

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

NOWOCZESNE METODY W ZAKRESIE PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM OSUWISK

METODYKA OPRACOWANIA

Opracowanie powstało w oparciu o materiały dostępne na Uniwersytecie Śląskim i na Uniwersytecie w Żylinie, kontaktowano się z pracownikami tych placówek naukowych, aby uzyskać informacje dotyczące zastosowania nowoczesnych rozwiązań w analizie aktywności osuwisk i w szacowaniu zagrożenia osuwiskowego nowoczesnymi metodami. Posiłowano się także analizą stron internetowych z ofertami specjalistycznymi oraz analizowano publikacje naukowe, głównie korzystając z bazy naukowej Google Scholar, gdzie dostępne są publikacje dotyczące analizowanego zagadnienia. Analizowano prace naukowe z miejsc, które ze względu na budowę geologiczną, specyficznych typów opadów i aktywną sejsmikę najbardziej narażone są na katastrofalne osuwanie: Tajwan, Chiny, Włochy, Nowa Zelandia. Wyszukiwano także konkretne frazy mające na celu właściwe filtrowanie informacji zawartych w bazie danych Gogle Scholar: landslide risk method, landslide hazard method, landslide mitigation, landslide activity.

Intencją niniejszego opracowania zgodnie z zamówieniem było opisanie nowoczesnych metod przeciwdziałania skutkom osuwisk. W trakcie opracowania posiłowano się także dostępną literaturą, której spis zamieszczono na końcu opracowania. Opracowanie wykonane zostało według następującego schematu wynikającego z opisu przedmiotu zamówienia:

- a) opis techniczny metody przeciwdziałania osuwaniu wraz założeniami teoretycznymi,
- b) opis wad i zalet każdej metody,
- c) ocena przydatności zastosowania metody,
- d) korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod przeciwdziałania osuwaniu przez samorządy terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia (korzyści opisano wspólnie dla wszystkich nowoczesnych metod).

Biorąc pod uwagę, że materiały będą mogły być wykorzystane przez samorządy lokalne, informacje starano się przekazać w taki sposób aby ułatwić zrozumienie opisywanych metod potencjalnemu odbiorcy materiałów. Dlatego rezygnowano, w miarę możliwości z detali technicznych, na rzecz użytkowych cech każdej z opisywanych metod.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

1. Metoda dendrochronologiczna

a) Opis techniczny metody przeciwdziałania osuwaniu wraz założeniami teoretycznymi -metoda dendrochronologiczna

Pnie drzew porastających osuwiska są często pochylone lub wygięte (Ryc. 1. A-B, Braam 1978; Wistuba, Malik 2011) na skutek oddziaływania ruchów masowych. Zaburzeniom zewnętrznym odpowiadają zmiany w anatomii drewna: np. dekoncentryczność wzrostu (Butler 1987). Każdy przyrost roczny wykazujący dekoncentryczność, a także towarzyszące mu drewno reakcyjne, dostarcza informacji o stresie środowiskowym wpływającym na wzrost drzewa w odpowiednim roku. Przebieg osuwania w terenach zalesionych jest zapisywany rok po roku, przez cały okres życia drzew. Jest to zaleta metody dendrochronologicznej w porównaniu z innymi sposobami analizy dynamiki osuwisk, co potwierdzają przykłady dotychczasowych zastosowań (Corominas, Moya 2010; Fantucci, Sorriso-Valvo 1999; Krąpiec, Margielewski 2000). Dekoncentryczność wzrostu to tendencja drzewa do wykształcania szerszych przyrostów rocznych po jednej stronie pnia. Występuje gdy intensywność wzrostu w obwodzie pnia jest nierównomierna. Za przyczynę wykształcania dekoncentryczności uznaje się oddziaływanie niewielkiego stresu mechanicznego w pochylonym pniu, gdzie oddziaływanie grawitacji ziemskiej powoduje wzmożony wzrost jego ściskanej, dolnej części u drzew iglastych (np. świerka pospolitego) a rozciąganej, górnej części u drzew liściastych (Schweingruber 2007).

Zastosowanie dekoncentryczności wzrostu drzew do analizy aktywności osuwiskowej i zagrożenia osuwiskowego doczekało się opatentowania i wdrożeń na Uniwersytecie Śląskim. Powstały tam dwa patenty:

[1] Malik I., Wistuba M., 2018. Sposób określania aktywności osuwiskowej gruntów. Patent nr 229425 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej na rzecz Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska

[2] Malik I., Wistuba M., Krąpiec M., 2023. Sposób identyfikacji ryzyka katastrofального osuwania. Patent nr 242514 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej na rzecz Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach i Laboratorium Datowań Bezwzględnych Marek Krąpiec. Zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska

Zastosowanie patentów pozwala na analizę aktywności osuwiskowej z wykorzystaniem dekoncentrycznego wzrostu drzew oraz na identyfikację ryzyka wystąpienia katastrofy osuwiskowej.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Aby przeprowadzić analizę aktywności osuwiska i oszacować zagrożenia wystąpieniem katastrofy należy wykorzystać opracowany na Uniwersytecie Śląskim algorytm. Początkowo należy wybrać do opróbowania minimum 20 drzew na stoku, gdzie chcemy oszacować zagrożenie osuwiskowe. Drzewa powinny być w miarę możliwości zdrowe, ich pnie nie powinny być zranione. Z każdego drzewa powinno się pobierać po dwa wywierty przy pomocy standardowego świdra przyrostowego (średnica 4 mm). Pary wywiertów pobiera się na wysokości pierśnicy, w jednej osi, zgodnej z nachyleniem stoku. Zastosowana procedura poboru prób powinna pozwolić na uzyskanie danych o szerokości przyrostów rocznych po do- i odstokowych stronach pni drzew. Próby należy pobrać możliwie na całej powierzchni osuwiska, ze zróżnicowanych geomorfologicznie lokalizacji.

Po przetransportowaniu prób do laboratorium dokonuje się pomiarów szerokości przyrostów rocznych (najlepiej przy zastosowaniu stacji pomiarowej LinTab z oprogramowaniem TSAPWin Professional 4.65, dokładność 0,01 mm) dla do- i odstokowych stron pni. Dane dla poszczególnych drzew są porównane i przekształcone w indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych i jego zmienność roczną przy użyciu następujących wzorów (Rycina 2):

$$Ex = Ux - Dx;$$

gdy $Ex > 0$: dekoncentryczność dostokowa; $[1] Eix = (Ex / Dx) \times 100\% > 0$; [2a]

gdy $Ex = 0$: brak dekoncentryczności; $Eix = Ex$ [mm] = 0; [2b]

gdy $Ex < 0$: dekoncentryczność odstokowa; $Eix = (Ex / Ux) \times 100\% < 0$; [2c]

$$vEix = Eix - Eix-1; [3]$$

gdzie: U – szerokość przyrostu rocznego po stronie dostokowej pnia [mm];

D – szerokość przyrostu rocznego po odstokowej stronie pnia [mm];

E – dekoncentryczność przyrostu rocznego [mm];

Ei – indeks dekoncentryczności przyrostu rocznego [%];

vEi – zmienność roczna indeksu [%];

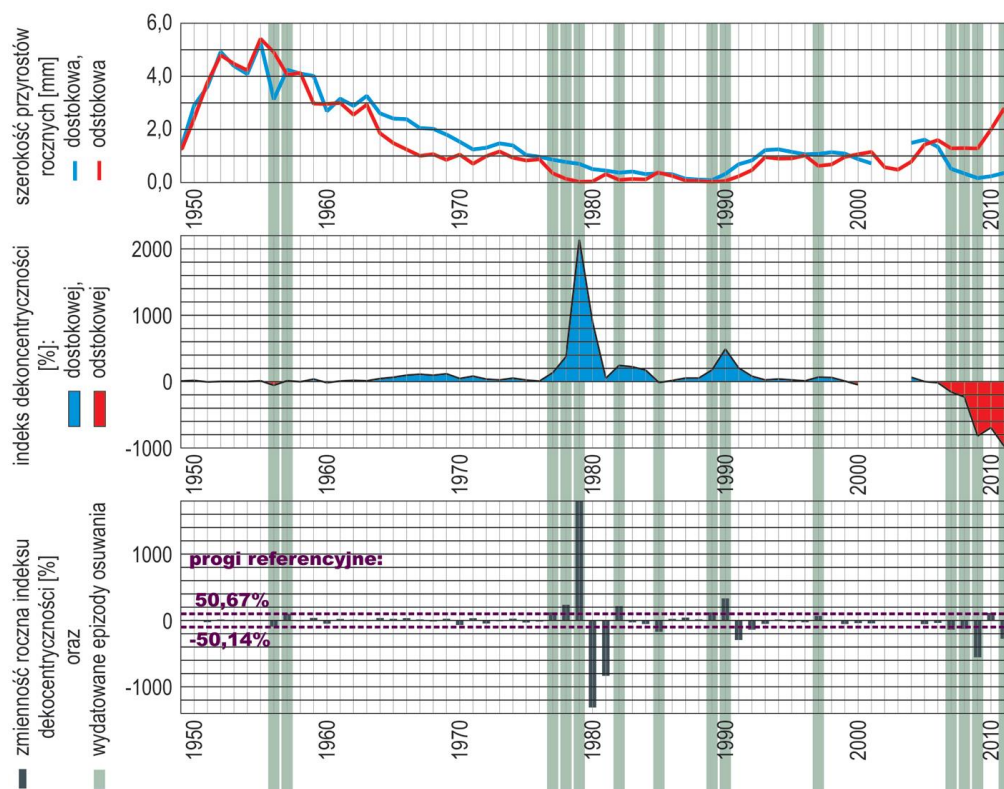
x – rok (przyrost roczny).

Datowanie epizodów osuwania stoku wykonuje się w oparciu o wskaźnik rocznej zmienności indeksu dekoncentryczności oraz wartości progowe zmienności indeksu dekoncentryczności obliczone dla stanowiska referencyjnego. Do tego celu trzeba także opróbować drzewa rosnące na stoku referencyjnym, czyli położonym poza osuwiskiem. Drzewa te powinny rosnąć na podobnej wysokości nad poziomem morza, co drzewa opróbowane na osuwisku, powinny one reprezentować także ten sam gatunek. Drzew referencyjnych powinno być co najmniej 10. Całą procedurę poboru prób i pomiarów przyrostów rocznych oraz kalkulacji indeksu dekoncentryczności stosuje się także dla drzew referencyjnych. Progi referencyjne oblicza się jako sumy średnich arytmetycznych i odchyłeń standardowych dla ogółu wyników z 10 drzew. Mogą one wynosić na przykład -50,14% (dla epizodów odstokowych) i 50,67% (dla epizodów dostokowych). Procedura datowania osuwania w oparciu o wskaźniki dekoncentryczności wzrostu i progi referencyjne szczegółowo

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

została ona omówiona w publikacji: Wistuba, M., Malik, I. 2011. Indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych drzew-narzędzie do identyfikacji współczesnych ruchów osuwiskowych. Po zastosowaniu algorytmu otrzymuje się wykres obrazujący zmiany aktywności osuwiskowej na badanym stoku w kolejnych latach zidentyfikowane metodą dendrochronologiczną (Rycina 2). W następnej kolejności opracowuje się mapy aktywności osuwiskowej i przedstawia się interpolację uzyskanych wyników, czyli mapę zagrożenia osuwiskowego (Rycina 3).

