

Inštrukcia 1.

NÁVOD NA VYKONANIE ANALÝZY NEBEZPEČENSTVA ZOSUVU POMOCOU MODERNÝCH METÓD V OBLASTI PODPORY

Obsah

ÚVOD	4
METODIKA SPRACOVANIA	6
1. MAPOVANIE OBLASTÍ ZOSUVOV	7
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	7
b) Priebeh terénnej analýzy	7
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	8
d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	8
2. GEODETICKÝ MONITORING VYBRANÝCH ZOSUVOV	10
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	10
b) Priebeh terénnej analýzy	10
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	11
d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	12
3. MONITORING ZOSUVU S VYUŽITÍM INKLINOMETROV	14
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	14
b) Priebeh terénnej analýzy	14
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	14
d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	15
4. DENDROCHRONOLOGICKÁ METÓDA	16
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	16
b) Priebeh terénnej analýzy	16
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	18
d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	18
5. RADAROVÁ INTERFEROMETRIA	20
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	20
b) Priebeh terénnej analýzy	20
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	21

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	21
6. LASEROVÉ SKENOVANIE	23
a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy	23
b) Priebeh terénnej analýzy	23
c) Priebeh analýzy malého rozsahu	23
d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy	24
LITERATÚRA	26

ÚVOD

Činnosť okresov v oblasti prevencie zosuvov sa veľmi často obmedzuje na dodržiavanie právnych predpisov. Medzi najdôležitejšie právne akty týkajúce sa zosuvov patria:

- **Zákon 569/2007 z 25. októbra 2007 - Zákon o geologických prácach**
 - upravuje vykonávanie geologických prác, evidenciu geologických informácií, ochranu výhradných ložísk a pôsobnosť štátnych orgánov v tejto oblasti.
- **Zákon 220/2004 z 10. marca 2004 o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy a o zmene zákona č. 245/2003 Z. z. o integrovanej prevencii a kontrole znečisťovania životného prostredia a o zmene a doplnení niektorých zákonov**
 - upravuje povinnosti vlastníkov a užívateľov pôdy zabráňovať vodnej a veternej erózii, napríklad vhodným obhospodarovaním, zachovaním trvalého vegetačného pokryvu, šetrným obrábaním a ďalšími opatreniami, ktoré chránia pôdu pred znehodnotením a stratou úrodnosti.
- **Zákon č. 543/2002 z 25. júna 2002 o ochrane prírody a krajiny**
 - stanovuje, že pri využívaní územia treba zachovávať ekologickú stabilitu krajiny a zabráňovať činnostiam, ktoré by mohli spôsobiť poškodenie prírodného prostredia, vrátane narušenia svahov a vzniku zosuvov. V praxi to znamená, že orgány ochrany prírody môžu obmedziť alebo zakázať zásahy (napr. výrub, stavebné práce, ťažbu), ktoré by zhoršili stabilitu pôdneho a geologického prostredia, najmä v náchylných alebo chránených územiach.
- **Zákon č. 17/1992 z 05. decembra 1991 o životnom prostredí**
 - Z hľadiska zosuvov a erózie tento zákon ukladá povinnosť predchádzať a odstraňovať škodlivé následky prírodných javov vrátane pôdnej erózie a zosuvov, ako aj zodpovednosť vlastníkov a užívateľov pozemkov za ochranu pôdy pred degradáciou a zabezpečenie protieróznych opatrení.
- **Zákon č. 200 z 27. apríla 2022 o územnom plánovaní**
 - Z hľadiska zosuvov a erózie tento zákon upravuje ochranu prírodných prvkov krajiny vrátane geologických útvarov a geomorfologických javov, ako aj povinnosť zachovávať stabilitu svahov a predchádzať erózii pri zásahoch do krajiny.
- **Zákon č. 25/2025 z 05. februára 2025 – Stavebný zákon**
 - Pojednáva o stavebných výrobkoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov upravuje podmienky uvádzania stavebných výrobkov na trh, požiadavky na ich parametre vrátane mechanických vlastností a odolnosti, čo v kontexte zosuvov znamená že stanovuje požiadavky na materiály a výrobky používané pri stabilizačných konštrukciách, oporných múroch, gabiónoch a iných technických prvkoch určených na zabezpečenie svahov proti zosuvu.
- **Zákon č. 364/2004 z 13. mája 2004 – o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon)**
 - Upravuje z hľadiska zosuvov a erózie ochranu pred povodňami a inými škodlivými účinkami vôd, vrátane opatrení na ochranu brehov a svahov pred podmielením a

zosuvmi, ako aj povinnosti pri hospodárení s vodami tak, aby sa predchádzalo erózii a nestabilite brehov vodných tokov.

Faktorom limitujúcim použitie jednotlivých metód v oblasti podpory sú finančné zdroje určené na protizosuvovú ochranu. Ďalším limitujúcim faktorom je vedomosť o možnostiach a technikách použitia jednotlivých metód. Nie vo všetkých samosprávnych jednotkách má personál široké vedomosti o zosuvoch, ich vzniku a metódach prevencie ich následkov. Existuje potreba vzdelávania samosprávnych pracovníkov v tejto oblasti. Túto medzeru by malo do istej miery zaplniť spracovanie predloženej analýzy.

METODIKA SPRACOVANIA

Spracovanie vzniklo na základe materiálov dostupných na internetových stránkach. Boli identifikované rôzne metódy analýzy zosuvov využiteľné v oblasti podpory na území Poľska a na území Slovenska.

Okresy v Poľsku: v Sliezskej vojvodstve: Pszczyński, Cieszyński, Bielski, mesto s právami okresu Bielsko-Biala, Żywiecki, v Malopoľskom vojvodstve: Olkuski, Chrzanowski, Oświęcimski, Wadowicki, Suski, Myślenicki, Tatrzański, Nowotarski, Limanowski, Nowosądecki, mesto s právami okresu Nowy Sącz, Gorlicki, v Podkarpatskom vojvodstve: Bieszczadzki, Leski, Sanocki, Brzozowski, Krośnieński, mesto s právami okresu Krosno, Jasielski, Rzeszowski, mesto s právami okresu Rzeszów, Przeworski, Przemyski, mesto s právami okresu Przemyśl, Jarosławski, Lubaczowski.

Okresy na Slovensku: v Žilinskom samosprávnom kraji: Čadca, Kysucké Nové Mesto, Bytča, Žilina, Martin, Turčianske Teplice, Ružomberok, Dolný Kubín, Námestovo, Tvrdošín, Liptovský Mikuláš, v Prešovskom samosprávnom kraji: Poprad, Kežmarok, Stará Ľubovňa, Levoča, Sabinov, Bardejov, Svidník, Prešov, Vranov nad Topľou, Stropkov, Medzilaborce, Humenné, Snina, v Košickom samosprávnom kraji: Spišská Nová Ves.

Zámerom tohto spracovania podľa objednávky bola príprava pokynov na vykonávanie analýz pomocou moderných metód pri rizikách zosuvu. Počas spracovania sa využívala aj dostupná literatúra, ktorej zoznam je umiestnený na konci spracovania.

Spracovanie bolo vykonané podľa nasledujúcej schémy vyplývajúcej z opisu predmetu objednávky:

- a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy
- b) Priebeh terénnej analýzy
- c) Priebeh analýzy malého rozsahu
- d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

1. MAPOVANIE OBLASTÍ ZOSUVOV

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Metóda mapovania zosuvov je dôležitým prvkom prevencie zosuvového nebezpečenstva. Zosuvové mapy umiestnené v otvorenom prístupe umožňujú dostať sa všetkým potenciálnym investorom k informáciám o polohe zosuvov. Geoportál určite obmedzuje nebezpečenstvo lokalizácie investícií na zosuvových územiach.

b) Priebeh terénnej analýzy

Metóda spočíva v zobrazení polohy a presnej plochy zosuvov. Na tento účel sa vytvárajú mapové systémy podmiennečne nazývané geoportály, často fungujúce pod názvom systém priestorových informácií. Sú zostavené z mnohých vrstiev prezentujúcich odlišné typy súborov objektov, ktoré boli získané prieskumom v teréne, pozorovaniami zosuvov pomocou observačných metód apod.

