškou nad povrchem, současně výška instalace nesmí překročit $H_{\max}$ spočítanou pro viditelnost (kap. 3.4.4, Zastínění).
	Lze TKO nebo konzole dosáhnout bez použití pomůcek (jednou nebo více osobami – např. při stojí jedné na ramenu druhé osoby)? (ANO: +4)	Bezpečná výška instalace je min. 5m nad vodorovným povrchem a 4,5m nad šikmým. Není doporučeno instalovat TKO pod tuto výšku.
	Lze TKO nebo konzole dosáhnout s využitím běžně dostupných žebříků? (ANO: +1)	Bezpečná výška instalace je min 10m nad povrchem.
R2: Přístupnost TKO z dalších směrů	Je TKO dosažitelný z dalších směrů: (ANO: +1) • lávky • podpěry se stupadly • římsy po vnější straně zábradlí ve směru shora?	V případě dosažitelnosti je vhodné zvážit: - Aktivní elektronické prostředky ochrany - Pasivní prostředky ochrany, zvláště při souběhu se zvýšeným rizikem daným charakterem lokality.
R3: Charakter lokality	Odlehlost lokality v rámci městské a příměstské zástavby? Zvyšuje riziko zcizení. (ANO: +1)	V případě zvýšené rizikovosti je vhodné dle možností rozpočtu zvážit kombinaci aktivních a

	Zvýšený výskyt drobných krádeží kovů v místě zvyšuje riziko zcizení? Provést konzultace s osobami s místní znalostí (např. na ŘSD, policie, mapa kriminality). (ANO: +1) Frekvencovanost lokality (chodci, dopravou v denních a nočních hodinách snižuje riziko zcizení.	pasivních prostředků, např. funkční kamerový systém. Aktivní výstražné zařízení pouze s akustickým či optickým upozorněním nebude mít v odlehle lokalitě přílišný efekt.
--	---	--

Tabulka 8 Vyhodnocení rizikových faktorů krádeže a vandalismu

3.6 VYHODNOCENÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ RIZIKA KRÁDEŽE

Opatření pro snížení rizika krádeže a vandalismu lze rozdělit do dvou, resp. třech skupin:

- **Aktivní opatření (elektronické prostředky)** - mají především preventivní odstrašující funkci, manipulaci či zcizení TKO tato opatření zabránit nemohou. Jsou-li viditelné nebo je na ně upozorněno, odstrašují případného zloděje či vandala. TKO či místo pod ním je proto vhodné doplnit o výstražné tabulky upozorňující na opatření a možný postih potenciálního pachatele.
- **Pasivní opatření**
 - **Zábranné mechanické prostředky** - slouží v zabránění přístupu k TKO či znesnadňují a prodlužují manipulaci v jeho blízkosti.
 - **Instalace do nedostupné výšky** - slouží v zabránění přístupu k TKO či znemožňuje dosažení a manipulaci

Kritérium	Vyhodnocení
Umístění	TKO by měl být vždy umístěn do maximální možné výšky nad povrchem při současném zachování technické proveditelnosti sledování jevu. Opatření s preventivním odstrašujícím účinkem by mely být umístěny 1) viditelně 2) mimo dosah záměrného vyřazení z provozu: - na sousedním oploceném objektu - na mostním objektu v dostatečné výšce znemožňující dostupnost nebo zásah běžným předmětem 3) V případě napájení solárním panelem je třeba vybrat místo a natočení s dostatečnou insolací
Instalace	Vzhledem k požadavku na sníženou dostupnost vzhledem k výšce umístění platí stejné potíže s instalací a servisem (výměna baterie) jako u TKO. Instalace je jednodušší vzhledem k nižší váze zařízení a požadavkům na nosnost kotvení.
Napájení	Možné zdroje napájení elektrických přístrojů: - síťové připojení - baterie - solární panel a baterie Stávající konstrukce TKO neumožňuje do TKO umístit dodatečné zařízení, které by bylo přístupné pro servis jako výměna baterie. Omezený prostor je uvnitř trubky konzole odkud lze vyvést drát k externě umístěné baterii. Např. u fotopastí výrobci udávají výdrž baterií 6 měsíců, z reálných zkušeností uživatelů vyplývá, že při běžném, ne příliš náročném provozu (v průměru 3 snímky a jedno krátké video denně) je

	výdrž baterií max. 2 měsíce. Fotopast neumí poslat zprávu v případě nízkého stavu baterií, takže by byla nutná preventivní kontrola každé cca 2 měsíce. Ve fotopastech se standardně používají alkalické baterie (až 12 článků typu AA), což není řešení vhodné pro provoz v mrazu. V takovém případě je potřeba použít lithiové články, které jsou výrazně dražší.
Záznamová kapacita	U kamer představuje limitaci nutnost přenosu a uchování obrazového záznamu - Vzhledem k velikostnímu omezení a omezené dostupnosti odpadá možnost využít záznam na konvenční DVD/pásková média, případně paměťovou kartu. - Přenos obrazu lze zrealizovat prostřednictvím GSM pásma na datové úložiště
Náklady	Do nákladů je třeba zahrnout cenu: - přístroje / materiálu - instalace - výškové práce (1500 – 3000 Kč / úkon) - provozní náklady za servisní úkony (výměna baterie) – výškové práce (1000 – 1500 Kč / úkon) - provozní náklady za přenosy dat, provoz PCO/serveru nebo monitorovací služby (< 5000 Kč / rok)

Tabulka 9 **Obecné vyhodnocení kritérií ochranných opatření**

Typ opatření	Výhody	Nevýhody	Orientační cena (Kč / kus)	Poznámka
O1: Výška instalace				
Nepřístupnost	Při instalaci do dostatečné výšky velmi efektivní	Znesnadňuje a prodražuje instalaci, znesnadňuje a prodražuje servis	10 000 – 20 000	Cena ovlivněna výškou, náročností úkonu, spotřebou materiálu (diamantové vrtáky). Výškové práce lze poptat formou výběrového řízení.
O2: Aktivní elektronické prostředky				
Atrapa bezpečnostní kamery	Naprostá nezávislost, u vybraných typů pouze baterie pro napájení imitace IR diod	Pouze odstrašující efekt, neposkytuje možnost sledování	100 – 1 000 Kč	Možnost solárního dobíjení napájecích baterií pro imitaci IR diod.
Konvenční kamery se síťovým napájením	Cena a jednoduchost instalace, široký výběr	Nutné připojení na síť 220 V	1 500 – 10 000 Kč	Vybrané typy obsahují detektory, které spustí poplach v případě pohybu nebo při změně polohy kamery.
Kamery se solárním napájením	Naprostá energetická nezávislost.	Cena, větší rozměry (díky solárnímu panelu a Pb baterii).	Od 20 000 Kč	Baterie není zahrnutá v ceně, používá se standardní gelová baterie.
Fotopasti	Provoz na baterie, kompaktní rozměry, jednoduchá instalace.	Provozní náročnost: kontrola stavu a výměna baterií.	2 000 – 10 000 Kč	Možno doplnit ochrannou schránkou.
Mechanický / náklonový motoalarm	Možnost umístit na/do odražeče, indikuje manipulaci či sejmутí TKO, možné doplnit o akustický alarm. Komunikace prostřednictvím SIM karty (SMS či internet) – snadná správa a	Provozní náročnost: kontrola stavu a výměna baterií, Nutné řešení vhodného ukrytí instrumentu uvnitř TKO. Není vhodné na něj upozorňovat, proto nemá odstrašující účinek.	3 000 – 5 000 Kč	Po aktivaci odešle SMS upozornění přes GSM. Vhodné zkombinovat s GPS nebo GSM trackerem. Výdrž baterie dle kapacity, podle výrobců až 1 rok, podle uživatelů obvykle do