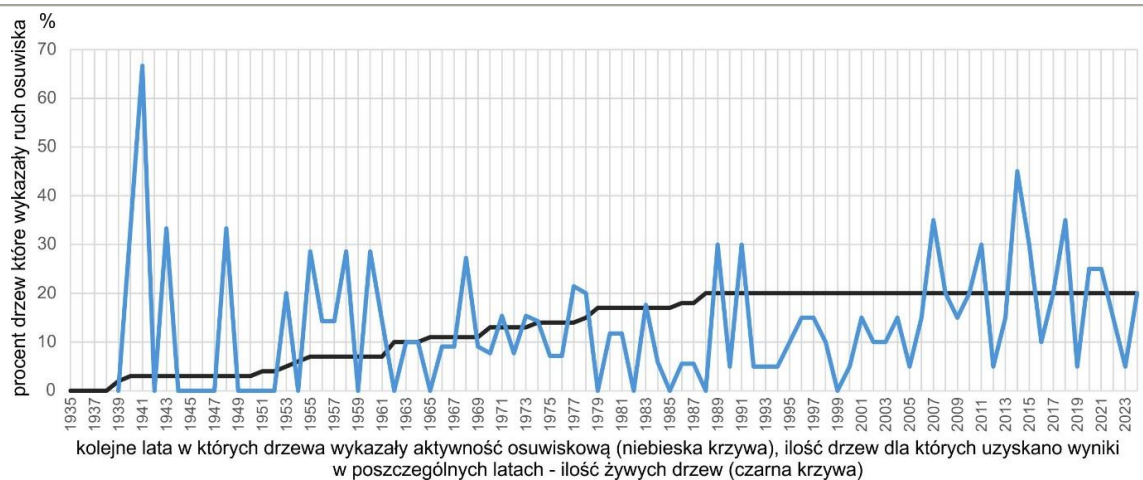


Rycina 1. Przykładowe datowanie osuwania zarejestrowanego w pojedynczym pniu świerka pospolitego: szerokości przyrostów [mm] przekształcone w indeks dekoncentryczności [%], jego zmienność roczną [%] i datowanie wykonane w oparciu o progi referencyjne.

Źródło: Materiały pozyskane od pracowników Uniwersytetu Śląskiego.

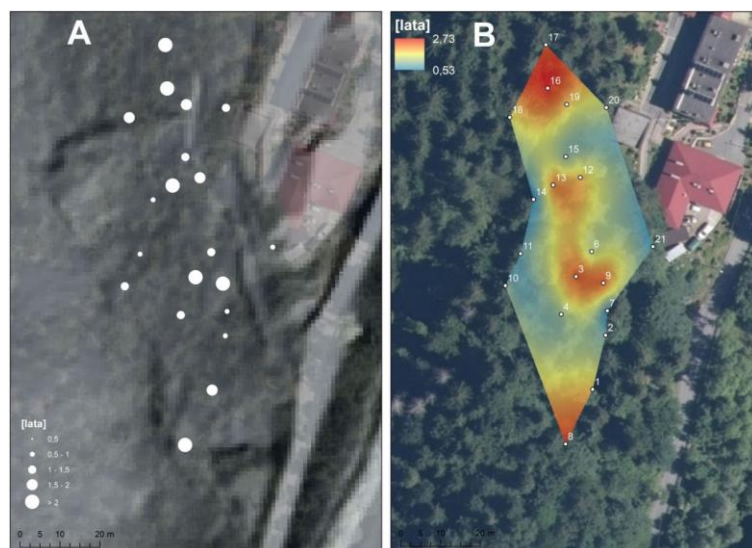
Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 2. Wykres obrazujący zmiany aktywności osuwiskowej na badanym stoku w kolejnych latach zidentyfikowane metodą dendrochronologiczną.

Źródło: Materiały pozyskane od pracowników Uniwersytetu Śląskiego.



Rycina 3. Ilość epizodów osuwiskowych zidentyfikowanych na badanym stoku na 10 lat. (A – ilość epizodów osuwiskowych na 10 lat, B – interpolacja ilości epizodów osuwiskowych zidentyfikowanych na 10 lat.

Źródło: Materiały pozyskane od pracowników Uniwersytetu Śląskiego.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

a) Opis wad i zalet metody dendrochronologicznej

Główną zaletą metody dendrochronologicznej jest, to, że można otrzymać informację o aktywności stoku w oparciu o dane z przerostów rocznych na przestrzeni kilkudziesięciu lub nawet kilkuset lat wstecz. Żadna tradycyjna metoda przeciwdziałania skutkom osuwisk nie zapewnia możliwości wnioskowania o osuwaniu w oparciu o rejestrację danych kilkudziesięcioletnich lub kilkusetletnich. Należy zauważyć, że długie ciągi danych środowiskowych pozwalają na bardziej precyzyjne rekonstrukcje osuwania, a przede wszystkim pozwalają na jego właściwą predykcję. Wszystkie tradycyjne metody przeciwdziałania skutkom osuwisk wykorzystują ciągi danych, które pozyskiwane są dopiero po instalacji sprzętu na obszarze osuwiska. Znacznie spowalnia to proces otrzymania wyników dotyczących aktywności osuwiska, a także czyni go mniej precyzyjnym. Zastosowanie metody dendrochronologicznej jest pod względem długości uzyskanych ciągów danych unikatowe. Dodatkową zaletą metody dendrochronologicznej jest możliwość identyfikacji ryzyka katastrofalnego usuwania. Analizując wzrost drzew przed katastrofą osuwiskową opracowano wzorzec kształtowania przyrostów rocznych przez drzewa przed katastrofą osuwiskową. Gdy w drzewach rosnących na stoku pojawia się podobny wzorzec oznacza to, że stok narażony jest na szybkie usuwanie w przyszłości, co czyni go szczególnie niebezpiecznym dla zlokalizowanej w jego obrębie i poniżej niego infrastruktury. Kolejną zaletą metody dendrochronologicznej jest jej niska cena w porównaniu do metod tradycyjnych. Oznaczenie może być wykonane za kilka tysięcy złotych, podczas gdy zastosowanie na przykład inklinometrów, to koszt rzędu co najmniej kilkudziesięciu tysięcy złotych.

Do wad metody dendrochronologicznej należy jej stosunkowo niska rozdzielczość czasowa. Wyniki o aktywności osuwisk otrzymuje się z roczną rozdzielczością uzyskiwaną wraz z wykształceniem przez drzewo kolejnych przyrostów rocznych. Oczywistą wadą metody jest także brak możliwości jej zastosowania na terenach wylesionych. Metoda ta należy do powierzchniowych metod monitorowania osuwisk, które dostarczają ograniczonych danych w porównaniu do możliwości metod wgłębnych. Ponadto metoda dendrochronologiczna należy do grupy metod pośrednich, opierających się na danych typu *proxy*, a nie bezpośrednich pomiarach samego osuwania.

b) Ocena przydatności zastosowania metody dendrochronologicznej

Metoda dendrochronologiczna może pomóc precyzyjniej oszacować zagrożenie osuwiskowe. Wraz z innymi metodami stosowanymi w ramach SOPO, może dać ona lepsze wyniki dotyczące nie tylko aktywności osuwisk, ale także ryzyka ich uruchomienia. Biorąc pod uwagę, że wiele obszarów Polsce i na Słowacji to obszary zalesione, metoda dendrochronologiczna może być powszechnie używana i zastosowana na terenie polskich i słowackich osuwisk. Szczególne znaczenie ma cena za wykonanie oznaczenia zagrożenia osuwiskowego. W przypadku metody dendrochronologicznej cena za oznaczenie jest szczególnie korzystna i biorąc pod uwagę dużą dokładność metody powinna

Interreg



Współfinansowany przez
UNIE EUROPEJSKĄ

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

ona być stosowana przez samorządy położone w obszarze wsparcia projektu, ale także w innych obszarach zagrożonych osuwaniem.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

2. Interferometria radarowa

a) Opis techniczny metody przeciwdziałania osuwaniu wraz założeniami teoretycznymi – interferometria radarowa

Radarowe obrazy zyskały na znaczeniu w teledetekcji satelitarnej w późnych latach 70. XX wieku, a powiązane z nimi metody są nieustannie rozwijane i doskonalone, również współcześnie. Zdjęcia uzyskiwane za pomocą radaru syntetycznej apertury (SAR - Synthetic Aperture Radar) są doskonałym narzędziem do tworzenia map powierzchni Ziemi oraz dostarczają cennych informacji na temat jej fizycznych właściwości, takich jak topografia czy morfologia, dlatego interferometria radarowa jest także z powodzeniem stosowana do analizy aktywności osuwisk. SAR to system, który wykorzystuje promieniowanie mikrofalowe, a obecnie satelity wyposażone w anteny SAR operują na mikrofalach o różnych długościach, takich jak:

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

Mikrofalowe częstotliwości umożliwiają monitorowanie właściwości powierzchni Ziemi praktycznie w każdych warunkach pogodowych. System SAR jest systemem aktywnym, co daje możliwość wykonywania zdjęć zarówno w dzień, jak i w nocy. Satelitarna interferometria radarowa (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) zyskała popularność w latach 80. XX wieku. Po wystrzeleniu przez Europejską Agencję Kosmiczną satelity ERS-1 w 1991 roku, interferometria radarowa zaczęła dynamicznie rozwijać się dzięki pracy wielu badaczy. InSAR okazał się niezwykle skutecznym narzędziem do kartowania powierzchni Ziemi, lodowców, a nawet struktury topograficznej mórz (Mirek, 2013).