Na tvorbu geoportálov sa používajú nástroje GIS, ktoré umožňujú veľmi presné priradenie bodových, líniových a priestorových objektov na mapu. Každý z objektov umiestnených na mape má svoje geografické súradnice. Pri vlastnení GPS prijímača možno jednoduchým spôsobom nájsť na mape aj najmenšie objekty umiestnené nielen v zastavanom území, ale aj v lesnej oblasti.

Na tvorbu geoportálov sa používajú nástroje GIS, ktoré umožňujú veľmi presné priradenie bodových, líniových a priestorových objektov na mapu. Každý z objektov umiestnených na mape má svoje geografické súradnice. Pri vlastnení GPS prijímača možno jednoduchým spôsobom nájsť na mape aj najmenšie objekty umiestnené nielen v zastavanom území, ale aj v lesnej oblasti.

Objekty sú usporiadané vo forme vrstiev, najčastejšie sú to:

- Topografia spolu s bodovými a líniovými objektmi
- Administratívne hranice
- Ortofotomapa
- Utváranie povrchu
- Hydrografia

Často systém máp obsahuje rôzne dodatočné vrstvy napr. geodetickú sieť, miestne urbanistické plány, monitoring pôdných podmienok, monitoring pohyblivých objektov atď.

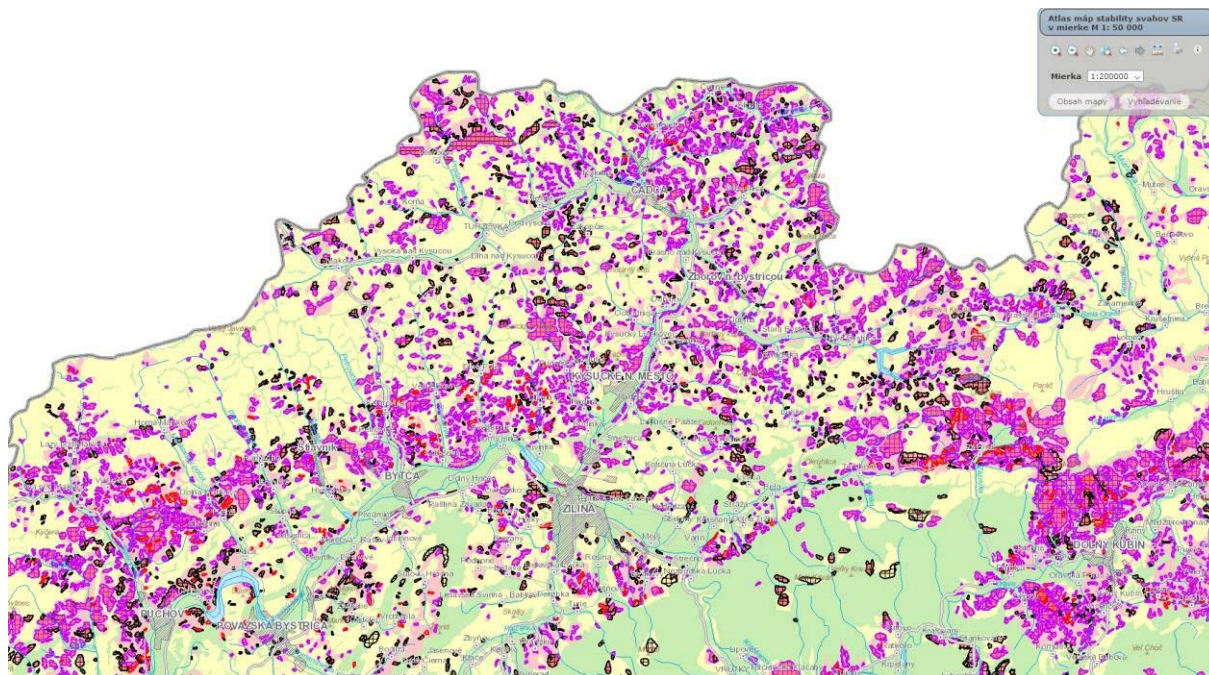
c) Priebeh analýzy malého rozsahu

Zosuvy sa najčastejšie vyskytujú v geoportáli pod názvom vrstvy: Geológia, alebo tvoria oddelenú vrstvu jednoducho s názvom: Zosuvy. Zosuvové územia sú zvyčajne označené obrysami, pod nimi sú umiestnené ľubovoľne iné vrstvy v geoportáli.

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

K základným výhodám mapovania oblastí zosuvov patrí možnosť informovania obyvateľov a potenciálnych investorov o polohe zosuvov, čo znižuje riziko plánovania stavebných investícií v oblastiach postihnutých zosuvmi. Jednou zo základných úloh zosuvových máp je eliminovať situáciu, v ktorej investor podniká činnosti súvisiace napr. s vykupovaním pozemkov na zosuvových územiach.

Mapy prezentujúce deformácie na svahoch a súčasne ohrozenie zosuvmi sú dostupné aj pre samosprávne jednotky umiestnené na Slovensku. V slovenskom mapovacom systéme sú takisto označené zóny, v ktorých sa vyskytujú posuny. Podobne ako v prípade máp z oblasti Poľska sú označené priestorovo a rozdelené na aktívne a neaktívne zóny (Obrázok 1).



Obrázok 1: Výrez z mapy zobrazujúcej zosuvné deformácie a zosuvné nebezpečenstvo zo slovenského geoportálu (zóny označené ružovou farbou sú zóny svahových deformácií, zóny označené oranžovou farbou sú aktívne zóny ohrozujúce infraštruktúru (Zdroj: www.geology.sk).

2. GEODETICKÝ MONITORING VYBRANÝCH ZOSUVOV

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Geodetický monitoring zosuvov je známy už dávno. Avšak časom, spolu s rozvojom geodetických techník, sa stáva čoraz presnejším. Spočíva najvšeobecnejšie v opakovateľnom meraní pozície bodov umiestnených v rámci zosuvu. Meraním pozície tých istých bodov na zosuve (napr. každé 3 mesiace) možno zistiť, či je zosuv aktívny, teda či jednotlivé body zosuvu menia svoju pozíciu v priestore.

Kedysi sa na geodetický monitoring zosuvov používali teodolity, v súčasnosti sa používajú presné GPS prijímače. Možno je aj inštalovanie GPS prijímačov na zosuve a nepretržité meranie pohybu zosuvu, vtedy je prípadná aktivita zosuvu najlepšie viditeľná.

Geodetické meranie zosuvov má svoje základy a určité predpoklady vyplývajúce z predtým vypracovaných inštrukcií. Terénne práce zahŕňajúce geodetický monitoring zosuvov spočívajú v niekoľkých etapách:

Vyhotovenie situačno-výškovej mapy

Stabilizácia meracích bodov

Inštalácia prístrojov na pozorovanie zosuvu

Povrchový monitoring zosuvov s využitím geodézie sa vykonáva na základe stabilizovanej siete meracích bodov v rámci zosuvu, pričom počet a lokalizáciu meracích bodov vstupujúcich do siete sa stanovuje individuálne pre každý monitorovaný zosuv.

b) Priebeh terénnej analýzy

Lokalizácia meracích bodov závisí hlavne od ich trvanlivosti osadenia, čo umožňuje viacnásobné geodetické meranie. Body by mali byť osadené tak, aby bolo možné meranie súradníc X, Y, Z. Zvyčajne sa dodatočne zakladajú tri referenčné body pre zosuvové meracie body. Sú to body merané mimo zosuvu, alebo sú to jednoducho body geodetickej siete, pre ktoré sa budú vykonávať pozorovania.