	sledování	Zvýšená cena TKO		½ roku
GSM / GPS tracker	Při dobrém ukrytí možnost dohledání zcizeného TKO: Možnost real-time lokalizace TKO, Možnost napájení baterie přes solární panel, Automatické upozornění na změnu stavu (pohyb TKO), Komunikace prostřednictvím SIM karty (SMS či internet) – snadná správa a sledování	Provozní náročnost: kontrola stavu a výměna baterií, nutný zásah do konstrukce TKO. Nutné řešení vhodného ukrytí instrumentu uvnitř TKO Není vhodné na něj upozorňovat, proto nemá odstrašující účinek. Omezený signál GNSS družic/mobilního operátora Zvýšená cena TKO	1 000 – 10 000 Kč	Po aktivaci odešle SMS upozornění přes GSM. Výdrž baterie dle kapacity, podle výrobců v rozsahu dní (real-time) až 1 roku (economy-mode), podle uživatelů třetinová až poloviční doba
O3: Zábranné mechanické prostředky				
Řetěz nebo ocelové lano	Další zábranný prostředek který je nutné překonat. Současně slouží jako zábrana pádu pro případ uvolnění TKO	Lze odříznout. Samostatné kotvení by vyžadovalo posouzení statiky vzhledem k rázové síly při pádu TKO z dané výšky	5 000 – 10 000	Možnost pogumování ocelového lana kvůli znesnadnění narušení tekutým dusíkem. Nutnost samostatného kotvení do přídavné konzole
Ochranný zaoblený plech	Znesnadňuje přímý přístup k TKO z nejzranitelnějších směrů: zespodu a shora. Efektivní v kombinaci s kamerou a alarmem na PCO.	Estetické hledisko, požadavky na samonosnost s ohledem na požadovaný rozsah krytí - přesahu TKO od stěny, při horní instalaci možnost zakrytí TKO, možnost rušení radarového signálu.	5 000 – 10 000 Kč	Zaoblenost znesnadňuje uchycení/opření se o plech, současně minimalizuje rušení signálu. Možné doplnit o ostnatý/žiletkový drát.
Plechová zábrana na římsu	Znesnadňuje přístup nad TKO po římsě vně zábradlí.	Lze obejít vozovkou a přes zábradlí.	5 000 – 10 000 Kč	Možné doplnit o ostnatý/žiletkový drát.
Konzole s ostnatým / žiletkovým drátem	Znesnadňuje přímý přístup k TKO z nejzranitelnějších směrů: zespodu a shora, neovlivňuje radarový signál. Efektivní v kombinaci s kamerou a alarmem na PCO.	Lze odstranit	2 000 – 5 000 Kč	

Tabulka 10 Opatření a jejich specifická kritéria

V následující tabulce jsou shrnuty doporučené opatření s ohledem na rizikovost instalace v dané lokalitě vyhodnocenou na základě kritérií v Tabulce 8. Vyhodnocení je třeba provést individuálně se znalostí lokální situace pro vybraný objekt s ohledem na finanční možnosti rozpočtu zakázky, potenciální ztráty v případě zcizení a přerušení časové řady monitoringu.

Skóre rizika	Návrh opatření
0	Nízké riziko: je dané relativní nedosažitelností TKO a nebezpečím, které souvisí s případnou manipulací s TKO ve velké výšce. Bez opatření.
1-2	Střední riziko: je dané částečnou dosažitelností a charakterem lokality. Po zvážení finančních nákladů je doporučeno aplikovat levnou variantu opatření nebo jejich kombinaci s ohledem na dominantní rizikový faktor, např: Aktivní prostředek: atrapa kamery + upozornění, Pasivní prostředek: zábrana ve směru nejsnazšího předpokládaného přístupu
3 a více	Vysoké riziko: je dané snadnou dosažitelností a charakterem lokality. Po zvážení finančních nákladů je doporučeno aplikovat dražší variantu (kombinaci aktivního a pasivního zabezpečení) s ohledem na dominantní rizikový faktor: - Aktivní prostředek: kamera se záznamem + upozornění, Pasivní prostředek: zábrana ve směru nejsnazšího předpokládaného přístupu - V případě extrémně rizikové oblasti s vysokou pravděpodobností zcizení lze prostředky doplnit o motoalarm nebo GPS tracker

Tabulka 11 Skóre rizika a doporučený typ opatření

3.7 VYHODNOCENÍ EKONOMICKÉ PROVEDITELNOSTI

Tabulka orientačních nákladů služby níže slouží k předběžné orientační kalkulaci jako podklad pro vyhodnocení ekonomické proveditelnosti na straně zadavatele (investora) zakázky na monitoring mostu pomocí InSAR. Je nutné zdůraznit, že uvedené ceny jsou pouze orientační. Uchazeč o zakázku monitoringu vypracuje nabídku na základě vyhodnocení požadavků od zadavatele.

Podrobná obecná nákladová kalkulace pro monitoring deformací pomocí InSAR byla provedena v rámci metodiky vyvinuté v rámci projektu TB0100MD021 (2014). Kalkulace zahrnovala náklady na pořízení různých komerčních dat InSAR, cenu za zpracování a analýzu deformací metodou PS InSAR a doplňkové náklady.

Stávající metodika počítá s využitím nekomerčních dat z družice Sentinel-1 s nulovými pořizovacími náklady. V tabulce 12 jsou uvedeny orientační ceny relevantních položek a činností aktualizované s ohledem na zkušenosti a závěry z praktické demonstrace v rámci projektu TB0400MD003: analýza PS InSAR metodou Small Area vybraných mostů na ostravsku a instalace TKO na most D1-441.

Produkt	Položka	Orientační cena / rozsah (Kč)		Komentář
		30 scén (ARCHIV)	30 scén (NOVÁ AKVIZICE)	
	Komerční družicová data (1x1 – 5x5m)	500 000 - 5 000 000	1 100 000 - 6 050 000	Single-Look / Strip Map / Fine modes: TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Radarsat, Palsar-2
	Sentinel-1 (5x20m)	0	0	
		první zpracování (Služba 1) (najednou celá časová řada)	1 aktualizace (Služba 2) (update např. v 3měs. cyklu)	
Analýza InSAR	Metodou PS InSAR Small Area První zpracování zahrnuje: zpracování 40-60 snímků v 3-4 tracích, analýza vč. dekompozice z více tracků, interpretace, konzultace se zákazníkem, výroba výstupů: mapy, report Aktualizace zahrnuje: doplnění již zpracované časové řady v 1 intervalu	150 000 - 300 000	30 000 - 60 000	Orientační komerční cena služby za zpracování 1 časové řady pro most (alespoň 1,5-2 roky, celá časová řada) a následnou aktualizaci (doplnění) již zpracované časové řady. Nižší cena je relevantní pro zpracování a interpretaci jednoho objektu, vyšší pro zpracování většího omezeného území s několika objekty v blízkosti) nebo zpracování jednoho objektu vč. statického modelování
		1 odrazeč	10 odrazečů	
Výroba a instalace TKO	Výroba a materiál	25 000 - 30 000	150 000 - 200 000	Dle návrhu v metodice Cena odvislá od počtu kusů TKO ve výrobní sérii a požadovaného příslušenství
	Instalace na most dle metodiky	15 000 - 20 000	100 000 - 150 000	Cena je orientační, zahrnuje: diagnostika výztuží, výškové práce, kotvení, instalace, materiál, doprava
	Geodetické zaměření	4000 - 6 000	20 000 - 40 000	Cena je orientační, zahrnuje vytvoření pole bodů rychlou statickou metodou (GPS) a zaměření orientace TKO
Doplňkové náklady	Zabezpečení aktivní vč. instalace	2 000 - 25 000	20 000 - 250 000	
	Zabezpečení pasivní vč. instalace	3 000 - 10 000	30 000 - 100 000	
	Provozní náklady na údržbu	1 500 - 3 000	15 000 - 30 000	Výměna baterie, vyčištění (2x za rok)

Tabulka 12 Orientační kalkulace rozsahů nákladů za službu sledování deformací mostů. Jsou uvedeny i orientační ceny v souvislosti s výrobou TKO, jejich instalací a doplňkovými náklady. Ceny uvedeny vč. DPH.

4 NÁLEŽITOSTI PRO INSTALACI TRVALÉHO KOUTOVÉHO ODRAŽEČE

4.1 DESIGN

V rámci projektu TB0400MD003 byl vyvinut design trvalého koutového odražeče (TKO) s odraznou hlavou tvořenou odraznými deskami pentagonálního tvaru upevněnou na konzoli k ukotvení na objekty dopravní infrastruktury, především mosty. Hlava i konzole jsou vyrobeny z kovové slitiny a nastříkány barvou se speciální povrchovou úpravou omezující tvorbu námrazy. Design byl navržen s ohledem na:

- Pevnost a robustnost konstrukce a kotvení
- Dostatečná odrazivost
- Kompaktní rozměry a nízká váha
- Snadná nastavitelnost do požadovaného směru
- Možnost kotvení a únosnost konstrukce v různých polohách instalace na povrch:
 - Horizontální
 - Vertikální
 - Šikmý

Vývoj designu zohlednil připomínky pracovníků ÚKKS ŘSD tak, aby splnil požadavky na bezpečnost provozu a nerušivý estetický dojem. V rámci projektu byl vyroben a otestován prototyp TKO, výsledky testování byly zohledněny při výrobě nulté série sady odražečů a při návrhu finálního designu a řady praktických detailů.

Výrobní výkresy v ISO standardu jsou k dispozici v Příloze 2 Metodiky.

4.2 VÝROBA ODRAŽEČE

Prototyp a nultá série TKO byly vyrobeny na zakázku firmou Metalicon s.r.o. (<http://www.metalicon.cz>). Součástí výroby bylo i testování zatížitelnosti a pevnosti konstrukce, navržených spojů a uchycení. Stručný výrobní postup je součástí Přílohy 2.