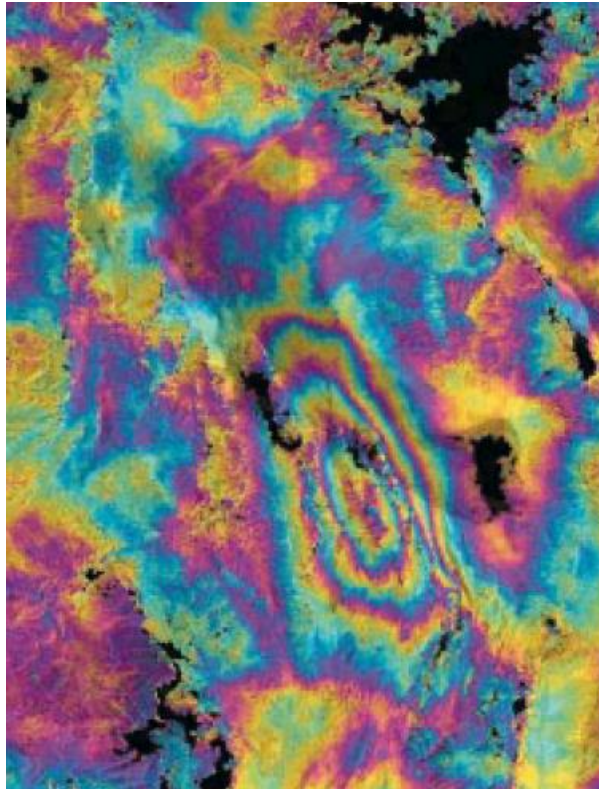
Obraz cyfrowy uzyskany z urządzenia SAR zawiera informacje o amplitudzie i fazie powrotu fali od punktów odbijających, takich jak skały, budynki czy roślinność. Obszary zurbanizowane oraz wyeksponowane skały charakteryzują się wysokimi wartościami amplitudy, natomiast płaskie, gładkie powierzchnie, przykładowo spokojna woda, mają niską amplitudę. Satelitarna interferometria radarowa, znana jako InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry), to technika wykorzystująca różnice w przesunięciu fazy sygnałów radarowych z dwóch obrazów SAR (Perski, 2010). Przetwarzając różnice fazowe między obrazami uzyskanymi w różnym czasie z tej samej satelity, tworzymy jedno interferometryczne odwzorowanie. Podczas rejestracji fal odbitych od powierzchni Ziemi gromadzone są dane dotyczące intensywności odzwierciedlenia fal (czyli

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

stopnia ich pochłaniania przez powierzchnię) oraz fazy sygnałów w chwili dotarcia do odbiornika. Zmiana fazy sygnału na radarogramie o pełny cykl 360° odpowiada połowie długości fali sygnału. Dla satelitów takich jak ERS-1/2 czy ENVISAT, długość fali wykorzystywanej przez urządzenie SAR wynosi 5,6 cm. Analizując dwa radarogramy wykonane w różnych momentach, można określić różnice w fazie poszczególnych sygnałów. Otrzymany obraz interferencyjny z tych dwóch radarogramów ukazuje zmiany wysokości terenu, gdzie zmiana fazy o pełny cykl 360° odpowiada różnicy wysokości wynoszącej 2,8 cm, co odzwierciedla zmiany w terenie zachodzące w czasie pomiędzy rejestracjami.

Satelitarna interferometria radarowa to technologia, która znalazła szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki. Umożliwia ona tworzenie numerycznych modeli terenu (NMT, w języku angielskim: DEM) oraz monitorowanie zjawisk takich jak osuwiska, lodowce, powódzie i osiadanie terenu (Perski, 1999; Popiołek i inni, 2007; Wojciechowski i inni 2008; Graniczny i inni., 2011; Szafarczyk, 2012; Przyłucka, Graniczny, 2015; Hejmanowski i inni 2018). Stosuje się ją także do badań zjawisk przyrodniczych oraz wegetacji roślin (Kampes, 2006); (Rycina 4,5).

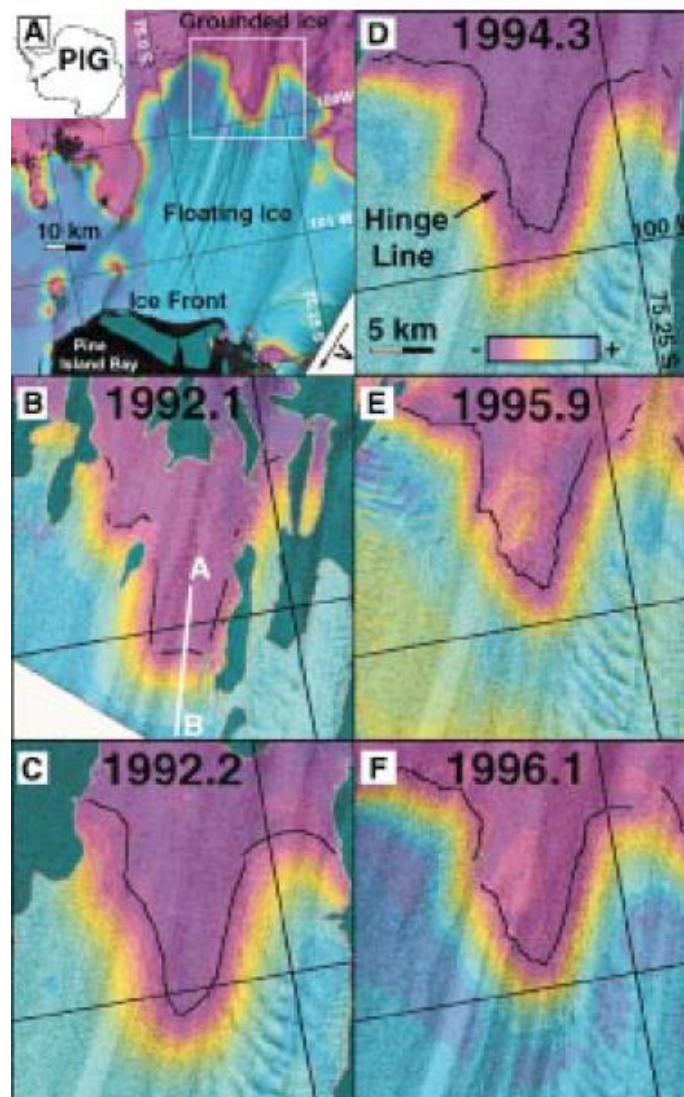


Rycina 4. Osiadanie spowodowane trzęsieniem ziemi o sile $M = 6,3$ wzdłuż uskoku w dolinie Eureka w Kalifornii, obrazowany interferometrycznie przez ERS-1.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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



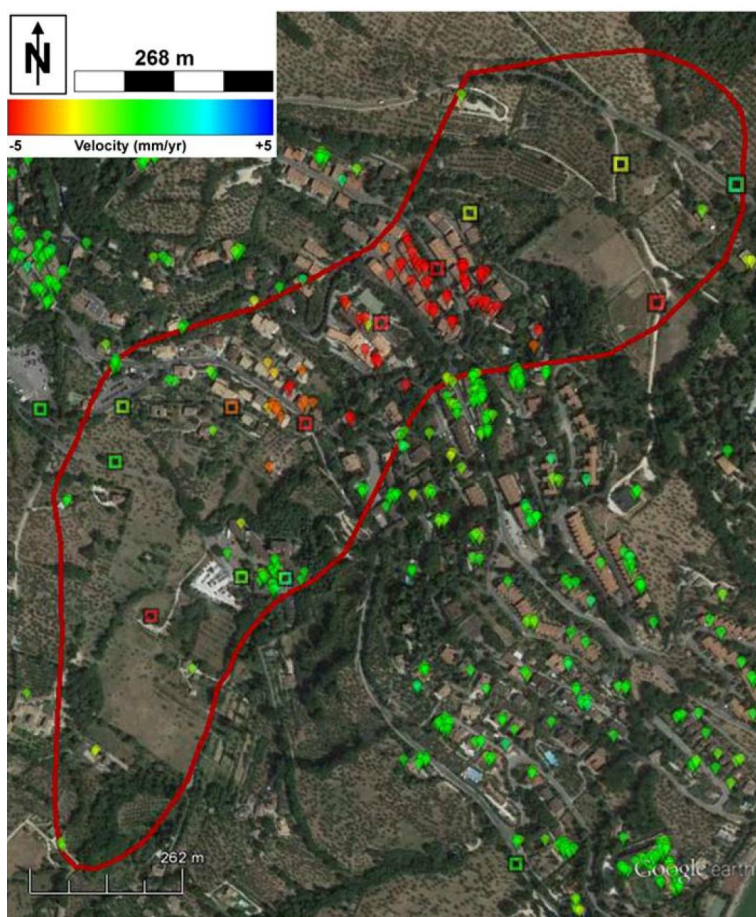
Rycina 5. Seria czasowa ilustrująca cofanie się lodowca Pine Island Glacier widoczna na obrazach radarowych.

Źródło: 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Interferometria radarowa znalazła zastosowanie także w analizie aktywności osuwisk (Rycina 6). Analizując obrazy radarowe wykonane w różnych okresach czasu można porównać skalę oraz kierunki przemieszczeń w obrębie osuwiska. Jednak aby zastosować tę metodę do określenia stopnia aktywności osuwiska i jednocześnie zagrożenia związanego z jego szybkim uaktywnieniem należy skontaktować się ze specjalistami posiadającymi niezbędną wiedzę nie tylko w zakresie interferometrii radarowej, ale także geologii.



Rycina 6. Rozkład średnich prędkości uzyskanych w wyniku przetwarzania danych ENVISAT (kropki) i zapisów GNSS (kwadraty). Kolory symboli są reprezentatywne dla prędkości (u góry rysunku). Granice osuwiska pokazano na czerwono.

Źródło 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Technika satelitarnej interferometrii radarowej nieustannie się rozwija, a szczególną popularnością cieszy się metoda PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometry). Twórcy tej techniki postawili sobie za cel rozwiązanie problemów związanych z geometryczną i czasową dekorelacją, które prowadziły do powstawania odizolowanych obszarów o koherentnej fazie, otoczonych terenami całkowicie pozbawionymi koherencji. PSInSAR korzysta z dużej liczby obrazów, co pozwala na zredukowanie negatywnego wpływu warunków atmosferycznych, na jakość rejestrowanych zdjęć. Jedną z niewątpliwych zalet techniki PSInSAR jest jej zdolność do pomiaru przemieszczeń z dokładnością wynoszącą milimetry. Kluczową rolę w tej metodzie odgrywają koherentne punkty odbijające (Permanent Scatterers, PS), które są widoczne we wszystkich zarejestrowanych zdjęciach. Zwykle odpowiadają one obiektom takimi jak budynki, infrastruktura komunikacyjna, przemysłowa oraz naturalne elementy powierzchni terenu, takie jak wychodnie geologiczne. Wykorzystanie koherentnych punktów odbijających w PSInSAR pozwala na prowadzenie pomiarów w specyficznych lokalizacjach, co różni się od klasycznej interferometrii. Gęstość punktów PS zależy od charakterystyki terenu, na którym prowadzone są badania. Na obszarach o intensywnej urbanizacji gęstość punktów PS może być bardzo wysoka (nawet ponad 100 PS/km²), podczas gdy na terenach rolniczych występuje ich znacznie mniej (Mirek, 2013).

