

Sít' výzkumných institucí a podniků pro infrastrukturu

Forschungs- und Unternehmensnetz für Infrastrukturen

RENI-100686680

Sít'ové kolokvium

Použití radarové interferometrie v inženýrské geologii a geotechnice

Anwendung der Radarinterferometrie in der Ingenieurgeologie und Geotechnik

11. června 2024, Albertov 6, Praha 2 a online

11. Juni 2024, Albertov 6, Prag 2 und online





Použití radarové interferometrie v inženýrské geologii a geotechnice

Jan Jerman (PřF UK)

jan.jerman@natur.cuni.cz

11.6.2024

Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

Obsah prezentace

- Úvod
- InSAR – základy teorie
- Scénáře aplikace InSAR v IG/GT

Monitoring rizik v ochranných pásmech dopravní infrastruktury

- Aplikovaný výzkum
- Spolupráce soukromého a výzkumného sektoru: **snížení rizik, automatizace, digitalizace**



UNICORN

Integrace a diseminace do ICT
(aplikace RiMo)



PŘÍRODOVĚDECKÁ
FAKULTA
Univerzita Karlova

Výzkum:
**Možnosti
integrace InSAR
do IG**



Fakulta životního
prostředí

Výzkum:
Pasportizace vegetace
z UAV DPZ



Aplikovaná metodika
družicové DPZ a
automatizace/digitalizace:

- InSAR
- Detekce změn
- Detekce vegetace

Výstupy:

- modely
- metodiky a studie
- software
- mapy

Vytvoření vhodných
podmínek pro
**komercializaci
technologie DPZ**



- Synthetic Aperture Radar instrument (SAR)
 - Satelitní platforma
 - Výška > 600 km, polární dráhy
 - Frekvence opakovaného snímání (4-16 dnů)
 - Anténa vysílá **radarový pulz** (vlna)
 - **Záznam signálu odraženého od povrchu**
 - Intenzita (Amplituda)
 - **Fáze** (periodický charakter)
 - **Vlnové délky**

	Rozlišení
■ L (1.2 GHz, 23 cm)	SpotLight (0.25-1m)
■ C (5.4 GHz, 5.5 cm)	StripMap (3 – 5 m)
■ X (9.6 GHz, 3.1 cm)	S-1 IW (5 - 10m)

→ **Odrazivost, přesnost, detekovatelný posun,**

velikost objektu

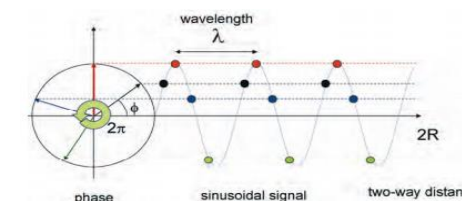
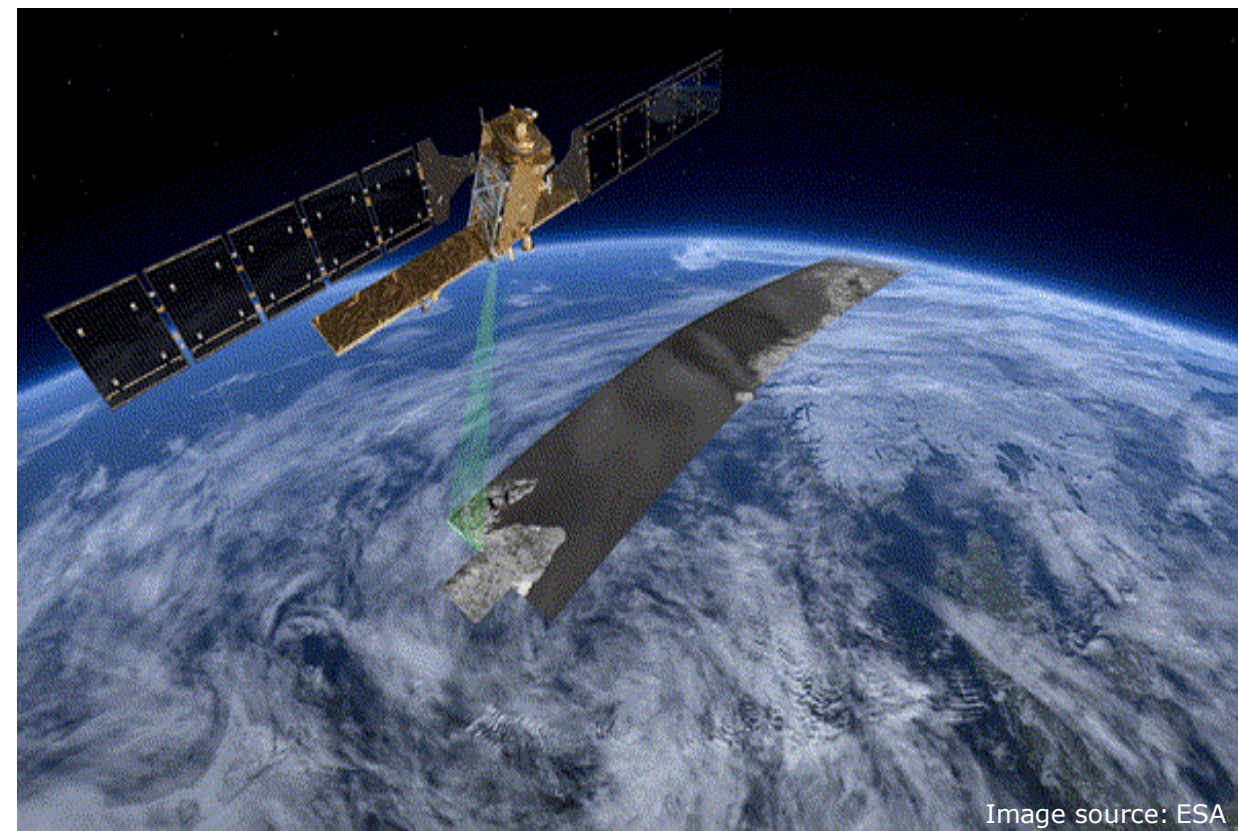
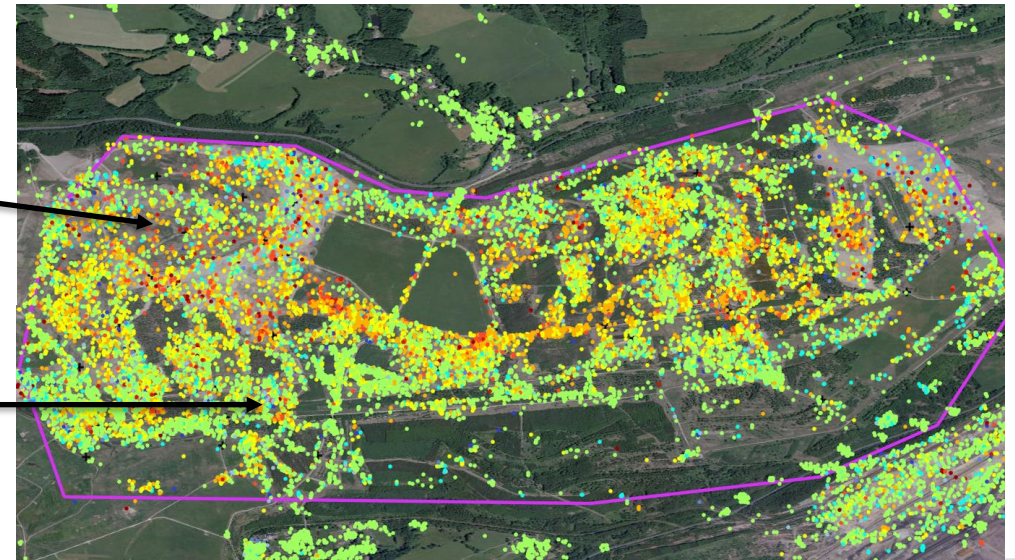
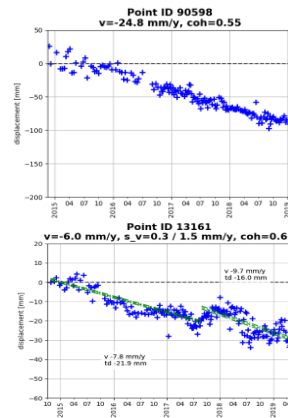
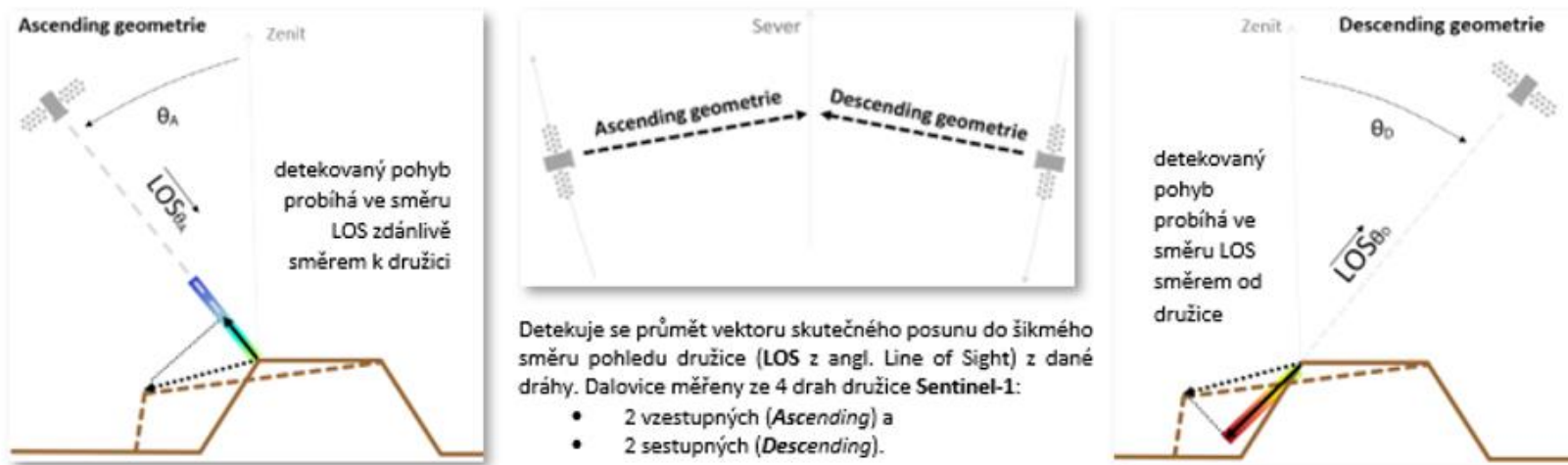


Image source: ESA

- Měření **pohybu povrchu Země z časových řad SAR snímků**
 - 2.. n **rozdílů fází** odražené radarové vlny > *Změna polohy*
 - Signál reflektovaný od ploch/objektů („targets“) > *Měříme projev. Příčina? Spojení s IG*
 - Odhad průměrné **rychlosti deformace** (mm/rok)
 - Vysoká přesnost: $std_{VEL_AVG} > 1 \text{ mm/rok}$ pro nejlepší PS
- Výsledek = **Mapa deformací**
 - Rychlosti jednotlivých bodů pro různé časové úseky



- **Šikmé snímání z boku, z více směrů**
 - Sentinel-1: 3-4 protilehlé dráhy
 - → možnost rozkladu vektoru pohybu **do vertikální a horiz. složky**



■ Výhody

- Distantní měření
- Prostorová pokryvnost a konzistence
- Frekvence měření
- **Archivní snímky – retrospektivní** mapování
- Přesnost (3 - 5 mm/r pro kvalitní odražeče)
- Dlouhodobý monitoring
- Doplnkovost
- Možnost instalace TKO
- Snímky zadarmo
 - Sentinel-1 (C-band)
 - ROSE-L (L-band)



■ Limity

- Stochastický charakter distribuce PS/DS bodů
- Atmosférické vlivy
- Fázový šum (decorrelation)
 - Vegetace
 - Změny povrchu (navážky, odkopy, orba, rekonstrukce)
 - Charakter pohybu (velká rychlost, nepravidelnost)
- Necitlivost vůči S-J pohybům
- Pouze odhad reálného směru pohybu
- Neumožňuje přímo určit kauzalitu

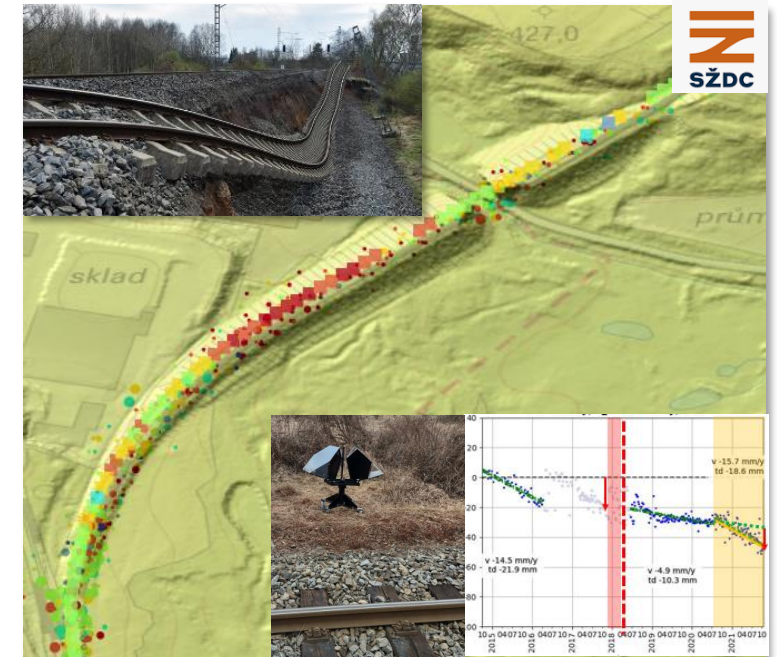
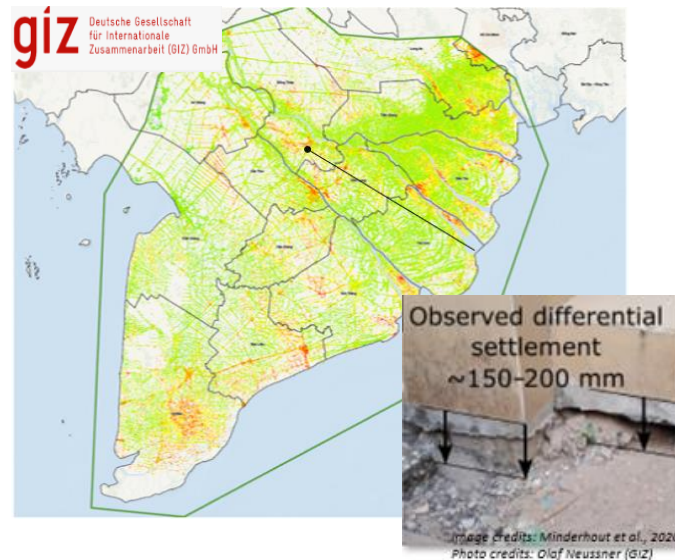
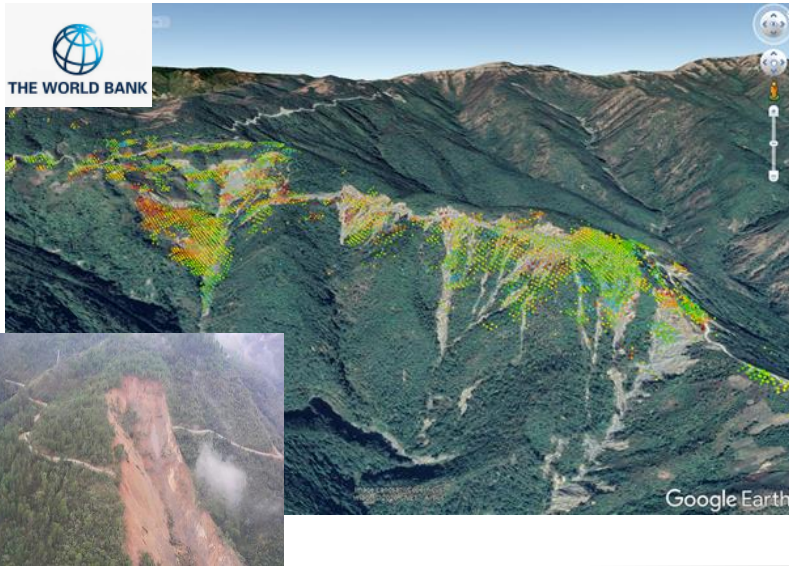
- **Geohazardy**

- **Svahové nestability** (sesuvy) - *spádnice*
- **Poklesy ~ Subsidence** - *vertikála*
 - Tektonika, krasové jevy
 - Zatížení (komprese podloží)
 - Poddolování, tunelování
 - Těžba spodní vody, ropy, plynu, ukládání CO2