4.3 SCHVÁLENÍ UMÍSTĚNÍ ODRAŽEČE

Tři z vyrobených odražečů nulté série byly v říjnu 2016 instalovány na most D1-441 v Ostravě-Svinově. Instalaci předcházelo schválení designu a návrhu umístění ze strany vlastníka objektu – oblastní správy ÚKKS ŘSD.

Pro vydání souhlasného stanoviska ze strany majitele objektu musí navrhovatel / dodavatel podat žádost o instalaci a doložit požadovanou dokumentaci. Žádost a dokumentace musí závazně obsahovat náležitosti definované v následující tabulce.

Kód	Název	Minimální rozsah náležitostí	Vstup - kapitola
00	Žádost	- Předmět žádosti - Identifikace žadatele - Zdůvodnění požadavku - Popis trvalého koutového odražeče - Vymezení a popis objektu, na který má být TKO instalován - Návrh umístění TKO vč. doplňkových ochranných opatření - Vyhodnocení podmínek a rizik	3.2.2 3.4.4 3.4.4, 3.5
01	Výkres TKO	Výkres hlavy odražeče a konzole v ISO standardu - Rozměry (vč. kótování) - Váha - Způsob spojení hlavy na konzoli	Příloha 2
02	Návrh kotvení	Návrh způsobu a parametrů kotvení - S ohledem typ prvku, třídu betonu a jeho stav - Počet a hloubka kotev - Odhad silového působení na kotvy při tahovém a smykovém zatížení	3.2.2: M2.6
03	Statický posudek	Statický vypracovaný autorizovaným statikem - Posouzení mezních stavů únosnosti a statiky konstrukce - Posouzení statiky kotvení	Příloha 2
04	Montážní návod	Technická specifikace postupu montáže a kotvení TKO - Kotvení do betonu v souladu s návrhem kotvení a statickým posouzením - Způsob a vlastnosti vrtání otvoru pro kotvení - Hloubka vývrtu - Minimální vzdálenosti vrtů od okraje bloku - Postup osazení kotev - Doba zpracování a vytvrdnutí v závislosti na aktuálních meteorologických podmínkách - Utahovací momenty - Doporučené nářadí a stroje	Příloha 3: 02, 03
05	Instalační postup	Popis - Opatření pro zajištění bezpečnosti práce a dopravy v rámci výškových prací - Popis geodetického zaměření stanovisek pro zaměření orientace hlavy odražeče - Postup výškových prací v souladu s Montážním návodem	Příloha3:02,03,04

Tabulka 13 Náležitosti žádosti o instalaci TKO na vybraný objekt.



Obrázek 2 Ukázka kotvení připraveného na osazení konzolí, součinnosti geodetů a výškových pracovníků při orientaci hlavy TKO a instalovaného TKO na plentovací zídce opěry mostu D1-441

5 METODIKA MONITORINGU INSAR

5.1.1 Zpracování InSAR dat

Následuje schematický doporučený postup zpracování. Postup není plně závazný, neboť jednotlivé softwary mají metody implementované rozdílným způsobem, ale identifikuje klíčové kroky. Výsledkem zpracování jsou pro každý detekovaný PS bod:

- Odhadnutá rychlost trvalých pohybů
- Odhad průběhu (časový profil) detekovaných pohybů

Vymezení časové řady	• Pro každý track zpracovat všechny dostupné snímky a vytvořit z nich dataset • Každý snímek vždy s jedním společným snímkem (masterem), který je vybrán tak, aby byl v časové řadě přibližně uprostřed jak co do termínu snímání, tak co do prostorových základů (poloh satelitu). • Pro Sentinel-1 je doporučený minimální počet snímků v datasetu 40 (v případě nižšího počtu výrazně klesá přesnost monitoringu) • V zájmu vyloučení numerické nestability je doporučeno zpracovat data nasnímaná v průběhu alespoň 18 měsíců, lépe 24 měsíců a to ve všech ročních obdobích.
Vymezení oblasti zpracování	• Pro omezení výpočetního času je doporučeno omezit zpracování na okolí mostu • Současně musí být oblast dostatečně velká, aby bylo možné nalézt referenční PS bod
Výběr bodů pro zpracování	Při výběru PS bodů pro zpracování z Sentinel-1 je doporučeno v zájmu co nejlepšího pokrytí mostu vybrat všechny body s ohledem na koherenci, částečně dle jejich intenzity a nezávisle na amplitudové disperzi. • Dále výběr zohlední pouze body, které jsou lokálními maximy intenzity (kvůli omezení šumu vzniklého distribucí příspěvku výrazného odražeče do více sousedních pixelů a následnému nesprávnému odhadu korekčních složek). • Body nejvyšší koherence (nad 0.95) mají nejnížší hodnoty amplitudové disperze. • I body s nevýraznou intenzitou a nepříliš nízkou hodnotou amplitudové disperze mají často koherenci vyšší než 0.7 nebo 0.8 (koherenční práh se obvykle vybírá individuálně pro každou lokalitu z tohoto rozsahu). ○ Jsou-li pohyby malé, lineární a počet snímků přesahuje 40, je možné použít práh koherence 0.8 po kontrole, že aplikací takto přísného koh. prahu nebyly vyloučeny body s vyššími, příp. nelineárními pohyby. ○ V případě nižšího koherenčního prahu (0.7), zvláště v kombinaci s menším počtem snímků, je ale třeba provést ruční vytřídění bodů, neboť v tomto rozsahu koherence se již nachází body s výrazně nesprávně odhadnutou rychlostí, výškou apod. (vlivem nelinearity problému). V případě použití TKO je pro zpracování třeba vybrat pouze pro středový pixel <i>kříže</i>, jakým se TKO ve snímku jeví.
Detekce pohybů	V rámci analýzy časové řady v datasetu se nezávisle pro každý PS bod detekovaná fáze rozkládá výpočetně regresí na tři, resp. 4 složky: 1) korekce výšky [m] – určena na základě polohy družice v době snímání, 2) koeficient teplotního pohybu [mm/°C] - průmět vratného pohybu vlivem dilatace do LOS, určen na základě aktuální teploty 3) rychlost trvalého pohybu [mm/rok] - průmět nevratného pohybu do LOS, určen na základě data snímání za předpokladu pohybu lineárního v čase. Časové průběhy pohybu jsou hlavním výsledkem z monitoringu, vykreslují se po odečtení vlivu teplotního pohybu. 4) rezidua.

	• Teplotní pohyb je z velké části způsoben dilatací částí nosné konstrukce, jeho vypočtený koeficient lze přepočítat do směru osy mostu. • Přesnost rozkladu pohybů mezi teplotní a trvalé závisí na co nejpřesnějších teplotách dodaných (z blízkých meteorologických stanic); měřená teplota vzduchu se vzhledem k setrvačnosti považuje za přesnější než teplota povrchu vozovky. Obecně jsou teploty reprezentativnější při ranních snímáních (DESC. tracky) než při večerních (ASC. tracky). • Při sledování kratším než cca 18 měsíců, nebo nesplnění podmínky linearity může vlivem ne zcela přesných teplot ve výsledku dojít k tzv. <i>průsaku</i> mezi vypočtenými trvalými a teplotními pohyby (tzn., že v daném místě je např. odhadnut pohyb teplotní a pohyb trvalý, které se navzájem odečítají, či je teplotní pohyb identifikován jako trvalý).
Přesnost výšek	Odhadnuté výšky slouží k rozeznání bodů na mostě od bodů mimo most a dvojitych odrazů (družice – země – most - družice). • Přesnost výšek je v případě zpracování dat z družice S1 horší než v případě jiných družic vzhledem k relativně krátkým kolmým základnám. Směrodatná odchylka vypočtených výšek se pohybuje v rozsahu cca 2-7 m (pro body s koherencí vyšší než 0.8, pro datasety s počtem snímků 28-40).
Poloha bodu	Georeferencovaná poloha detekovaného PS bodu není v radarovém snímku jednoznačná. Vliv mají: • Rozlišení • Charakter odrazu • Korekce výšky oproti DEM použitému pro georeferencování Chyba geolokace nabývá podobných hodnot jako směrodatná odchylka korekce výšky.
Výběr referenčního bodu	Při výběru ref. bodu je třeba • Respektovat podmínku jeho stability či jeho pohyby měřit jinou metodou. (Pokud by ref. bod podléhal např. teplotnímu pohybu, budou odhady teplotního pohybu ostatních bodů vychýleny právě o tuto hodnotu, atd.). • Musí mít vysokou koherenci (ideálně vyšší než 0.95), ale v softwaru SARPROZ(c) je jeho pohyb (časový průběh) odhadnut jako průměr z ostatních bodů. • V případě monitorování objektu z více tracků doporučujeme zvolit všechny ref. body ve vzájemné blízkosti. • Měl by mít vyšší odrazivost než body PS body na mostě (s ohledem na míru šumu)

Pokud je průběh sledovaného pohybu značně nelineární, zvláště při krátké době sledování a časové souvislosti např. nejvyšší rychlosti pohybu s nejvyššími teplotami, dojde k nesprávnému odhadu koeficientů teplotního pohybu a v důsledku k nesprávnému rozdělení pohybu na trvalý a teplotní. Odhadnutou hodnotu teplotního koeficientu každého PS bodu lze porovnat s teoretickou hodnotou vypočítaného teplotního koeficientu přepočtenou do směru dilatace dle:

$$k_{mod} = d k_{Salong},$$

kde d je dilatační délka (typicky vzdálenost daného bodu od pevného bodu mostu),

k je teplotní koeficient materiálu ($10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pro železobeton, více v Příloze 4)a

S_{along} je citlivost radaru pro směr osy mostu.