b) Opis wad i zalet interferometrii radarowej

Interferometria radarowa jest nowoczesną metodą analizy zagrożenia osuwiskowego o bardzo dużym potencjale. Pozwala ona na detekcję nawet najmniejszych ruchów osuwiskowych powodujących milimetrowe przesunięcia obiektów. Duża jest też rozdzielczość metody, która jest zależna od częstości zdjęć wykonywanych z satelitów. Przy zastosowaniu interferometrii radarowej można uzyskać stosunkowo długie, nawet ponad dwudziestoletnie ciągi danych. Wyniki uzyskane dla osuwiska pozwalają szacować tempo jego ruchu, to z kolei ma duży potencjał do szacowania ryzyka wystąpienia katastrofy osuwiskowej. Z pewnością do wad metody należą trudności interpretacyjne po uzyskaniu wyników. Jej zastosowanie wymaga specjalistycznej wiedzy, danych i oprogramowania, jednak jej zaletą jest brak konieczności instalacji drogiego sprzętu w terenie. Całość analizy może być wykonana bez konieczności wizyty w terenie, na obszarze osuwiska. Jednak rekomendowane jest zapoznanie się warunkami terenowymi, wtedy interpretacja uzyskanych wyników poprzez zastosowanie interferometrii radarowej jest pełniejsza. Metoda, jako jedna z nielicznych pozwala na uzyskanie danych o aktywności osuwiska w przeszłości, co czyni szacowanie zagrożenia osuwiskowego bardziej dokładnym. Wadą metody, jest to, że jest ona metodą powierzchniową i obrazuje ruch punktów na powierzchni osuwiska, który nie zawsze jest związany z osuwaniem, czasami może być obrazowane na przykład pełzanie gruntu lub osiadanie. Z drugiej strony metoda pozwala na śledzenie ruchów w różnych kierunkach, a także analizę

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

składowej pionowej, co czyni ją przydatną do monitorowania dużych rozległych osuwisk, zwłaszcza rotacyjnych, które przemieszczają się w różnych kierunkach i teren w ich obrębie podnosi się w niektórych miejscach, a w innych obniża. Interferometria radarowa nie wszędzie może być zastosowana, w wąskich dolinach lub też na terenach zalesionych trudno znaleźć miejsca, które mogą być punktami odniesienia przy porównywaniu kolejnych obrazów radarowych.

c) Ocena przydatności zastosowania interferometrii radarowej

Interferometria radarowa może być z powodzeniem stosowana na obszarze gór polskich i słowackich, zresztą coraz częściej spotykamy przykłady takich aplikacji. Jednak dalej jest ona metodą, która jest trudna w interpretacji i stosunkowo mało znana. Należy podejmować próby jej upowszechnienia w ramach działania jednostek odpowiedzialnych za analizę zagrożenia osuwiskowego. Warto zauważyć, że wyniki, które mogą zostać osiągnięte przy zastosowaniu interferometrii są bardzo dokładne, a czas opracowania wyników stosunkowo krótki, co daje możliwość szybkiego reagowania na ewentualne zagrożenie osuwiskowe. Trudno określić cenę opracowania polegającego na zastosowaniu interferometrii radarowej do oceny zagrożenia osuwiskowego. Na rynku ze względu na nowatorski charakter metody, cena nie jest ustabilizowana. Samorządy lokalne chętniej stosują tradycyjne metody techniczne do oceny aktywności, stabilizacji i zabezpieczania osuwisk.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

3. Skaner laserowy

- a) Opis techniczny metody przeciwdziałania osuwaniu wraz założeniami teoretycznymi –skaner laserowy

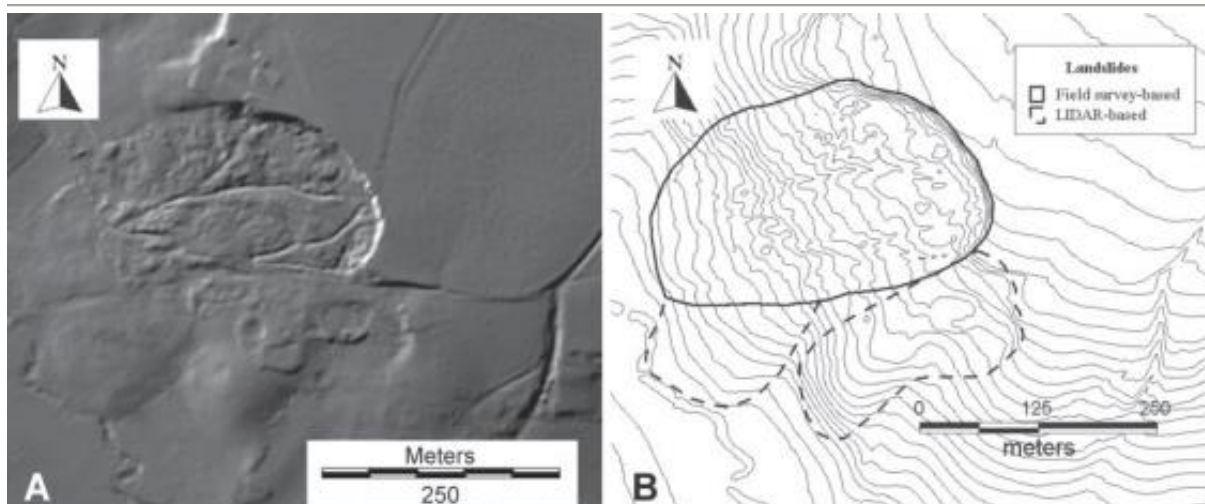
Działanie skanera laserowego, znanego również jako LiDAR (ang. Light Detection And Ranging), opiera się na precyzyjnym pomiarze odległości między urządzeniem a badanym obiektem. Proces ten polega na mierzeniu czasu, jaki upływa od momentu emisji wiązki lasera do jej powrotu do skanera po odbiciu od powierzchni. Dzięki znajomości prędkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych oraz zmierzonemu czasowi, można dokładnie obliczyć odległość obiektu od urządzenia. Skaner rejestruje również kąt, pod jakim wysyłana jest wiązka laserowa. Te uzyskane dane — odległość i kąt odchylenia każdego impulsu — umożliwiają wyznaczenie współrzędnych przestrzennych XYZ punktów, które tworzą tzw. chmurę punktów w układzie lokalnym skanera (Graniczny i inni, 2012; Wojciechowski, i inni 2012; Cebulski, 2015; Przyłucka, Klimkowska, 2016). Przykładowo skaner Riegl VZ 4000, generuje imponujące 220 000 punktów na sekundę. Dzięki połączeniu z GPS RTK Trimble R4, każdy z tych punktów ma przypisane dokładne współrzędne geograficzne. Z uzyskanej chmury punktów generowane są modele terenu przedstawiające z dużą dokładnością modele osuwisk (Rycina 7,8).

Bardzo często stosowanym algorytmem jest metoda analizy par punktów z kolejnych "chmur punktów" w celu obliczenia wektora przemieszczeń wybranych, charakterystycznych elementów, takich jak pień drzewa czy głaz, w obrębie dowolnej części osuwiska. Technika ta jest stosunkowo prosta w użyciu, jednak ma swoje istotne ograniczenia. Obszary pozbawione tzw. „elementów charakterystycznych” nie mogą być monitorowane, a ich nadmiar może prowadzić do trudności w identyfikacji właściwych elementów, które powinny być porównywane. Badania naukowe dotyczące osuwisk, prowadzone przez wiodące ośrodki na całym świecie, koncentrują się na ilościowym, numerycznym przedstawianiu procesów osuwania. Coraz bardziej rezygnuje się z tradycyjnych metod opisowych na rzecz podejścia statystycznego. W tym kontekście przedstawiona metoda doskonale wpisuje się w aktualne trendy (Cebulski, 2015).

Porównanie kolejnych modeli terenu wygenerowanych na podstawie danych LiDAR pozwala na porównanie przemieszczeń w obrębie osuwiska. Uzyskane mapy pozwalają na określenie współczesnej aktywności i zagrożenia związanego z funkcjonowaniem analizowanego osuwiska.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 7. (A) - Fragment mapy uzyskanej za pomocą danych LIDAR, przedstawiający aktywne osuwisko rotacyjne z zakrzywioną skarpą główną (B) - Fragment mapy poziomnicowej uzyskanej za pomocą LIDAR.

Źródło: 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.



Rycina 8. Model terenu osuwiska oparty na danych LIDAR.

Źródło: 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

b) Opis wad i zalet skaningu laserowego

Do najważniejszych zalet skaningu laserowego należy niezwykle wysoka precyzja metody, dokładność rzędu 2 cm, oraz szybkość w zbieraniu ogromnych ilości danych przestrzennych, sięgających nawet kilkuset milionów punktów. Dodatkową zaletą jest duża szybkość uzyskania wyników od momentu przeprowadzenia pomiarów terenowych. Kolejną zaletę stanowi możliwość powtórzeń skanowania w dowolnym momencie, metoda nie jest zależna od źródeł zewnętrznych, jak na przykład interferometria radarowa, która jest stosowana w oparciu o gotowe zdjęcia radarowe. Mimo licznych atutów, metoda ta ma również wady. Największą wadą metody jest konieczność czekania na uzyskanie wyników od pierwszego zastosowania metody. Dopiero kolejne skanowane obrazy powierzchni osuwiska mogą ujawnić przemieszczenia. Oznacza to, że oszacowanie dynamiki osuwiska zachodzi dopiero do stosunkowo długim czasie. Gdy skaningu laserowego zostanie użyty na przykład 4 razy w ciągu roku, wnioskowanie o ruchu osuwiska dotyczy tylko tego roku, podczas gdy użycie interferometrii radarowej lub metody dendochronologicznej pozwala na użycie ciągów danych obejmujących kilkadziesiąt, a nawet kilkaset lat jak w przypadku metody dendochronologicznej. Obraz aktywności osuwiska uzyskany metodą skaningu laserowego dla jednego roku może być nieobiektywny. Może wystąpić rok, w którym osuwisko jest nieaktywne, z powodu np. mniejszych opadów, podczas gdy to samo osuwisko w ciągu dziesięcioleci wykazuje aktywność.

c) Ocena przydatności zastosowania skaningu laserowego

Skaningu laserowego jest metodą przydatną, gdy chcemy otrzymać dokładną mapę rzeźby terenu w obrębie osuwiska. Taki model terenu może być wykorzystywany w różny sposób w późniejszych analizach. Jednak do oceny aktywności osuwania i zagrożenia osuwiskowego, metoda skaningu laserowego nie jest najlepszym rozwiązaniem. Od pierwszego pomiaru trzeba, bowiem odczekać jakiś czas i wykonać pomiar kolejny, aby otrzymać informację dotyczącą zmian w rzeźbie terenu osuwiska, czyli jego aktywności. Takie podejście nie pozwala na szybką ocenę zagrożenia osuwiskowego. Skaningu laserowego spełnił swoją bardzo ważną rolę, gdy mapowano powierzchnię terenu w Polsce i na Słowacji, podczas nalotów skaningowych. Naloty te, pozwoliły na sporządzenie numerycznych modeli terenu o bardzo dużej dokładności. Dzięki nim bezbłędnie można wykreślić granice osuwisk, które występują w Polsce i na Słowacji.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod przeciwdziałania osuwaniu do przez samorządy terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia

Z pewnością nowoczesne metody w zakresie przeciwdziałania skutkom osuwisk nie są tak powszechnie stosowane jak metody tradycyjne. Wśród metod nowoczesnych na uwagę zasługują szczególnie interferometria radarowa i metoda dendrochronologiczna. Zastosowanie tych metod nie tylko pozwala na monitoring osuwisk, ale także powinno pozwolić na identyfikację stref gdzie osuwanie może pojawić się przy intensywnych opadach. Często obszary sąsiadujące z osuwiskami, są narażone na osuwanie, pomimo tego, że nie są objęte osuwaniem. Główną zaletą zarówno interferometrii radarowej jak i metody dendrochronologicznej, jest możliwość wnioskowania o zagrożeniu osuwiskowym na podstawie ciągów danych z przeszłości. W przypadku wszystkich innych metod, na wyniki szacowania zagrożenia osuwiskowego trzeba poczekać, otrzymywane są one dopiero po przeprowadzeniu analizy opartej najczęściej na instalacji sprzętu w terenie. Zaletą metody interferometrycznej jest dodatkowo jej duża rozdzielczość dająca dobrą podstawę do wnioskowania o aktywności osuwiskowej w przyszłości. Z kolei metoda dendrochronologiczna pozwala na opracowanie bardzo długich ciągów danych, sięgających wstecz, jednak o stosunkowo małej rozdzielczości, jest to także metoda stosunkowo tania. Na dzień dzisiejszy wydaje się, że zastosowanie tych dwóch metod: interferometrii radarowej i dendrochronologii daje najlepsze podstawy do szacowania zagrożenia osuwiskowego. Wszystkie pozostałe metody wymagają oczekiwania na wyniki kolejnych pomiarów i wymagają czasochłonnych obserwacji. Nawet po kilkuletnich obserwacjach uzyskane wyniki mogą nie dawać pełnego obrazu o zagrożeniu osuwiskowym.