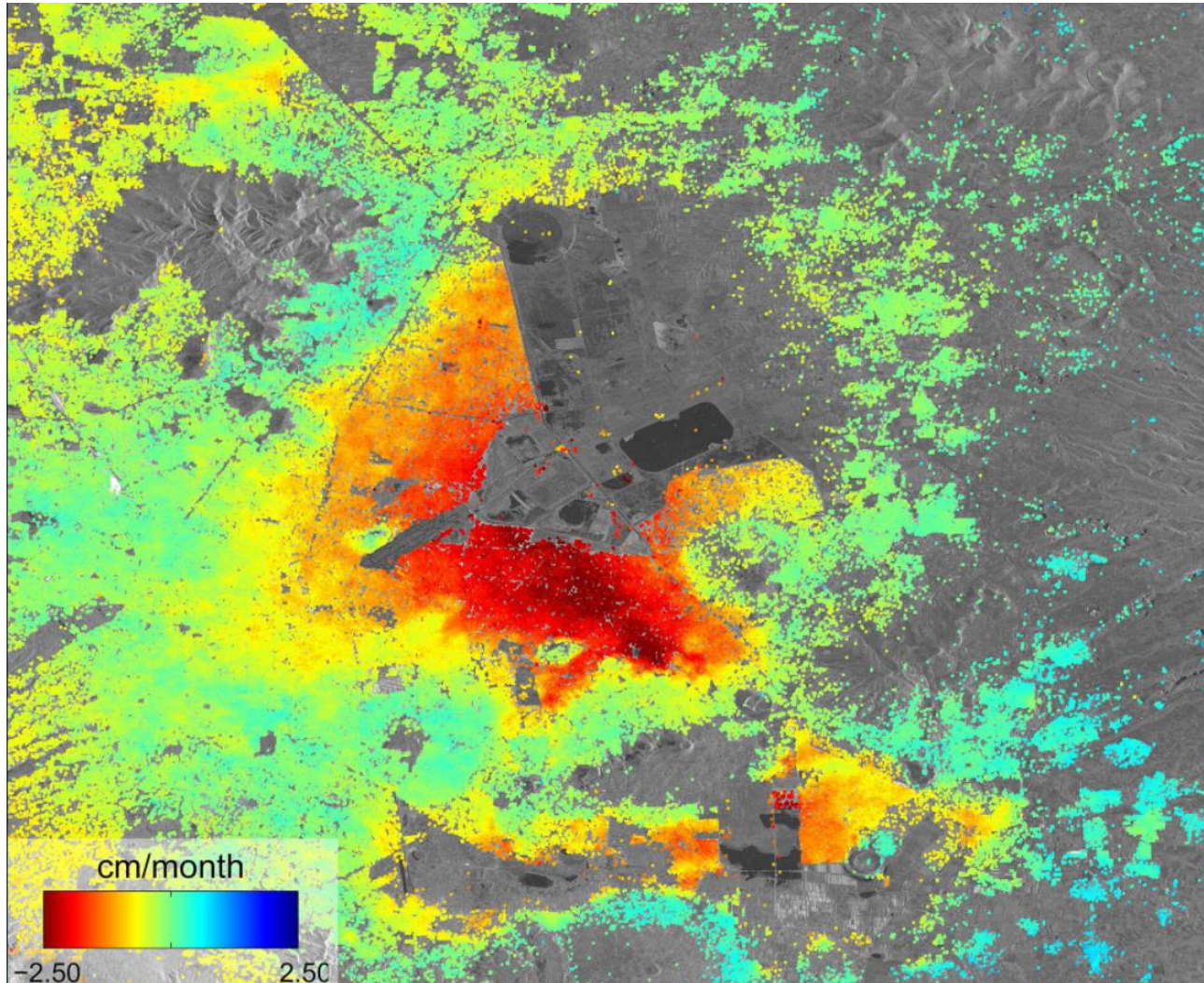
- **Infrastruktura a utility / Budovy**

(silnice, železnice, přehrady, sítě, produktovody, ...)

- Strukturální integrita
- Deformace vlivem nestability podloží / okolí

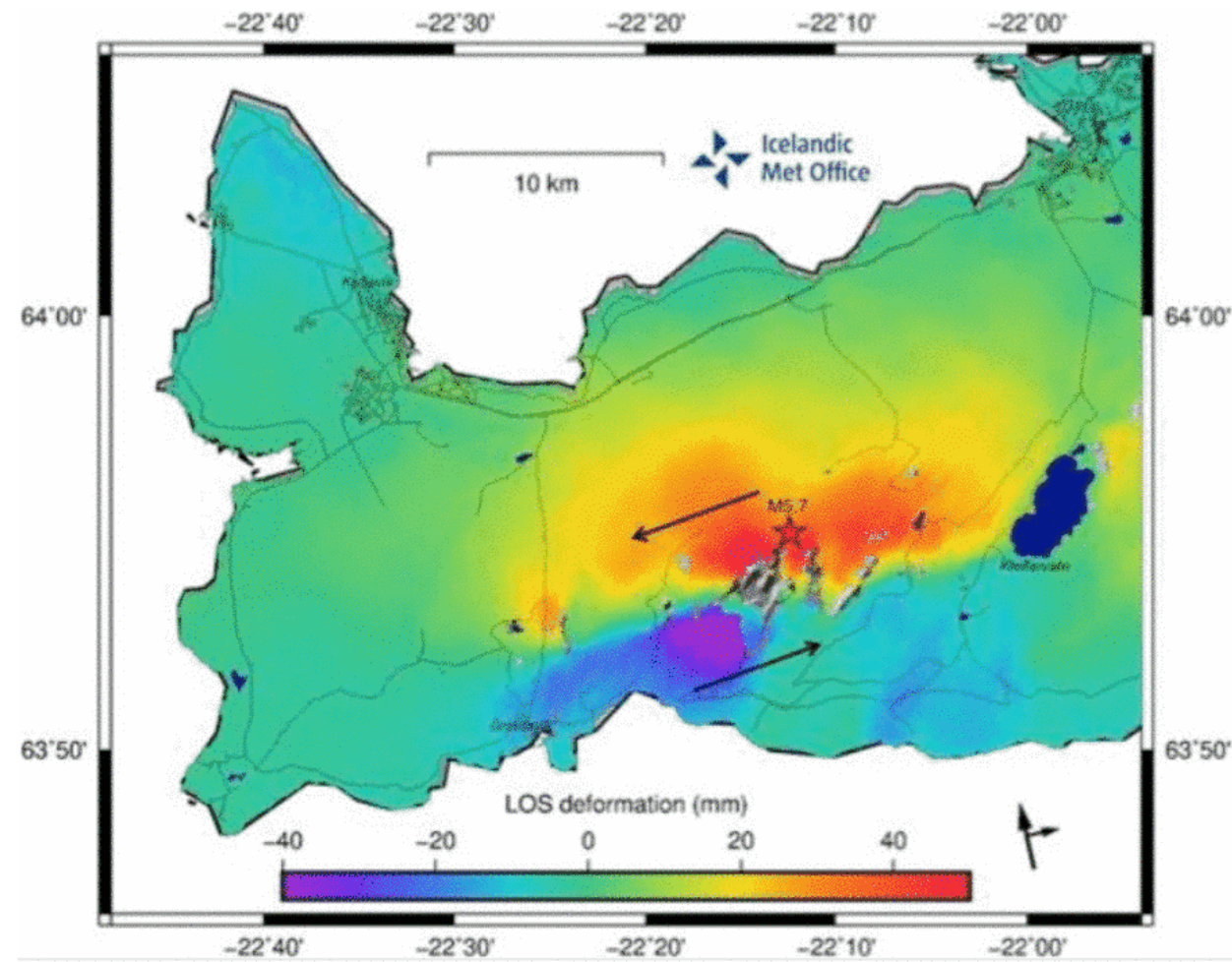
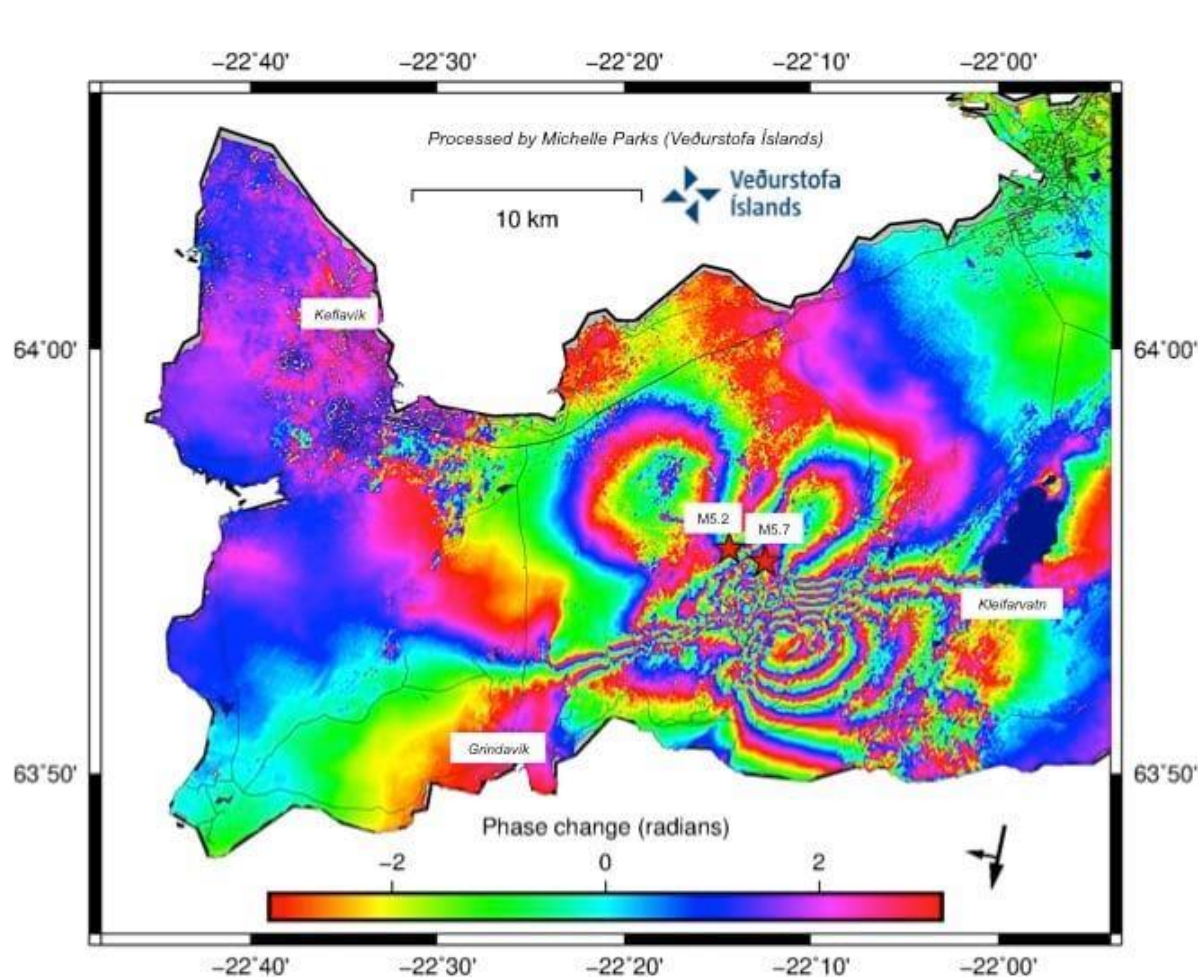


Mexico city



- **Sedání díky čerpání podzemní vody** je dlouhodobým problémem
- „A Pac-Man-shaped subsidence zone has been observed over this mean velocity map with the subsidence easily over 30 cm yr^{-1} .“
- Zabránění povodní – odvedení přítoků do bezodtokého jezera a tedy zamezení doplňování podzemní vody
- Růst populace – 2,4 mil (1950) → 22 mil (2020); a tedy zvýšení potřeb obyvatelstva
- **Vysušené dno jezera** s extrémně stlačitelnými jezerními sedimenty (80 m mocné málo propustné jíly na zvodni – aluviálních štěrkopískách)

Přicházející erupce na Reykjanes peninsula na Islandu



Satelitní interferometrie (InSAR) + IG/GT

Interreg



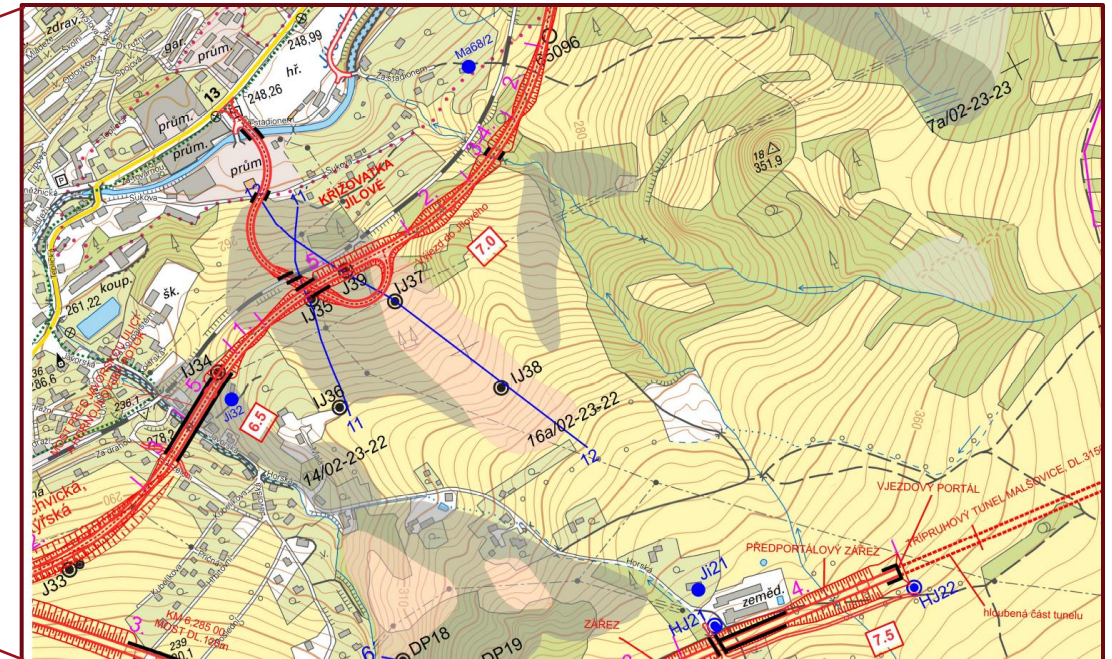
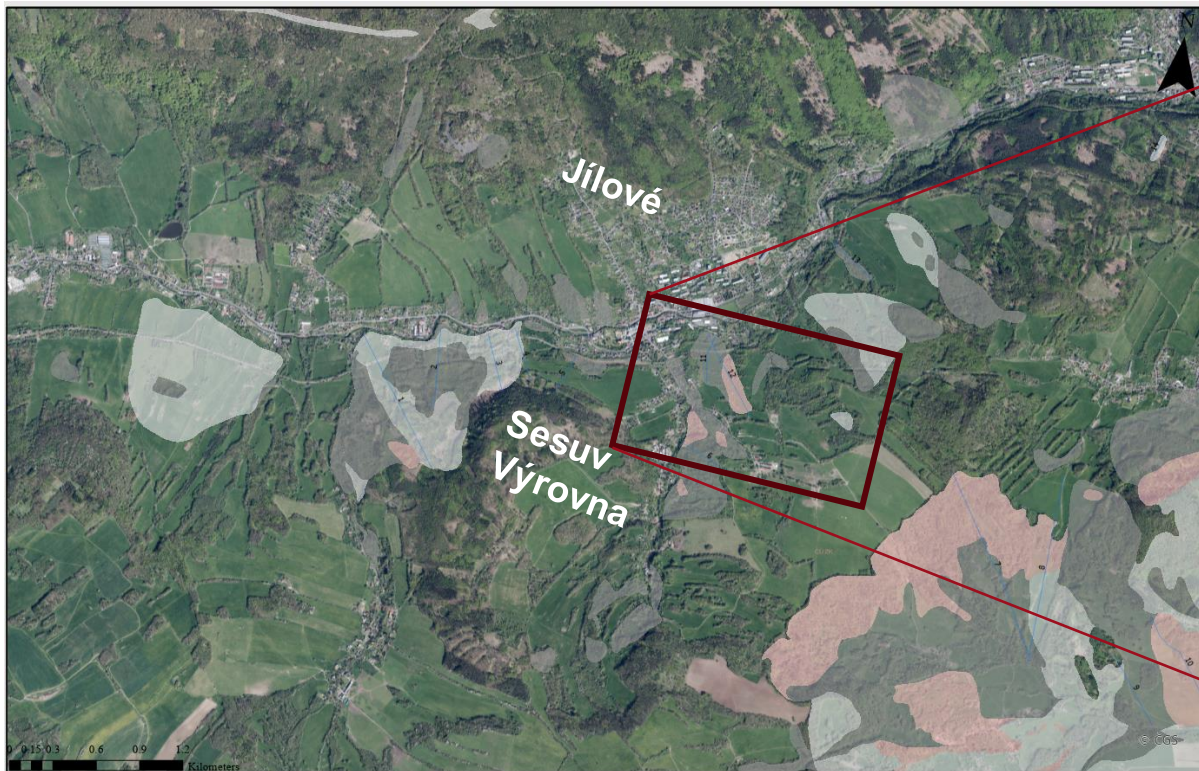
Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