V případě nesrovnalosti pro některé PS body se nabízí možnost

- vykreslit časový průběh i s teplotním pohybem a průběh trvalého pohybu odhadnout přibližně,
- průběh trvalého pohybu odhadnout na základě modelové hodnoty teplotního koeficientu,
- bod vyloučit z interpretace.

5.2 INTEGRACE VÝSTUPŮ ZE STATICKÝCH A DILATAČNÍCH MODELŮ

Pokud interferometrický software neumožňuje odhad třetího parametru (teplotního pohybu), je žádoucí ho modelovat pomocí programu na statické a dilatační výpočty, např. CSI Bridge. Statický program kalkuluje cykly rovnoměrných a nerovnoměrných pohybů na základě vstupních informací o teplotě a jejím vývoji (T1). Před výpočtem je v programu třeba vytvořit 3D model konstrukce mostu na základě technických parametrů mostu v rozsahu M1-M4 definovaných v Tabulce 3, především typ a konstrukce nosné konstrukce, výška spodní stavby, typ ložisek a způsob uložení nosné konstrukce. Modelované hodnoty dilatací pro danou situaci lze v 3D modelu přepočítat a agregovat pro dodané polohy na základě detekovaných poloh PS bodů, resp. ploch vymezených velikostí zdrojového pixelu. Výsledný vektor teplotního pohybu je pro zdrojovou polohu přepočítán do LOS a odečten od měřené fáze před dalším zpracováním.

Vliv teploty na viditelnou část mostní konstrukce je dále doporučeno modelovat v následujících případech a za předpokladu, že dominantní projev dilatace vzhledem ke geometrii orientace mostu a družicové dráhy není zanedbatelný:

- pokud je (nevratný) pohyb nelineární v čase (např. pohyb vlivem sesuvu)
- pokud je (vratný) pohyb nelineární vůči teplotě (jsou-li tyto nelinearity v řádu několika mm, projeví se v reziduích po zpracování - např. zhoršením koherence)
- pokud je délka sledování příliš krátká (tedy kratší než 18 měsíců)

Ve výstupech ze standardního postupu ve výše uvedených případech dochází k nesprávnému rozdělení pohybu na teplotní a trvalou složku. Výstup z modelu převedený na koeficient teplotního pohybu do LOS (mm/°C) pro každý bod, jehož poloha je výstupem z předchozí iterace InSAR zpracování, lze importovat např. do softwaru SARPROZ. Nepřesné vstupní teploty (rozdíl teploty konstrukce vůči měřené teplotě vzduchu či povrchu vozovky) do modelu představují zdroj chyb, nicméně výsledky dosažené na základě zahrnutí modelování jsou v případě oblastí s nelineárním pohybem výrazně lepší než bez modelování.

Při modelování teplotního pohybu bodů je především při zpracování dat středního rozlišení nutné

- zohlednit možné nepřesnosti v geolokaci, a to především na okraji mostů v blízkosti dilatačních spár
- rozlišit (nejlépe ručním výběrem), které body reprezentují odraz od mostu, a které od nezávislých konstrukčních prvků nebo objektů (např. podpěry, blízké budovy apod.). Předpokládáme, že konstrukční prvky umístěné na horní stavbě (svodidla, protihlukové stěny apod.) dilatují společně s vozovkou.

Body chybně modelované se projeví obvykle nízkou koherencí či nesmyslnými hodnotami odhadnutých pohybů.

5.3 MONITORING BEZ VYUŽITÍ ODRAŽEČŮ

Monitoring bez využití odražečů umožňuje zpracovat zpětně nejdelší možnou časovou řadu snímků. Kromě limitů daných konstrukcí mostu a orientací představuje omezení pouze rekonstrukce mostu či úprava stavebních částí a povrchu, nikoliv okamžik instalace TKO.

Monitorovatelnost mostů bez využití TKO závisí na intenzitě odrazu radarového signálu od mostu, stejně jako na rozměrech, orientaci, výšce a charakteru okolí.

Vozovka má obvykle nízkou odrazivost. Je-li most dostatečně široký (např. dálniční mosty), signál není zašuměn okolím, které přispívá odrazem do stejné buňky rozlišení. Koherence má na intenzitě odrazu jen slabou závislost - i body s nevýraznou odrazivostí dosahují hodnot koherence kolem 0.9. Jedná se obecně o případy, kde existují slabě odrazivé plochy, které nejsou ovlivňovány náhodnou přítomností jiných objektů, jejichž odraz by v dané buňce rozlišení dominoval. (Zatímco na vozovce se pohybují automobily, například v odstavných pruzích se vozidla vyskytují jen velmi sporadicky, proto je možné vyhodnotit pohyby i v těchto částech.)

Mosty úzké či krátké (rozměr mostu v radarových souřadnicích závisí vzhledem k nečtvercovému rozlišení radaru i na orientaci mostu), se šířkou/délkou nižší než 2 pixely, a nízkou odrazivostí ve srovnání s okolím obvykle monitorovat nelze, protože odražený signál v dané buňce rozlišení je výrazně ovlivněn příspěvkem okolí. Detekovaný pohyb pak neodpovídá pohybu mostu. Je běžné, že mosty úzké či krátké lze monitorovat jen z některých drah. Monitorovatelnost mostu lze posoudit na základě mapy odrazivosti a amplitudové stability bez interferometrického zpracování.

Snadno monitorovatelné jsou mosty s vysokou intenzitou odrazu, která je výrazně vyšší než okolí. V radarovém snímku jsou snadno rozeznatelné. Zde jde obvykle při vhodné geometrické konstelaci o odraz od příslušenství mostu (svodidla, zábradlí, mýtné brány, dopravní značky či jiné trvale umístěné objekty). Hodnoty koherence bývají v takovém případě vysoké.

Vysokou odrazivost mají někdy také vícenásobné odrazy (např. družice -> země -> most -> družice), které ale mají následně buď nízkou koherenci (v případě, že na zemi je vegetace, která signál dekoreluje), či nesprávně odhadnutou výšku, lze je tedy odlišit od signálu odraženého od samotného mostu.

5.3.1 Monitoring pohybů v definovaném směru

InSAR z principu monitoruje pouze pohyb ve směru paprsku (LOS), resp. průmět skutečného pohybu do tohoto směru. Za předpokladu, že je zadavatelem potvrzen směr pohybu v konkrétním směru, lze do něj naměřené pohyby přepočítat. Příklad pro vertikální směr je:

$$d_{vert} = \frac{d_{LOS}}{s_{vert}},$$

kde d_{LOS} , resp. d_{vert} jsou hodnoty polohy či rychlosti v LOS, resp. vertikálním směru, a s_{vert} je citlivost pro vertikální směr,

$$s_{vert} = \cos\theta,$$

kde θ je incidenční úhel.

Podobně lze vyjádřit citlivost pro detekci vodorovného pohybu v určitém směru jako

$$s_{hor,\alpha} = \sin\theta \cos\alpha,$$

kde α je vodorovný úhel mezi směrem paprsku (LOS) a definovaným směrem pohybu.

V případě monitoringu pohybů v předem definovaném směru postačuje zpracování jednoho tracku dat, doporučuje se volit track s nejvyšší citlivostí pro definovaný směr pohybu za předpokladu, že je v něm detekován dostatek spolehlivých bodů v zájmové oblasti. Citlivost lze vyčíslit na základě směru pohybu a inc. úhlu, v případě nevertikálního pohybu také na základě vodorovného úhlu pohledu družice. Výsledky zpracování z dalších drah lze použít pro verifikaci.

Citlivost ve vodorovném severojižním směru je všeobecně nízká, pro monitoring takových pohybů není metoda InSAR vhodná.

