

Raport z testu badawczego dotyczącego zagrożenia osuwiskowego z wykorzystaniem metody LiDAR wspomaganą metodą interferometryczną (Raba Wyżna)

*1. Plan badawczy zawierający przebieg badań z podziałem na prace terenowe i laboratoryjne, wraz ze wskazaniem kolejnych kroków przebiegu prac badawczych*

#### Prace terenowe

- wizja terenowa wraz ze wstępną analizą rzeźby terenu,
- identyfikacja obszarów potencjalnie objętych osuwaniem,
- identyfikacja strefy która powinna zostać objęta analizami z wykorzystaniem technologii LiDAR,
- identyfikacja stref i punktów które potencjalnie mogą być źródłem sygnału dla interferometrii radarowej,
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza interferometryczna,
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza LiDAR.

#### Prace laboratoryjne

- wyznaczenie okresu, w którym przeprowadzona zostanie analiza LiDAR,
- wyznaczenie okresu, w którym przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- wyznaczenie przedziałów czasowych, dla których przeprowadzona zostanie analiza LiDAR,
- wyznaczenie przedziałów czasowych, dla których przeprowadzona zostanie analiza interferometryczna,
- wybór modeli terenu i ortofotomap na bazie których zostanie przeprowadzona analiza,
- budowa modelu różnicowego na bazie modeli terenu z danych LiDAR pozwalających na identyfikację zmian rzeźby terenu wynikających z ewentualnego osuwania,
- zaplanowanie przedstawienia typów grafik obrazujących zmiany powierzchni gruntu z wykorzystaniem interferometrii radarowej,
- zaplanowanie przedstawienia typów grafik obrazujących zmiany powierzchni gruntu z wykorzystaniem obrazów LiDAR,
- ocena aktywności osuwiskowej analizowanego obszaru.

## *2. Opis przebiegu prac badawczych z uwzględnianiem założeń teoretycznych, opisu metody, ewentualnego poboru prób w terenie i kolejnych kroków prac laboratoryjnych.*

### Założenia teoretyczne (LiDAR)

LiDAR to metoda teledetekcyjna oparta na wysyłaniu impulsów laserowych w kierunku powierzchni Ziemi. W badaniach osuwisk technologia ta jest wykorzystywana do precyzyjnego odwzorowania ukształtowania terenu. Pozwala ona na tworzenie szczegółowych numerycznych modeli terenu w strefie, gdzie występuje osuwisko. Dzięki wysokiej rozdzielczości możliwe jest zauważenie nawet bardzo niewielkich zmian powierzchni gruntu na stokach. LiDAR umożliwia analizę terenu pokrytego roślinnością poprzez eliminację zakłóceń wynikających z odbicia sygnału od drzew i krzewów. W efekcie można dokładnie odwzorować powierzchnię gruntu ukrytą pod roślinnością. Na podstawie danych LiDAR da się rozpoznać charakterystyczne elementy rzeźby związane z osuwiskami. Są to między innymi nisze, progi osuwiskowe oraz strefy akumulacji materiału w postaci jęzora osuwiskowego i wielu niewielkich form występujących w jego obrębie. Analiza danych z różnych lat pozwala śledzić rozwój i dynamikę osuwisk. Umożliwia to określenie skali przemieszczeń mas skalnych i zwietrzelinowych w czasie. LiDAR znajduje zastosowanie zarówno w pracach badawczych dotyczących analizy aktywności osuwisk, jak i w działaniach praktycznych wskazując strefy zagrożenia osuwiskowego. Zebrane dane dotyczące analizy numerycznych modeli terenu z wykorzystaniem danych LiDAR są także pomocne przy ocenie stopnia zagrożenia osuwiskowego. Na ich podstawie opracowywane się mapy ryzyka i podatności stoku na osuwanie. Technologia ta wspiera podejmowanie decyzji w planowaniu przestrzennym, jest szczególnie użyteczna na obszarach o skomplikowanej rzeźbie terenu, pozwala także na szybkie i efektywne badanie rozległych obszarów. Uzyskane z analizy modeli terenu opracowanych na podstawie danych LiDAR wyniki charakteryzują się bardzo dużą dokładnością pomiarową.