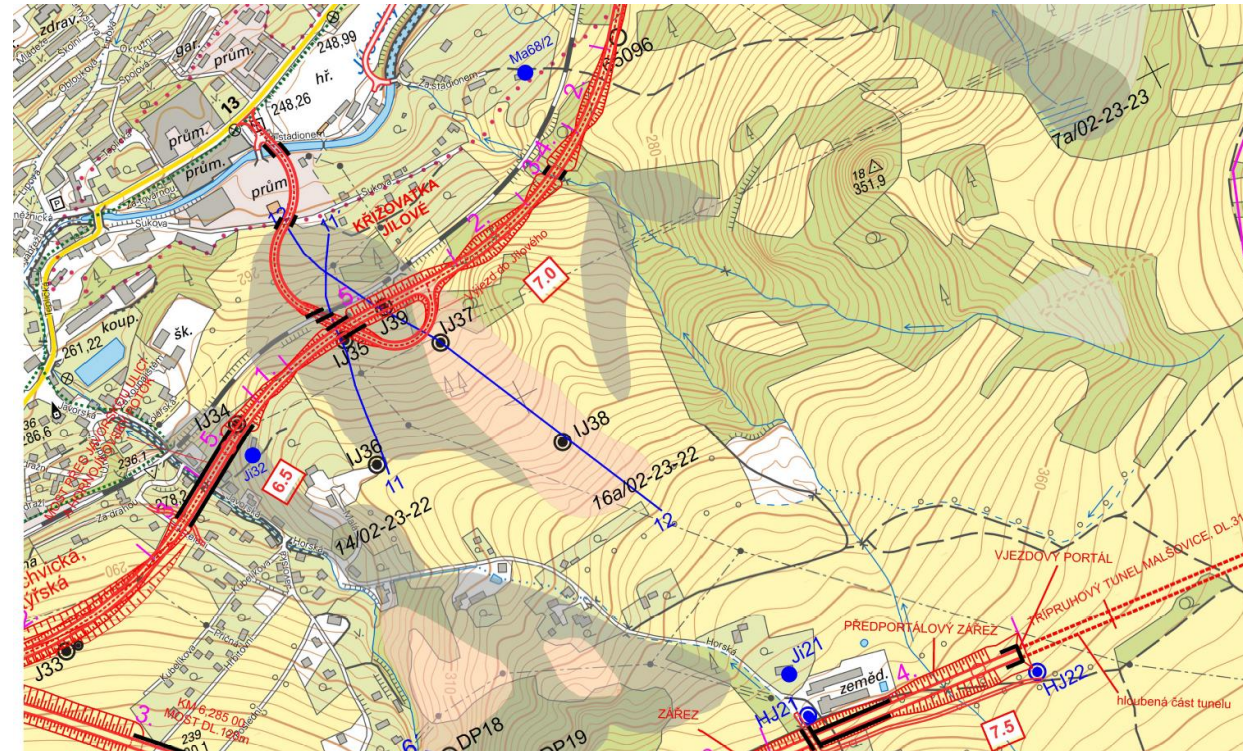
- Vyhodnocení vhodnosti použití výsledků měření InSAR jako podkladu pro inženýrsko-geologické mapování a geotechnické analýzy
- 1) Zakomponování InSAR do standardního IG průzkumu a zhodnocení jeho přínosu pro vyhodnocení svahových nestabilit v okolí liniové stavby
 - Děčín I/13 + Kozí dráha
- 2) Zakomponování měření InSAR do analýzy **stability**, **2D a 3D deformačních modelů** a **komplexního monitoringu oblasti**
 - Sesuvné území Prackovice, D8
- 3) Zapojení InSAR do standardního **monitoringu potenciálně nebezpečné lokality**; instalace monitorovacího systému
 - Dubičná

InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

- Zapojení InSAR do standardního GT/IG průzkumu pro liniovou stavbu?
- Přeložka silnice I/13 kopírující železniční trať Děčín – Oldřichov u Duchcova (*Kozí dráha*) vedoucí přes komplexní sesuvná území



- Zapojení InSAR do standardního GT/IG průzkumu pro liniovou stavbu?
- Bez součinnosti na získávání dat a návrhu průzkumu
- Podklady
 - Registr svahových nestabilit
 - InSAR měření
 - Geofyzikální profily + průzkumné vrtý (-> geotechnické řezy)
 - Laboratorní zkoušky

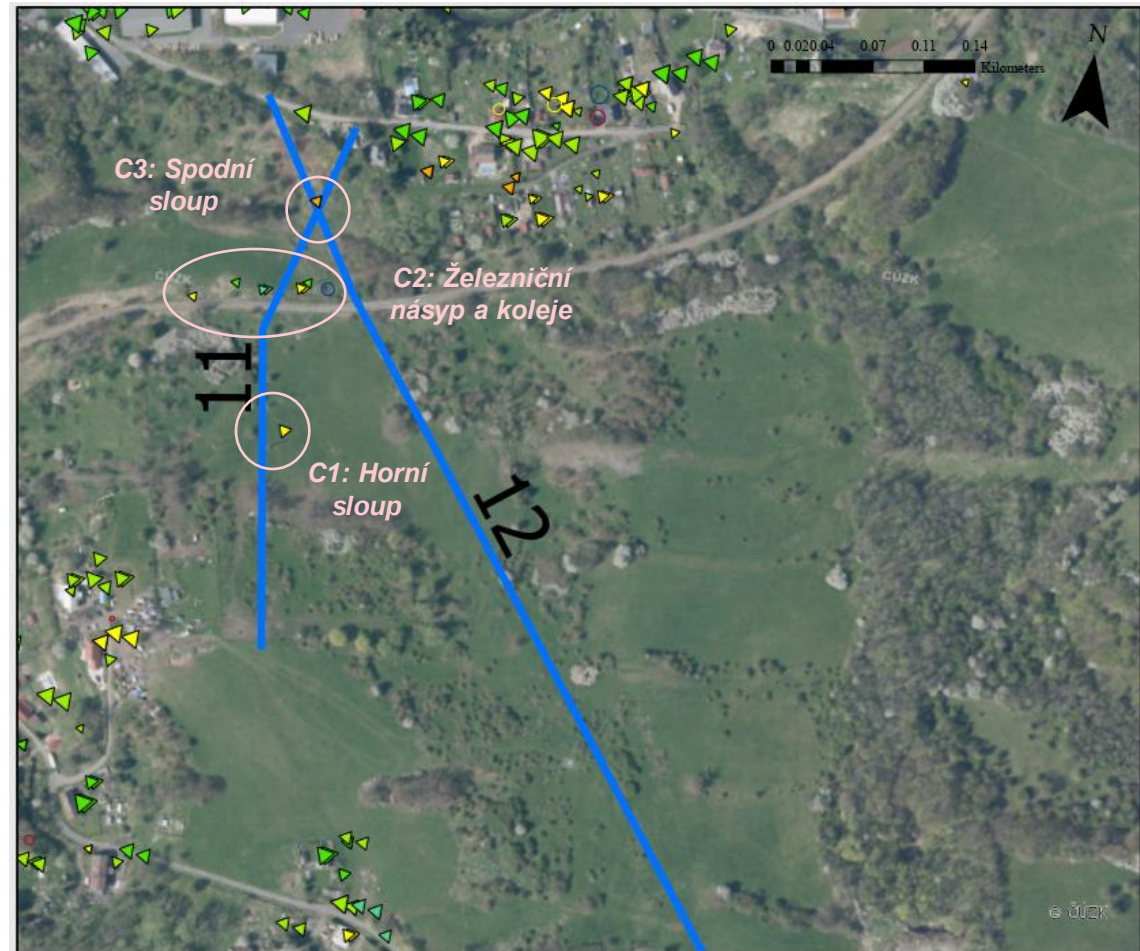


InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

- Zapojení InSAR do standardního GT/IG průzkumu pro liniovou stavbu?
- Bez součinnosti na získávání dat a návrhu průzkumu

- Podklady

- Registr svahových nestabilit
- **InSAR měření**
- Geofyzikální profily + průzkumné vrtý (-> geotechnické řezy)
- Laboratorní zkoušky

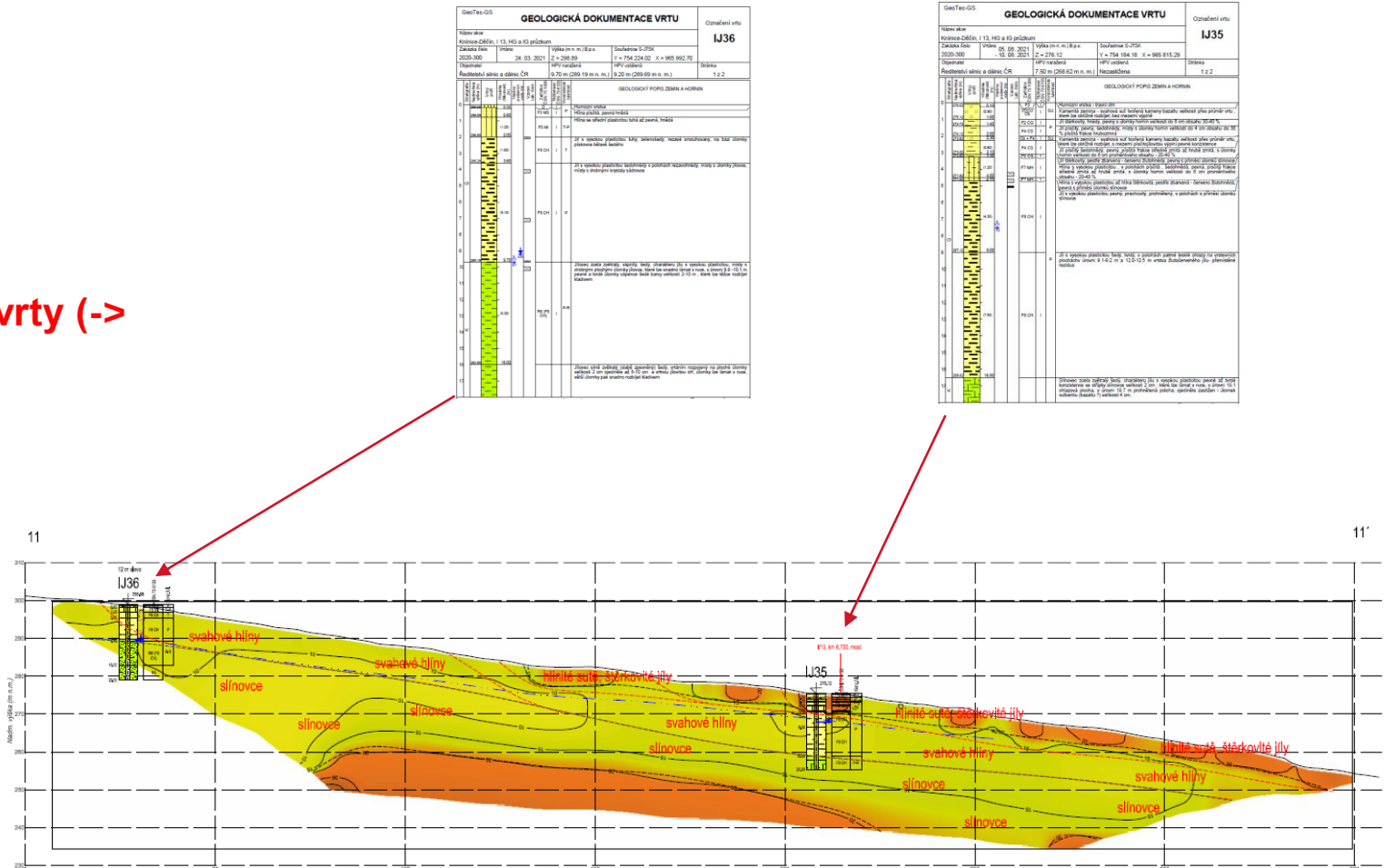


InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

- Zapojení InSAR do standardního GT/IG průzkumu pro liniovou stavbu?
- Bez součinnosti na získávání dat a návrhu průzkumu

■ Podklady

- Registr svahových nestabilit
- InSAR měření
- **Geofyzikální profily + průzkumné vrty (-> geotechnické řezy)**
- Laboratorní zkoušky



InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

- Zapojení InSAR do standardního GT/IG průzkumu pro liniovou stavbu?
- Bez součinnosti na získávání dat a návrhu průzkumu

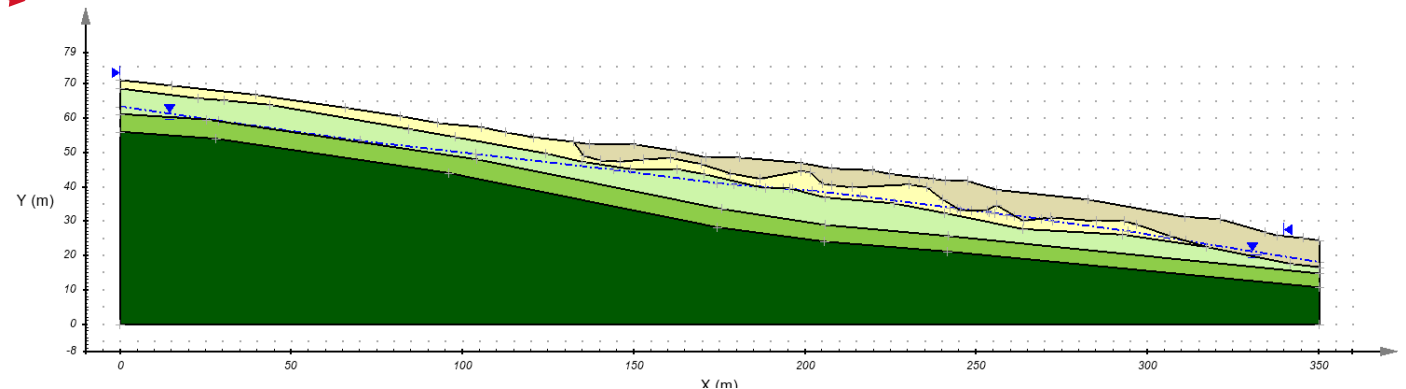
Vytvoření geotypů a získání hodnot parametrů zemin

- Podklady

- Registr svahových nestabilit
- InSAR měření
- **Geofyzikální profily + průzkumné vrty (-> geotechnické řezy)**
- **Laboratorní zkoušky**

		φ_{res}	φ_{cr}
<u>Křída</u>	KBZa	9.00 (± 1.68)	20.41 (± 3.13)
	KBZ	9.30 (± 1.10)	23.88 (± 4.12)
<u>Kvartér</u>	Qk	30.00	N/A
	Qjk	N/A	28.50
	Qj	14.30	22.25