Literatura

- 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- 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 Łańcicy (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). Osiedzenia 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 skaningu 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

MODERNÉ METÓDY V OBLASTI PREVENČIE NÁSLEDKOV ZOSUVOV

METODIKA SPRACOVANIA

Spracovanie vzniklo na základe materiálov dostupných na Sliezskej univerzite a na Žilinskej univerzite. Boli kontaktovaní pracovníci týchto vedeckých inštitúcií s cieľom získať informácie týkajúce sa využitia moderných riešení pri analýze aktivity zosuvov a pri odhade zosuvného ohrozenia modernými metódami. Využitá bola aj analýza internetových stránok so špecializovanými ponukami a analyzované boli vedecké publikácie, najmä s využitím vedeckej databázy Google Scholar, kde sú dostupné publikácie týkajúce sa analyzovanej problematiky.

Analyzované boli vedecké práce z oblastí, ktoré sú vzhľadom na geologickú stavbu, špecifické typy zrážok a aktívnu seizmicitu najviac ohrozené katastrofickými zosuvmi: Taiwan, Čína, Taliansko, Nový Zéland. Vyhľadávané boli aj konkrétne frázy s cieľom správne filtrovať informácie v databáze Google Scholar: landslide risk method, landslide hazard method, landslide mitigation, landslide activity.

Zámerom tohto spracovania v súlade so zadaním bolo opísať moderné metódy prevencie následkov zosuvov. Počas spracovania bola využitá aj dostupná literatúra, ktorej zoznam je uvedený na konci dokumentu.

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

- a) technický opis metódy prevencie zosuvov spolu s teoretickými predpokladmi,
- b) opis výhod a nevýhod každej metódy,
- c) hodnotenie vhodnosti použitia metódy,
- d) prínosy vyplývajúce z využitia inovatívnych metód prevencie zosuvov miestnymi samosprávami pôsobiacimi v oblasti podpory (prínosy boli opísané spoločne pre všetky moderné metódy).

Vzhľadom na to, že materiály môžu byť využité miestnymi samosprávami, informácie boli podané tak, aby uľahčili pochopenie opisovaných metód potenciálnemu používateľovi. Preto sa podľa možnosti upustilo od technických detailov v prospech praktických vlastností jednotlivých metód.

1. Metóda dendrochronologická

- a) Technický opis metódy prevencie zosuvov spolu s teoretickými predpokladmi – dendrochronologická metóda

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Kmene stromov rastúcich na zosuvoch sú často naklonené alebo zakrivené (Obr. 1. A–B, Braam 1978; Wistuba, Malik 2011) v dôsledku pôsobenia svahových pohybov. Vonkajším narušeniam zodpovedajú zmeny v anatómii dreva, napr. excentricita rastu (Butler 1987). Každý ročný prírastok vykazujúci excentricitu, ako aj sprievodné reakčné drevo, poskytuje informácie o environmentálnom strese ovplyvňujúcom rast stromu v danom roku.

Priebeh zosuvu v zalesnených oblastiach je zaznamenávaný rok po roku počas celého života stromov. To predstavuje výhodu dendrochronologickej metódy v porovnaní s inými spôsobmi analýzy dynamiky zosuvov, čo potvrdzujú aj príklady jej doterajšieho využitia (Corominas, Moya 2010; Fantucci, Sorriso-Valvo 1999; Krąpiec, Margielewski 2000).

Excentricita rastu je tendencia stromu vytvárať širšie ročné prírastky na jednej strane kmeňa. Vyskytuje sa vtedy, keď je intenzita rastu po obvode kmeňa nerovnomerná. Za príčinu vzniku excentricity sa považuje pôsobenie malého mechanického stresu v naklonenom kmeni, kde gravitačné pôsobenie spôsobuje zvýšený rast jeho stlačenej dolnej časti u ihličnatých stromov (napr. smrek obyčajný) a ťahanej hornej časti u listnatých stromov (Schweingruber 2007).

Využitie excentricity rastu stromov na analýzu aktivity zosuvov a zosuvného ohrozenia bolo patentované a implementované na Sliezskej univerzite. Vznikli tam dva patenty:

[1] Malik I., Wistuba M., 2018. Spôsob určovania aktivity zosuvov pôd. Patent č. 229425 udelený Patentovým úradom Poľskej republiky pre Sliezske univerzitu v Katoviciach. Územný rozsah ochrany: Poľsko

[2] Malik I., Wistuba M., Krąpiec M., 2023. Spôsob identifikácie rizika katastrofického zosuvu. Patent č. 242514 udelený Patentovým úradom Poľskej republiky pre Sliezske univerzitu v Katoviciach a Laboratórium absolútneho datovania Marek Krąpiec. Územný rozsah ochrany: Poľsko

Využitie patentov umožňuje analyzovať aktivitu zosuvov pomocou excentrického rastu stromov a identifikovať riziko vzniku katastrofického zosuvu.

Na vykonanie analýzy je potrebné použiť algoritmus vyvinutý na Sliezskej univerzite. Najskôr je potrebné vybrať minimálne 20 stromov na svahu, kde chceme odhadnúť zosuvné riziko. Stromy by mali byť čo najviac zdravé a ich kmene by nemali byť poškodené. Z každého stromu sa odoberajú dva vývrty pomocou štandardného prírastkového vrtáka (priemer 4 mm).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Páry vývrtov sa odoberajú vo výške prsnej výšky v jednej osi zodpovedajúcej sklonu svahu. Postup odberu vzoriek by mal umožniť získanie údajov o šírke ročných prírastkov na svahovej a proti svahovej strane kmeňov. Vzorky je potrebné odobrať čo najviac po celej ploche zosuvu z geomorfologicky rôznych lokalít.

Po transporte do laboratória sa vykonáva meranie šírky ročných prírastkov (najlepšie pomocou meracej stanice LinTab s programom TSAPWin Professional 4.65, presnosť 0,01 mm) pre obe strany kmeňa.

Údaje sa transformujú na index excentricity podľa vzorcov (Obr. 2):

$$E_x = U_x - D_x;$$

ak $E_x > 0$: svahová excentricita;

$$E_{ix} = (E_x / D_x) \times 100\% > 0;$$

ak $E_x = 0$: bez excentricity;

$$E_{ix} = E_x [\text{mm}] = 0;$$

ak $E_x < 0$: protisvahová excentricita;

$$E_{ix} = (E_x / U_x) \times 100\% < 0;$$

$$vE_{ix} = E_{ix} - E_{ix-1};$$

kde:

U – šírka ročného prírastku na svahovej strane [mm];

D – šírka ročného prírastku na protisvahovej strane [mm];

E – excentricita prírastku [mm];

E_i – index excentricity [%];

vE_i – ročná variabilita indexu [%];

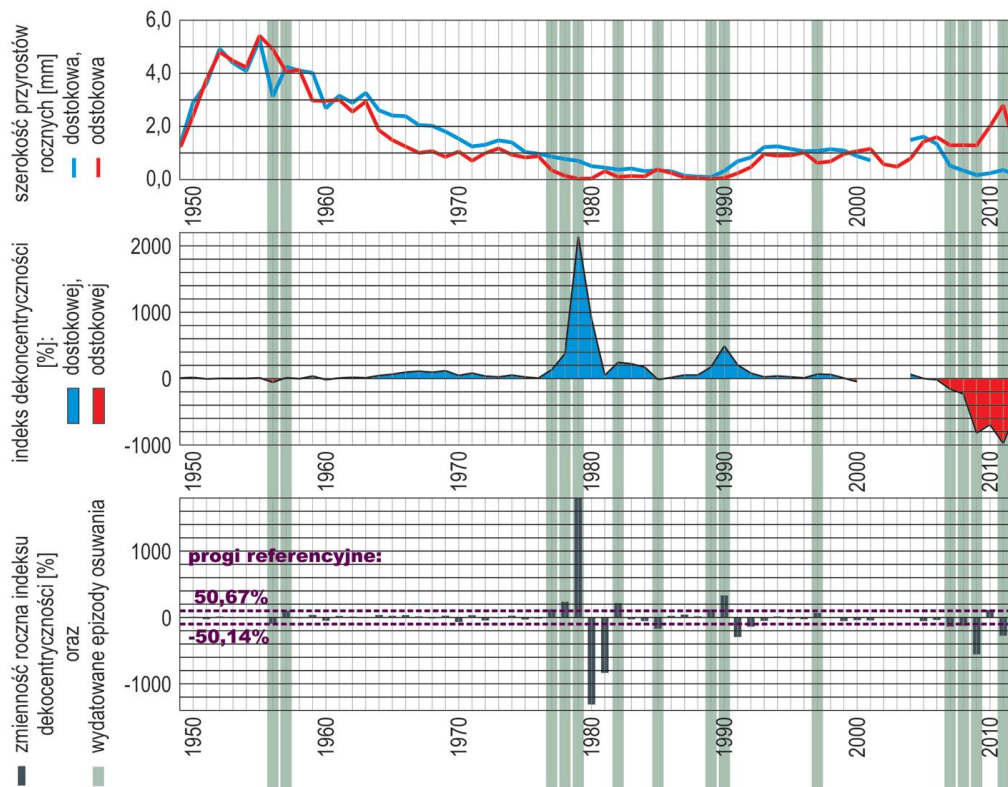
x – rok.