Používanie GPS prijímačov by malo byť vykonané statickou metódou s určením základných bodov. Pomocou statívov a spodárik s optickým olovnícou sa upevňujú antény prijímačov (Obrázok 2). Výsledky meraní sa vzťahujú na najmenej 3 body geodetickej siete. K týmto bodom sa stále nadväzuje pri ďalších meracích etapách.

Geodetické merania zosuvov umožňujú určiť tzv. ukazovatele deformácie, ku ktorým patria:

Zníženie

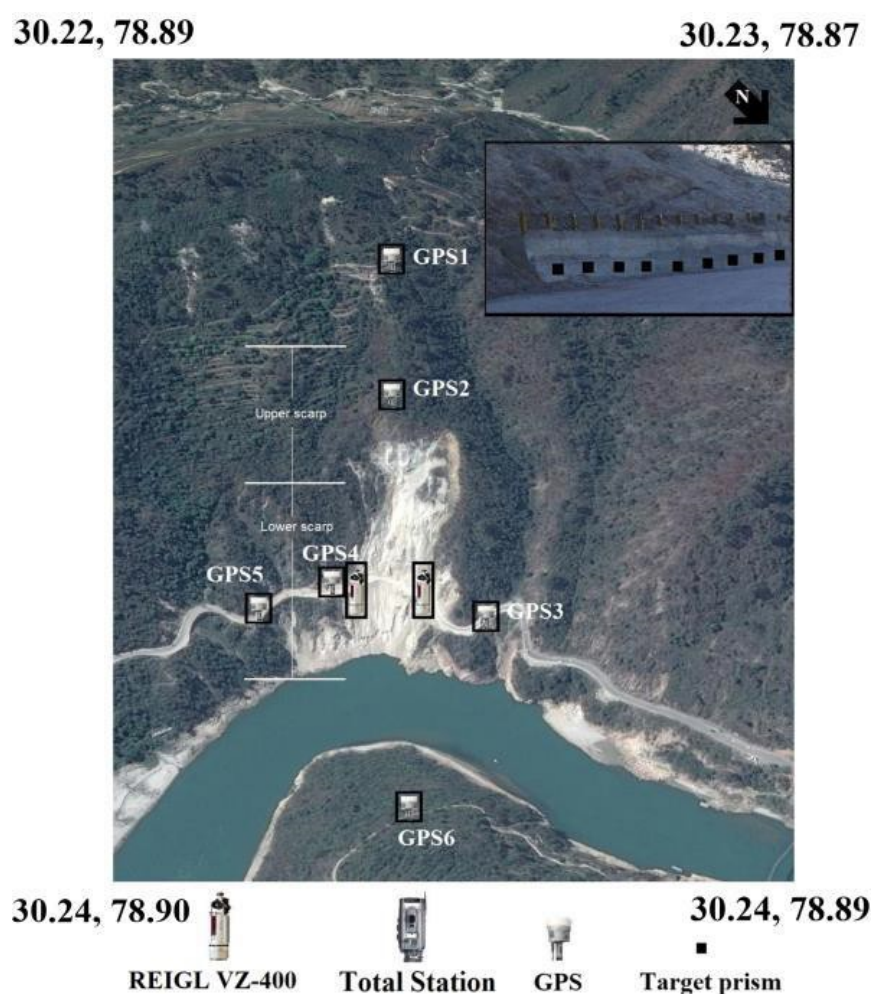
Naklonenie

Horizontálny posun

Deformácia

Krivosť

Posuny sa najčastejšie uvádzajú v tabuľkovej forme alebo vyznačením vektorov posunov na mape alebo na grafe.



Obrázok 2: Príklad inštalovaných geodetických pozorovacích prístrojov pre zosuvy

c) Priebeh analýzy malého rozsahu

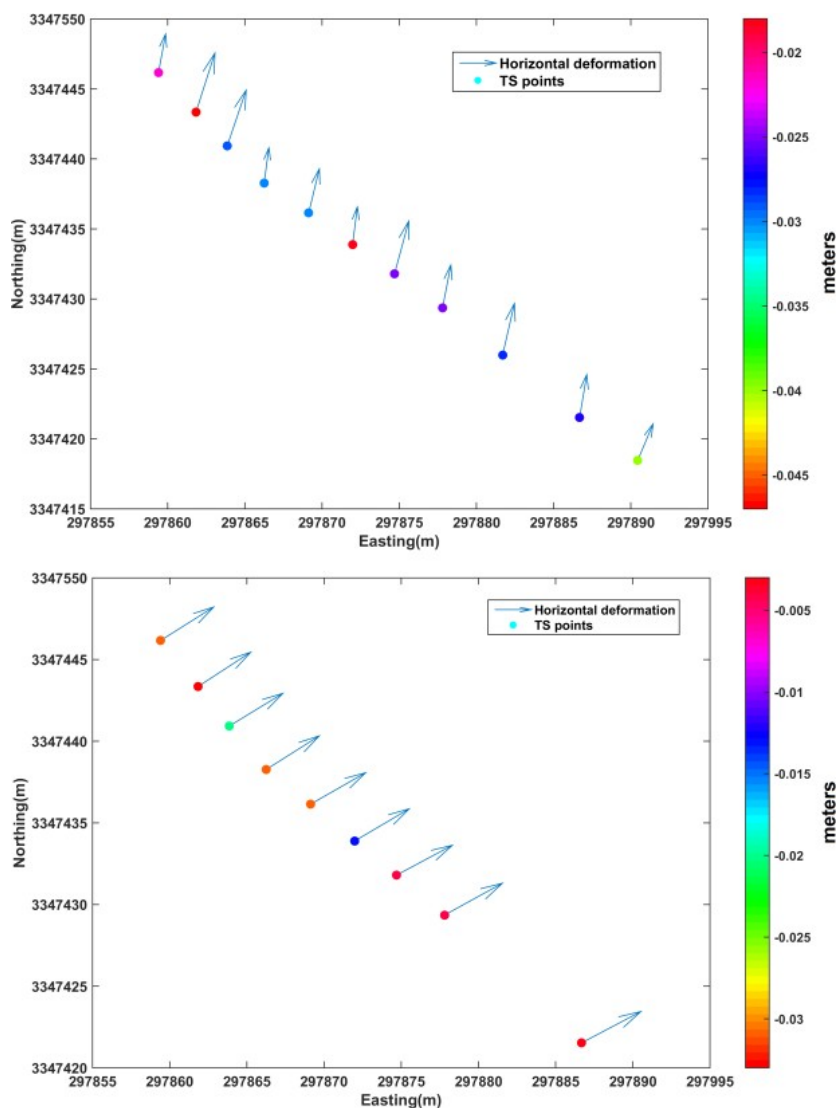
Hlavnou výhodou geodetickej metódy je jej relatívne nízka cena v porovnaní s hlbinnými metódami, ako sú napr. inštalovanie inklinometrov. Môže byť tiež použitá na rôznych miestach

nezávisle od polohy zosuvu. K výhodám metódy patrí tiež relatívne jednoduchý systém merania deformácií. Je to tiež veľmi presná metóda umožňujúca podrobný monitoring aktivity zosuvu.