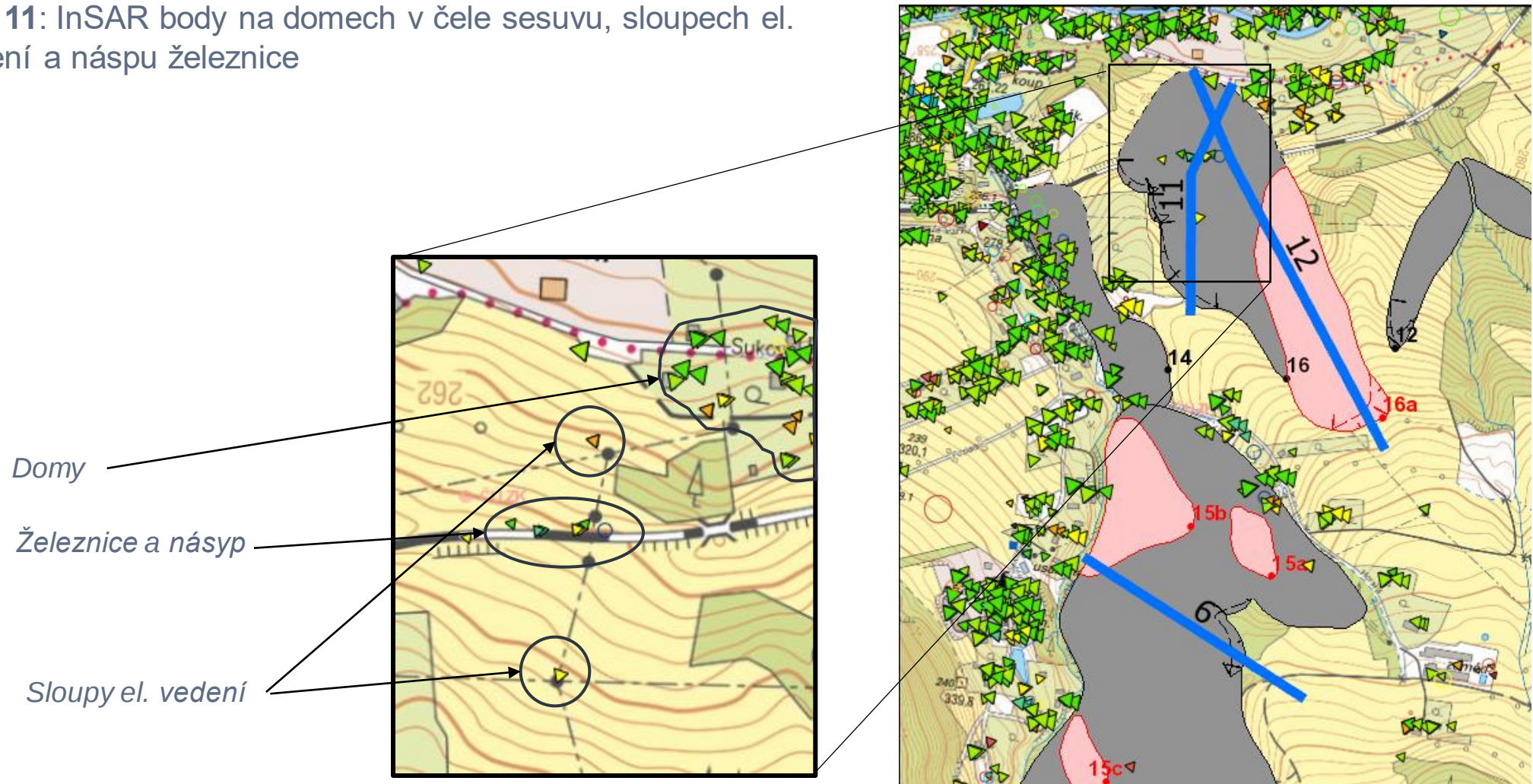
Vytvoření řezů pro stabilitní analýzy



InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

■ Příklad: Jílové

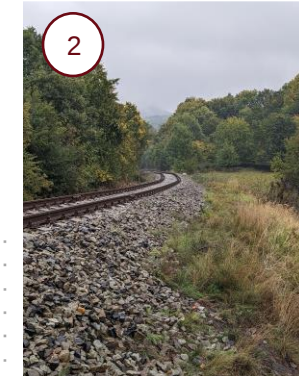
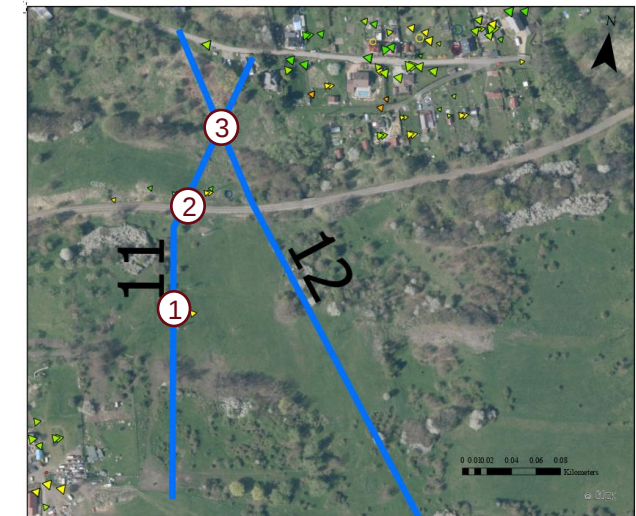
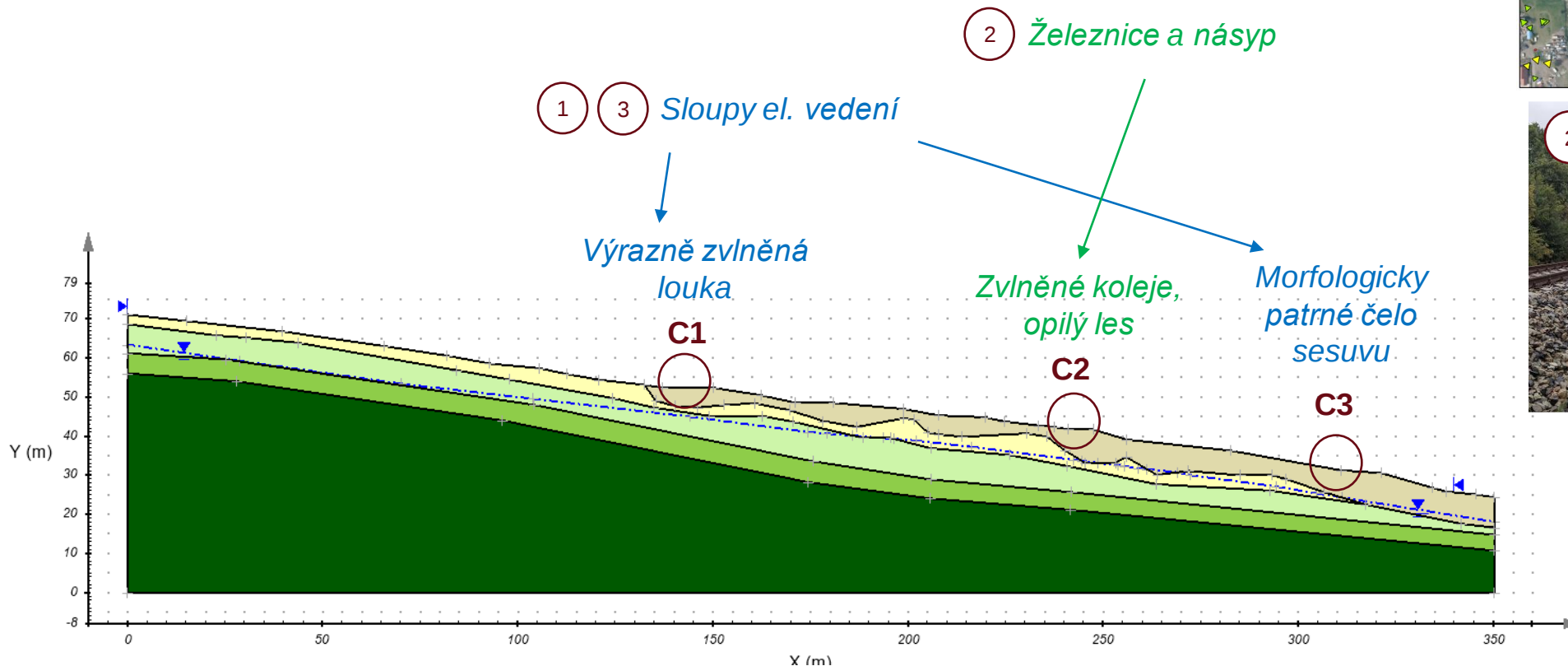
- Řez 11: InSAR body na domech v čele sesuvu, sloupech el. vedení a násypu železnice



InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

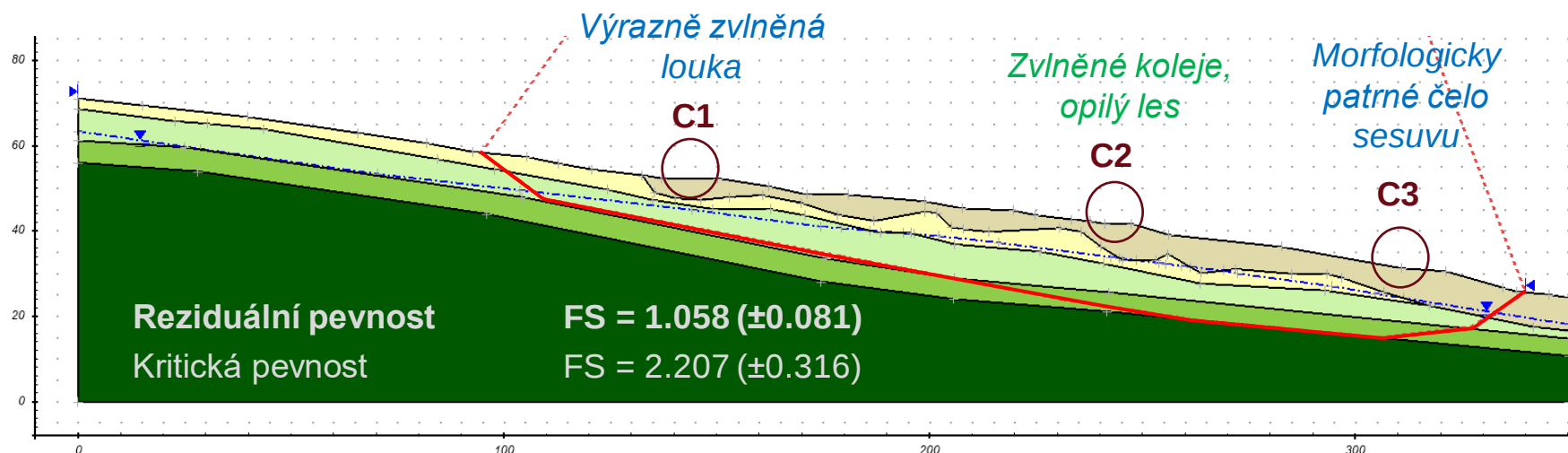
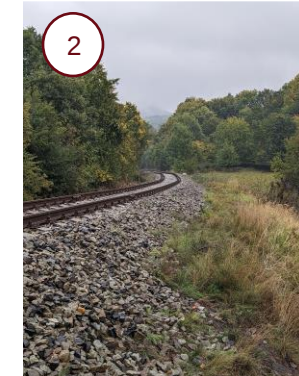
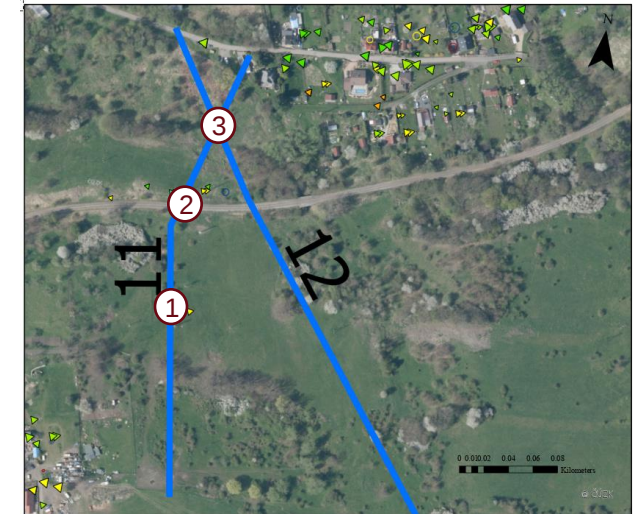
■ Zakomponování InSAR do standardního IG průzkumu

- **IG mapování:** body InSAR poskytují jasná vodítka, na co se soustředit při průzkumu → **zvýšení efektivity IG mapování v terénu**



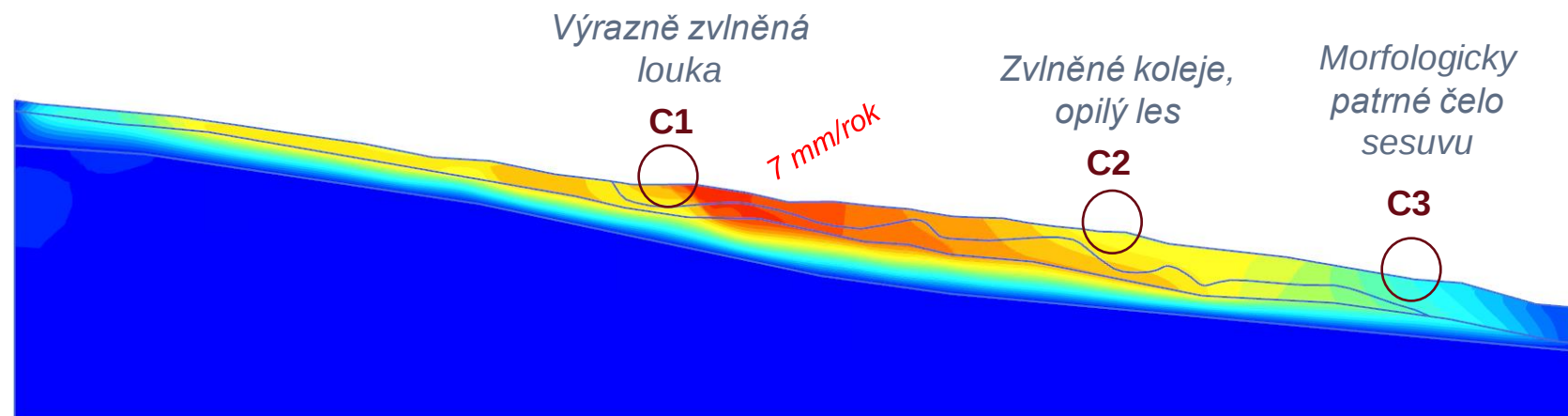
InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

- Zakomponování InSAR do standardního IG průzkumu
 - **IG mapování:** body InSAR poskytují jasná vodítka, na co se soustředit při průzkumu → **zvýšení efektivity IG mapování v terénu**
 - **Stabilitní analýza:** InSAR poskytuje vodítko, **jak interpretovat stabilitní analýzy** (v případě studovaného řezu je relevantní použití reziduální pevnosti - stav je blízko kolapsu, což je potvrzeno InSAR měřením)

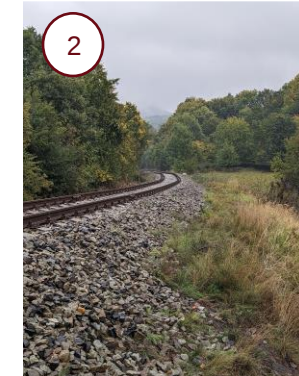
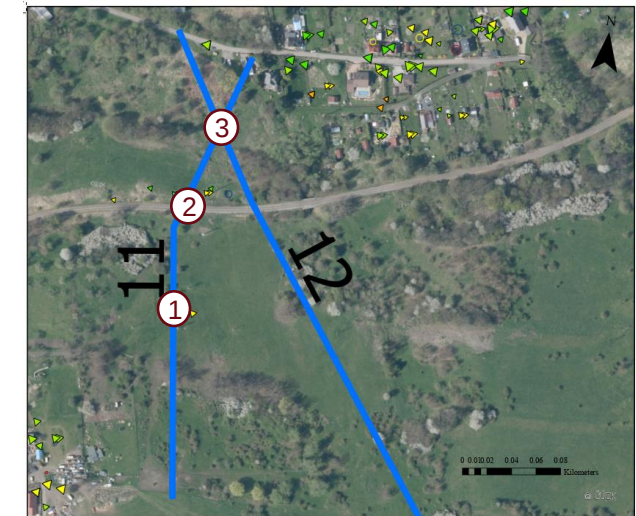


InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha

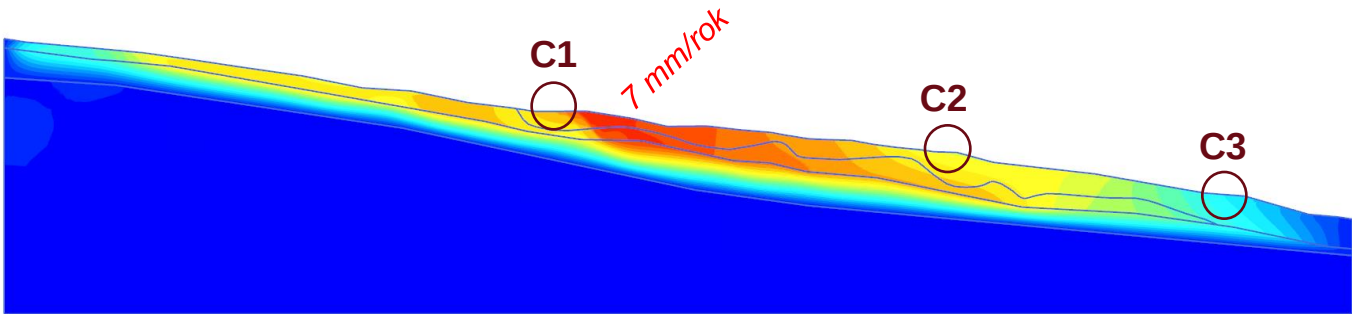
- Zakomponování InSAR do standardního IG průzkumu
 - **IG mapování:** body InSAR poskytují jasná vodítka, na co se soustředit při průzkumu → **zvýšení efektivity IG mapování v terénu**
 - **Stabilitní analýza:** InSAR poskytuje vodítko, **jak interpretovat stabilitní analýzy** (v případě studovaného řezu je relevantní použití reziduální pevnosti - stav je blízko kolapsu, což je potvrzeno InSAR měřením)
 - **Deformační analýza:** InSAR může sloužit jako podklad pro **předpověď rozložení deformací** ve svahu a na náspech (bez nutnosti čekání na výsledky geodetických a inklinometrických měření) – kalibrace modelu na základě InSAR dat



Předpovídané kumulativní horizontální deformace ve svahu
pro období 2018-2023



InSAR-IG: 1) Děčín I/13 + Kozí dráha



Předpovídané kumulativní horizontální deformace ve svahu pro období 2018-2023

	InSAR	Model
C1 – sloup	4.96	5.4
C2 – násyp	2.95	3.6
C3 - sloup	2.89	1.8

Horizontální deformace za rok (mm/rok)