Datovanie epizód zosuvov sa vykonáva na základe ročnej variability indexu excentricity a referenčných prahových hodnôt. Na tento účel sa analyzujú aj referenčné stromy rastúce mimo zosuvu, ale v podobných podmienkach.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Po aplikácii algoritmu sa získa graf zobrazujúci zmeny aktivity zosuvov v jednotlivých rokoch (Obr. 2). Následne sa vytvárajú mapy aktivity a interpolácia výsledkov, teda mapa zosuvného ohrozenia (Obr. 3).

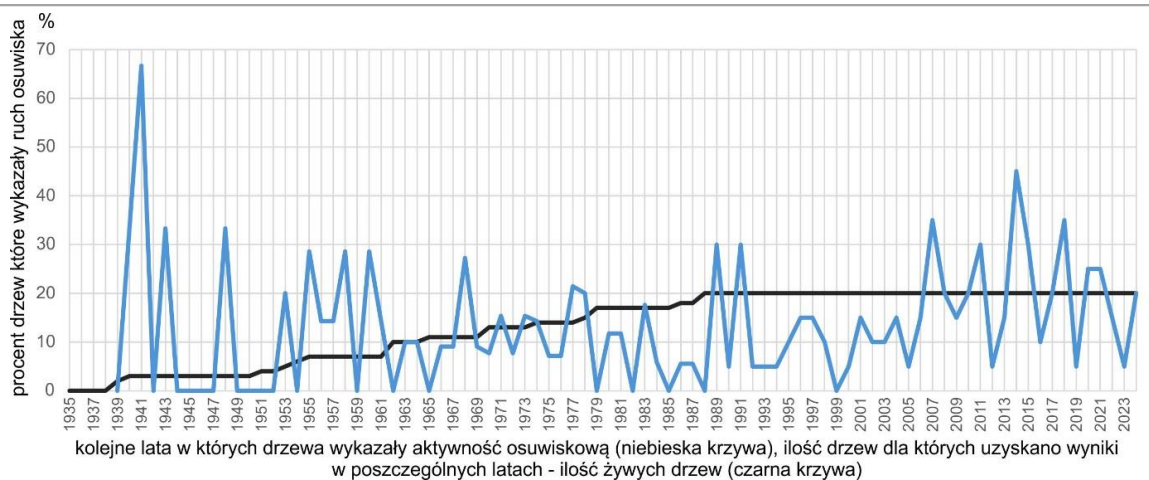


Obr. 1. Príklad datovania zosuvu zaznamenaného v jednotlivom kmene smreka obyčajného: šírky prírastkov [mm] transformované na index excentricity [%], jeho ročná variabilita [%] a datovanie vykonané na základe referenčných prahov.

Zdroj: Materiály získané od pracovníkov Slezskej univerzity.

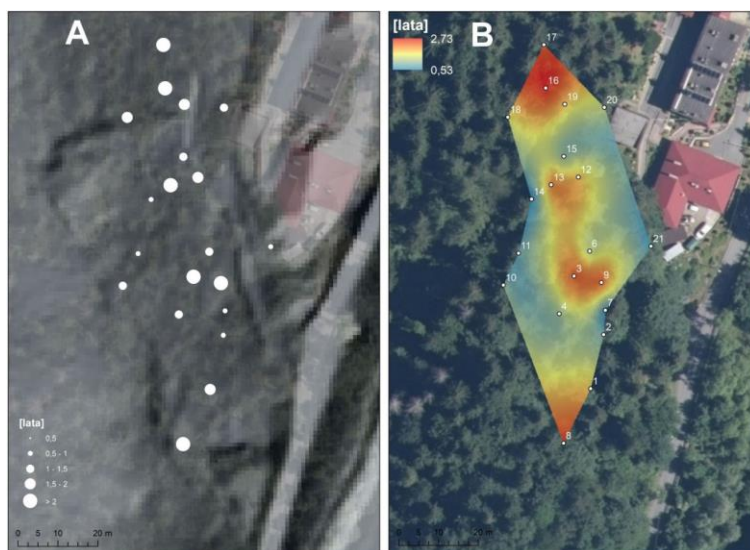
Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Obr. 2. Graf zobrazujący zmiany aktywności zosuvov na skúmanom svahu v jednotlivých rokoch, identifikované dendrochronologickou metódou.

Zdroj: Materiály získané od pracovníkov Sliezskej univerzity.



Obr. 3. Mapa ohrozenia zosuvmi vypracovaná na základe interpolácie výsledkov z máp aktivity zosuvov.

Zdroj: Materiály získané od pracovníkov Sliezskej univerzity.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

c) Popis výhod a nevýhod dendrochronologickej metódy

Hlavnou výhodou dendrochronologickej metódy je, že je možné získať informácie o aktivite svahu na základe údajov z ročných prírastkov stromov počas niekoľkých desiatok až stoviek rokov dozadu. Žiadna tradičná metóda prevencie účinkov zosuvov neposkytuje možnosť vyvodit' závery o zosuvoch na základe údajov zozbieraných počas niekoľkých desaťročí alebo storočí. Je potrebné poznamenať, že dlhé časové rady environmentálnych údajov umožňujú presnejšie rekonštrukcie zosuvov a predovšetkým umožňujú ich adekvátnu predikciu. Všetky tradičné metódy prevencie účinkov zosuvov využívajú údaje, ktoré sa získavajú až po inštalácii prístrojov na území zosuvu. Tento postup značne spomaľuje proces získania výsledkov o aktivite zosuvu a zároveň znižuje presnosť. Použitie dendrochronologickej metódy je z hľadiska dĺžky získaných dát unikátne.

Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je možnosť identifikácie rizika katastrofálneho zosuvu. Analýzou rastu stromov pred zosuvom bol vypracovaný model formovania ročných prírastkov stromov pred katastrofou. Ak sa u stromov rastúcich na svahu objaví podobný model, znamená to, že svah je ohrozený rýchlym zosuvom v budúcnosti, čo ho robí obzvlášť nebezpečným pre infraštruktúru situovanú na svahu alebo pod ním.

Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je jej nízka cena v porovnaní s tradičnými metódami. Oznamenie môže byť vykonané za niekoľko tisíc zlotých, zatiaľ čo použitie napríklad inklinometrov predstavuje náklady minimálne niekoľkých desiatok tisíc zlotých.

Medzi nevýhody dendrochronologickej metódy patrí jej relatívne nízke časové rozlíšenie. Výsledky o aktivite zosuvov sa získavajú s ročným rozlíšením, ktoré zodpovedá vytváraniu jednotlivých ročných prírastkov stromu. Zrejmom nevýhodou metódy je aj nemožnosť jej použitia v odlesnených oblastiach. Metóda patrí k povrchovým monitorovacím metódam zosuvov, ktoré poskytujú obmedzené údaje v porovnaní s hlbinnými metódami. Okrem toho dendrochronologická metóda patrí medzi nepriame metódy, založené na proxy údajoch, nie na priamych meraniach samotného zosuvu.

d) Hodnotenie vhodnosti použitia dendrochronologickej metódy

Dendrochronologická metóda môže pomôcť presnejšie odhadnúť riziko zosuvov. Spolu s inými metódami používanými v rámci SOPO môže poskytnúť lepšie výsledky nielen o aktivite zosuvov, ale aj o riziku ich spustenia. Vzhľadom na to, že mnohé oblasti v Poľsku a na Slovensku sú zalesnené, dendrochronologická metóda môže byť široko používaná a bola aplikovaná na území poľských aj slovenských zosuvov.



Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Obzvláštny význam má cena vykonania stanovenia rizika zosuvu. V prípade dendrochronologickej metódy je cena stanovenia obzvlášť výhodná a vzhľadom na vysokú presnosť metódy by mala byť používaná obcami v území podporovanom projektom, ale aj v iných oblastiach ohrozených zosuvmi.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

2. Radarová interferometria

a) Technický popis metódy prevencie zosuvov so súvisiacimi teoretickými predpokladmi – radarová interferometria

Radarové snímky získali význam v satelitnom diaľkovom prieskume koncom 70. rokov 20. storočia a s nimi súvisiace metódy sa neustále vyvíjajú a zdokonaľujú aj v súčasnosti. Snímky získané pomocou radaru syntetickej apertúry (SAR – Synthetic Aperture Radar) predstavujú vynikajúci nástroj na tvorbu máp povrchu Zeme a poskytujú cenné informácie o jej fyzikálnych vlastnostiach, ako sú topografia alebo morfológia, preto sa radarová interferometria úspešne využíva aj na analýzu aktivity zosuvov.

SAR je systém využívajúci mikrovlnné žiarenie a súčasné satelity vybavené SAR anténami pracujú na rôznych vlnových dĺžkach, napríklad:

- 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 monitorovanie vlastností povrchu Zeme prakticky za akýchkoľvek poveternostných podmienok. Systém SAR je aktívny, čo umožňuje vykonávať snímky počas dňa aj noci.

Satelitná radarová interferometria (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar) získala popularitu v 80. rokoch 20. storočia. Po vypustení satelitu ERS-1 Európskou vesmírnou agentúrou v roku 1991 sa radarová interferometria začala dynamicky rozvíjať vďaka práci mnohých výskumníkov. InSAR sa ukázal ako mimoriadne účinný nástroj na mapovanie povrchu Zeme, ľadovcov a dokonca aj topografickej štruktúry morí (Mirek, 2013).

Digitálny obraz získaný zo zariadenia SAR obsahuje informácie o amplitúde a fáze odrazenej vlny od reflektujúcich bodov, ako sú skaly, budovy alebo vegetácia. Urbanizované oblasti a exponované skalné masívy sa vyznačujú vysokými hodnotami amplitúdy, zatiaľ čo ploché a hladké povrchy, napríklad stojatá voda, majú nízku amplitúdu.

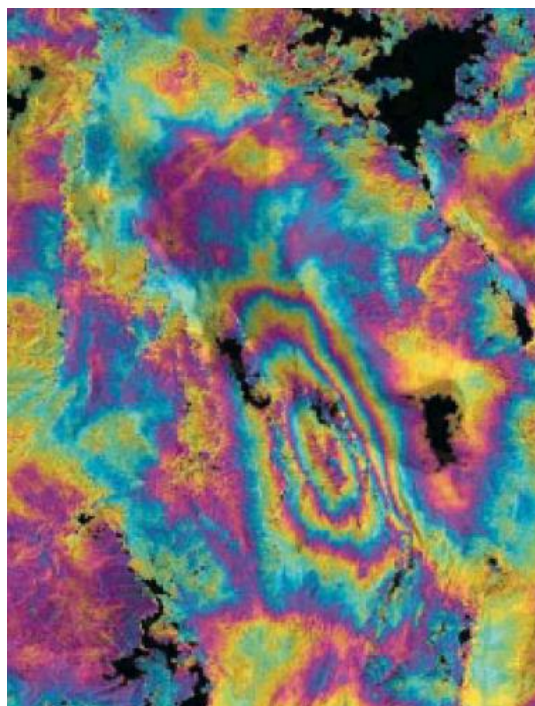
Satelitná radarová interferometria, známa ako InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry), je technika využívajúca rozdiely vo fáze radarových signálov z dvoch SAR snímok (Perski, 2010). Spracovaním fázových rozdielov medzi snímkami získanými v rôznom čase z toho istého satelitu sa vytvára jedno interferometrické zobrazenie.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Pri zaznamenávaní odrazených vln od povrchu Zeme sa zhromažďujú údaje o intenzite odrazu vln (teda o miere ich pohltienia povrchom) a fáze signálov v okamihu doručenia do prijímača. Zmena fázy signálu na radarograme o celý cyklus 360° zodpovedá polovici vlnovej dĺžky signálu. Pre satelity ako ERS-1/2 alebo ENVISAT je vlnová dĺžka využívaná SAR zariadením 5,6 cm. Analýzou dvoch radarogramov získaných v rôznych časoch je možné určiť rozdiely vo fáze jednotlivých signálov. Výsledný interferenčný obraz z týchto dvoch radarogramov zobrazuje zmeny nadmorskej výšky terénu, kde zmena fázy o celý cyklus 360° zodpovedá rozdielu výšky 2,8 cm, čo odráža terénne zmeny v čase medzi snímkami.