LiDAR umożliwia wczesne rozpoznanie zmian mogących prowadzić do powstania niebezpiecznych osuwisk, co pozwala traktować numeryczne modele terenu uzyskane z danych LiDAR jako narzędzie do wczesnego zagrożenia przed zagrożeniem osuwiskowym. Dzięki temu analiza LiDAR przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa oraz ograniczenia strat materialnych wynikających z powstawania osuwisk.

### Założenia teoretyczne (interferometria radarowa)

Interferometria radarowa (InSAR) stanowi nowoczesną technikę teledetekcyjną stosowaną w analizie osuwisk. Opiera się ona na porównywaniu fazy sygnału radarowego zarejestrowanego na kilku obrazach satelitarnych tego samego terenu, pozwala to na wykrywanie bardzo niewielkich przemieszczeń powierzchni ziemi. Metoda ma dokładność nawet kilku milimetrów. Dzięki InSAR możliwe jest monitorowanie rozległych obszarów, także tych trudno dostępnych w badaniach terenowych. Jest ona szczególnie efektywna w obserwacji wolnych i występujących w etapach ruchów masowych, w tym osuwania.

Interferometria radarowa umożliwia rozpoznanie aktywnych osuwisk, które nie zawsze są łatwe do identyfikacji w terenie. Analizy interferometryczne dostarczają także informacji o tempie oraz kierunku przemieszczania się mas skalnych i zwietrzelinowych, a wykorzystanie długich serii czasowych danych radarowych pozwala na analizę zmian rzeźby terenu zachodzących na osuwisku. Technika ta wspiera ocenę ryzyka osuwiskowego, zwłaszcza na terenach zabudowanych. Dużą zaletą interferometrii radarowej jest jej niezależność od warunków atmosferycznych oraz oświetlenia, zapewnia to regularne pozyskiwanie danych monitoringowych. Wyniki badań InSAR są zwykle łączone z informacjami geologicznymi i geotechnicznymi, pozwala to na dokładniejszą interpretację procesów prowadzących do powstawania osuwisk. Dane radarowe są pomocne w planowaniu zagospodarowania przestrzennego, metoda ta umożliwia również ocenę efektów prac zabezpieczających stoki. Interferometria radarowa jest coraz powszechniej wykorzystywana w badaniach naukowych i praktyce inżynierskiej. Postęp technologiczny w dziedzinie satelitów radarowych zwiększa precyzję pomiarów. W rezultacie InSAR odgrywa istotną rolę w monitorowaniu i analizie zagrożeń osuwiskowych.