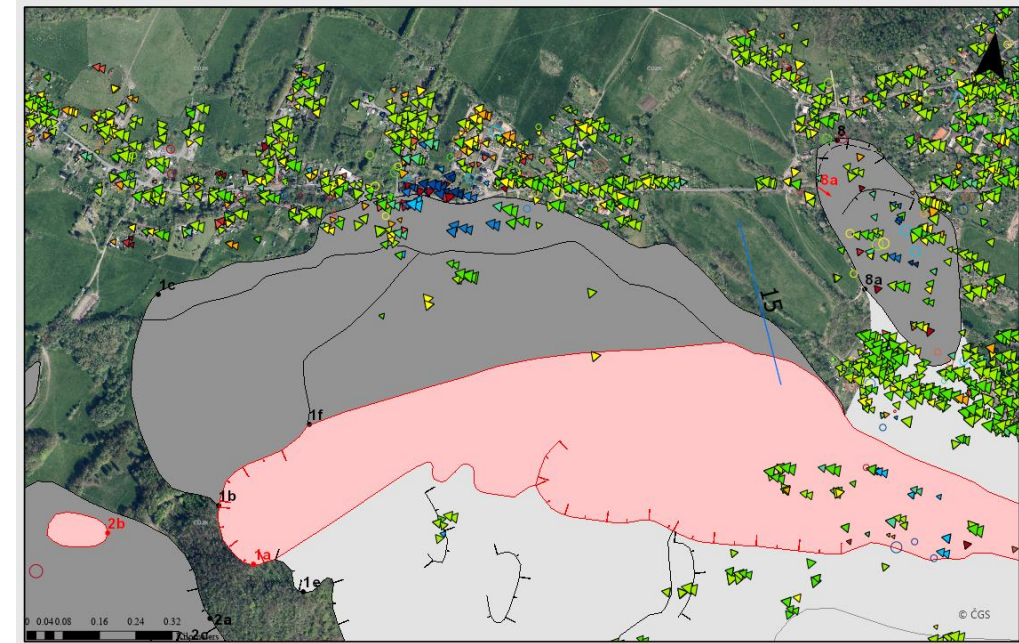
InSAR-IG: 1) Doporučený postup IG/GT průzkumu

(1) InSAR mapování (orientační/předběžný průzkum)

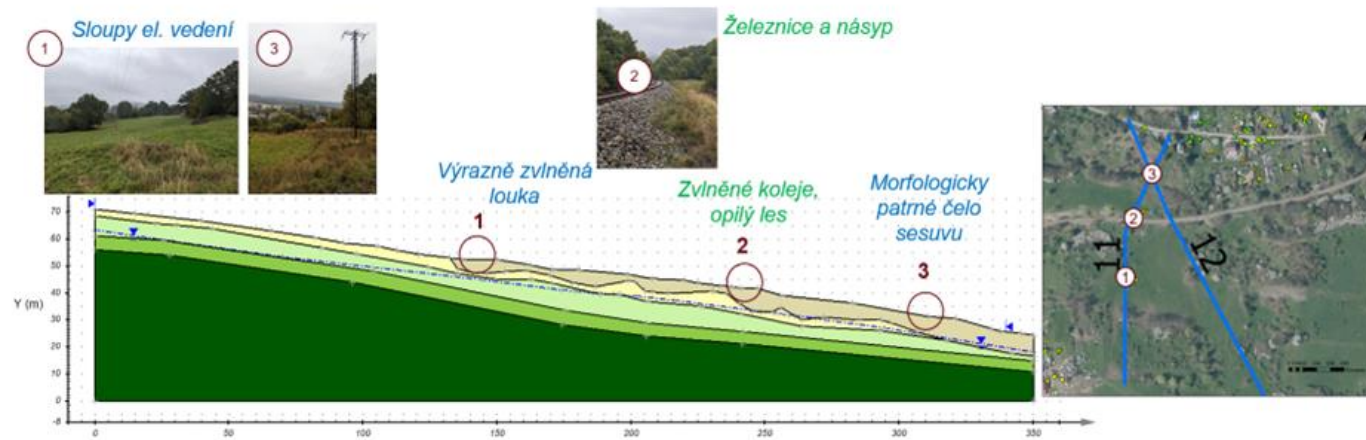
- Zpětné vyhodnocení deformací a nestabilit povrchu v zájmovém území na základě archivních radarových měření.
- Zvýšení efektivity při **předběžném posouzení IG poměrů**; zhotovení mapy **geologického nebezpečí**; vymezení oblastí **nepříznivých z hlediska únosnosti a stability území**.

→ lepší znalost území v prvních fázích průzkumu

- **Pomůže specifikovat pozice** pro průzkumné sondy, geofyzikální profily a případné prvky geotechnického monitoringu v dalších fázích průzkumu.



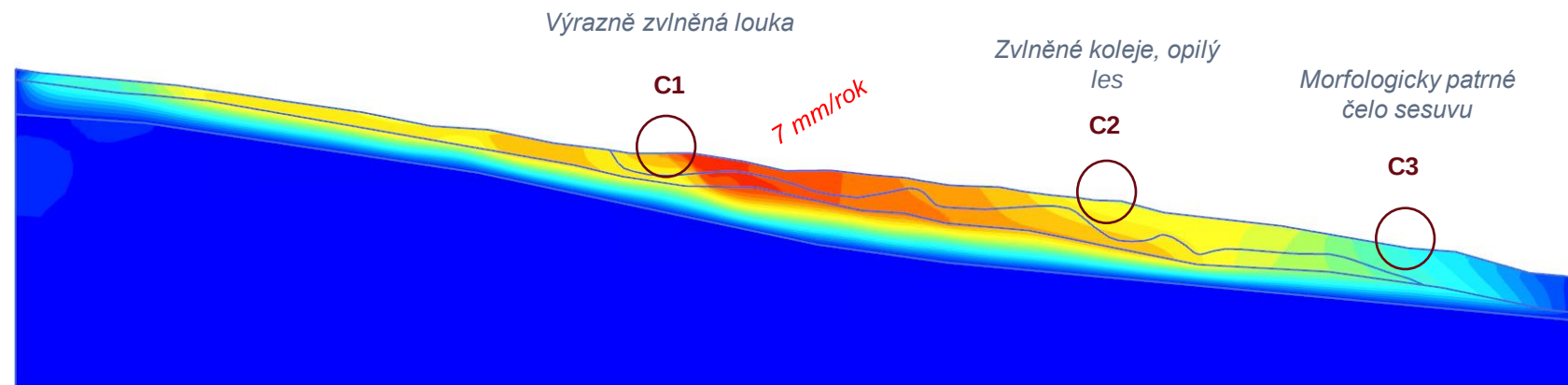
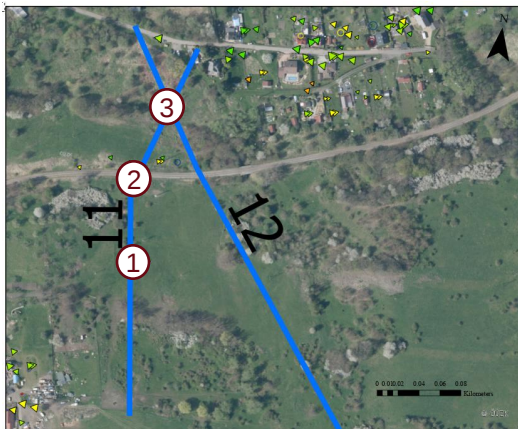
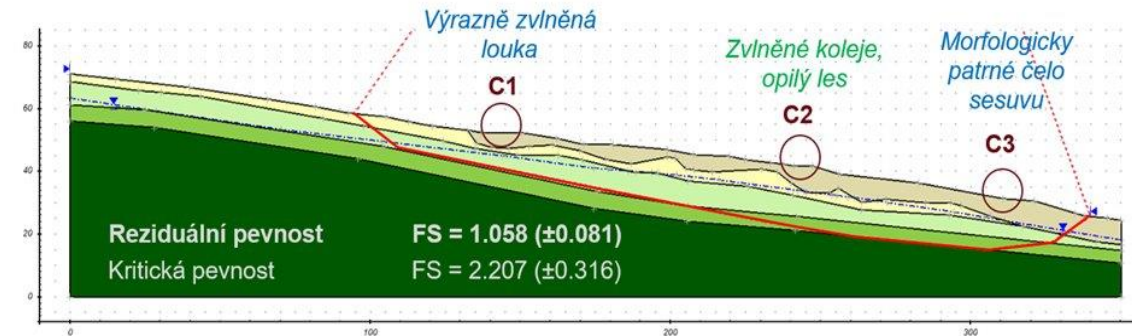
Krásný Studenec, Děčín



InSAR-IG: 1) Doporučený postup IG/GT průzkumu

(2) Předběžný/podrobný/doplňkový průzkum

- **Ověření výsledků stabilitních analýz** - je relevantní použití reziduální/kritické pevnosti atd.? Je svah blízko kolapsu a drobný zásah při stavbě může nestabilitu aktivovat?
- Probíhající InSAR monitoring od počátku stavby pomáhá monirotovat **změny v chování svahu během** průzkumu.
- Optimalizace prvků monitoringu (inklinometry, piezometry ad.)
- **Předpověď rozložení deformací** (např. v mm/rok)
v rámci studovaných řezů, a to pouze na základě měření InSAR

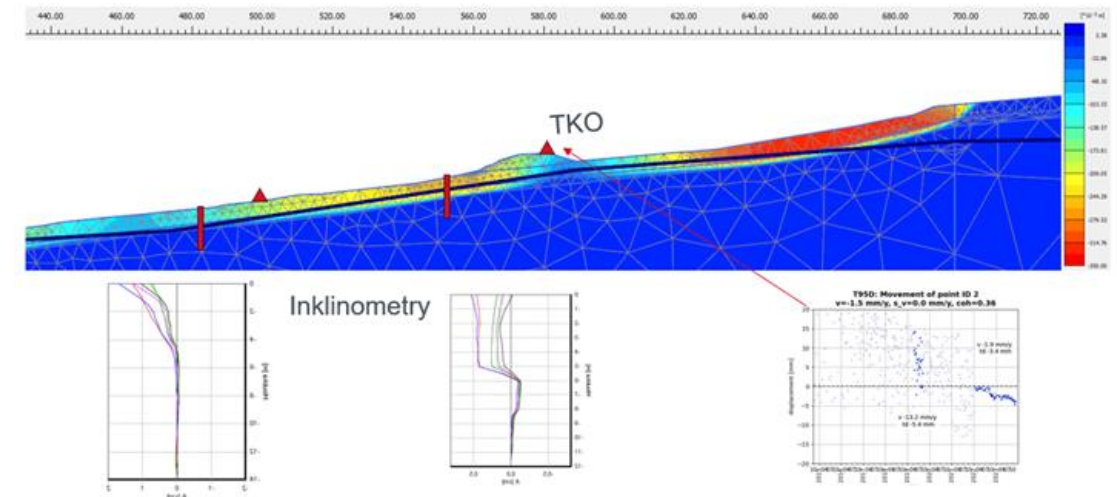
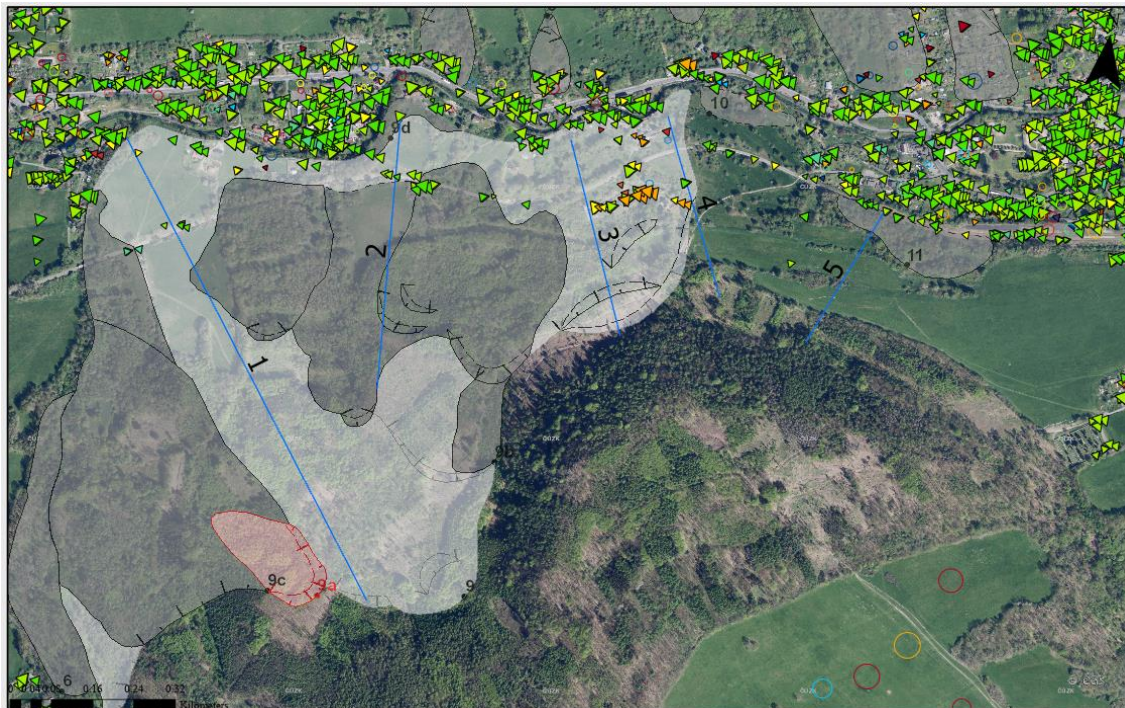


Předpovídání kumulativní horizontální deformace ve svahu pro období 2018-2023

InSAR-IG: 1) Doporučený postup IG/GT průzkumu

(3) Pokračující monitoring

- Porovnání s inklinometrickými měřeními/geodetickými měřeními/piezometry - **více informací (časově, prostorově) o chování svahu**
- Jakým způsobem **stavba změnila/nezměnila registrované pohyby lokalitě?**
- **Pasportizace** okolních objektů



Okolí sesuvu Výrovna

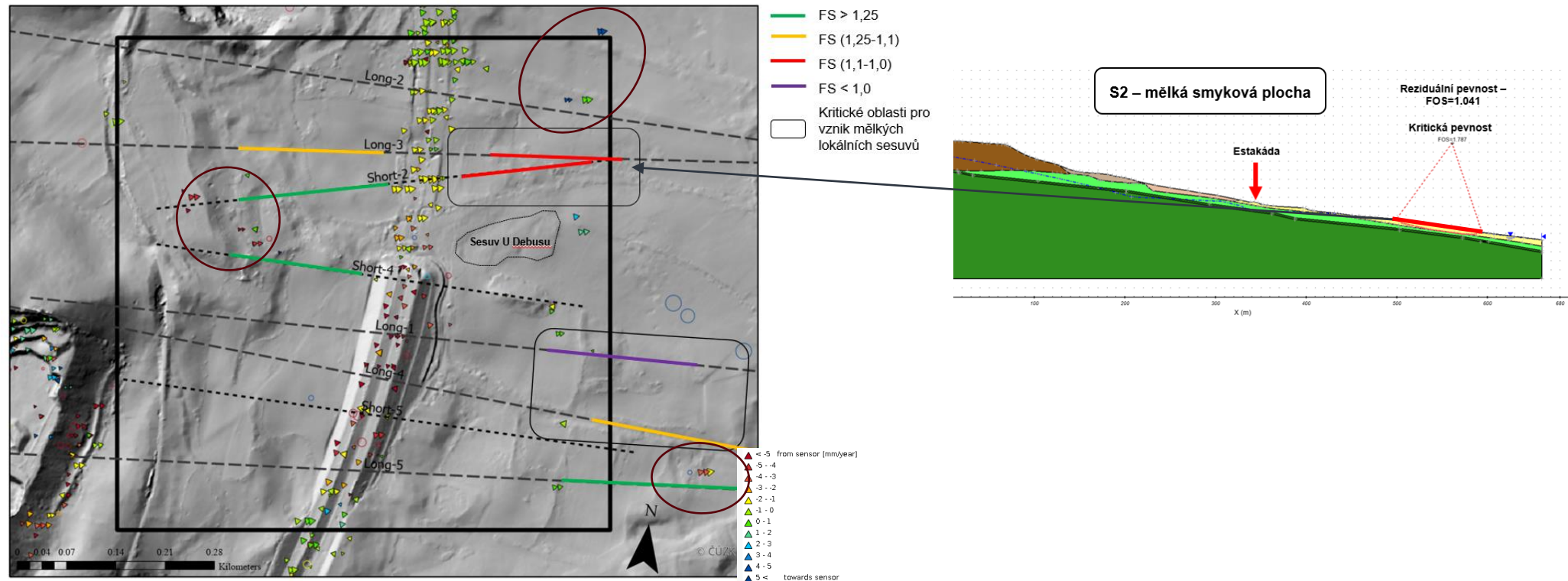
InSAR-IG: 2) D8 Prackovice

- Zakomponování měření InSAR do analýzy **stability**, **2D a 3D deformačních modelů** a **komplexního monitoringu oblasti**
 - Sesuvné území Prackovice, dálnice D8, železniční trať Lovosice – Teplice v Čechách
 - Velmi dobrá prozkoumanost lokality, hustá síť standardního monitoringu