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

Metódu treba uznať za vhodnú na analýzu aktivity zosuvov. Obzvlášť bude dobrá pre samosprávne jednotky, pretože môže meraniami pokrývať veľké oblasti a metóda umožňuje analýzu mnohých zosuvov.

Treba tiež upozorniť, že nezávisle od rozmiestnenia zosuvov možno geodeticky monitorovať oblasti, ktoré v budúcnosti by mali byť predmetom investícií. Treba mať na zreteli fakt, že zosuvy môžu vznikáť v zónach, kde v súčasnosti nevyskytujú. Často takéto nové oblasti postihnuté zosuvmi sú prekvapením pre miestne úrady alebo pre investorov, preto sa odporúča pokryť geodetickým monitoringom oblasti budúcich investícií. Týka sa to obzvlášť horských a podhorských zón umiestnených v oblastiach náchylných na zosuv z geologických dôvodov. Ako je známe, práve takéto oblasti sa vyskytujú v okresoch umiestnených v oblasti podpory projektu.



Obrázok 3: Príklad znázornenia smerov a rozsahu posunov hornín v zosuve identifikovaných počas geodetického monitorovania.

3. MONITORING ZOSUVU S VYUŽITÍM INKLINOMETROV

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Inklinometer je snímač náklonu (ukazovateľ náklonu), toto zariadenie slúži na meranie uhlov náklonu, meria výšky alebo zníženia objektu vzhľadom na gravitačnú silu. Inklinometre merajú tak kladné, ako aj záporné náklony. Snímač náklonu môže merať náklon v dvoch alebo troch osiach roviny.

V prípade určovania aktivity zosuvov sa inklinometre montujú vo vrtných otvoroch. Do týchto otvorov sa vkladajú rúry rôzneho priemeru, najčastejšie vybavené klbmi zvyšujúcimi ich pevnosť, umožňujúce meranie posunov na veľkých hĺbkach, dokonca až do niekoľkých desiatok metrov pod zemou.

Na cementovanie otvoru sa využívajú rôzne hmoty, napr. cementovo-bentonitové prispôsobené druhu hornín vyskytujúcich sa v zóne, v ktorej bol otvor vykonaný. Cementovanie by sa malo vykonať takým spôsobom, aby sa zabezpečil dobrý prenos síl pôsobiacich v horninách na meracie rúry

b) Priebeh terénnej analýzy

Prípadný náklon inklinometrických rúr sa meria pomocou inklinometrickej sondy, zvyčajne merajúcej odchýlky v dvoch rovinách s presnosťou 0,1 mm. Po spustení sondy do otvoru sa odčíta prvé meranie, potom sa sonda zdvihne o meraciu vzdialenosť a vykonajú sa ďalšie odčítania, najčastejšie každých 0,5 m.

Tento postup sa opakuje až do momentu, keď sa sonda nachádza na úrovni povrchu terénu. Meracie série sa vykonávajú v časových odstupoch napr. trojmesačných, čo dáva možnosť pozorovania posunov pôdy vyplývajúcich zo zosuvu spolu s uplývaním času.

Po meraniach sa vykonávajú profily posunov zobrazujúce veľkosť, smer a hĺbku, na ktorej dochádza k pohybu zosuvu. Namerané náklony inklinometrických rúr v stupňoch sú prepočítané na veľkosti horizontálnych posunov v milimetroch na základe trigonometrických funkcií. Pre posuny sa kalkuluje aj meracie chyby.

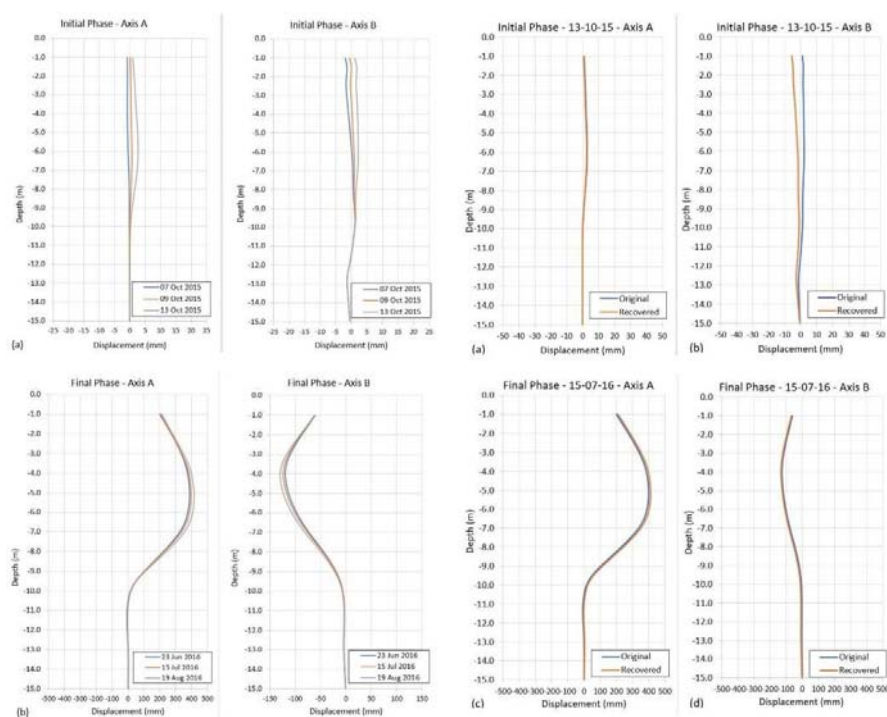
c) Priebeh analýzy malého rozsahu

Rozsah analýzy je daný rozsahom monitorovaného zosuvu, resp. oblasti. Minimálne je osadný jeden inklinometer situovaný tak, aby bolo možné získať, čo najväčší dataset údajov.

d) Závěry na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

K bezpochybným výhodám metódy patrí fakt, že inklinometer meria skutočné posuny pôdy vyskytujúce sa pod zemou na rôznych hĺbkach. V prípade povrchových metód výsledná informácia sa týka deformácií vyskytujúcich sa na povrchu hornín. Často takéto deformácie môžu súvisieť napr. s plazením zvetralinového pokryvu a nie sú spojené so zosuvom. Proces plazenia je samozrejme menej nebezpečný pre infraštruktúru v porovnaní so zosuvom.

Vďaka inštalovaniu inklinometrov je možná aj identifikácia hĺbky, na ktorej sa vyskytuje tzv. šmyková plocha, teda povrch, po ktorom sa premiestňuje hmota zosuvu. To je dôležité, pretože umožňuje racionálne naplánovať prípadnú stabilizáciu zosuvu.