Satelitná radarová interferometria je technológia, ktorá našla široké uplatnenie v rôznych oblastiach vedy. Umožňuje tvorbu numerických modelov terénu (NMT, v angličtine DEM) a monitorovanie javov, ako sú zosuvy, ľadovce, povodne a zosúvanie pôdy (Perski, 1999; Popiołek a kol., 2007; Wojciechowski a kol., 2008; Graniczny a kol., 2011; Szafarczyk, 2012; Przyłucka, Graniczny, 2015; Hejmanowski a kol., 2018). Používa sa aj na štúdium prírodných javov a vegetácie rastlín (Kampes, 2006) (Obr. 4,5).

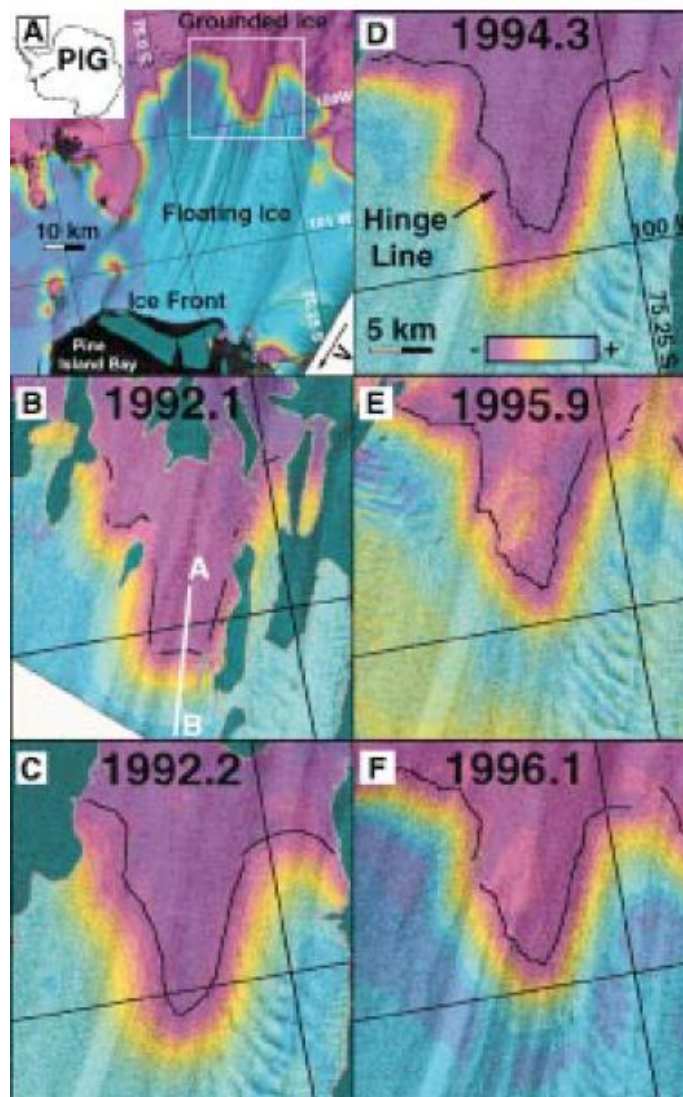


Obrázok 4. Zosuv spôsobený zemetrasením s magnitúdou $M = 6,3$ pozdĺž zlomu v údolí Eureka v Kalifornii, zobrazený interferometricky satelitom ERS-1.

Zdroj: Kampes, B. M. (2006). Radar interferometry (Vol. 12). Dordrecht, Holandsko: Springer.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



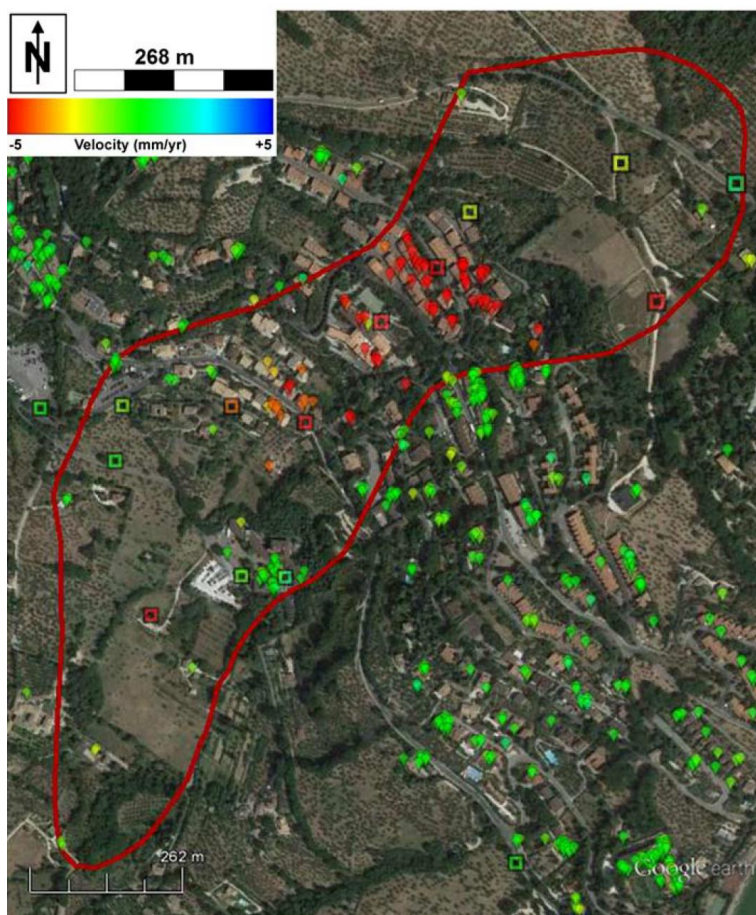
Obrázok 5. Časová séria ilustrujúca spätný pohyb ľadovca Pine Island Glacier, viditeľná na radarových snímkach.

Zdroj: 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.

Radarová interferometria našla uplatnenie aj pri analýze aktivity zosuvov (Obrázok 6). Analýzou radarových snímkov zhotovených v rôznych časových obdobiach je možné porovnať rozsah a smery pohybov v rámci zosuvu. Avšak na použitie tejto metódy na určenie stupňa aktivity zosuvu a zároveň rizika jeho rýchlej aktivácie je potrebné kontaktovať odborníkov, ktorí majú nevyhnutné znalosti nielen v oblasti radarovej interferometrie, ale aj geológie.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Obrázok 6. Rozloženie priemerných rýchlostí získaných spracovaním údajov z ENVISAT (bodky) a záznamov GNSS (štvrce). Farby symbolov sú reprezentatívne pre rýchlosť (v hornej časti obrázka). Hranice zosuvu sú znázornené červenou farbou.

Zdroj: 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.

Technika satelitnej radarovej interferometrie sa neustále vyvíja, a osobitnou popularitou sa teší metóda PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometry). Tvorcovia tejto techniky si stanovili cieľ riešiť problémy spojené s geometrickou a časovou dekoherenciou, ktoré viedli k vzniku izolovaných oblastí s koherentnou fázou, obklopených terénom úplne bez koherencie. PSInSAR využíva veľký počet snímok, čo umožňuje znížiť negatívny vplyv atmosférických podmienok na kvalitu zaznamenaných snímok. Jednou z nezanedbateľných výhod techniky PSInSAR je jej schopnosť merať pohyby s presnosťou na milimetre. Kľúčovú úlohu v tejto metóde zohrávajú koherentné odrazacie body (Permanent Scatterers, PS), ktoré sú viditeľné vo všetkých zaznamenaných snímkach. Zvyčajne zodpovedajú objektom ako budovy, dopravná infraštruktúra, priemyselné

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

objekty alebo prírodné prvky povrchu, ako sú geologické výchozy. Využitie koherentných odrážacích bodov v PSInSAR umožňuje vykonávať merania na špecifických lokalitách, čo sa líši od klasickej interferometrie. Hustota PS bodov závisí od charakteru terénu, na ktorom sa skúmanie vykonáva. V oblastiach s intenzívnou urbanizáciou môže byť hustota PS bodov veľmi vysoká (až viac ako 100 PS/km²), zatiaľ čo na poľnohospodárskych plochách je ich výrazne menej (Mirek, 2013).

d) Popis výhod a nevýhod radarovej interferometrie

Radarová interferometria je moderná metóda analýzy rizika zosuvov s veľmi veľkým potenciálom. Umožňuje detekciu aj tých najmenších pohybov zosuvov spôsobujúcich milimetrové posuny objektov. Metóda má vysoké rozlíšenie, ktoré závisí od frekvencie snímok zhotovovaných zo satelitov. Použitím radarovej interferometrie je možné získať relatívne dlhé, dokonca viac ako dvadsaťročné dátové série. Výsledky získané pre zosuv umožňujú odhadnúť rýchlosť jeho pohybu, čo má veľký potenciál pri hodnotení rizika vzniku zosuvnej katastrofy. Nevýhodou metódy sú interpretácie získaných výsledkov – jej použitie vyžaduje odborné znalosti, údaje a softvér, avšak výhodou je, že nie je potrebná inštalácia drahého zariadenia v teréne. Celá analýza môže byť vykonaná bez návštevy terénu na území zosuvu. Odporúča sa však oboznámiť sa s terénnymi podmienkami, čím je interpretácia výsledkov interferometrie úplnejšia. Metóda ako jedna z mála umožňuje získať údaje o aktivite zosuvu v minulosti, čo robí odhad rizika presnejším. Nevýhodou metódy je, že ide o povrchovú metódu a zobrazuje pohyb bodov na povrchu zosuvu, ktorý nie je vždy spojený so samotným zosuvom – niekedy môže zobrazovať napríklad plazenie pôdy alebo usadzovanie. Na druhej strane umožňuje sledovanie pohybov v rôznych smeroch a analýzu vertikálnej zložky, čo ju robí vhodnou na monitorovanie veľkých rozľahlých zosuvov, najmä rotačných, ktoré sa pohybujú v rôznych smeroch a terén sa v ich rámci na niektorých miestach zdvíha a inde klesá. Radarová interferometria však nie je všade aplikovateľná; v úzkych dolinách alebo na zalesnených územiach je ťažké nájsť referenčné body na porovnanie po sebe idúcich radarových snímok.