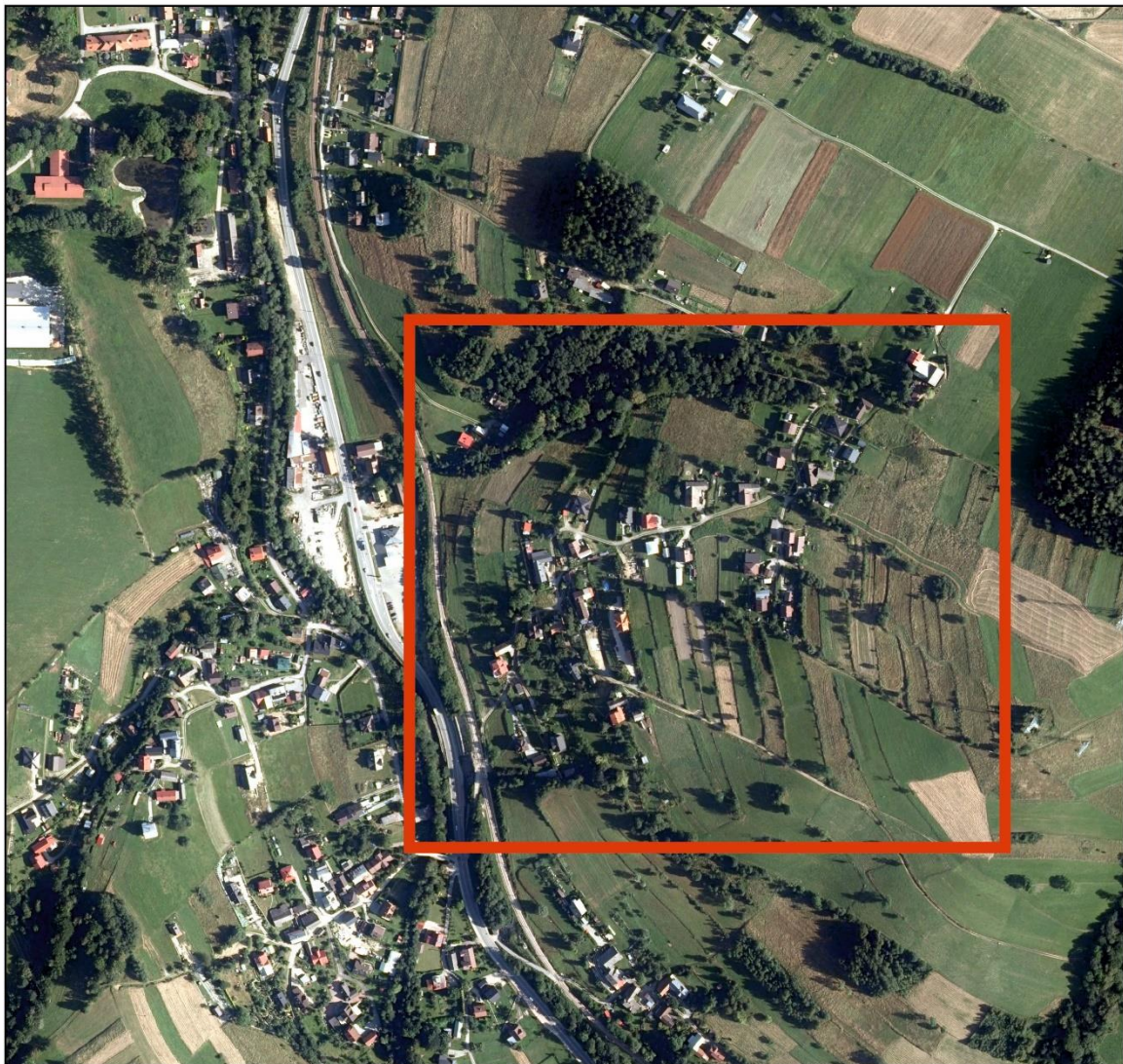
Przeprowadzony test środowiskowy obejmuje obszar położony na południe od centrum Raby Wyżnej, obszar ten zaznaczono czerwonym kwadratem na rycinie 1. Istnieje podejrzenie, że badany obszar jest objęty ruchami osuwiskowymi. Aktywność osuwiskowa wystąpiła tu w 2021, kiedy podczas remontu linii kolejowej doszło do intensywnych opadów i osunęła się niezabezpieczona skarpa o szerokości około 50 metrów. Osuwisko zablokowało drogę wojewódzką na około 2 miesiące. Analiza porównawcza numerycznych modeli terenu opracowanych na podstawie danych LiDAR miała na celu identyfikację zmian rzeźby terenu w obszarze badawczym. Aby analiza była możliwie najbardziej efektywna wykorzystano do porównania możliwie najstarszy numeryczny model terenu z danych LiDAR z 2012 roku i możliwie najmłodszy z 2024 roku. W ten sposób uzyskano mapę zmian rzeźby terenu w czasie ostatnich 14 lat. Dane uzyskane z LiDAR pozwoliły na szczegółową analizę zmian rzeźby terenu spowodowanych ewentualnym osuwaniem. Opracowany różnicowy model terenu opracowany na podstawie danych LiDAR porównano z ortofotomapą. Uzupełniającą analizę interferometryczną zmian powierzchni gruntu przeprowadzono dla okresu 2019-2023, dane interferometryczne dotyczące tego okresu są ogólnodostępne. Szczegółowe analizy interferometryczne zostały uwzględnione dla kolejnych następujących dni: 08.03.2019, 12.06.2019, 16.09.2019, 21.12.2019, 26.03.2020, 30.06.2020, 04.10.2020, 03.03.2021, 07.06.2021, 11.09.2021, 16.12.2021, 22.03.2022, 26.06.2022, 30.09.2022, 03.11.2023, 15.06.2023, 19.09.2023.