Obrázok 4: Príklady deformácií vyplývajúcich z meraní inklinometrom

4. DENDROCHRONOLOGICKÁ METÓDA

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Kmene stromov prerastajúcich zosuvmi sú často v dôsledku vplyvu pohybu hmoty vyklonené alebo ohnuté (obr. 1. A-B, Braam 1978; Wistuba, Malik 2011). Vonkajším poruchám zodpovedajú zmeny v anatómii dreva: napr. dekoncentrácia rastu (Butler 1987). Každý ročný prírastok vykazujúci dekoncentráciu, ako aj sprievodné reakčné drevo, poskytuje informácie o environmentálnom strese, ktorý ovplyvňuje rast stromu v príslušnom roku. Priebeh zosuvu v lesných oblastiach sa zaznamenáva rok po roku, počas celého života stromov. To je výhoda dendrochronologickej metódy oproti iným metódam analýzy dynamiky zosuvu, čo potvrdzujú príklady predchádzajúcich aplikácií (Corominas, Moya 2010; Fantucci, Sorriso-Valvo 1999; Krąpiec, Margielewski 2000). Rastová dekoncentrovanosť je tendencia stromu vytvárať širšie ročné prírastky na jednej strane kmeňa. Nastáva vtedy, keď je intenzita rastu v obvode kmeňa nerovnomerná. Dekoncentricita je spôsobená menším mechanickým namáhaním v naklonenom kmeni, kde pôsobenie gravitácie spôsobuje zvýšený rast spodnej stlačenej časti kmeňa u ihličnatých drevín (napr. smrek) a hornej stlačenej časti u listnatých drevín (Schweingruber 2007).

b) Priebeh terénnej analýzy

Stromy by mali byť čo najzdravšie a ich kmene by nemali byť poranené. Z každého stromu by sa mali odobrať dva vrty pomocou štandardného prírastkového vrtáka (priemer 4 mm). Dvojice vrtov sa odoberajú v prsnej výške, v jednej osi, v línii so svahom. Použitý postup odberu vzoriek by mal poskytnúť údaje o šírke ročných prírastkov na hornej a dolnej strane kmeňov stromov. Odber vzoriek by sa mal vykonávať pokiaľ možno na celej ploche zosuvu, z geomorfologicky rôznych miest (z dutinovej niky, zo svahu).

Po prevoze vzoriek do laboratória sa zmeria šírka ročných prírastkov (najlepšie pomocou meracej stanice LinTab so softvérom TSAPWin Professional 4.65, presnosť 0,01 mm) na hornej a dolnej strane kmeňov. Údaje pre jednotlivé stromy sa porovnávajú a transformujú na index dekoncentrácie ročného prírastku a jeho ročnej variácie pomocou nasledujúcich vzorcov (obrázok 2):

$$Ex = Ux - Dx;$$

keď $Ex > 0$: zo strany svahu dekoncentrácia; [1] $Eix = (Ex / Dx) \times 100\% > 0$; [2a]

keď $E_x = 0$: žiadna dekoncentrácia; $E_{ix} = E_x \text{ [mm]} = 0$; [2b]

keď $E_x < 0$: od strany svahu dekoncentrácia; $E_{ix} = (E_x / U_x) \times 100\% < 0$; [2c]

$vE_{ix} = E_{ix} - E_{ix-1}$; [3]

Kde: U - šírka ročného prírastku kmeňa zo strany svahu [mm];

D - šírka ročného prírastku kmeňa od strany svahu [mm];

E - dekoncentrácia ročného prírastku [mm];

E_i - ročný index dekoncentrácie prírastku [%];

vE_i - ročná variabilita indexu [%];

x - rok (ročný prírastok).



Obrázok 5: Odober vzorky jadra zo stromu pomocou Presslerovej vyvrtávačky počas terénneho testovania

Datovanie zosuvných epizód na svahu sa vykonáva na základe indexu ročnej variability indexu dekoncentrácie a prahových hodnôt variability indexu dekoncentrácie vypočítaných pre referenčnú lokalitu. Na tento účel sa musia odobrať aj vzorky stromov rastúcich na referenčnom svahu alebo nachádzajúcich sa mimo zosuvu. Tieto stromy by mali rásť v podobnej nadmorskej výške ako stromy odobraté na zosuve a mali by tiež predstavovať rovnaké druhy. Referenčných

stromov by malo byť najmenej 10. Celý postup odberu vzoriek, merania ročných prírastkov a výpočtu indexu dekoncentrácie sa vzťahuje aj na referenčné stromy. Referenčné prahové hodnoty sa vypočítajú ako súčty aritmetických priemerov a štandardných odchýlok pre celkové výsledky 10 stromov.

Po aplikácii algoritmu sa získa graf znázorňujúci zmeny zosuvnej aktivity na skúmanom svahu v po sebe nasledujúcich rokoch identifikované dendrochronologickou metódou (obr. 1). Potom nasleduje príprava mapy aktivity zosuvov a z takto získaných výsledkov sa vytvorí interpolácia, t. j. mapa ohrozenia zosuvmi (obrázok 6).



Obrázok 6: Graf zobrazujúci zmeny zosuvnej aktivity na skúmanom svahu v nasledujúcich rokoch zistené dendrochronologickou metódou.

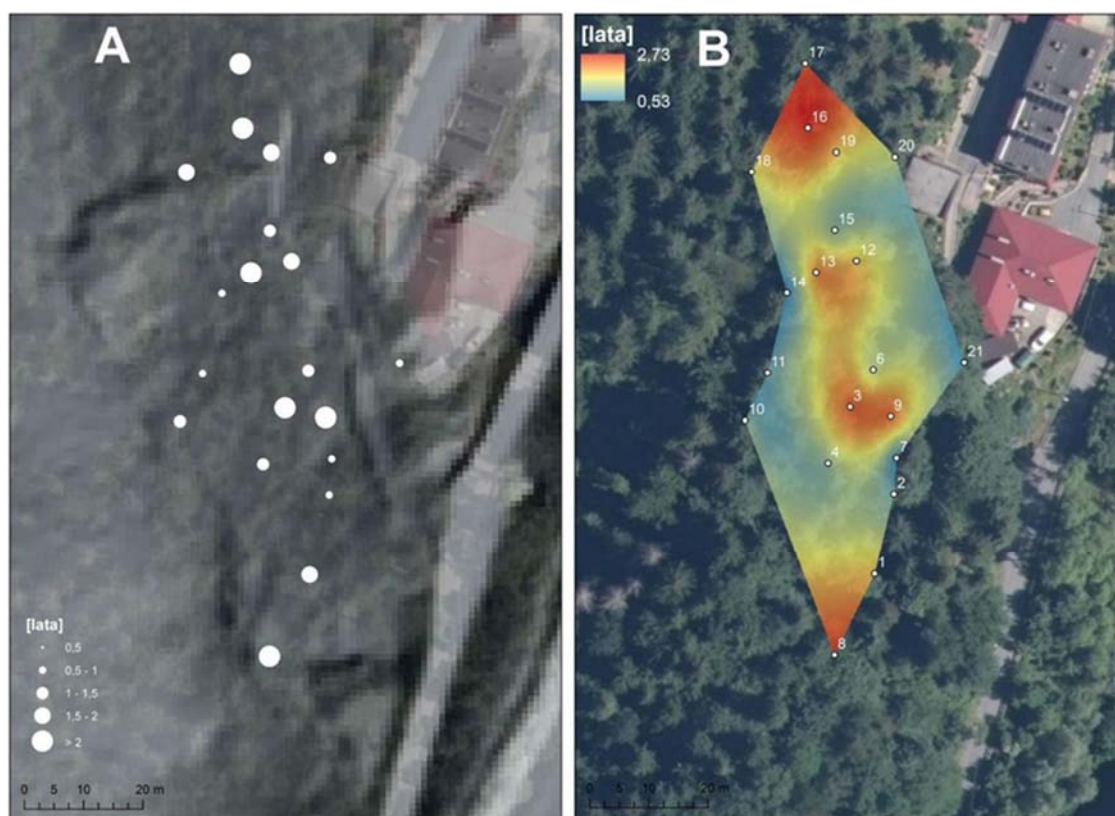
c) Priebeh analýzy malého rozsahu

V prípade potreby je možné rozsah testovania prispôbiť daný pomerom,, avšak treba brať na zreteľ, že môže dôjsť k skresleniu výsledkov a nepresnej interpretácii daného stavu.