e) Hodnotenie využiteľnosti radarovej interferometrie

Radarová interferometria môže byť úspešne používaná v poľských a slovenských horských oblastiach, pričom príklady takýchto aplikácií sa stále častejšie objavujú. Napriek tomu je to metóda, ktorá je náročná na interpretáciu a relatívne málo známa. Je potrebné snažiť sa o jej rozšírenie v rámci činností jednotiek zodpovedných za analýzu rizika zosuvov. Treba zdôrazniť, že výsledky, ktoré je možné dosiahnuť použitím interferometrie, sú veľmi presné a čas spracovania výsledkov relatívne krátky, čo umožňuje rýchlu reakciu na prípadné riziko zosuvu. Určiť cenu spracovania pomocou radarovej interferometrie na hodnotenie rizika zosuvov je ťažké. Na trhu, vzhľadom na inovatívny charakter metódy, cena nie je stabilizovaná. Miestne samosprávy uprednostňujú tradičné technické metódy na hodnotenie aktivity, stabilizácie a zabezpečenia zosuvov.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

4. Laserový skener

b) Technický popis metódy prevencie zosuvov s teoretickými predpokladmi – laserový skener. Fungovanie laserového skenera, známeho aj ako LiDAR (ang. Light Detection And Ranging), je založené na presnom meraní vzdialenosti medzi zariadením a skúmaným objektom. Proces spočíva v meraní času, ktorý uplynie od okamihu vyslania laserového lúča až po jeho návrat do skenera po odraze od povrchu. Vďaka znalosti rýchlosti šírenia elektromagnetických vln a zmeranému času je možné presne vypočítať vzdialenosť objektu od zariadenia. Skener tiež zaznamenáva uhol, pod ktorým je laserový lúč vysielaný. Tieto získané údaje – vzdialenosť a uhol odchýlenia každého impulzu – umožňujú určiť priestorové súradnice XYZ bodov, ktoré tvoria tzv. „cloud“ bodov v lokálnom systéme skenera (Graniczny a kol., 2012; Wojciechowski a kol., 2012; Cebulski, 2015; Przyłucka, Klimkowska, 2016).

Napríklad skener Riegl VZ 4000 generuje pôsobivých 220 000 bodov za sekundu. Vďaka spojeniu s GPS RTK Trimble R4 má každý z týchto bodov presne určené geografické súradnice. Z získaného „cloudu“ bodov sa generujú modely terénu, ktoré s vysokou presnosťou zobrazujú modely zosuvov (Obrázok 7,8).

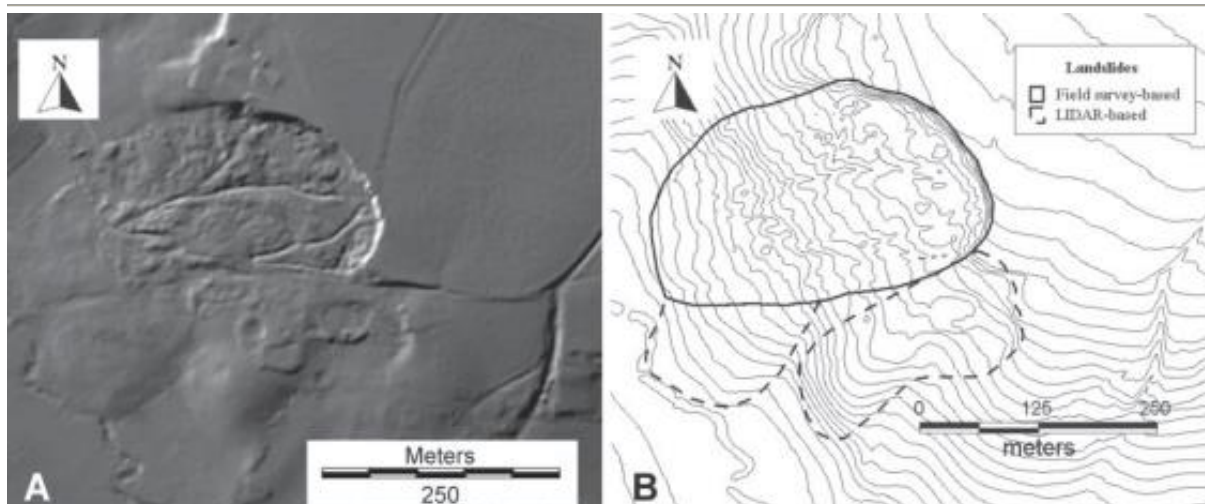
Veľmi často používaným algoritmom je metóda analýzy párov bodov z po sebe nasledujúcich „cloudov bodov“ na výpočet vektora posunu vybraných charakteristických prvkov, ako sú stromový kmeň alebo balvan, v rámci ľubovoľnej časti zosuvu. Táto technika je relatívne jednoduchá na použitie, avšak má svoje podstatné obmedzenia. Oblasti bez tzv. „charakteristických prvkov“ nemôžu byť monitorované, a ich nadbytok môže spôsobiť problémy pri identifikácii správnych prvkov, ktoré by mali byť porovnávané.

Vedecké štúdie týkajúce sa zosuvov, vedené poprednými pracoviskami na celom svete, sa sústreďujú na kvantitatívne, numerické zobrazenie procesov zosuvu. Tradičné opisné metódy sú čoraz viac nahrádzané štatistickým prístupom. V tomto kontexte prezentovaná metóda dobre zapadá do súčasných trendov (Cebulski, 2015).

Porovnaním po sebe nasledujúcich modelov terénu generovaných na základe údajov LiDAR je možné analyzovať posuny v rámci zosuvu. Získané mapy umožňujú určiť súčasnú aktivitu a riziko spojené s fungovaním skúmaného zosuvu.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Obrázok 7. (A) – Úsek mapy získanej z údajov LIDAR, zobrazujúci aktívny rotačný zosuv s zakriveným hlavným svahom (B) – Úsek vrstevnicovej mapy získanej 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 8. Model terénu zosuvu založený na údajoch LIDAR.

Zdroj: 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

c) Popis výhod a nevýhod laserového skenovania

Medzi najdôležitejšie výhody laserového skenovania patrí mimoriadne vysoká presnosť metódy, s presnosťou okolo 2 cm, a rýchlosť zberu obrovského množstva priestorových údajov, ktoré môžu dosiahnuť až stovky miliónov bodov. Ďalšou výhodou je rýchlosť získania výsledkov od momentu vykonania terénneho merania. Výhodou je aj možnosť opakovaného skenovania kedykoľvek, pričom metóda nie je závislá od externých zdrojov, ako napríklad radarová interferometria, ktorá sa využíva na základe hotových radarových snímok.

Napriek mnohým prednostiam má táto metóda aj nevýhody. Najväčšou nevýhodou je potreba čakať na získanie výsledkov od prvého použitia metódy. Až ďalšie snímané obrazy povrchu zosuvu môžu odhaliť presuny. To znamená, že odhad dynamiky zosuvu nastáva až po relatívne dlhom čase. Ak je laserové skenovanie vykonané napríklad štyrikrát do roka, vyvodenie záverov o pohybe zosuvu sa týka len daného roka, zatiaľ čo použitie radarovej interferometrie alebo dendrochronologickej metódy umožňuje využiť údaje zahrňajúce desiatky alebo stovky rokov, ako je to pri dendrochronologickej metóde. Obraz aktivity zosuvu získaný laserovým skenovaním pre jeden rok môže byť neobjektívny. Môže nastať rok, keď je zosuv neaktívny, napríklad kvôli menším zrážkam, zatiaľ čo ten istý zosuv vykazuje aktivitu počas desaťročí.

d) Hodnotenie použiteľnosti laserového skenovania

Laserové skenovanie je metóda vhodná, keď chceme získať presnú mapu reliéfu terénu v rámci zosuvu. Takýto model terénu môže byť neskôr využitý rôznymi spôsobmi v ďalších analýzach. Na hodnotenie aktivity zosuvu a nebezpečenstva zosuvov však nie je laserové skenovanie najlepším riešením. Od prvého merania je totiž potrebné počkať určitý čas a vykonať ďalšie meranie, aby sa získala informácia o zmenách reliéfu terénu zosuvu, teda o jeho aktivite. Takýto prístup neumožňuje rýchle posúdenie rizika zosuvu. Laserové skenovanie zohralo veľmi dôležitú úlohu pri mapovaní povrchu terénu v Poľsku a na Slovensku počas leteckých skenovacích prieskumov. Tieto prelety umožnili vytvoriť numerické modely terénu s veľmi vysokou presnosťou, vďaka čomu je možné presne vyznačiť hranice zosuvov, ktoré sa vyskytujú v Poľsku a na Slovensku.

Výhody použitia moderných metód na prevenciu zosuvov pre samosprávy pôsobiace na území projektu

Moderné metódy prevencie následkov zosuvov nie sú určite tak rozšírené ako tradičné metódy. Medzi modernými metódami si zaslúži pozornosť najmä radarová interferometria a dendrochronologická metóda. Použitie týchto metód nielen umožňuje monitorovanie zosuvov, ale

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

malo by tiež umožniť identifikáciu zón, kde môže zosuv vzniknúť pri intenzívnych zrážkach. Často sú oblasti susediace so zosuvmi ohrozené zosuvom, aj keď nie sú priamo zahrnuté v samotnom zosuve.

Hlavnou výhodou radarovej interferometrie aj dendrochronologickej metódy je možnosť vyvodenia záverov o nebezpečenstve zosuvov na základe historických údajov. Pri všetkých ostatných metódach je potrebné počkať na výsledky hodnotenia nebezpečenstva zosuvov, ktoré sa získavajú až po analýze, často založenej na inštalácii zariadení v teréne. Výhodou interferometrickej metódy je aj jej vysoké rozlíšenie, ktoré poskytuje dobrý základ pre predikciu aktivity zosuvov v budúcnosti. Dendrochronologická metóda umožňuje vypracovať veľmi dlhé časové rady údajov, siaha do minulosti, hoci s relatívne nízkym rozlíšením, a je aj relatívne lacná.

V súčasnosti sa zdá, že kombinácia týchto dvoch metód – radarová interferometria a dendrochronológia – poskytuje najlepší základ pre odhad nebezpečenstva zosuvov. Všetky ostatné metódy vyžadujú čakanie na výsledky ďalších meraní a časovo náročné pozorovania. Aj po niekoľkoročných pozorovaniach získané výsledky nemusia poskytnúť úplný obraz o nebezpečenstve zosuvov.

Literatúra

- 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.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Graniczny, M., Kamiński, M., Piątkowska, A., & Surała, M. (2012). ARTYKUŁY NAUKOWE Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańcicy (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 górnictwem 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.

Krapiec 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). Osiedzenia 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 skanowanie laserowe 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).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

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.