InSAR-IG: 2) D8 Prackovice - stabilita

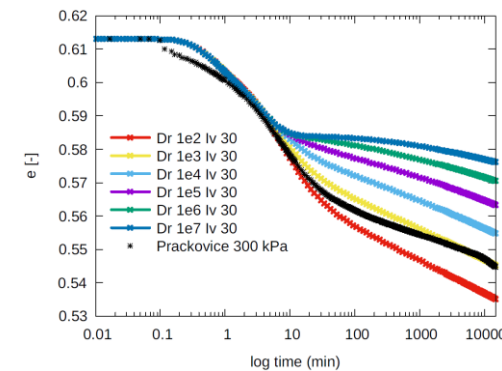
- **Stabilitní analýza:** zakomponování InSAR a jeho přínos u dobře prozkoumané lokality (8 řezů založených na 3D IG modelu)?
- Porovnání předpovězených smykových ploch a výsledků InSAR



InSAR-IG: 2) D8 Prackovice – deformační analýzy

- Deformační analýza – tři varianty postupu kalibrace modelů pro předpověď deformací:

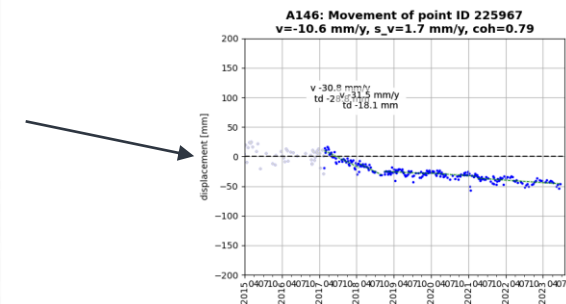
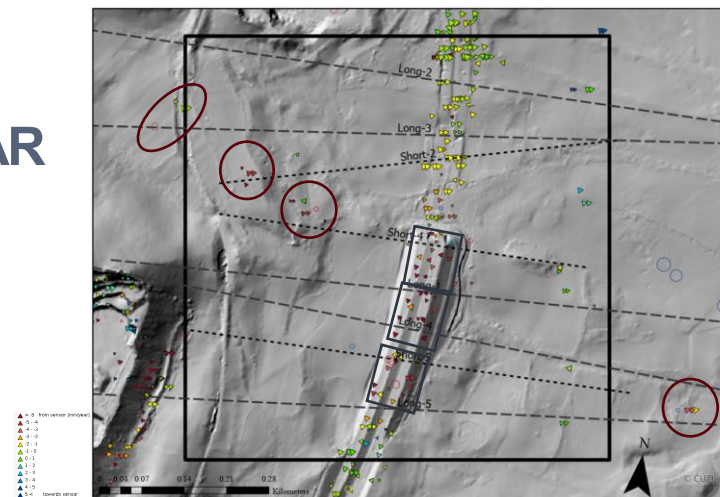
1. Kalibrace na základě zpětné analýzy inklinometrických měření



2. Kalibrace na základě dlouhodobých zkoušek zemin

3. Kalibrace na základě měření InSAR

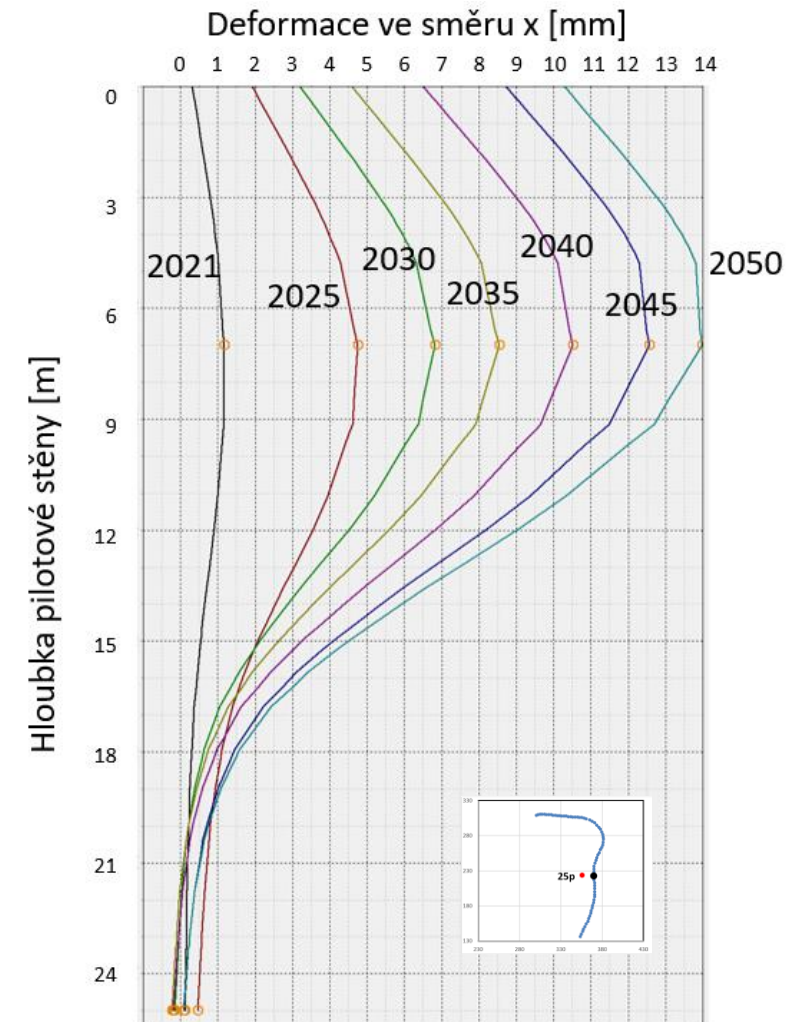
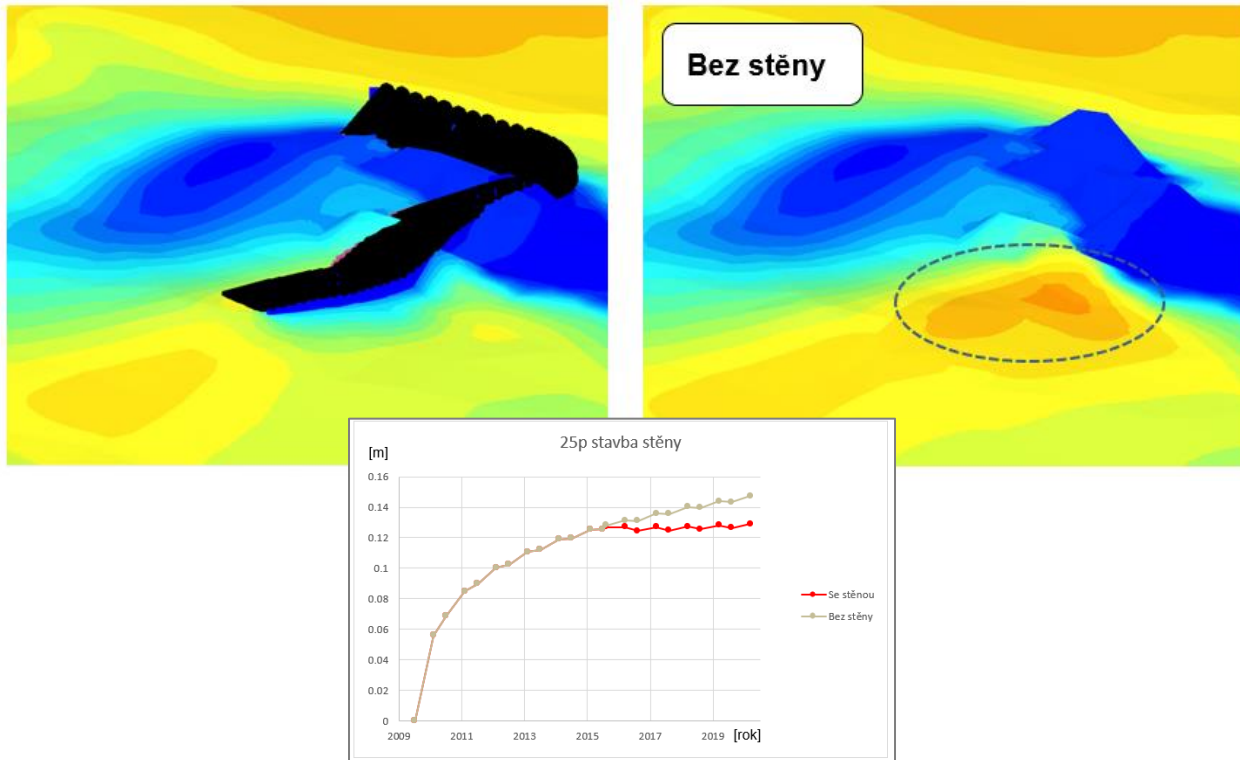
- Vytvoření clusterů s větším množstvím dat, které je možné statisticky zpracovat → kalibrace



InSAR-IG: 2) D8 Prackovice – deformační analýzy

3D deformační analýza

- Vliv pilotové stěny, síly působící na pilotovou stěnu, předpověď deformací stěny
- Vliv změn hladiny podzemní vody atd.

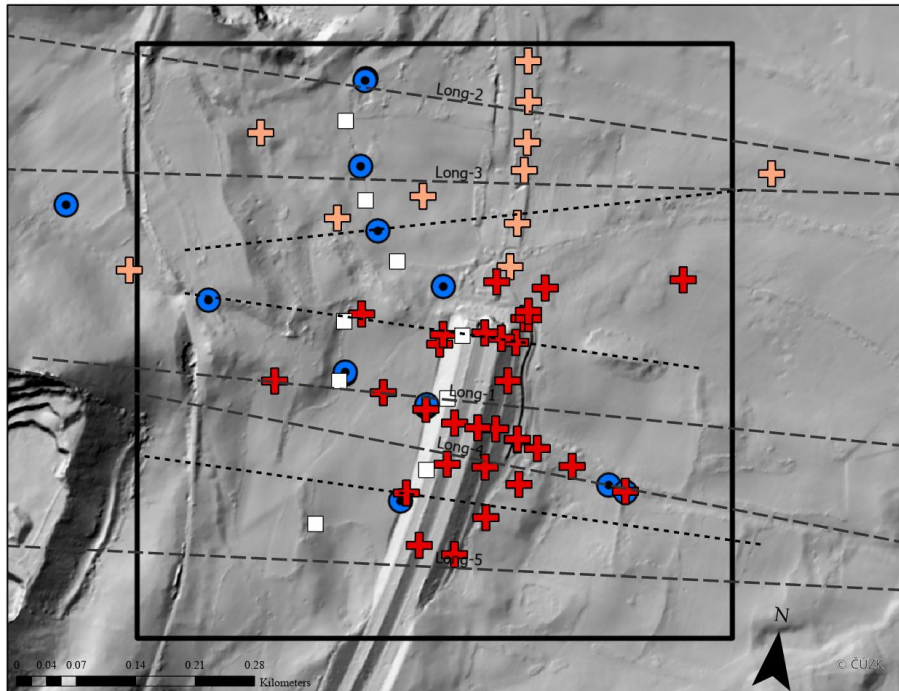
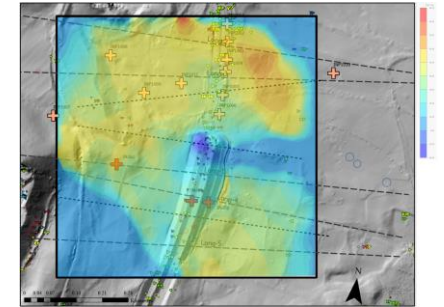


Předpovězené deformace pilotové stěny po 30 letech na úrovni inklinometru 25p.

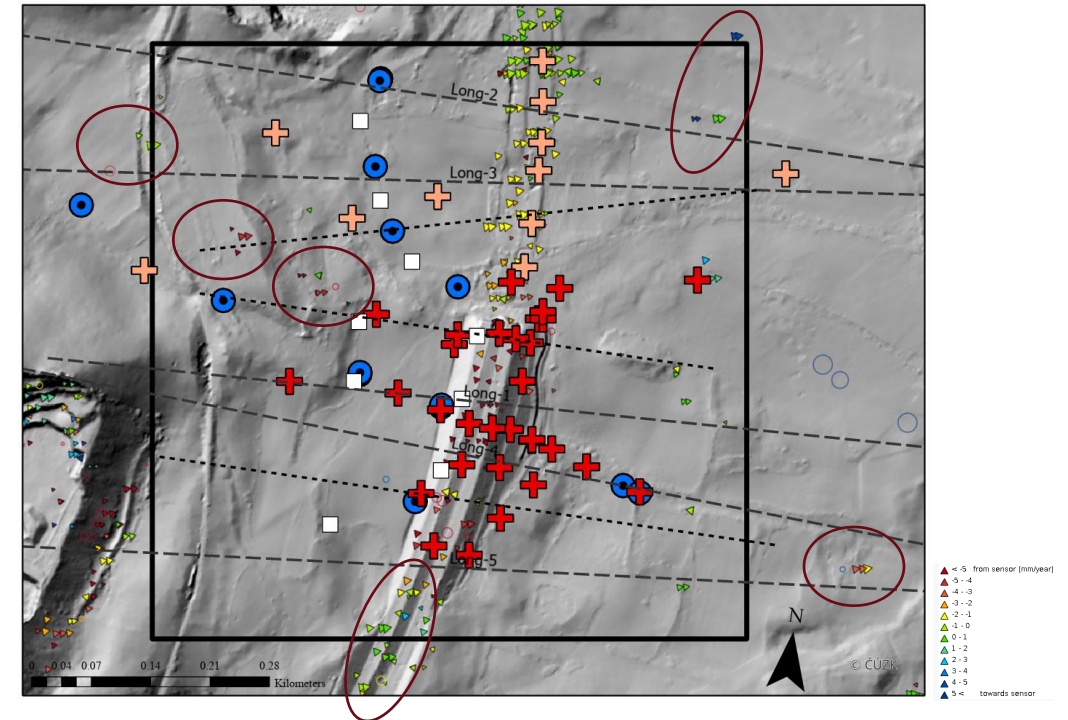
InSAR-IG: 2) D8 Prackovice – monitoring

■ Přínos InSAR pro monitoring?

- 40+ inklinometrů, stav hladiny podzemní vody (10+ piezometrů) + srážky
- Podklad navržení dalších monitorovacích prvků jako inklinometry s větší přesností

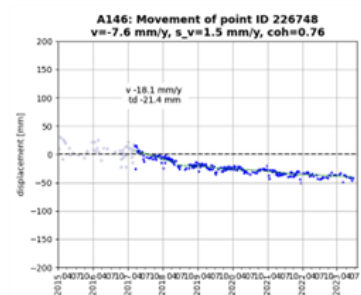
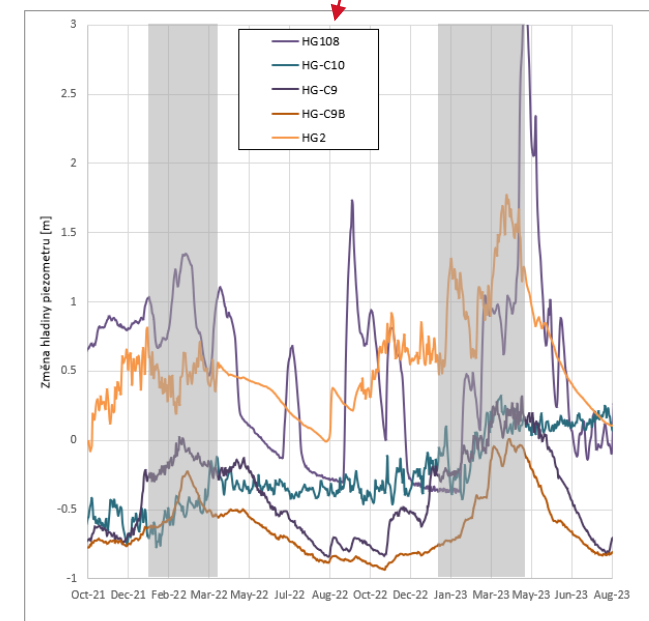
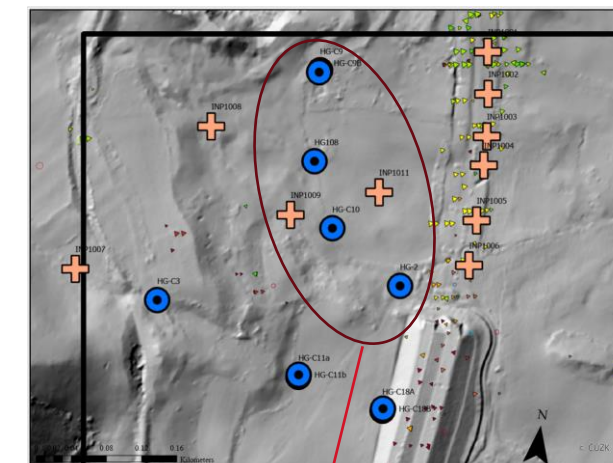
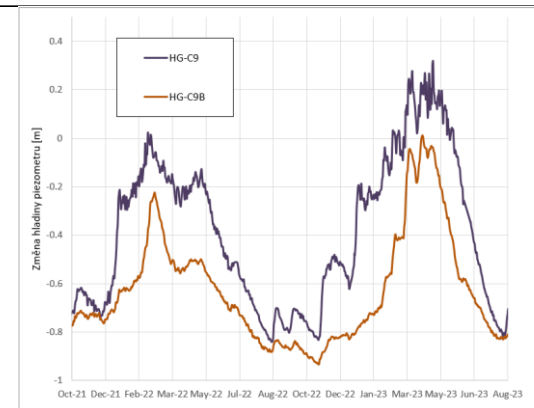
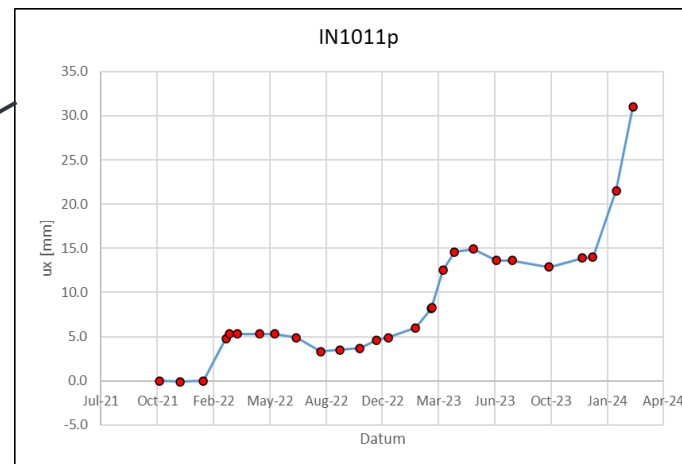
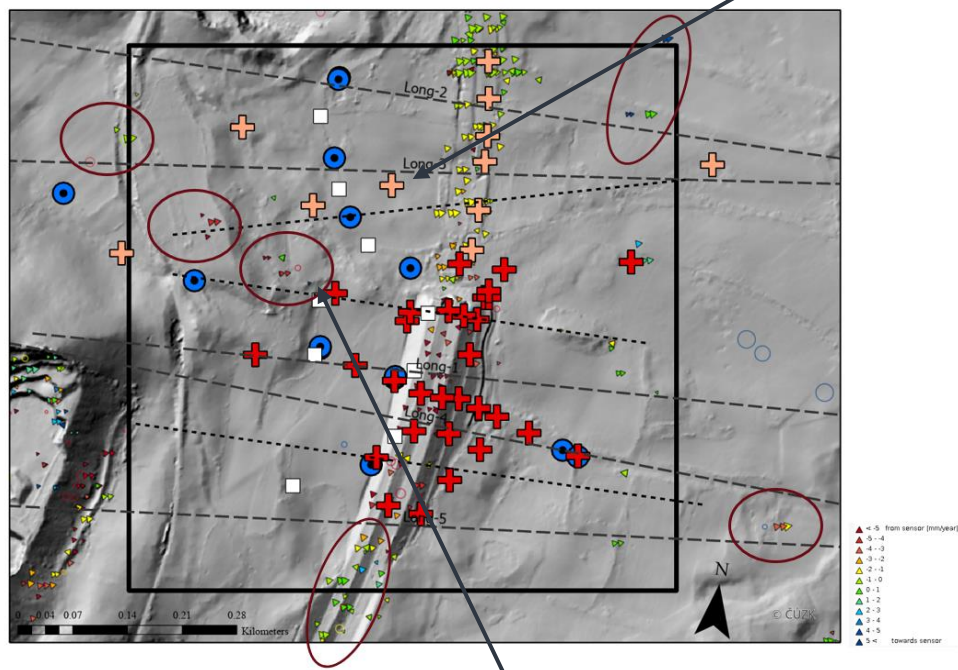