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

Hlavnou výhodou dendrochronologickej metódy je, že je možné získať informácie o činnosti svahu na základe údajov o ročnom obrastaní za desiatky alebo dokonca stovky rokov dozadu. Žiadna iná tradičná metóda proti zosuvom neposkytuje možnosť odvodiť zosuvy na základe záznamov za niekoľko desiatok alebo stoviek rokov dozadu. Treba poznamenať, že dlhé sekvencie environmentálnych údajov umožňujú presnejšie rekonštrukcie minulého zosuvu a

predovšetkým umožňujú jeho správnu predikciu. Všetky tradičné metódy zmiernovania zosuvov využívajú reťazce údajov, ktoré sa získavajú až po inštalácii zariadenia v oblasti zosuvu. To výrazne spomaľuje proces získavania výsledkov o činnosti zosuvu a tiež ho robí menej presným. Použitie dendrochronologickej metódy je jedinečné z hľadiska dĺžky získaných reťazcov. Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je, že dokáže identifikovať riziko katastrofického odstránenia. Analýzou rastu stromov pred katastrofou zosuvu sa vytvoril model tvorby ročných prírastkov stromov pred katastrofou zosuvu. Ak sa podobný vzor objaví u stromov rastúcich na svahu, znamená to, že v budúcnosti hrozí rýchle odstránenie svahu, čo je obzvlášť nebezpečné pre infraštruktúru nachádzajúcu sa v ňom a pod ním. Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je jej nízka cena v porovnaní s tradičnými metódami. Stanovenie sa dá vykonať za niekoľko tisíc zlotých, zatiaľ čo napríklad použitie inklinometrov stojí minimálne niekoľko tisíc zlotých.



Obrázok 7: Počet zosuvov identifikovaných na skúmanom svahu za 10 rokov. (A - počet zosuvných epizód za 10 rokov, B - interpolácia počtu zosuvných epizód identifikovaných za 10 rokov.

5. RADAROVÁ INTERFEROMETRIA

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Radarové snímky nadobudli význam v satelitnom diaľkovom prieskume Zeme koncom 70. rokov 20. storočia. Snímky získané pomocou radaru so syntetickou apertúrou (SAR) sú vynikajúcim nástrojom na mapovanie zemského povrchu a poskytujú cenné informácie o jeho fyzikálnych vlastnostiach, ako je topografia alebo morfológia. SAR je systém, ktorý využíva mikrovlnné žiarenie a v súčasnosti satelity vybavené anténami SAR pracujú na rôznych mikrovlnných vlnových dĺžkach, ako napr.:

- C - 5,3 GHz, 5 cm (napr. ERS, Envisat, Radarsat)
- L - 1,2 GHz, 25 cm (napr. J-ERS, ALOS)
- X - 10 GHz, 3 cm (napr. X-SAR)

Mikrovlnné frekvencie umožňujú monitorovať vlastnosti zemského povrchu prakticky za všetkých poveternostných podmienok. Systém SAR je aktívny systém, ktorý umožňuje snímať počas dňa aj v noci. Družicová radarová interferometria (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) si získala popularitu v 80. rokoch 20. storočia. Po vypustení družice ERS-1 Európskou vesmírnou agentúrou v roku 1991 sa radarová interferometria začala vďaka práci mnohých výskumníkov rýchlo rozvíjať. InSAR sa ukázal ako mimoriadne účinný nástroj na mapovanie zemského povrchu, ľadovcov a dokonca aj topografickej štruktúry morí (Mirek, 2013).

b) Priebeh terénnej analýzy

Družicová radarová interferometria, známa ako InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry), je technika, ktorá využíva rozdiely vo fázovom posune radarových signálov z dvoch snímok SAR (Perski, 2010). Spracovaním fázových rozdielov medzi snímkami získanými v rôznom čase z tej istej družice sa vytvorí jedno interferometrické mapovanie. Pri zaznamenávaní vln odrazených od zemského povrchu sa zbierajú údaje o intenzite odrazených vln (t. j. o miere ich pohltienia povrchom) a o fáze signálov, keď dosiahnu prijímač. Zmena fázy signálu na radarograme o celých 360° cyklu zodpovedá polovici vlnovej dĺžky signálu. V prípade satelitov, ako je ERS-1/2 alebo ENVISAT, je vlnová dĺžka používaná prístrojom SAR 5,6 cm. Analýzou dvoch radarogramov zhotovených v rôznych časoch je možné určiť rozdiely vo fáze jednotlivých signálov. Výsledný interferenčný obraz z týchto dvoch radarogramov

ukazuje zmeny vo výške terénu, pričom zmena fázy o celých 360° zodpovedá výškovému rozdielu 2,8 cm, čo odráža zmeny terénu v čase medzi jednotlivými záznamami.

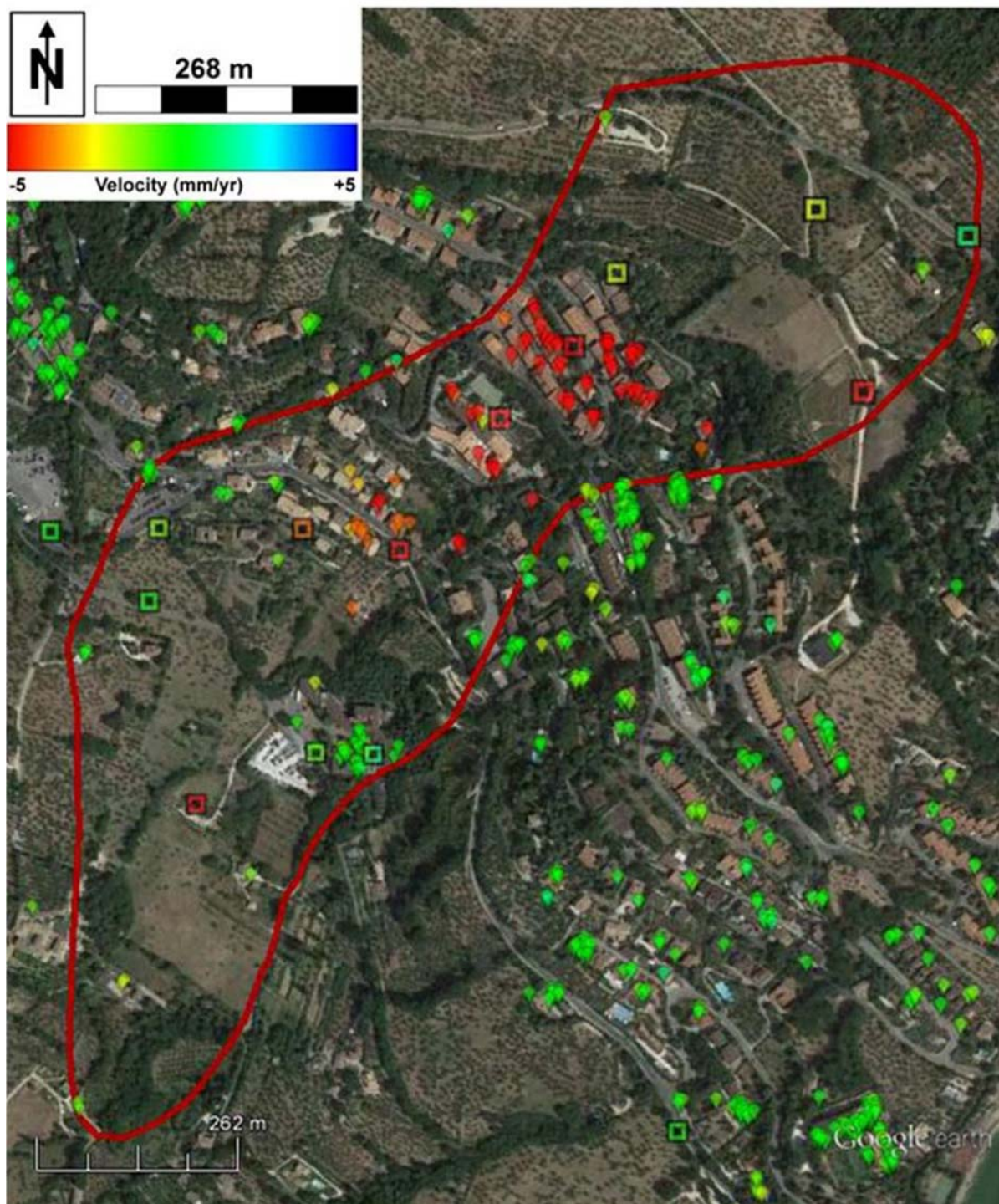
c) Priebeh analýzy malého rozsahu

Závisí od požadovaného rozsahu analyzovaných údajov zachytených družicovým sledovaním.