*Wyniki badań w postaci obliczeniowej wraz z niezbędną dokumentacją w postaci tabel, wykresów i rysunków*

## LiDAR

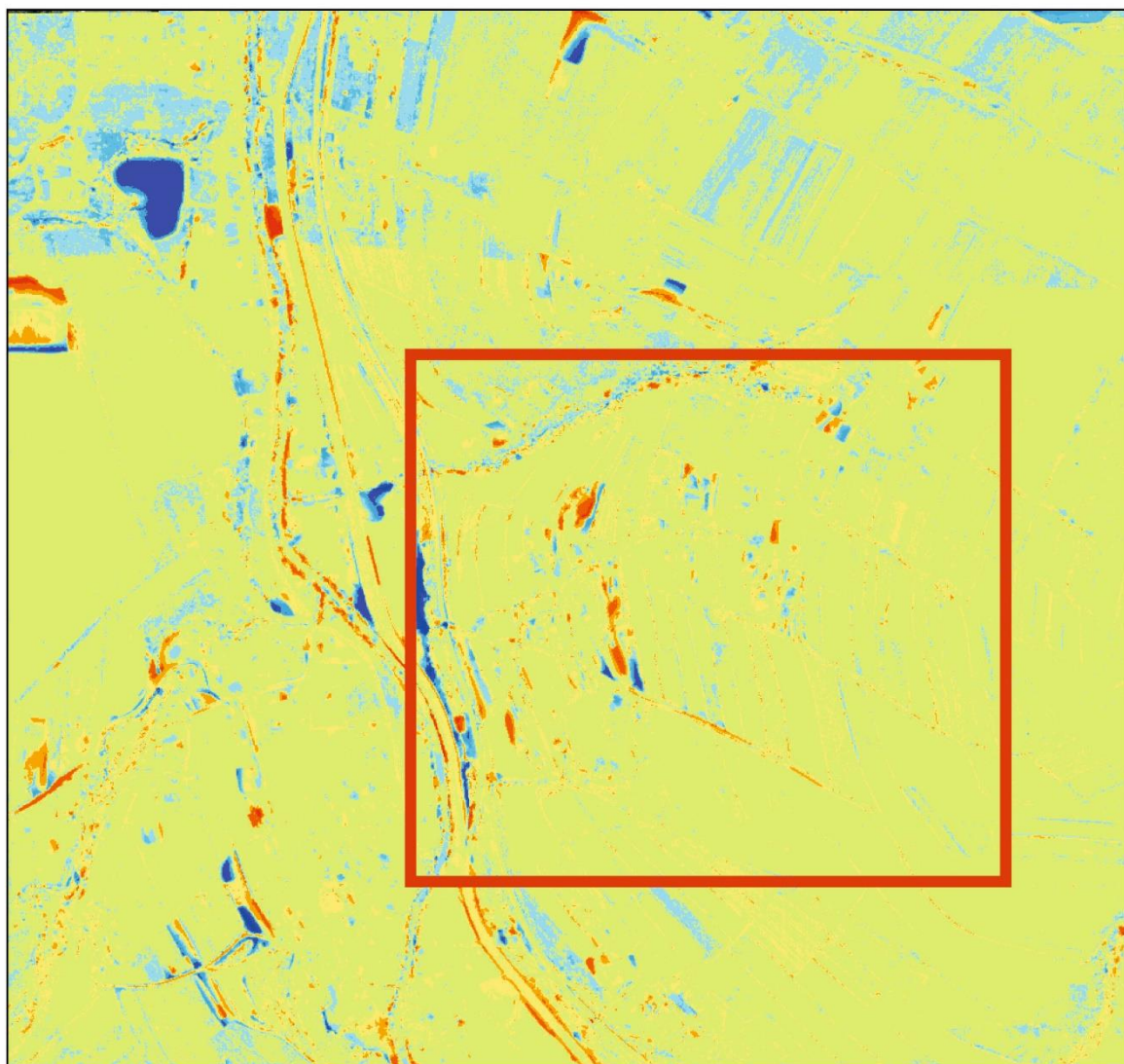
Opracowanie modeli terenu uzyskanych na podstawie danych LiDAR pozwala na analizę powierzchniową rzeźby terenu wraz z uwzględnieniem terenów leśnych i polnych. Analiza