5.3.2 Monitoring 3D pohybů

Směr pohybu je pomocí metody InSAR možno odhadnout při zpracování dat z více tracků, na základě měření průmětu skutečného pohybu do různých LOS. Prakticky může být k dispozici pohyb změřený z jednoho nebo více stoupajících (ASC.) tracků, a pohyb změřený z jednoho nebo více klesajících (DESC.) tracků, a to i v případě použití dat z několika družic; vodorovné úhly pohledu se pro družice na polárních drahách liší jen o několik stupňů. Inc. úhly se u X-band družic mohou lišit až o 30-40°, v případě družice Sentinel-1 se rozdíl v inc. úhlu mezi dvěma rovnoběžnými tracky pohybují kolem 10°, směry pohledu jsou tedy velmi podobné.

Výpočet vertikální složky d_{vert} , východozápadní složky d_{V-Z} a případně severojižní složky d_{S-J} (opět se může jednat jak o polohu v daný čas. okamžik, tak o rychlost) pak probíhá v souladu s (Ketelaar, 2009) jako vyrovnání s maticí plánu

$$d_{LOS} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\cos\alpha & \sin\theta\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{vert} \\ d_{V-Z} \\ d_{S-J} \end{bmatrix}$$

kde, v souladu s vzorcí v kap. 5.3.1 θ je inc. úhel pro daný bod/track a α je úhel mezi vodorovným průmětem směru paprsku a východozápadním směrem.

Při výpočtu zanedbáváme možný pohyb v severojižním směru - ve vzorci výše odstraníme třetí sloupec první matice a třetí řádek sloupcového vektoru); na základě praktického monitoringu mostů na Ostravsku přináší odhad pohybu v tomto směru do výpočtu numerickou nestabilitu projevující se i v nesmyslných odhadech složky vertikální a (vodorovné) východozápadní. Odhad chyby, která vzniká tímto zanedbáním, je popsán v Samieie-Esfahany (2009).

Také v případě, že jsou složky pohybu definovány v jiném souřadném systému než (vertikální, S-J, V-Z), tedy např. v systému mostu (vertikální, v ose mostu, kolmo na osu mostu), je rozklad do všech tří směrů numericky nestabilní. To platí i pro vhodnou orientaci mostu vzhledem k LOS. Příčinou je nízký rozdíl úhlů LOS pro stoupající a klesající dráhy (směry LOS se ve vodorovném směru (bez ohledu na znaménko) liší jen o 20°), a fakt, že obě klesající či obě stoupající dráhy jsou v podstatě rovnoběžné (rozdíl cca 1°). Možnost rozkladu do 3D by byla možná jen v případě použití dat z družic s jinou než polární dráhou.

Odhad pohybu v severojižním směru je možný za pomoci speciálních metod, např. pomocí pixel-offset tracking, či metodou multiple-aperture InSAR (Jung et al., 2013). Ty ale nejsou obvykle vhodné pro sledování infrastruktury (citlivost v tomto směru je podstatně nižší než pro ostatní

směry či vyžadují data z větší plochy), či jsou omezeny na oblast překryvů mezi bursty (pro S-1 v IWS režimu).

Pro zajištění numerické stability výpočtu je třeba zpracovat přibližně stejný počet měření ze stoupajících a klesajících drah. Tohoto požadavku je dosaženo vážením: váhy jsou koncipovány tak, aby jejich součet byl stejný pro oba typy drah. Jednotlivá měření jsou vážena dle jejich přesnosti (sm. odchylek).

Před samotným výpočtem pohybu mostu je třeba ztotožnit body zpracované z více tracků. Vzhledem k nízkému rozlišení družice S-1 je skutečné ztotožnění nemožné, v každé dráze dochází k odrazu od různých částí mostu apod. Nejprve je třeba vybrat body v daném koridoru okolo mostu, a následně z těchto bodů (automaticky či ručně) vytřídit body, které prokazatelně nenáležejí odrazu od mostu (např. na základě odhadnutých koeficientů teplotního pohybu či na základě odhadu výšek). Dále jsou body rozděleny do buněk na základě souřadnic v geometrii mostu (kolmá a rovnoběžná vzdálenost od osy mostu).

V některých případech je rozpoznání bodů na mostě od bodů mimo most obtížné. Koeficienty teplotního pohybu jsou nízké (srovnatelné s přesností) v blízkosti nedilatujících míst mostu, na krátkých mostech (či krátkých dilatačních segmentech) či na mostech severojižního směru. Dále směrodatné odchylky odhadnutých výšek jsou pro družici S-1 často v řádu 4-9 m (v závislosti na datasetu, mj. počtu snímků), tedy srovnatelné s výškou mostu.

V některých případech navíc dochází ve středním rozlišení k mísení odrazu od různých objektů (opěrná zídka u severního okraje mostu D1-433, protihluková zeď u severní části exitu 357 poblíž mostu D1-442), které nelze na základě dat z družice S-1 od sebe rozpoznat.

5.4 MONITORING S VYUŽITÍM ODRAŽEČŮ

Instalace odražečů na určité místo v podstatě "zvýrazní" toto místo oproti okolí. Toho lze využít pro sledování přesně určeného místa nebo konstrukčního prvku, který sice je viditelný v LOS, ale bez TKO by nebyl sledovatelný (např. podpěra) vzhledem k charakteru a mixování odrazů přispívajících celkovému projevu daného pixelu. Při návrhu vhodné velikosti odražeče je třeba uvažovat odrazivost daného pixelu - odražeče je smysluplné instalovat pouze tam, kde je odrazivost daného pixelu a jeho okolí alespoň 10x nižší (tedy nižší o 10 dB); vyšší odrazivost má pak nepříznivý vliv na přesnost fáze naměřené na odražeči (Ugsang et al., 2001)

5.4.1 Monitoring vertikálních pohybů

Pro monitoring pohybů daného směru platí totéž, co v kapitole 5.3.1, a sice že směr pohybu musí být znám. Běžné koutové odražeče jsou viditelné pouze z jednoho směru (pro ASC nebo DESC dráhy, bylo experimentálně ověřeno, že odražeče mají dostatečný odraz z obou sousedních drah, i když jsou orientovány na jednu dráhu). Vybírá se track s nejvyšší citlivostí ke směru pohybu, a je třeba zajistit viditelnost samotného TKO (nejčastěji nezastíněnost samotnou konstrukcí mostu), jeho dostatečnou intenzitu ve srovnání s odrazivostí mostu a dostatečnou vzdálenost (několik pixelů v každém směru) od jiných pixelů v okolí, jejichž odrazivost by byla srovnatelná či vyšší než TKO (odrazivost okolních objektů by měla být alespoň o 10 dB nižší než odrazivost TKO).

5.4.2 Monitoring 3D pohybů

Monitoring 3D pohybů s využitím TKO je pomocí dat středního rozlišení technicky obtížný až nemožný, a to právě vzhledem k nutnosti sledovatelnosti toho samého objektu z několika tracků (klesajících i stoupajících). To implikuje nutnost instalace více TKO blízko sebe (či alespoň do míst, která podléhají stejným pohybům), aniž by se vzájemně rušily (vysoká intenzita odrazu je možná i při pohledu "zezadu" odražeče) při současném zachování jejich viditelnosti (nezastíněnost nelze zajistit u řady případů orientací mostu) a rozumné váze.

Tento problém by pravděpodobně řešilo použití oboustranně odrážejících TKO či spíše aktivních transpondérů místo TKO za předpokladu viditelnosti ze všech potřebných směrů. Využití aktivní transpondérů doposud nebylo demonstrováno v operační praxi.

6 PŘESNOST A VALIDACE

Jako měřítko přesnosti se při zpracování dat metodou InSAR používá koherence. Koherence je vlastnost daného bodu (odražeče, resp. odrazné buňky), a její hodnotu odhadujeme jako

$$\gamma = \left| \frac{1}{N} \sum e^{j\varphi} \right|,$$

kde φ jsou fázová rezidua (fáze po odečtu odhadnutých výškových korekcí, odhadnuté rychlosti a příp. koeficientu teplotního pohybu) a N je počet interferogramů, tedy počet zpracovaných snímků snižený o 1. Její sm. odchylka je pak dána jako (Colesanti et al., 2003)

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{\sqrt{2N}} (1 - \gamma^2).$$

Zatímco odhad koherence nezávisí na počtu snímků, její sm. odchylka na počtu snímků závisí.

Koherence je měřítkem, jak fáze naměřená na daném bodě odpovídá modelu, který vždy počítá s pohybem lineárním v čase a teplotním pohybem úměrným zadaným teplotám. V případě nelineárního pohybu či nepřesných teplot je odhad koherence nižší, než odpovídá kvalitě odrazu od daného bodu.

Sm. odchylka fázových reziduí, resp. fáze samotné, převedená na naměřené hodnoty polohy (v mm) je funkcí koherence

$$\sigma_r[mm] = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{-2 \ln \gamma},$$

kde λ je vlnová délka radaru. Pro družici S-1 (C-band) hodnota koherence 0.7 odpovídá sm. odchylce jednoho měření 3.7 mm, koherence 0.8 hodnotě 3.0 mm, koherence 0.9 hodnotě 2.0 mm.

Sm. odchylku odhadnuté rychlosti lze vyčíslit jen přibližně (Colesanti et al., 2003) jako

$$\sigma_v = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sigma_r}{\sqrt{N} \delta\Delta T}$$

kde $\delta\Delta T$ je rozptyl časových základů (časových rozdílů mezi master snímkem a ostatními snímky)¹. Numericky tato hodnota přibližně odpovídá hodnotě sm. odchylky vypočtené z reziduí metodou nejmenších čtverců.

Obdobně lze vypočíst sm. odchylku (korekce) výšky či koeficientu teplotního pohybu.

Směrodatné odchylky pro 3D pohyb (separátně svislou a východo-západní složku, reálně tedy 2D) vyhodnocujeme a-posteriorně, z vyrovnání (je-li v buňce dostatečný počet bodů). Směrodatné odchylky σ_v vstupují do vyrovnání jako váhy pro jednotlivé body.

Hodnota vypočtená dle vzorců výše udává tzv. *interní přesnost (precision)* měření. V této hodnotě není zahrnut vliv ref. bodu (jehož vliv se vzhledem k faktu, že jeho koherence není 1, vyčísluje

¹ Z tohoto důvodu se volí master snímek přibližně uprostřed časové řady.

obtížně), vliv rozdílů v atmosférických zpožděních (které by měly být zanedbatelné do cca 1km vzdálenosti (Hanssen, 2001)) a navíc se jedná pouze o odhad koherence a nikoli o její skutečnou hodnotu.

Celý problém odhadu rychlosti pohybu, společně s korekcí výšky a koeficientem teplotního pohybu je navíc vzhledem k fázové nejednoznačnosti² nelineární. Nesprávné (výrazně vychýlené) odhady rychlosti (a ostatních parametrů) se objevují především v případech nižšího počtu snímků (pro družici S-1 cca do 30) a v případech nižší koherence (do 0.75), ale závisí i na přesnosti teplot a linearitě pohybu. Při interpretaci (zvláště v případě osamocených bodů či bodů obklopených body s výrazně odlišnými parametry) je tedy třeba postupovat opatrně a body s podezřením na nesprávný odhad nebrat v úvahu.

Pravděpodobně nejvýraznějším faktorem, ovlivňujícím přesnost odhadnutých parametrů, je závislost mezi jednotlivými parametry, které v koherenci nejsou vyjádřeny, nejčastěji pak závislost mezi rychlostí trvalého a teplotního pohybu, resp. mezi naměřenými teplotami a časem měření. Tato závislost teoreticky slábne při době měření alespoň 1 rok a při alespoň 18měs. sledování je pro většinu bodů zanedbatelná. Přesnost měřených teplot je vždy diskutabilní a s nelinearitou pohybu se numerická stabilita systému rovnic opět zhoršuje a stává se citlivou na přesnost teplot.

Z tohoto důvodu je vhodné předem znát místa s očekávanými pohyby, týkají-li se malé plochy, aby takový bod nebyl vyloučen jako nesprávně odhadnutý, a případný výrazně nelineární pohyb.

6.1 VALIDACE VÝSLEDKŮ

Návrh způsobu validace vychází z jejich omezení a dostupnosti referenčních dat.

Na kvalitativní úrovni lze vizuálně hodnotit hodnoty detekovaných parametrů v rámci datasetu nebo mezi datasety na základě prostorové konzistence hodnot bez jejich převedení do společného (reálného) směru.

Kvantitativní vyhodnocení nejprve vyžaduje převedení detekovaných hodnot rychlosti pohybu (příp. její směrodatné odchylky) ve validovaném datasetu do shodného (známého) směru a rozměru (časového úseku), jaký je naměřen ve validačním datasetu (geodetické měření, nezávislé měření z InSAR).

6.1.1 Porovnání s výsledky z geodetického měření

Jedná se o preferovanou variantu, pokud jsou geodetická měření konzistentní s navrženým průběhem monitoringu InSAR z hlediska sledovaných prvků objektu a jeho časového pokrytí.

6.1.2 Vyhodnocení prostorové konzistence detekovaných pohybů

² naměříme-li hodnotu fáze 0, může jít o hodnotu polohy 0 či jakýkoli celočíselný násobek $\lambda/2$

V rámci kvalitativního vyhodnocení prostorové konzistence detekovaných pohybů z jednoho tracku jsou identifikovány clustery oblastí s podobnými vlastnostmi, případně jednotlivé body s odlišnými parametry, než má okolí:

- rychlost trvalého pohybu
- výška
- koeficient teplotního pohybu.

V případě aplikace tohoto postupu na body z analýzy Sentinel-1 (obecně ve středním rozlišení) se tento požadavek omezuje možnosti detekce pohybu na malé ploše – odlehlé body (z hlediska projevu) jsou označeny jako chybné.

6.1.3 Porovnání výsledků z více družicových drah

V případě porovnání drah z VHR družic lze provést kvantitativní vyhodnocení agregovaných statistických hodnot (průměr, sm. odchylka) naměřených rychlostí pohybu:

- Pro logicky vymezené úseky dle konstrukčních charakteristik mostu (náspy, segmenty nosné konstrukce, okolí podpěr atd.)
- Pro clustery vymezené statisticky na základě podobnosti

Vzhledem k menšímu počtu detekovaných bodů a jejich nejednoznačnosti vzhledem k rozlišení toto není doporučeno v případě výsledků z drah družice Sentinel-1. Porovnání výsledků z různých drah Sentinel-1 je proto provedeno kvalitativně:

- Porovnání konzistence výsledků ze dvou blízkých drah (buď ASC, nebo DESC - podobná orientace, různý inc. úhel) umožňuje identifikovat (často izolované) body s nesprávně odhadnutými parametry (rychlost pohybu, oprava výšky, koef. teplotního pohybu).
- V případě odlišných výsledků, především z protilehlých drah, je třeba zvážit možnost odrazu od různých objektů (např. vozovka vs. protihluková stěna či přilehlý svah).

Za splnění předpokladu dostatečného počtu detekovaných bodů s dostatečnou koherencí ve všech drahách a není-li sporu ohledně objektu, od kterého se signál odráží, indikuje kombinace jejich detekovaných hodnot rychlosti nejen pravděpodobný směr pohybu, ale i spolehlivost detekce daného pohybu v rámci kvalitativního vyhodnocení:

- Reálný pohyb by měl být viditelný konzistentně ve všech drahách, proto je-li tomu tak (s jakýmkoli znaménkem), je spolehlivost detekce vysoká
- Pokud je pohyb detekován konzistentně ve všech drahách se stejným znaménkem a s podobnými hodnotami, je spolehlivost velmi vysoká a jedná se o pohyb ve svislém nebo blízkém směru.
- Je-li pohyb detekován konzistentně v blízkých drahách, je spolehlivost detekce pohybu vysoká, pokud není pohyb v protilehlých drahách nulový (průmět do LOS je nulový či zanedbatelný pouze v případě, že je pohyb na LOS kolmý). Pokud lze takový směr pohybu vzhledem ke konstrukci nebo na základě znalosti situace vyloučit, je spolehlivost naopak nízká.

6.1.4 Porovnání výsledků s výsledky z družice s vysokým rozlišením

Porovnání výsledků zpracování dat z družice Sentinel-1 s výsledky zpracování dat z některé z VHR družic (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed) umožňuje v některých případech přesněji identifikovat objekt, od kterého odraz nastal, což je v případě družice Sentinel-1 vzhledem k jejímu rozlišení obtížné. Porovnání je provedeno kvalitativně, případně kvantitativně pro body / skupiny bodů, které jsou jednoznačně identifikovatelné s velkou mírou jistoty.

6.1.5 Porovnání výsledků s výsledky pro stabilní oblast

Posouzením dosažených výsledků ve stabilní oblasti lze získat představu o praktické (vnější) míře přesnosti (accuracy) metody pro daný dataset. Je zvolena oblast, kterou lze označit za stabilní, a pro všechny detekované body v této oblasti je vyhodnocena rychlost pohybu za stejných podmínek jako pro monitorovanou oblast (most). Na základě předpokladu o stabilitě všech bodů v oblasti (a příp. po vyloučení odlehlých měření, která mohou indikovat pohyby malých objektů nebo body s nesprávně odhadnutými parametry) je zde vyhodnocena směrodatná odchylka naměřených rychlostí (dále externí sm. odchylka). Na rozdíl od dříve diskutované teoretické sm. odchylky, která je měřítkem, jak fázový průběh na daném bodě odpovídá modelu (pro lineární a teplotní pohyb), tato praktická sm. odchylka hodnotí rozdíl mezi naměřenou a skutečnou rychlostí. Hodnota je spočtena nikoli pro bod, ale pro plochu (několik tisíc bodů) a je platná pro daný dataset.

Experimentálně bylo zjištěno, že i tato praktická sm. odchylka závisí na koherenci, a pro body s koherencí nad určitým prahem (obvykle 0.70-0.75) ji lze odhadnout jako funkci teoretické sm. odchylky, a tedy prezentovat její odhad pro každý bod.

6.2 VALIDACE VÝSLEDKŮ S VYUŽITÍM REFERENČNÍCH MĚŘENÍ

Koncept validace závisí na typu InSAR měření: 1. zpětné vyhodnocení pohybů v minulosti (S1) nebo 2. plánovaný monitoring pohybů v budoucnosti (S2).

S1: Validace zpětná	
Validaci pomocí geodetických měření lze provést, pouze pokud měření na měřících bodech umístěných na mostě probíhalo v průběhu pokrytí analyzovanými družicovými daty: • geodetické: vychýlení, 3D pohyby • nivelace: poklesy (opěr, podpěr)	Při srovnání historických měření (InSAR + geodetické): • Nelze volit validační body (jsou dané místem provedeného geodetického měření) • Nelze volit časový interval pro validaci (frekvence geodetického měření byla nezávislá na InSAR měření, obvykle s intervalem 1 roku) • Je nutná interpolace rychlostí trvalých pohybů (nebo naměřených poloh pro každý čas InSAR měření) v prostoru • Je třeba posoudit nutnost interpolace InSAR měření v čase s ohledem na intervaly InSAR měření a rychlost pohybů • Je třeba uvažovat nepřesnost geolokace InSAR výsledků (v závislosti na rozlišení)
S2: Validace budoucího InSAR monitoringu (s nebo bez TKO)	
Při plánování budoucího sledování pomocí InSAR je možné naplánovat nebo dohodnout postup geodetických měření	Nivelace pomocí stávajících značek (bez instalace TKO) • Lze na nivelačních značkách osazených na mostě (obvykle

v souladu s prostorovým a časovým vymezením měření: • Frekvenci geodetického měření lze zharmonizovat s plánem měření InSAR co do délky a frekvence. • Předpokládaná proveditelná (dostatečná?) frekvence geodetických měření je 2-4 krát za rok (v souladu s počtem postupných vyhodnocení InSAR)	na boku spodku dřívku podpěr a opěr). • Vzhledem k tomu, že tyto body jsou mimo viditelnost v LOS, není možné přímé porovnání (pouze srovnání poklesu spodní a horní stavby). Pro osazení dalších bodů by bylo nutné zažádat ŘSD. Při sledování horní stavby je nutné opravovat geodetická měření o teplotní dilataci, navíc dochází k otřesům. Nivelace značek na prvku spodní stavby, na kterém je instalován TKO • Lze provádět za předpokladu, že výška TKO vůči nivelační značce na spodní stavbě se nemění jinak než v závislosti na teplotě. Vliv teplotní dilatace InSAR měření odhaduje (z měřených teplot vzduchu) a odečítá. V případě nivelačních měření ve výšce by bylo nutné teplotní dilataci modelovat a následně odečítat, a očekáváme výrazné zhoršení přesnosti nivelačních měření (vlivem nepřesnosti teplot). Při výšce TKO 10 m, dilatačním koeficientu 10-5 oC-1 a chybě teploty 10°C (rozdíl mezi teplotou vzduchu a pilíře) je nepřesnost vlivem chyby teploty 1 mm, srovnatelná s přesností nivelace. V případě InSAR výsledků je tato chyba částečně kompenzována odhadem koeficientu teplotního pohybu a částečně přejde do reziduí (zvyšující sm. odchylku daného bodu). Nivelace TKO • Lze pouze pokud je TKO umístěný do výšky, ve které je dosažitelný pomocí latě (případně ze žebříku). • V tomto případě je porovnání přímé, není třeba uvažovat chyby v geolokaci InSAR měření, není třeba interpolace v prostoru, není třeba interpolace času s ohledem na očekávanou rychlost pohybu (do 10 mm/rok) a intervaly InSAR měření Polohové měření (3D) s nebo bez TKO • Lze zaměřovat na body osazené odrazkami buď na mostě, nebo na TKO
Přesnost geodetických měření - Velmi přesná nivelace v místním systému cca 1 mm (prakticky závisí přesnost na l, kde l je délka pořadu [km]) - o GNSS nelze použít pro vertikální měření (přesnost cca 2 cm) - Polohová měření - o v místním systému cca 3 mm - o GNSS, rychlá statická metoda: polohová přesnost 3-5 mm (10-15 min. měření) - o GNSS, statická metoda: polohová přesnost 1-2 mm (min. 1-2 hod. měření)	

Geodetická měření měří polohu, InSAR odhaduje rychlost pohybu, tedy změnu polohy v čase. Aby bylo možné provést přímé srovnání, je pro provedení validace třeba:

- Provést geodetické měření alespoň 2x a výsledky zreferencovat vůči jednomu z těchto dat, sm. odchylka tohoto rozdílu pak bude dána jako 2-násobek sm. odchylky jednoho měření,
- Odhadnutou rychlost pohybu z InSAR přepočítat na změnu polohy dle doby mezi geodetickými měřeními. Sm. odchylku této hodnoty vypočteme ze sm. odchylky odhadnuté rychlosti.
- Naměřené hodnoty rychlosti či polohy (z InSAR) převést do požadovaného (měřeného) směru (za předpokladu, že skutečný pohyb probíhá v tomto směru), úměrně s hodnotou rychlosti se navýší i její sm. odchylka

- V případě nutnosti interpolace v prostoru se se zvyšujícím se počtem vstupujících bodů snižuje sm. odchylka.
- Sjednocení referenčních bodů (v prostoru), bez vlivu na velikost sm. odchylek. Je třeba zajistit/potvrdit, že ref. body obou měření jsou stabilní (či se pohybují stejně rychlostí).

Porovnání pak bude provedeno s nulovou hypotézou, že obě měření (geodetické i InSAR) pocházejí ze stejného základního souboru.

- Pokud je k dispozici více geodetických měření (která lze považovat za výběry ze stejného souboru), je možné pro posouzení, zda obě měření pocházejí ze stejného základního souboru, použít Fischerovo rozdělení (parametry jsou sm. odchylky obou měření a počty stupňů volnosti obou měření).
- Pokud není k dispozici více geodetických měření (stupeň volnosti je tedy 0), Fischerovo rozdělení použít nelze. Lze posoudit překryv konfidenčních intervalů obou měření vůči jejich sjednocení

$$\frac{d_1 + \sigma_1 - d_2 + \sigma_2}{d_2 + \sigma_2 - d_1 + \sigma_1},$$

kde d_1 , d_2 jsou naměřené hodnoty (oběma metodami), $d_2 > d_1$, a σ_1 , σ_2 jsou jejich sm. odchylky. Pro úspěšnou validaci by měl tento poměr být kladný (vždy je menší než 1), vyšší hodnota znamená lepší shodu. V případě neshody lze uvažovat ještě mezní chyby (hodnoty σ_1 , σ_2 nahradit jejich dvojnásobky).

V případě instalace referenčního TKO kdekoli v oblasti pokryté snímkem lze provést vlícování dle souřadnic TKO. Zde by byla vyloučena systematická chyba (posun), vzniklá srovnáváním optického a radarového snímku, a geolokace by podléhala pouze náhodné chybě, dané směrodatnou odchylkou korekce výšky pro daný bod. V případě, že takováto geolokace není možná, mohou vznikat systematické chyby geolokace - posun. Vliv této chyby je možno ověřit experimentálně na základě srovnání výsledků vlícovaných pomocí TKO a takto neupravených.

EKONOMICKÉ ASPEKTY

Náklady na zavedení postupu uvedeného v metodice na straně zadavatele zakázky se vztahují k časovým nákladům a ceně práce při aplikaci uvedených postupů v rámci definice technických požadavků.

Odhad očekávatelných nákladů za službu sledování rychlosti trvalých pohybů pomocí radarové interferometrie jsou uvedeny v Tabulce 12.

Ekonomický přínos InSAR lze zhodnotit obecně ve smyslu redukce rizika spojeného s provozem dopravní infrastruktury, na úrovni metodiky pak odhadem pravděpodobných nákladů a kategorizace opatření a souvisejících nákladů, které při aplikaci doporučeného postupu povedou k účelnému využití prostředků.

UPLATNĚNÍ METODIKY

Uplatnění je uvedeno v kapitole 1.2. Předpokládá se primárně na straně správců objektů dopravní infrastruktury, resp. jejich organizačních útvarů zodpovědných za definici technických požadavků na návrh řešení v rámci zadání zakázky na sledování pomocí interferometrie. Dále na straně uchazečů a řešitelů uvedených zakázek.