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

Radarová interferometria je najmodernejšia metóda analýzy nebezpečenstva zosuvov s veľmi vysokým potenciálom. Umožňuje detekciu aj tých najmenších zosuvných pohybov, ktoré spôsobujú milimetrové posuny objektov. Rozlišovacia schopnosť metódy, ktorá závisí od frekvencie snímok získaných zo satelitov, je tiež vysoká. Pomocou radarovej interferometrie možno získať pomerne dlhé sekvencie údajov, ktoré sa datujú od začiatku roku 2000. Výsledky získané pre zosuv umožňujú odhadnúť rýchlosť jeho pohybu, čo má zase veľký potenciál na odhad rizika zosuvnej katastrofy. Medzi nevýhody metódy patrí, samozrejme, vysoká miera komplikovanosti a ťažkosti s interpretáciou po získaní výsledkov. Jej aplikácia si vyžaduje špecializované znalosti, jej výhodou však je, že si nevyžaduje inštaláciu drahého zariadenia v teréne. Celú analýzu možno vykonať bez návštevy zosuvného územia v teréne.

Kľúčovú úlohu v tejto metóde zohrávajú koherentné odrazové body (Permanent Scatterers, PS), ktoré sú viditeľné na všetkých zaznamenaných snímkach. Zvyčajne zodpovedajú objektom, ako sú budovy, komunikačná a priemyselná infraštruktúra a prírodné prvky zemského povrchu, napríklad geologické odkryvy. Použitie koherentných odrazových bodov v PSInSAR umožňuje vykonávať merania na konkrétnych miestach, čím sa líši od klasickej interferometrie. Hustota bodov PS závisí od vlastností skúmanej oblasti. V oblastiach s intenzívnou urbanizáciou môže byť hustota bodov PS veľmi vysoká (aj viac ako 100 PS/km^2), zatiaľ čo v poľnohospodárskych oblastiach sa vyskytujú oveľa menej (Mirek, 2013).



Obrázok 8: Rozdelenie priemerných rýchlostí získaných spracovaním údajov ENVISAT (bodky) a záznamov GNSS (štvrce). Farby symbolov reprezentujú rýchlosti (horná časť obrázku). Hranice zosuvov sú znázornené červenou farbou.

Zdroj: Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Skúmanie zosuvov a nestabilných svahov pomocou satelitnej viacčasovej interferometrie: Súčasné problémy a perspektívy do budúcnosti. *Engineering Geology*, 174, 103-138.

6. LASEROVÉ SKENOVANIE

a) Vecný úvod, vybavenie potrebné na vykonanie analýzy

Činnosť laserového skenera, známeho aj ako LiDAR (Light Detection And Ranging - detekcia a meranie svetla), je založená na presnom meraní vzdialenosti medzi zariadením a skúmaným objektom. Tento proces zahŕňa meranie času, ktorý uplynie medzi vyslaním laserového lúča a jeho návratom do skenera po odraze od povrchu. Na základe znalosti rýchlosti šírenia elektromagnetických vĺn a nameraného času možno presne vypočítať vzdialenosť objektu od zariadenia. Skener zaznamenáva aj uhol, pod ktorým je laserový lúč vyslaný. Tieto získané údaje - vzdialenosť a uhol vychýlenia každého impulzu - umožňujú určiť priestorové súradnice XYZ bodov, ktoré tvoria tzv. mračno bodov v lokálnom systéme skenera (Graniczny et al, 2012; Wojciechowski, et al 2012; Cebulski, 2015; Przyłucka, Klimkowska, 2016). Napríklad skener Riegl VZ 4000 generuje impozantných 220 000 bodov za sekundu. V kombinácii s GPS Trimble R4 RTK sú každému z týchto bodov priradené presné zemepisné súradnice. Z výsledného mračna bodov sa generujú modely terénu zobrazujúce modely zosuvov s vysokou presnosťou.

b) Priebeh terénnej analýzy

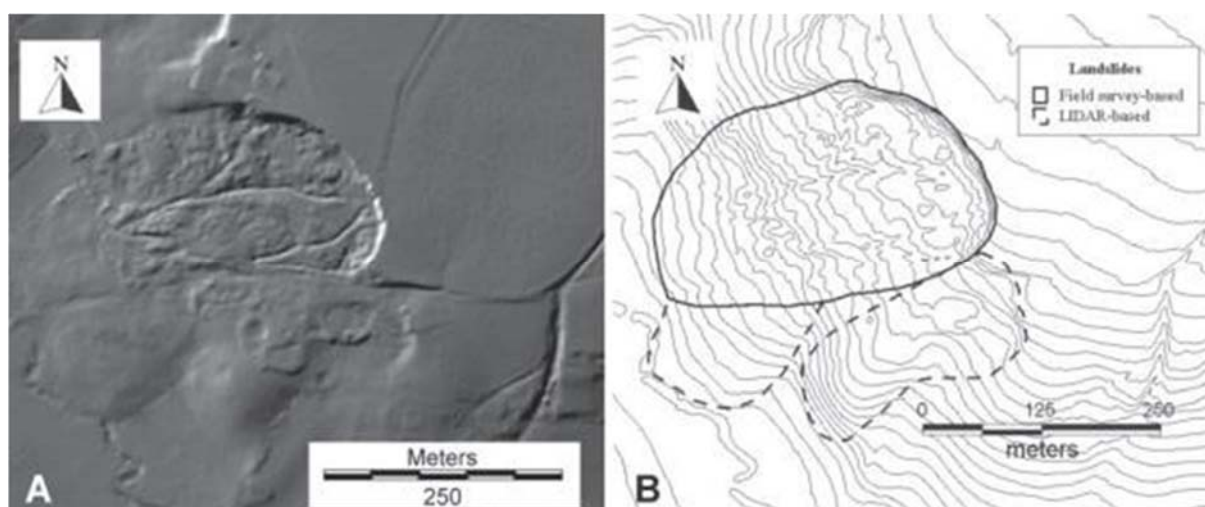
Veľmi často používaným algoritmom je metóda analýzy dvojíc bodov z po sebe idúcich "mračen bodov" na výpočet vektora posunutia vybraných charakteristických prvkov, ako je napríklad kmeň stromu alebo balvan, v ktorejkoľvek časti zosuvu. Táto technika je pomerne jednoduchá na použitie, ale má svoje významné obmedzenia. Oblasti bez takzvaných "charakteristických prvkov" nemožno monitorovať a ich nadbytok môže viesť k ťažkostiam pri identifikácii správnych prvkov, ktoré sa majú porovnávať. Vedecký výskum zosuvov, ktorý vykonávajú popredné pracoviská na celom svete, sa zameriava na kvantitatívne, numerické znázornenie zosuvných procesov. Čoraz viac sa upúšťa od tradičných deskriptívnych metód v prospech štatistickému prístupu.

c) Priebeh analýzy malého rozsahu

Závisí od požadovaného rozsahu analyzovaných údajov zachytených laserovým skenovaním.

d) Závery na základe získaných výsledkov ohľadom úrovne zosuvu pôdy

Laserové skenovanie je užitočná metóda, keď je potrebné získať presnú mapu tvaru terénu v zosuve. Takýto model terénu sa môže použiť rôznymi spôsobmi v následných štúdiách. Na posúdenie aktivity zosuvov a nebezpečenstva zosuvov však metóda laserového skenovania nie je najlepším riešením. Je totiž potrebné počkať určitý čas po prvom meraní a potom vykonať ďalšie meranie, aby sa získali informácie o zmenách v rezaní zosuvného územia, t. j. o jeho aktivite. Takýto prístup neumožňuje reálne a predovšetkým rýchle posúdenie nebezpečenstva zosuvu.