modelu terenu dla badanego obszaru wykazała, że zmiany rzeźby terenu w latach 2012-2024 miały charakter głównie punktowy (Rycina 2). Na modelu różnicowym nie widać powierzchniowych zmian rzeźby terenu, które sugerowałyby wystąpienie rozległych ruchów masowych. Zmiany rzeźby terenu widoczne na modelu różnicowym to bardzo lokalne wynoszenie niektórych powierzchni (kolor niebieski), a także na obniżanie niewielkich powierzchni (kolor czerwony). Mapa zmian rzeźby terenu została także nałożona na ortofotomapę (Rycina 3). Na mapie na rycinie 3 widoczne jest, że zmiany rzeźby terenu występują w obrębie posesji i wzdłuż dróg, co sugeruje gospodarczy charakter zmian rzeźby terenu, nie związane z ruchami osuwiskowymi. Część domów była od 2012 roku budowana/przebudowywana, część posesji była urządzana, czego efektem jest otrzymany punktowy obraz zmian rzeźby terenu na skutek prac ziemnych i budowlanych. Widoczne są także niewielkie zmiany rzeźby terenu wzdłuż dróg. Zmiany te wskazują na niewielkie obniżanie terenu, najprawdopodobniej wynikające z erozji podłoża.

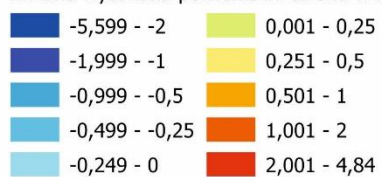


0 75 150 300 m

Rycina 1. Obszar objęty analizą.



Zmiana wysokości powierzchni terenu w latach 2012-2024 [m]

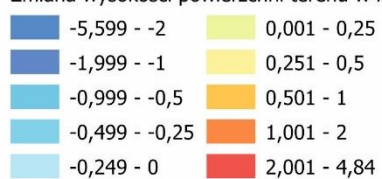


0 75 150 300 m

Rycina 2. Zmiany rzeźby terenu widoczne na modelu różcowym wykonanym z porównania modeli terenu z 2012 i 2024 roku opracowanych na podstawie danych LiDAR.



Zmiana wysokości powierzchni terenu w latach 2012-2024 [m]

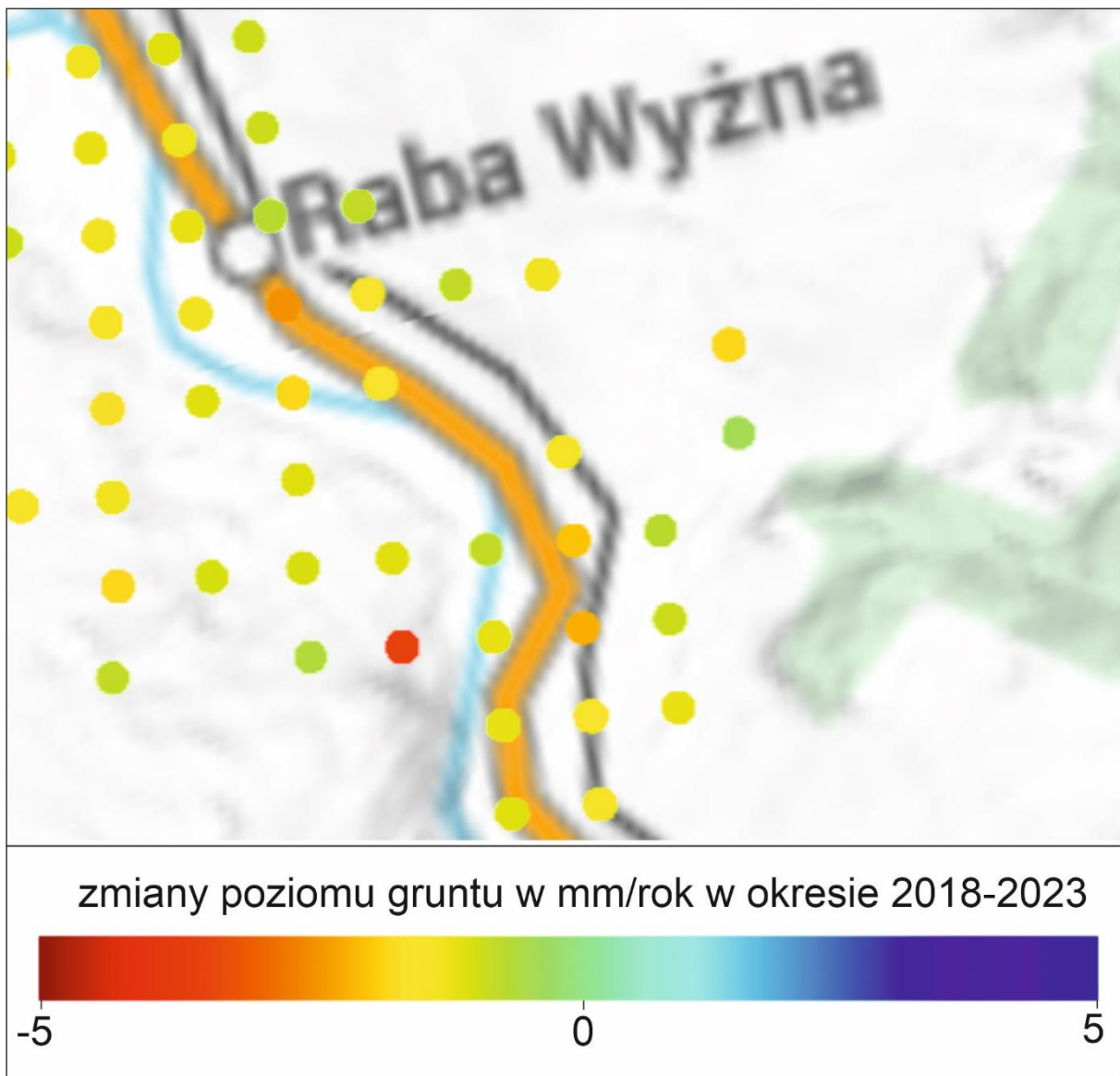


0 75 150 300 m

Rycina 3. Zmiany rzeźby terenu widoczne na modelu różcowym wykonanym z porównania modeli terenu z 2012 i 2024 roku opracowanych na podstawie danych LiDAR. Różnicowy model terenu nałożono na ortofotomapę.

## Interferometria radarowa

Analiza zmian rzeźby terenu i tempa tych zmian z wykorzystaniem interferometrii radarowej (ogólnodostępnych dane z interferometrii radarowej) nie wspomogła analizy na podstawie danych LiDAR. Na badanym obszarze nie zidentyfikowano na tyle dużo punktów trwale odbijających, aby móc przeprowadzić analizę zmian rzeźby terenu (Rycina 4). W terenie badań widoczne są jedynie pojedyncze punkty wskazujące na niewielkie obniżanie powierzchni gruntu.



Rycina 4. Zmiany rzeźby terenu widoczne w postaci punktów wynikających z analiz interferometrycznych w latach 2019-2023.

3. *Wnioski z przeprowadzonych badań w formie opracowania zawierającego szczegółowe analizy wraz z szacunkiem dotyczącym zagrożenia występującego w testowanym terenie (osuwiskowego, powodziowego, związanego z zanieczyszczeniem powietrza zależnie od typu testu badawczego)*

Analiza modeli terenu opracowanych na podstawie danych LiDAR wykazała, że badany obszar nie był objęty naturalnymi ruchami masowymi, w tym osuwaniem w latach 2012-2024. Wprawdzie zidentyfikowano niewielkie strefy obniżające się lub wyniesione w badanym okresie, jednak zmiana powierzchni gruntu wynikała z działalności człowieka związanej z budową domów i zagospodarowywaniem posesji. Niewielkie obniżanie powierzchni terenu widoczne jest także wzdłuż dróg i ścieżek. Spowodowane jest ono erozją podłoża, co jest zjawiskiem naturalnym i nie ma związku z ruchami osuwiskowymi. Oznacza to, że na badanym terenie nie powstają nawet inicjalne ruchy osuwiskowe, nie zidentyfikowano także rzeźby osuwiskowej, z charakterystycznym dla osuwisk zespołem form terenu.

W badanym obszarze, w podłożu występuje zwietrzelina piaszczysto-pylasta z elementami grubszych frakcji, co w trakcie wykonywania prac ziemnych może prowadzić do niewielkich zsuwów gruntu przy powstałych sztucznych skarpach. Zsuwy antropogeniczne mogą powstać w trakcie prowadzenia prac ziemnych i budowlanych związanych drogami, linią kolejową, zwłaszcza chodzi tu o obiekty położone w dolnych partiach stoku. Właśnie do takiej sytuacji (podcięcia stoku i powstania osuwiska) doszło prawdopodobnie w 2021 roku. Osuwanie uaktywnić mogą także opady deszczu, dlatego należy w miarę możliwości unikać wykonywania wykopów w okresach występowania dużych opadów, a w trakcie prac ziemnych starać się zabezpieczać odsłonięcia.