PROHLÁŠENÍ O NOVOSTI POSTUPŮ

Radarová interferometrie je celosvětově stále využívanější technikou pro sledování deformací povrchu. Jak bylo prokázáno řadou studií, satelitní data velmi vysokého rozlišení se hodí i pro monitoring objektů silniční infrastruktury.

Sledování trvalých pohybů silniční infrastruktury pomocí dat středního rozlišení však doposud bylo provedeno jen v ojedinělých jednorázových případech, neboť naráží na řadu praktických problémů daných nižším rozlišením. U družice Sentinel-1 jsou ale tyto problémy vyváženy výhodami plynoucí z pravidelné a dlouhodobé časové základny, nulové pořizovací ceně dat a možnosti sledování z více směrů najednou. Ucelená metodika postupu vyhodnocení proveditelnosti a provedení žádosti o umístění TKO na mostní objekt dosud nebyla zpracována ani publikována.

Jak bylo ukázáno praktickou demonstrací v rámci tohoto projektu, kdy byla sledována řada mostů na Ostravsku a ve středních Čechách na kterých byly identifikovány trvalé pohyby, pomocí dat Sentinel-1 je možné sledovat pohyby řady prvků dopravní infrastruktury, vč. mostů a jejich náspů. Toho bylo dosaženo aplikací nových postupů založených na využití nejaktuálnějších metod pro monitoring malých oblastí a oblastí s příspěvkem teplotních pohybů pomocí InSAR.

Dále byly podle dostupných dat poprvé ověřeny možnosti instalace trvalých koutových odražečů na mostní objekt za účelem sledování pohybů vybrané části jeho konstrukce pomocí družicových dat. Prezentovaný postup vyhodnocení je novým postupem, který byl navíc prakticky ověřen v rámci provedené demonstrační instalace schválené ze strany ŘSD.

Klíčové poznatky z provedených kroků v rámci praktických demonstrací byly zpracovány do metodického postupu, který umožňuje jak zadavateli, tak zpracovateli zakázky vyhodnotit kritéria pro úspěšnou implementaci monitoringu na základě analýzy InSAR z družice Sentinel-1.

SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

PUBLIKACE V RÁMCI PŘEDCHOZÍHO VÝZKUMNÉHO PROJEKTU TAČR

Kolomazník, J., Hlaváčková, I., Bartaloš, T., Šustera, J.: *Přehled jevů a dat DPZ pro použití v dopravě & Analýza přínosu vybraných aplikací. Projektový výstup v rámci projektu TAČR TB0100MD021. Prosinec 2013.*

Kolomazník, J., Hlaváčková, I., Lazecký, M.: *Metodika výběru dat a metod InSAR pro vytvoření mapy rizika sledování subsidence a nežádoucích deformací dopravní infrastruktury. Certifikovaná metodika v rámci projektu TAČR TB0100MD021. Prosinec 2014.*

NEJNOVĚJŠÍ POUŽITÉ PUBLIKACE S PROBLEMATIKOU SLEDOVÁNÍ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Bakon, M. et al. 2014. *Infrastructure Non-linear Deformation Monitoring Via Satellite Radar Interferometry. In Proc. CENTERIS 2014, Troia, pp. 294-300.*

Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., Crippa, B., 2010, *Persistent scatterer interferometry: Potential, limits and initial C- and X- band comparison, Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 76, no. 9, pp. 1061-1069*

Hlavacova, I., Kolomaznik, J., Halounova, L.: *TerraSAR-X Staring Spotlight Monitoring of a Highway Bridge in the Czech Republic, Fringe 2015, ESA.*

Lazecky, M., Bakon, M., Sousa, J. J., Perissin, D., Hlavacova, I., Patricio, G., Papco, J., Rapant, P., Real, N., *Potential of multi-temporal InSAR techniques for structural health monitoring, In Proc. CENTERIS 2014, Troia*

Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., Sousa, J. J. M., Hlavacova, I., Real, N. (2015), *Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations, Procs. JURSE, Lausanne, April 2015*

Zhang, L., Ding, X., Lu, Z., 2010, *Monitoring of Bridge Deformation with InSAR: An Experimental Study, XXIV FIG International Congress, Sydney, 11-16 April 2016*

DALŠÍ POUŽITÉ PUBLIKACE

Colesanti, C., A. Ferretti, F. Novali, C. Prati, and F. Rocci., *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 41(7), 701–1685. 2003.*

Hanssen, R. F.: *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001*

Jung, H.-S., Lee, T. Lu, Z., Won, J.: *Ionospheric Correction of SAR Interferograms by Multiple-Aperture Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 51(5):3191-3199 · May 2013*

Ketelaar, V. B. H.: *Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques. Springer Verlag, Press, Oxford, 2009.*

Samiee-Esfahany S., Hanssen R., van Thienen-Visser K., Muntendam-Bos A.: *On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, in Proceedings of the Fringe 2009 Workshop, ESA SP-677, ESTEC Oxford, UK, Noordwijk, The Netherlands*

Ugusang, D.M., Honda, K., Saito, G.: *ASSESSMENT OF SMALL PASSIVE CORNER REFLECTORS FOR GEOMETRIC CORRECTION OF RADARSAT FINE MODE SAR DATA. Proceedings of 22nd Asian Conference in Remote Sensing, Singapore. November 2001.*

SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

Lazecky, M., I. Hlavacova; M. Bakon; J. J. Sousa; D. Perissin; G. Patricio, "Bridge Displacements Monitoring Using Space-Borne X-Band SAR Interferometry," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing , vol.PP, no.99, pp.1-6 doi: 10.1109/JSTARS.2016.2587778.

Hlaváčová, I., Kolomazník, J.: Monitoring of bridge deformation velocity and profile using SAR persistent scatterers interferometry. Poster at ESA Living Planet in Prague. May 2016.

Hlaváčová, I., Kolomazník, J.: Monitoring of bridge deformation velocity and profile using SAR persistent scatterers interferometry (from Sentinel-1). Poster at ESA Living Planet in Prague. May 2016.

PODĚKOVÁNÍ

Pracovníkům ÚKKS ŘSD Ing. Jiřímu Hlavatému, PhD., Ing. Čestmíru Kopřivovi, Ing. Jiřímu Slámovi, Ing. Josefu Jalůvkovi a Ing. Dimitriosovi Partenidisovi za konzultace, připomínky a asistenci v průběhu realizace projektu

Pracovníkům firmy Metalicon, především Petru Zapletalovi za konzultace při designu TKO a jejich výrobu

Asoc. Prof. Daniele Perissinovi, PhD. za konzultace postupů a rychlé řešení problémů a bugů v softwaru SARProz(c)

doc. Ing. Evě Jiráňkové, PhD. (VŠB-TUO) za konzultace konceptu validace a přesnosti

O AUTORECH

Mgr. Jan Kolomazník

Jan Kolomazník má více než 9 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 praktické části – metodických zásadách vyhodnocení proveditelnosti, validačních přístupech. Podíl práce na předložené metodice: 35%

Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D.

Dr. Ivana Hlaváčová se více než 12 let věnuje výuce, vědecké a publikační činnosti na Katedře geomatiky Stavební fakulty ČVUT a dále analýze interferometrických dat ve firmě GISAT. Specializuje se na interferometrické zpracování radarových dat DPZ, metody trvalých odrazečů 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 metodiky – metodických zásadách vyhodnocení proveditelnosti, praktické metodiky InSAR a validačních přístupech. Dále v rámci projektu na vyhodnocení dat z družice Sentinel-1 pro pilotní vyhodnocení metod InSAR pro sledování mostů a přilehlé infrastruktury v rámci. Podíl práce na předložené metodice: 35%

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 rešeršní a praktické části, vyhodnocení použitelnosti TKO a validačních přístupech. V rámci projektu se dále podílel na návrhu designu a vyhodnocení použitelnosti TKO v rámci přípravy prototypu a zpracování dat InSAR. Podíl práce na předložené metodice: 15%

Ing. Marek Pelant

Ing. Marek Pelant se více než 11 let věnuje projektování mostních a inženýrských konstrukcí v praxi, prohlídkám mostních objektů, vykonávání autorského dozoru a konzultační a poradenské činnosti. Je členem profesní organizace ČKAIT, autorizovaný v oboru IM00 - Mosty a inženýrské konstrukce. V současné době pracuje na pozici vedoucího projektanta ve společnosti v soukromé sféře.

Ing. Pelant se podílel na vypracování praktické části metodiky – vyhodnocení konstrukčních aspektů pro sledovatelnost pomocí InSAR, návrhu vhodných míst pro instalaci a vypracování metodického rámce pro zpracování a integraci teplotních pohybů do analýzy InSAR. Podíl práce na předložené metodice: 15%

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 14001:2004.