Obrázok 9: Výrez z mapy získaný pomocou údajov LIDAR, na ktorom je zobrazený aktívny rotačný zosuv so zakriveným hlavným svahom (B) - Výrez z vrstevnicovej mapy získaný pomocou LIDAR.

Zdroj: Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., ... & Vandekerckhove, L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 754-769.



Obrázok 10: Model terénu so zosuvom pôdy založený na údajoch LIDAR.

Žródlo: Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). Mapping and monitoring of landslides using LiDAR. In Natural Hazards (pp. 397-420). CRC Press.

LITERATÚRA

Allil, R. C., Lima, L. A., Allil, A. S., & Werneck, M. M. (2021). FBG-based inclinometer for landslide monitoring in tailings dams. *IEEE Sensors Journal*, 21(15), 16670-16680.

Bednarczyk, Z. (2008). Metody instrumentácie a monitoringu povrchových hromadných pohybov na príklade vybraných zosuvov v Karpatoch (Nízke Beskydy, Stredné Beskydy a Podhorie). *Geológia/Banicko-hutná akadémia im. Stanisława Staszica v Krakove*, 34(4), 721-732.

Ćwiąkała, P., Stanisławski, J., Wróbel, A., Kaczmarczyk, R., Drwal, P., Grabek, P., ... & Zierkiewicz, M. (2016). Určenie povrchových posunov na zosuve v Kłodnom (obec Limanová, južné Poľsko). *Geologický prehľad*, 64(2), 122-130.

Maca, N. (2020). Praktické zásady výberu metód stabilizácie zosuvov. Moderné inžinierske stavebníctvo.

Różycka, R. (2013). Zosuvové ohrozenia a proces priestorového plánovania na príklade obce Zakliczyn. *Infraštruktúra a ekológia vidieckych území*, (3/I).

Stryczek, S., Gonet, A., & Wiśniowski, R. (2008). Geoinžinierske metódy stabilizácie svahov a zrázov. Moderné inžinierske stavebníctvo, 6(21), 78-81.

Szafarczyk, A. (2011). Geodetické metódy monitoringu zosuvov. *Infraštruktúra a ekológia vidieckych území*, (02).

Tiwari, A., Narayan, A. B., Devara, M., Dwivedi, R., & Dikshit, O. (2018). Multi-senzorový geodetický prístup k detekcii a monitoringu zosuvov. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 287-292.

Butler D. R., 1987, Teaching general principles and applications of dendrogeomorphology, J. Geol. Ed., 35, s. 64–70.

Braam R. R., Weiss E. E. J., Burrough, P. A., 1987 a, Dendrogeomorphological analysis of mass movement a technical note on the research method, Catena Supplement, 9, s. 585–589.
Cebulski, J. (2015). Naziemny skaning laserowy jako narzędzie do określenia aktywności osuwiska. Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie (2012-2018), (4).

Corominas J., Moya J., 2010, Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides, Geomorphology, 124, s. 137–149.

Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., ... & Vandekerckhove, L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. Earth Surface Processes and Landforms, 32(5), 754-769.

Fantucci R., Sorriso-Valvo M., 1999, Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago Calabria (Italy), Geomorphology, 30, s. 165–174.

Graniczny, M., Bovenga, F., Kowalski, Z., Perski, Z., Piątkowska, A., Surała, M., ... & Zdanowski, A. (2011). Problematyka wykorzystania interferometrii satelitarnej w badaniach geologicznych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego.

Graniczny, M., Kamiński, M., Piątkowska, A., & Surała, M. (2012). ARTYKUŁY NAUKOWE Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańnicy (gmina Lanckorona), Pogórze Wielickie, Karpaty zewnętrzne. Przegląd Geologiczny, 60(2), 89-94.

Hejmanowski, R., Malinowska, A., Witkowski, W., & Guzy, A. (2018). Pomiary przemieszczeń wywołanych wstrząsem górniczym przy zastosowaniu satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. Przegląd Górniczy, 74.

Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). Mapping and monitoring of landslides using LiDAR. In Natural Hazards (pp. 397-420). CRC Press.

Kampes, B. M. (2006). Radar interferometry (Vol. 12). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Krąpiec M., Margielewski W., 2000, Analiza dendrogeomorfologiczna ruchów masowych na obszarze polskich Karpat fliszowych, Kwart. AGH, Geologia, 26, 2, s. 141–171.

Mirek, K. (2013). Związek występowania sejsmiczności indukowanej z osiadaniem powierzchni terenu określonym techniką PSInSAR. Przegląd Górniczy, 69(6), 44-50.

Perski, Z. (1999). Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). Przegląd Geologiczny, 47(2), 171-174.

Perski, Z. (2010). Satelitarna interferometria radarowa InSAR i PSInSAR.

Popiołek, E., Krawczyk, A., & Sopata, P. (2007). Wykorzystanie metody InSAR w monitoringu i prognozowaniu deformacji powierzchni terenu. Zeszyty Naukowe. Górnictwo/Politechnika Śląska, (278), 395-404.

Perski, Z., Krawczyk, A., & Marinković, P. (2008). Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 18, 499-507.

Przyłucka, M., & Graniczny, M. (2015). Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GOP. Przegląd Górniczy, 71(3), 80-88.

Przyłucka, M., & Klimkowska, A. (2016). Fotogrametria bliskiego zasięgu i skaning laserowy jako metody monitoringu zmian geodynamicznych na przykładzie skarpy w Płocku. Przegląd Geologiczny, 64(7), 504-512.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), 333-382.

Schweingruber F. H., 1996, Tree rings and Environment. Dendroecology, Swiss Federal Institute for Forests, Snow and Landscape Research, WSL/FNP Birmensdorf, Paul Haupt Publishers Berne, Stuttgart, Vienna.

Szafarczyk, A. (2012). Możliwości wykorzystania naziemnej interferometrii radarowej w monitoringu osuwisk. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, (2/II).

Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174, 103-138.

Wistuba, M., & Malik, I. (2011). Indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych drzew–narzędzie do identyfikacji współczesnych ruchów osuwiskowych.

Wojciechowski, T., Perski, Z., & Wójcik, A. (2008). Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. *Przegląd Geologiczny*, 56(12), 1087-1091.

Wojciechowski, T., Borkowski, A., Perski, Z., & Wójcik, A. (2012). Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk–przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). *Przegląd Geologiczny*, 60(2), 95-102.

Tento dokument vznikol pre účely projektu „Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien“ z programu „Interreg V-A PL-SK“ číslo PLSK.01.01-IP.01-0007/23.

V rámci: „Úloha 4 Vypracovanie návodov, školiacich materiálov a máp na implementáciu moderných metód prevencie a protipatrení proti účinkom zosuvov pôdy, povodní a znečistenia ovzdušia v oblasti podpory“.

Všetky práva vyhradené. Úpravy tohto dokumentu sú dovoľené po dohode s autorom.