+ InSAR



Velmi hustá monitorovací síť

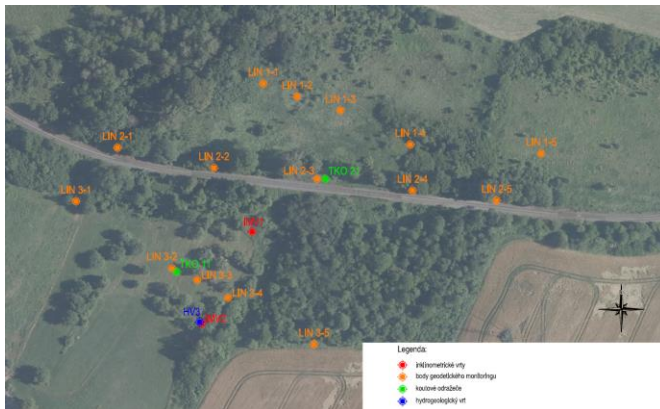
InSAR-IG: 2) D8 Prackovice – monitoring



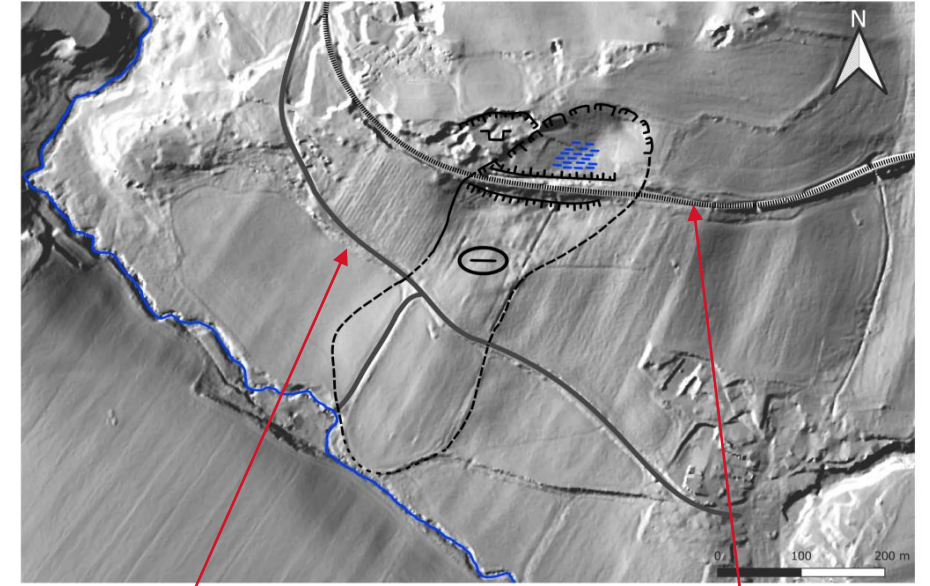
InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

- Sesuv Dubičná: trať 140 Lovosice – Česká Lípa
- Dlouhodobě registrovány deformace kolejí, náspu a silnice
- Potenciální reaktivace sesuvu
 - Historický sesuv v 70. letech se škodou na kolejích a sloupech el. vedení
- (1) Terénní IG mapování; (2) instalace monitorovacího systému; (3) odběr laboratorních vzorků a provedení zkoušek; (4) vyhodnocení InSAR

→ Vytvoření robustní sítě monitoringu; nenáročné na údržbu



ÚČELOVÁ IG MAPA STABILITNÍCH POMĚRŮ 1:5000



Silnice III/24087 Lukov
- Dubičná

Železniční trať
Lovosice – Česká Lípa



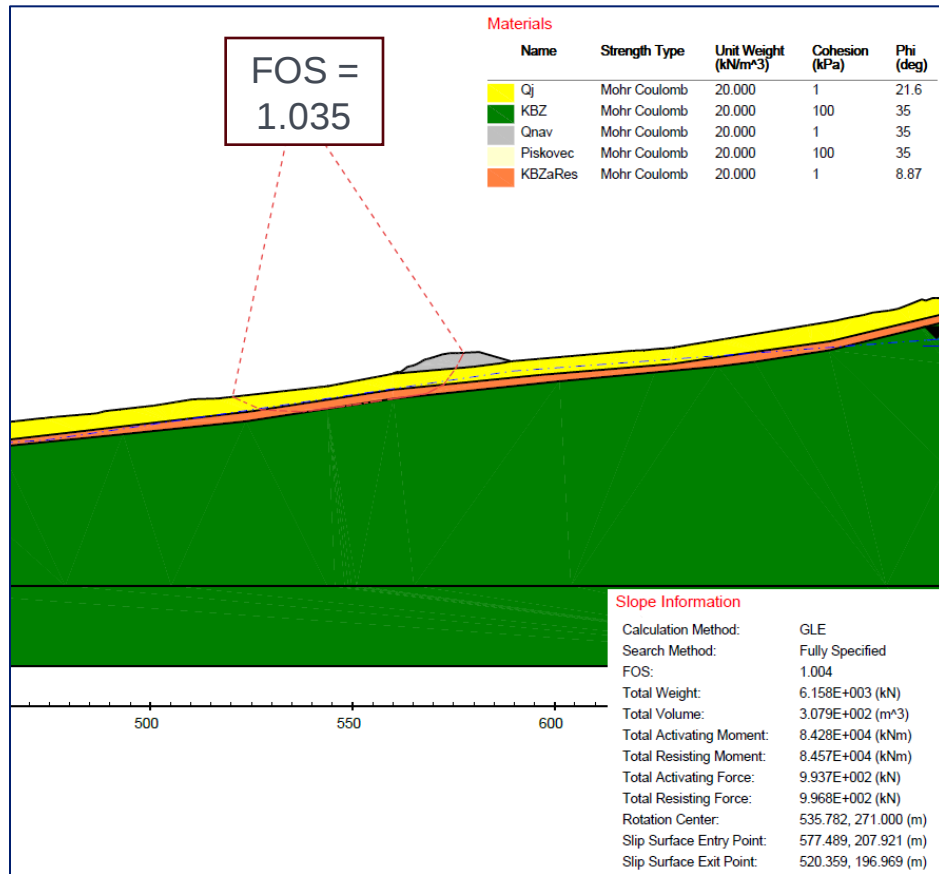
InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

- Cílem vytvoření sítě monitoringu je její použití na pravidelné vyhodnocování:
 - **Stability** (na základě hladiny podzemní vody)
 - Předpovídání **deformací**
 - + na základě **měřených deformací** (inklinometry, InSAR, geodetické body) a jejich vztahu s hladinou podzemní vody (a kumulativními srážkami)
- vytvoření varovných stavů

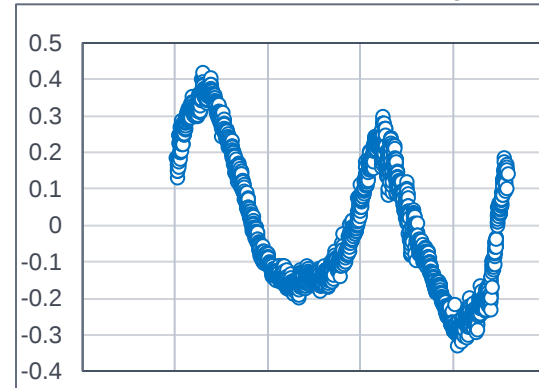


InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

■ Stabilitní analýza



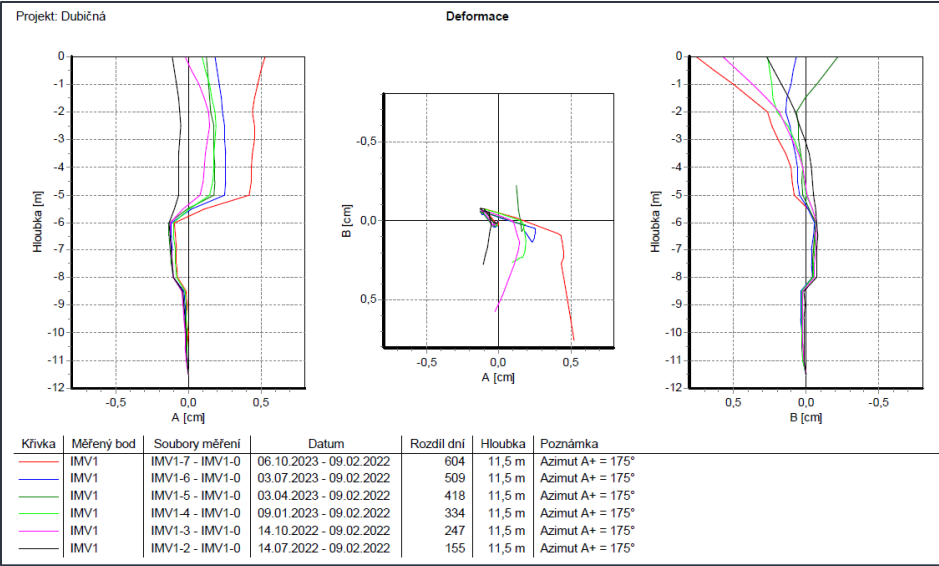
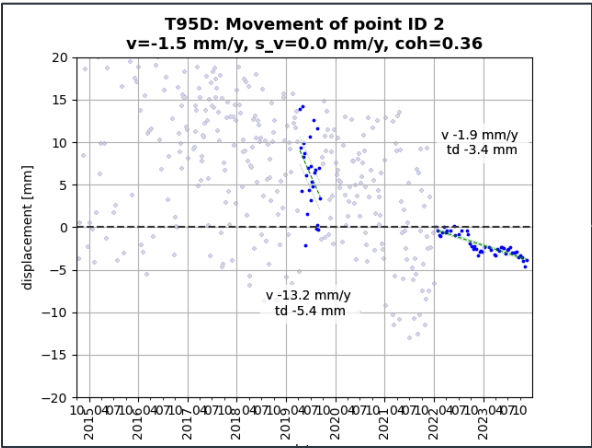
Změřené hladiny



Změna hladiny podzemní vody od průměru [m]	Stupeň stability
-0.4	1.097
-0.2	1.071
0	1.065
+0.2	1.041
+0.4	1.035
+0.9	0.999

Teoretická hladina pro aktivaci svahového pohybu

InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

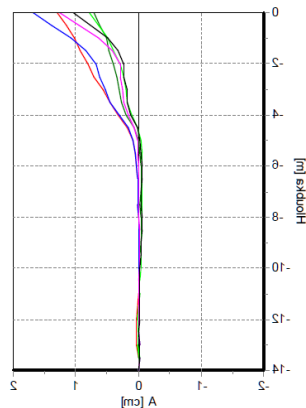
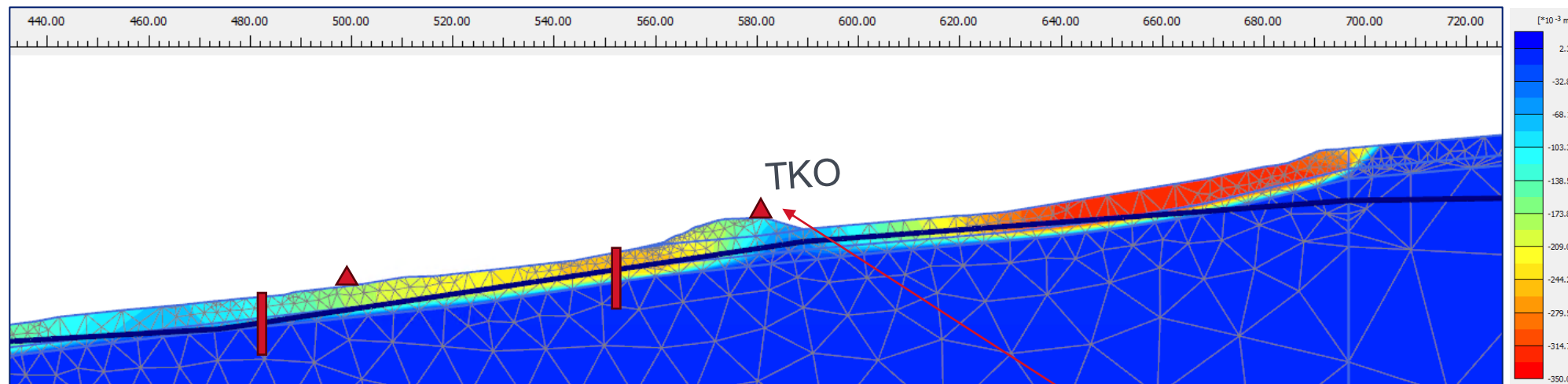


Pobýhující se referenční geodetické body

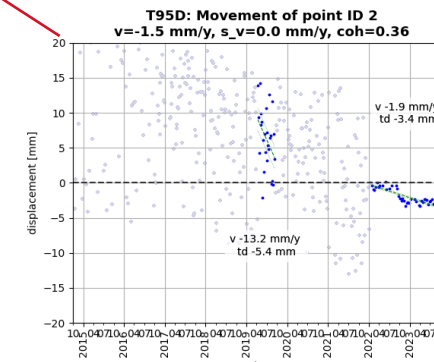
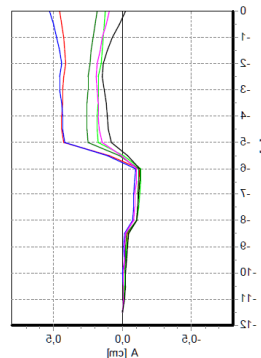
InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

■ Deformační analýza

■ Kalibrace modelu na základě měřených deformací

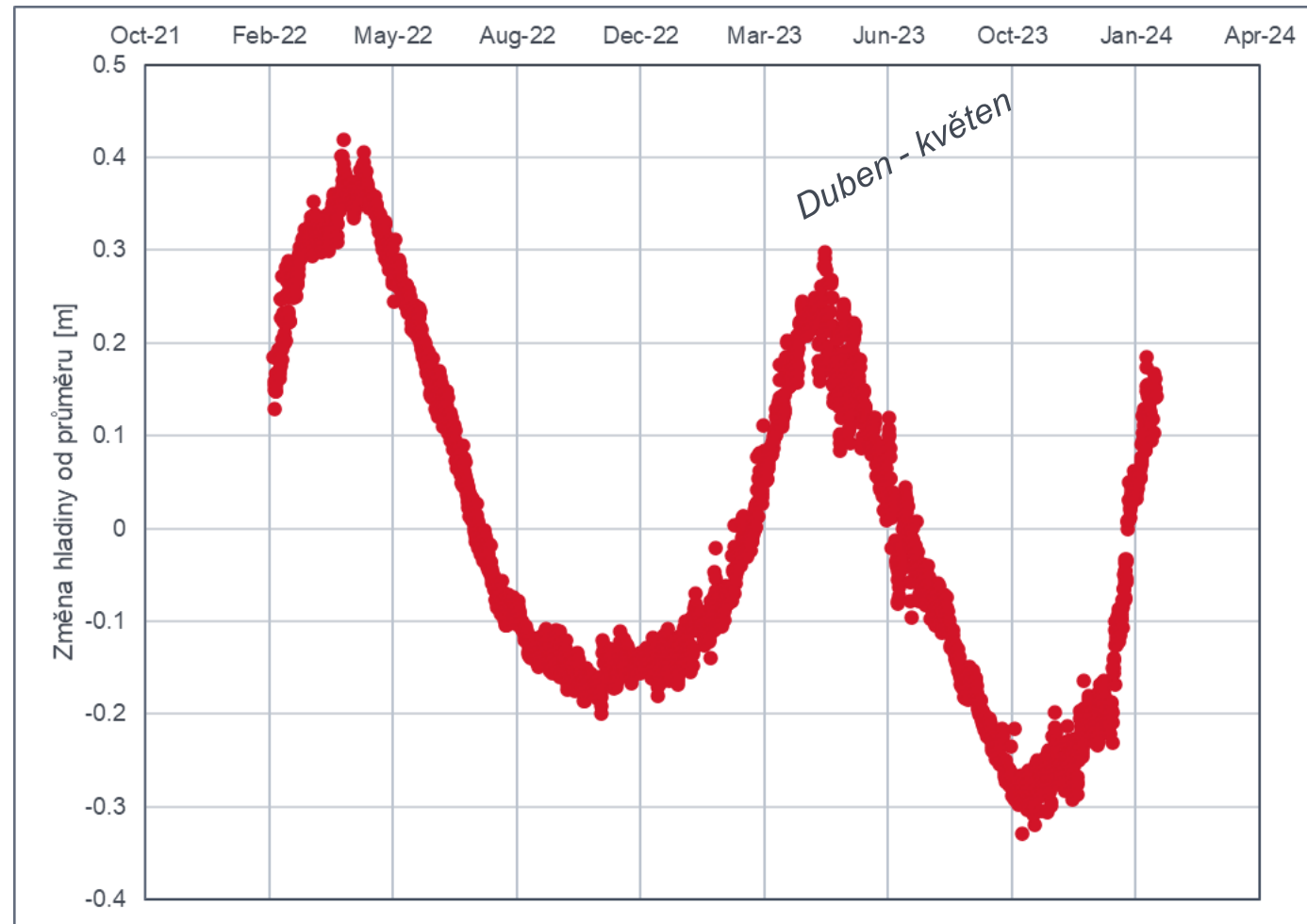


Inklinometry

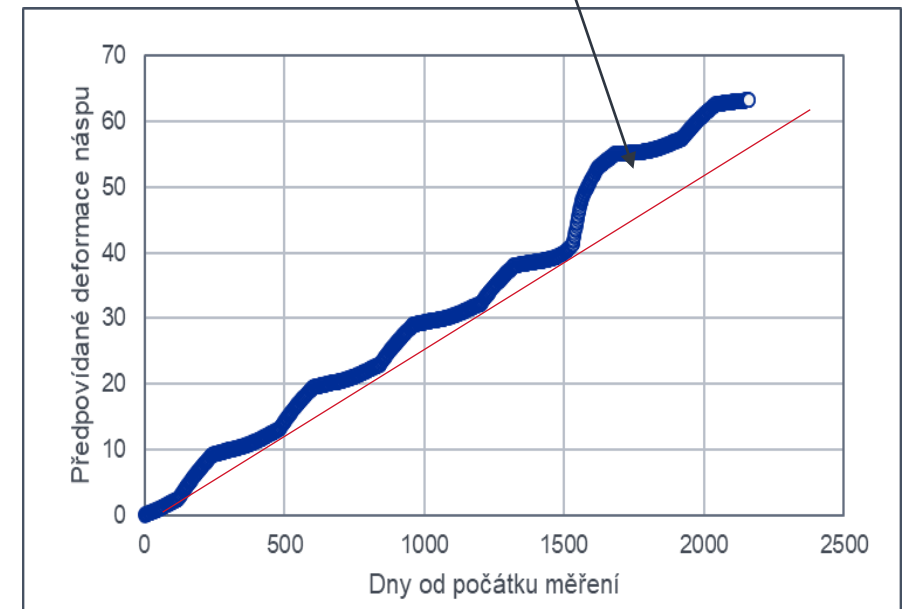


InSAR-IG: 3) Monitoring potenciálně nebezpečné lokality

■ Vliv hladiny podzemní vody na deformace



Vliv extrémních srážek



Nastoupání hladiny podzemní vody o 50 cm nad normál vede ke zvýšení deformací o 80% (cca 10 mm/rok → 18 mm/rok)

→ možnost vytvořit varovné stavy na základě získaných dat a vhodné interpretace

- (1) Zakomponování InSAR do standardního IG/geotechnického průzkumu
 - Pomůže specifikovat pozice pro průzkumné sondy
 - Doplnění dat z Geofondu ad. při orientačním průzkum; doplnění doporučených nepřímých metod
 - Ověření stabilitních výpočtů (výsledky analýz s vyšší přesností)
Specifikace nepříznivých území týkajících se geodynamických jevů
 - Umožňuje předpověď rozložení defomací ve svahu
- (2) Součást komplexního monitoringu dlouhodobě sledované lokality
 - Podklad pro navržení dalších monitorovacích prvků jako inklinometry s větší přesností
- (3) Zapojení InSAR do geotechnického sledování výstavby a monitoringu potenciálně nebezpečné lokality; instalace monitorovacího systému
 - Optimalizace rozložení jednotlivých monitorovacích prvků; možné jednotlivé prvky (plánovaně) kombinovat

- Cost-benefit
 - **Náklady** vyčíslitelné
 - Vlastní **finanční výhodnost** hůře kvantifikovatelná
 - Doplnkovost metod → **dodatečný náklad**
- Výhodnost ve vazbě na „**cenu neactivity**“ (cost of inaction) a „**cenu informace**“
 - **Zefektivnění** stávajících investic:
 - Vhodnější umístění pevných prvků monitoringu
 - Rozšíření monitorované plochy
 - **Zdůvodnění** zahájení návazných investic
 - Standardní monitoring
 - Výstavba měř. sítí
 - **A-priorní pasportizace** - podklad pro řešení možných sporů
- Cena komerčních dat, cena TKO → včasnost

Satelitní interferometrie (InSAR) – monitoring

GISAT

Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

1b: Využití InSAR pro monitoring deformací traťového spodku

■ Cíle

■ Monitorovací systém

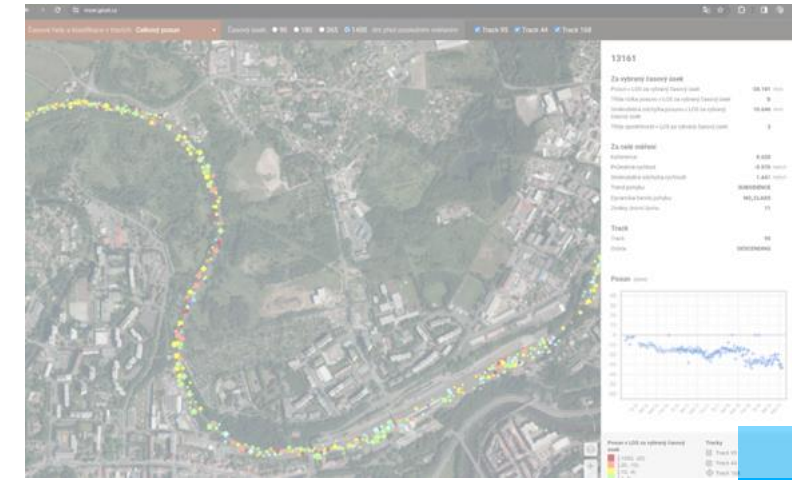
InSAR, časové řady ze Sentinel-1 (zdarma)

- Automatizovatelnost (stažení, vyhodnocení, distribuce)
- Etapizovatelnost
- Hustota a spolehlivost výsledků

■ Interpretovatelnost („semafor“ varovných stavů)

■ Pilotní území

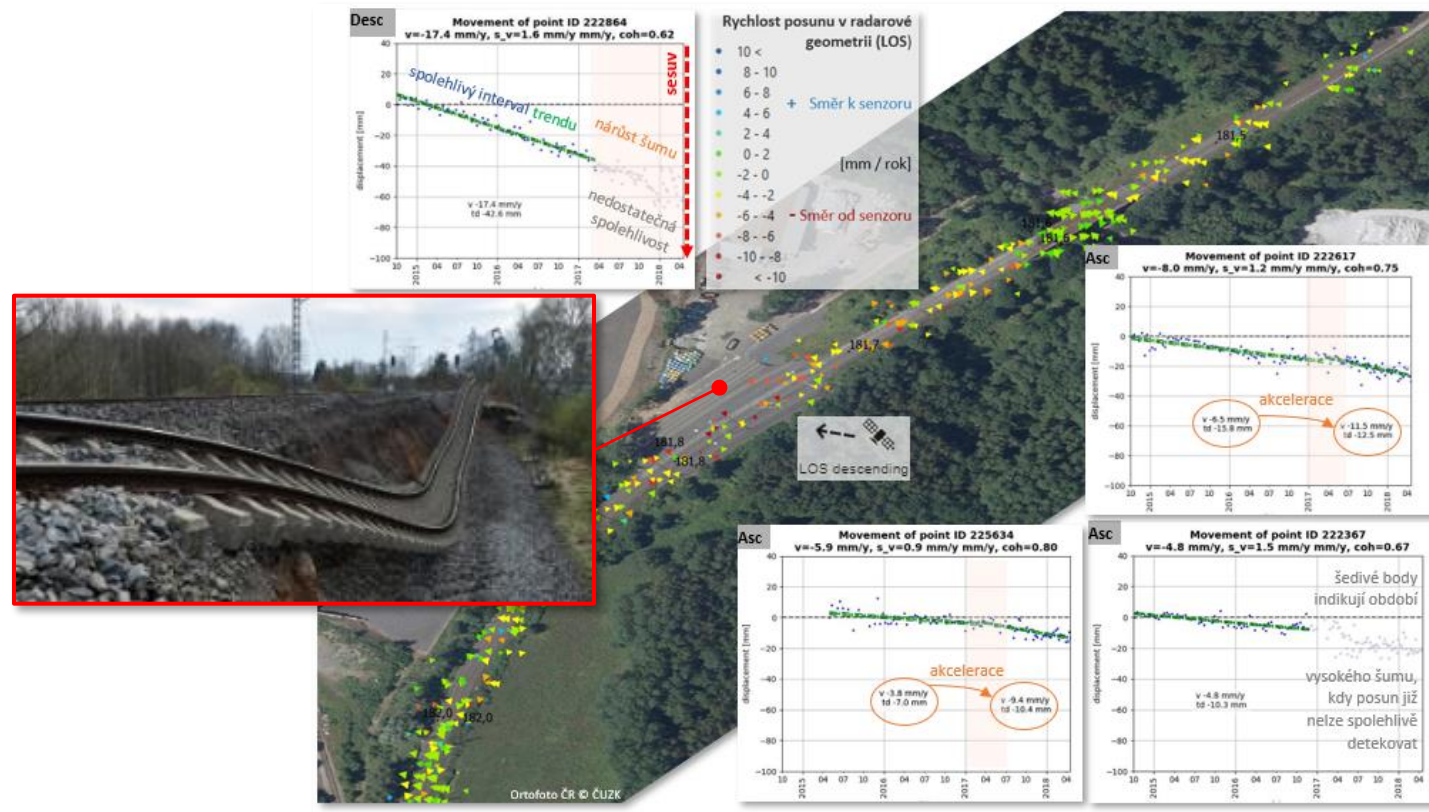
- → kalibrace & validace s traťmistry
- Trať 140 (Ostrov n. O. žkm162 – Karlovy Vary žkm192)
- Trať 280 (Hranice n. M. – Střelná)
- Trať 080 (Česká Lípa – Nový Bor)



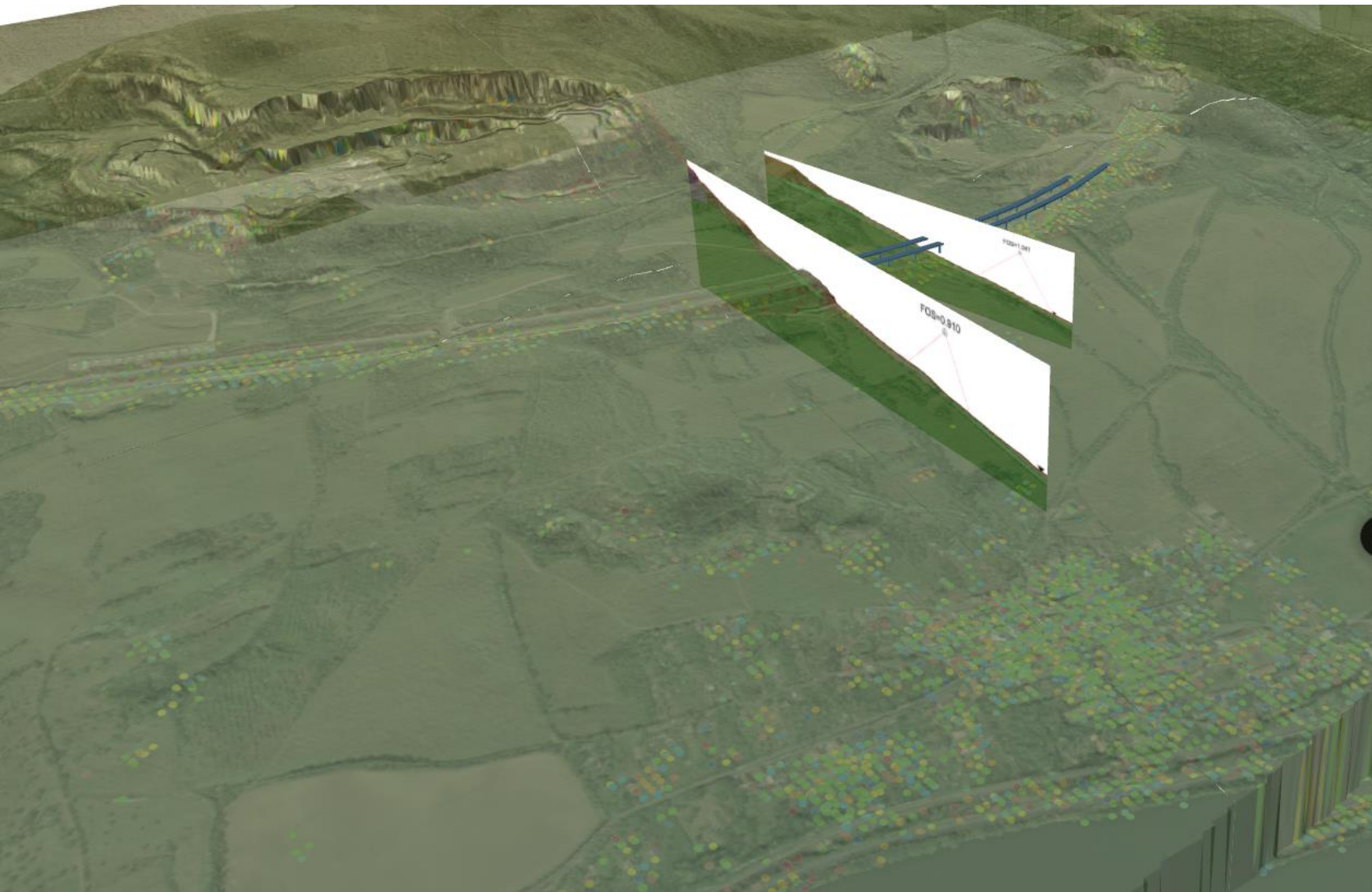
InSAR-Monitoring: Trať 140 – sesuv Dalovice

Monitorovací systém, železnice: trať 140 (Ostrov n. O. žkm162 – Karlovy Vary žkm192)

■ Před sesuvem: 2015-04/2018



InSARviz-3D



Integration of slope motions measured by InSAR with 2D geotechnical model

Ground movements - Interferometric measurements

Configuration

Projected direction (L1)

Orbital trajectories

Line-of-side (LOS)

☒ Ascending ☐ Descending

Visualizations

Displacement velocity

Displacement velocity vector

Average displacement rate [mm/yr]

(Estimated only from summer time series periods. Real displacement rate may be higher)

< -5 5 < No data

← Select point in the map to display statistics here

Děkuji za pozornost

Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko