

## Wyznaczenie przemieszczeń powierzchniowych na osuwisku w Kłodnem (gmina Limanowa, południowa Polska)

Paweł Ćwiąkała<sup>1</sup>, Jacek Stanisławski<sup>1</sup>, Andrzej Wróbel<sup>1</sup>, Robert Kaczmarczyk<sup>1</sup>,  
Paweł Drwał<sup>1</sup>, Paulina Grabek<sup>1</sup>, Monika Daroch<sup>1</sup>, Michał Pękala<sup>1</sup>,  
Małgorzata Świątek<sup>1</sup>, Mateusz Zierkiewicz<sup>1</sup>



P. Ćwiąkała



J. Stanisławski



A. Wróbel



R. Kaczmarczyk



P. Drwał



P. Grabek



M. Daroch



M. Pękala



M. Świątek



M. Zierkiewicz

**Determination of surface displacement on the landslide in Kłodne (Limanowa community, southern Poland).** *Prz. Geol.*, 64: 122–130.

*Abstract.* Examination of the landslide in Kłodne was carried out in 2013 and 2014. The work was divided into two parts: geological engineering investigations (mapping of the external borders of the landslide) and geodetic surveying (photogrammetric studies and monitoring of surface movements). The boundaries of the landslide were marked using a Garmin eTrex GPS receiver and a geological compass (Freiberg). The boundaries have not changed and is convergent with previous studies. In the south-western part of the landslide the boundary is blurred as a result of anthropogenic transformation of the area. In the south-eastern part (as at May 17, 2014) about 200 m<sup>3</sup> of the colluvial material has been moved. Photogrammetric studies were based on the analysis of aerial photos from May 26, 2009 (prior to the landslide formation) and on the orthophotomap created from images taken in July 2010, after the formation of the landslide. Displacement vectors were determined by comparing the locations of specific terrain details in the pictures taken before and after the mass movements occurred. In the upper part of the landslide the maximum horizontal displacement value was 87.7 m, the minimum was 6.2, and the average – 84.5 m. In the lower part of the landslide the horizontal displacements amounted to 65.5 m, had a minimum value of 10.3, and an average of 54.8 m. In the last stage of the study the base measurement network was created. It consisted of 68 points stabilized in the ground. The measurements were performed using the static GNSS observations method and linear-angular measurements carried out with a precise total station. In 2013, horizontal displacements ranged from 1 to 8.1 mm, and vertical ones ranged from –9.8 to 13.5 mm. In 2014, there were displacements observed in the vicinity of the main slope. They were directed to the south. The horizontal displacement vector has reached values from 2 to 94 mm, and the vertical vector was from –63 to 16 mm.

**Keywords:** *Flysch Carpathians, landslides, geodetic monitoring, Kłodne*

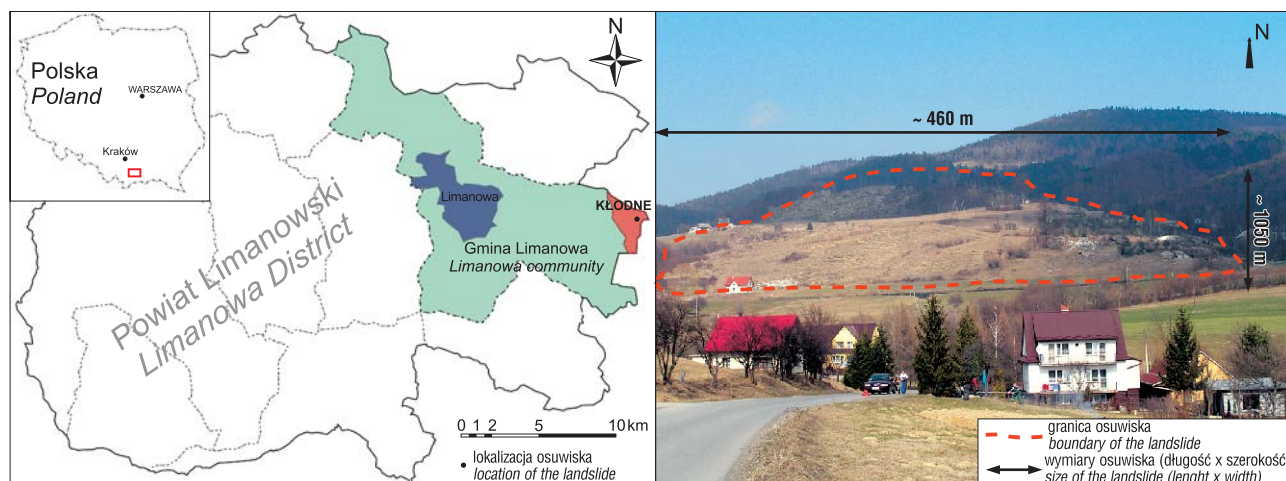
Intensywne i długotrwałe opady atmosferyczne, które wystąpiły w maju i czerwcu 2010 r., przyczyniły się do powstania lub odmłodzenia wielu osuwisk na terenie Karpat fliszowych. Jedno z nich powstało w Kłodnem (gmina Limanowa). Swym zasięgiem objęło obszar ok. 51 ha, powodując zniszczenia budynków mieszkalnych, mienia i infrastruktury. Teren bezpośrednio przylegający do osuwiska jest nadal zamieszkały (ryc. 1).

Od 2013 r. pracownicy oraz studenci AGH w Krakowie prowadzą monitoring osuwiska i terenów do niego przyległych. Prace badawcze podzielono na część geologiczno-inżynierską (kartowanie) oraz geodezyjną (monitorowanie przemieszczeń). Należy dodać, że na osuwisku były prowadzone badania w szerszym zakresie także przez pracowników Oddziału Karpackiego Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB)

(Borkowski i in., 2011; Perski i in. 2011; Wójcik i in., 2011; Chowaniec i in., 2012).

W pierwszym etapie prac wykonano kartowanie geologiczne, które pozwoliło na wyznaczenie przebiegu granic zewnętrznych osuwiska, trzy i cztery lata po wystąpieniu ruchów masowych. W kolejnym etapie – geodezyjnym – na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych przed i po osunięciu się mas skalno-zwietrzelinowych, wyznaczono wektory przemieszczeń poziomych punktów charakterystycznych, które są położone w obrębie osuwiska. Dodatkowo w ramach prac polowych zastabilizowano w gruncie 68 punktów pomiarowych. Na nich wykonano pomiary tachimetryczne w nawiązaniu do punktów, których współrzędne wyznaczono techniką satelitarną (GNSS). Przeprowadzono cztery serie pomiarowe: I pomiar (wyjściowy) – maj 2013 r., II – październik 2013 r., III – kwie-

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; pawelcwi@agh.edu.pl, jstanisz@agh.edu.pl, awrobel@agh.edu.pl.



**Ryc. 1.** Lokalizacja i poglądowy widok osuwiska w Kłodnem. Fot. J. Stanisław  
**Fig. 1.** Location and illustrative view of landslide in Kłodne. Photo by J. Stanisław

cień 2014 r. oraz IV – październik 2014 r. Liczba serii jest typowa dla tego typu badań przemieszczeń na terenach osuwiskowych (Rozporządzenie, 2007).

Uzyskane informacje pozwoliły na wyznaczenie wartości i kierunków wektorów przesunięcia w punktach badawczych. Analiza danych umożliwiła wstępną ocenę bezpieczeństwa obiektów znajdujących się w pobliżu osuwiska oraz zobrazowała dynamikę rozwoju procesów osuwiskowych. Celem przeprowadzonych badań była czasoprzestrzenna analiza przemieszczeń osuwiska i przyległego do niego obszaru.

### POŁOŻENIE I CHARAKTERYSTYKA OSUWISKA

Osuwisko jest położone we wschodniej części Beskidu Wyspowego (Kotlina Sądecka) na południowych stokach góry Chełm (793 m n.p.m) (Kondracki, 2011). W ujęciu geologicznym, obszar ten znajduje się w zachodniej części Karpat fliszowych (Stupnicka, 1997). Budują go utwory płaszczowiny magurskiej, wśród których można wyróżnić trzy kompleksy skalne (Paulo, 2000):

- warstwy magurskie – eocen górny–oligocen – wykształcone jako piaskowce gruboławicowe (facji glaukonitowej), z wkładkami łupków o miąższości do 1 cm. Utwory te budują szczyt góry Chełm oraz odsłaniają się w rejonie skarpy głównej;

- warstwy podmagurskie – eocen górny – składające się z ciemnych, łupków zgrupowanych w ławicach o kilkumetrowej miąższości, rozdzielone piaskowcami, przeważnie glaukonitowymi (gruboławicowymi, gruboziarnistymi, ze śladami stopniowego warstwowania). Łupki współwystępują z piaskowcami glaukonitowymi w stosunku 1 : 1 lub są w przewadze ilościowej;

- warstwy hieroglifowe – eocen – zbudowane z łupków oraz drobnziarnistych piaskowców cienkoławicowych, o miąższości 3–10 cm. Ich charakterystyczną cechą jest występowanie laminowania, zwykle równoległego, rzadziej przekątnego.

Wymienione warstwy są podścielone łupkami pstryimi (środkowy eocen). Najmłodsze osady są reprezentowane przez gliny zwietrzelinowe oraz rumosze skalne (Paulo, 2000). Mapę geologiczną omawianego obszaru oraz profil otworu studziennego (K-1), wykonanego w marcu 2004 r. przez ZWG Hydroel (J. Dyda, praca niepublikowana) w

pobliżu zewnętrznej granicy osuwiska przedstawiono na rycinie 2.

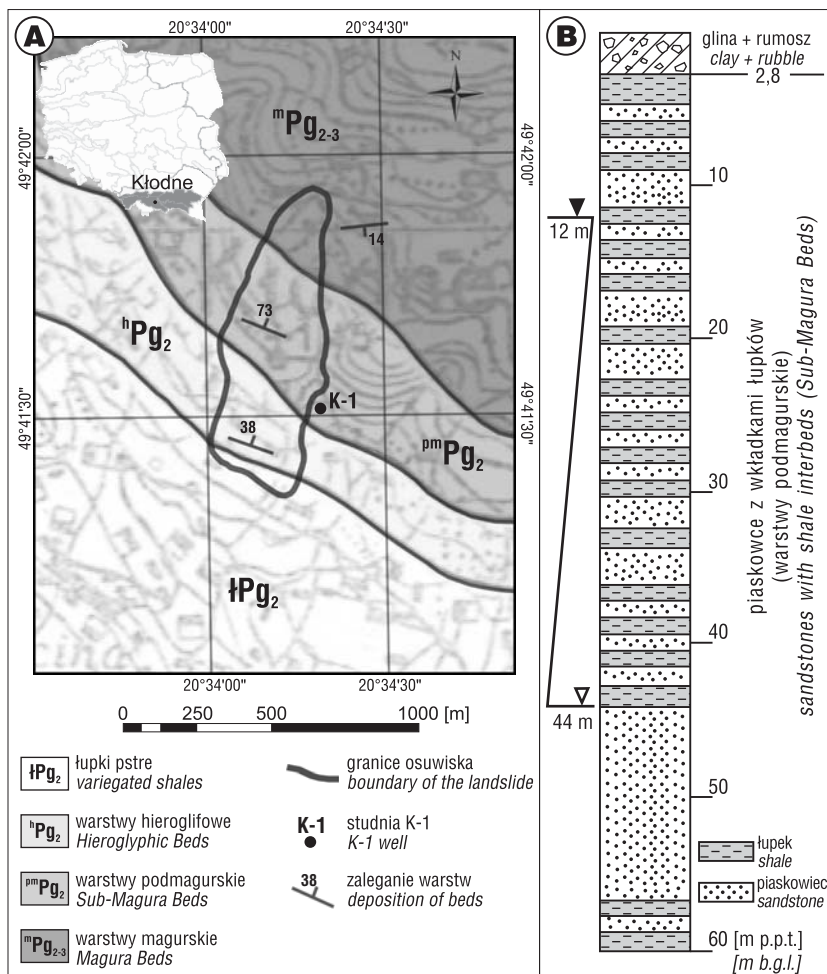
Powstanie i rozwój osuwiska spowodowały zaburzenie struktur geologicznych i zniekształcenie profilu litostratigraficznego. Materiał koluwalny składa się z rumoszu piaskowcowo-łupkowego oraz glin (Chowaniec i in., 2012). Na terenie osuwiska nie wykonywano otworów wiertniczych ani badań geofizycznych. Brak również informacji o położeniu powierzchni poślizgu i wglębnej budowie wewnętrznej po wystąpieniu ruchów masowych.

Znaczący wpływ na inicjację i rozwój ruchów masowych na tym obszarze, ma litologia i tektonika płaszczowiny magurskiej (Pulinowa, 1981; Bober, 1984). Osuwisko ma złożoną budowę. Od północy warstwy magurskie zapadają obsekwnie pod kątem  $14^\circ$  w kierunku południowym. Utwory podmagurskie oraz hieroglifowe, zalegające w centralnej i dolnej partii osuwiska, zapadają insekwnie ku północy pod kątem od  $28$  do  $73^\circ$  (Chowaniec i in., 2012). W rejonie badań są zlokalizowane uskoki zrzutowo-przesuwcze, o kierunku zbliżonym do południkowego (Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1964).

Osuwisko w Kłodnem jest położone w zlewni potoku Smolnik, lewobrzeżnego dopływu Dunajca. Wody podziemne występują w dwóch piętrach wodonośnych (paleogeńsko-neogeńskim i czwartorzędowym). Zwierciadło wody kształtuje się na małych głębokościach (5–20 m) i ma charakter swobodny lub słabo napięty. W głębszych partiach masywu skalnego bywa silnie napięte (Chowaniec & Witek, 1997).

Początkowo sądzono, że osuwisko w Kłodnem jest odmłodzoną częścią osuwiska skalno-zwietrzelinowego występującego na północny wschód od nowo przemieszczonego materiału. Porównanie danych kartograficznych (mapa topograficzna w skali 1 : 10 000, ortofotomapa oraz numeryczny model terenu) pozwoliły stwierdzić, że osuwisko jest stosunkowo młode (Wójcik i in., 2011). Przypuszcza się, że pierwsze przejawy ruchów masowych na opisywanym obszarze pojawiły się po wystąpieniu długotrwałych i intensywnych opadów atmosferycznych latem 1997 r. Z relacji mieszkańców wynika, że w tym okresie, w północnej części zbocza zaobserwowano powstanie płytkich niecek oraz szczelin o różnym przebiegu i rozwarości. Ten fakt wydają się potwierdzać zdjęcia lotnicze wykonane w 2009 r. Po ich analizie, zespół Wójcika (Wój-





Ryc. 2. Mapa geologiczna (A) oraz profil litologiczny (B) warstw podmagurskich nawierconych w otworze studziennym K-1

Fig. 2. Geological map (A) and lithological profile (B) of the Sub-Magura Beds drilled in the K-1 well

cik i in., 2011) wskazał lokalizację obniżenia (1–2 m), gdzie rok później zarysowała się skarpa główna.

Ruch osuwiskowy rozpoczął się 1 czerwca 2010 r., po kolejnych intensywnych opadach atmosferycznych. Po ustaniu fazy wzmożonej aktywności, nastąpiła względna stabilizacja. Obecnie osuwisko osiągnęło rozmiary 460 m szerokości i 1050 m długości. Średnie nachylenie powierzchni terenu wynosi 18°. W górnej części zbocza zarysowuje się skarpa główna (rzędna terenu 610 m n.p.m), której wysokość wynosi od 3 do 6 m. Czoło osuwiska, wyraźnie zaznaczone w dolnej partii zbocza, jest położone na rzędnej ok. 410–413 m n.p.m. Szczegółowy opis form morfologicznych został omówiony w publikacjach zespołów Wójcika (*op. cit.*) oraz Chowańca (Chowaniec i in., 2012).

#### ANALIZA PRZEBIEGU ZEWNĘTRZNEJ GRANICY OSUWISKA

W latach 2013–2014 r., wykonano kartowanie zewnętrznych granic osuwiska za pomocą dwóch metod pomiarowych. W pierwszej, wykorzystano odbiorniki GPS Garmin eTrex, natomiast w kolejnej – kompas geologiczny (Freiberg) oraz tzw. „krokówkę”. Zewnętrzne granice osuwiska, które wyznaczono w trakcie trwania pomiarów z wykorzystaniem obu metod, naniesiono na mapę topograficzną w skali 1 : 10 000 (ryc. 3).

Wyniki prac porównano z opisywanymi w publikacji Wójcika i innych (2011). Oba opracowania wskazują na stabilizację osuwiska w latach 2010–2014. Granice zewnętrzne zaznaczają się wyraźnie w terenie. Wyjątkiem jest południowo-zachodni fragment, gdzie dokładne wyznaczenie granicy nie było możliwe. Jest to efekt przekształceń antropogenicznych powierzchni terenu (pola uprawne). 17 maja 2014 r. w południowo-wschodnim fragmencie osuwiska przemieszczeniu uległo około 200 m<sup>3</sup> materiału koluwalnego. Wpłynęło to nieznacznie na przebieg granicy zewnętrznej osuwiska.

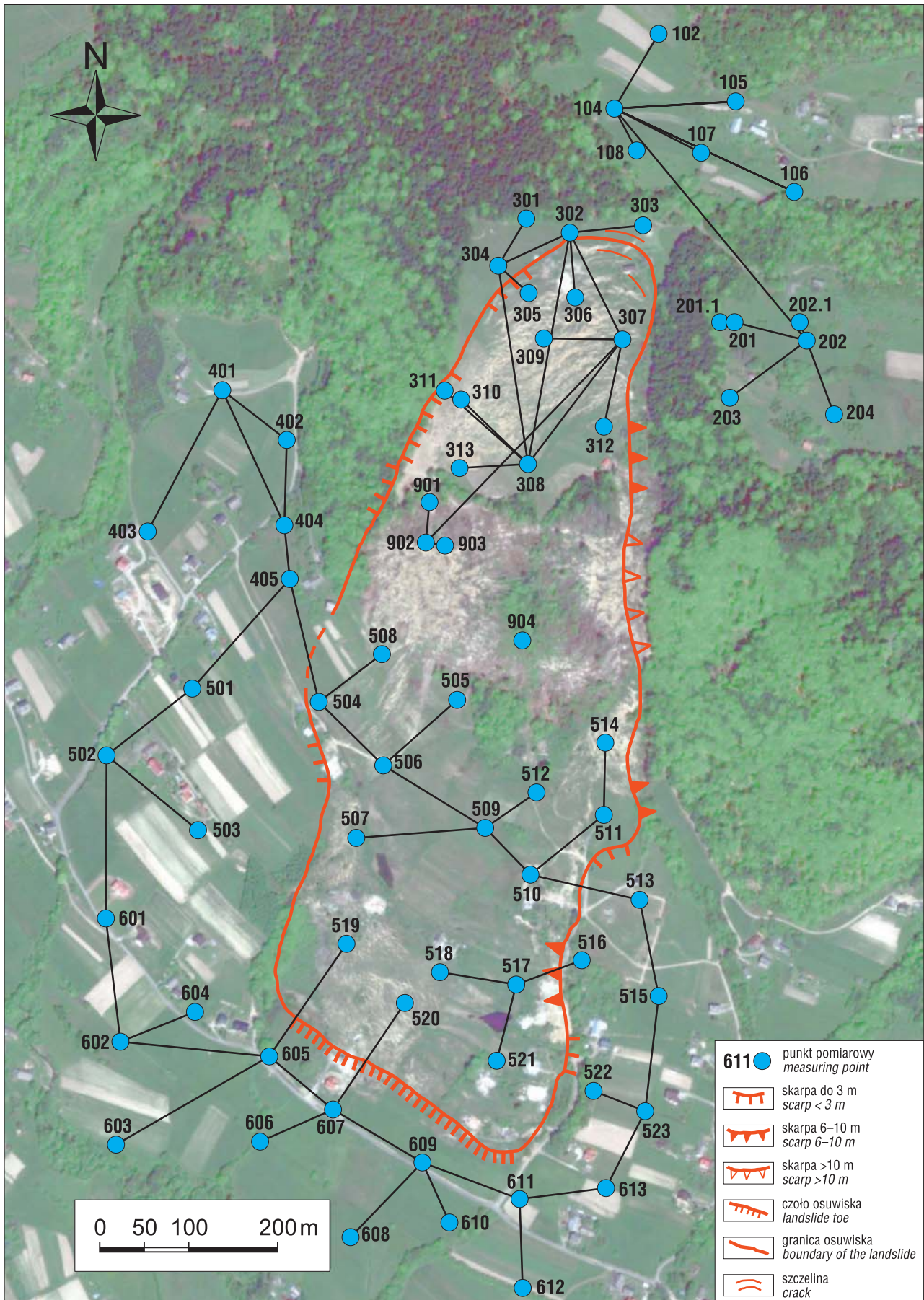
#### POMIARY FOTOGRAMETRYCZNE ZMIAN UKSZTAŁTOWANIA TERENU

Przed powstaniem osuwiska, w Kłodnem nie była założona żadna geodezyjna sieć pomiarowa, mająca na celu kontrolę stabilności zbocza. Jedną z możliwości analizy stanu przed i po aktywacji osuwiska, było porównanie archiwalnych zdjęć lotniczych lub obrazowań satelitarnych. Z archiwum Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej pozyskano zdjęcia lotnicze wykonane 26 maja 2009 r., w skali 1 : 14 500. Zeskanowano je z rozdzielczością 14 μm, co dało terenową wartość pikselu równą 20 cm. Po inicjacji ruchów masowych w lipcu 2010 r. Małopolska Grupa Geodezyjno-Projektowa (MGGP-Aero) wykonała zdjęcia lotnicze, na podstawie których

utworzono ortofotomapę. Jej piksel terenowy wynosił 10 cm. Korzystając ze zorientowanego stereogramu zdjęć lotniczych z nalogu wykonanego w 2009 r. oraz z ortofotomapy z 2010 r., określono moduły wektora przemieszczeń w obrębie osuwiska.

Prace rozpoczęto od orientacji stereogramu zdjęć z 2009 r., mającej na celu uzyskanie przestrzennego modelu terenu. W tym celu wykorzystano autograf cyfrowy VSD-AGH. Do wykonania orientacji bezwzględnej była konieczna znajomość fotopunktów o znanych współrzędnych. Nie było możliwe ich określenie na podstawie pomiarów w terenie, oparto się na mapach zasadniczych i wysokościowych w skali 1 : 2000. Mapy te wykonano w 1978 r., zatem nie ma pewności co do ich aktualności i dokładności. Jako fotopunkty wybrano naroża budynków, które można jednoznacznie zidentyfikować na zdjęciach i na mapie. Nie uległy one zmianom, w odróżnieniu od infrastruktury technicznej i przesyłowej, które mogły być modernizowane.

Stereogram zdjęć lotniczych został zorientowany w układzie map zasadniczych (układ 1965). Natomiast ortofotomapa została wykonana w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych PL-2000. Transformacja współrzędnych pomiędzy układami mogła wprowadzić błędy systematyczne. W celu uniknięcia ich wpływu na



**Ryc. 3.** Mapa obrazująca przebieg granicy zewnętrznej osuwiska w Kłodnem, z rozmieszczoną geodezyjną siecią punktów pomiarowych (podkład – GoogleMaps)

**Fig. 3.** Map displaying the course of the external boundary of the landslide in Kłodne with a disposed network of geodetic measurement points (background – GoogleMaps)

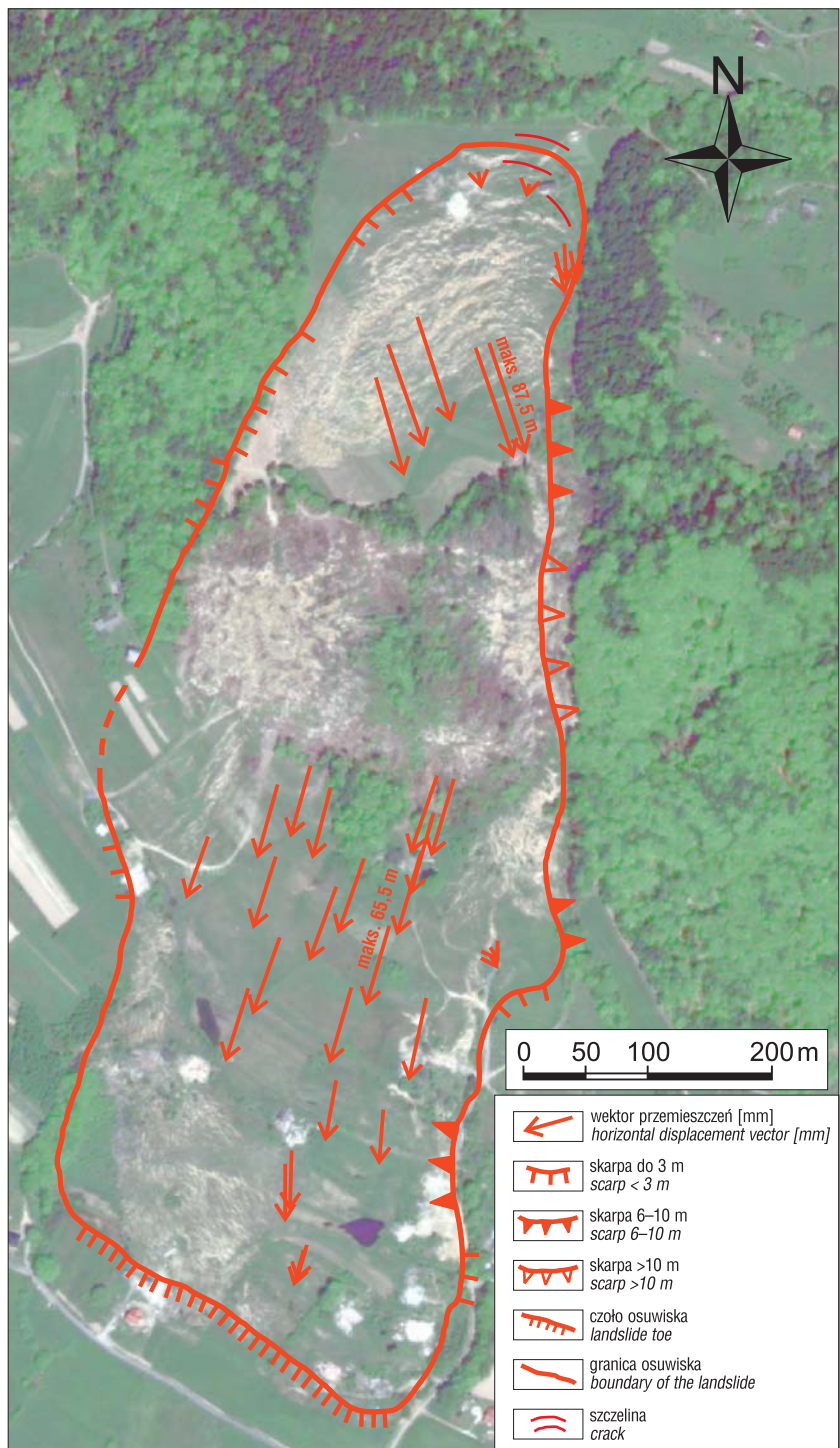


wyniki pomiarów, wykonano transformację sprowadzającą obydwie produkty do jednego układu współrzędnych. Ortofotomapę wpasowano w punkty, których współrzędne odczytano ze stereogramu (Wytoczne techniczne G-1.10, 2001).

Zestawienie zdjęć z lat 2009 i 2010 umożliwiło porównanie obrazu powierzchni terenu osuwiska. W kolejnym etapie, zlokalizowano odpowiadające sobie punkty charakterystyczne na stereogramie oraz ortofotomapie. Za takie punkty przyjęto narożniki pól rolnych, słupy oraz naroża budynków. Analiza nie była możliwa do przeprowadzenia w centralnej partii osuwiska (rumowisko skalne). Porównanie wartości współrzędnych poszczególnych punktów charakterystycznych, pozwoliło na wyznaczenie wektorów przemieszczeń poziomych, obrazujących dynamikę ruchu osuwiska tuż po jego aktywacji.

W trakcie trwania ruchu osuwiskowego przemieszczaniu uległy całe pakiety skalne. Potwierdzeniem tej informacji są zbliżone wartości i kierunki wektorów przesunięcia w poszczególnych partiach osuwiska (ryc. 4). Dynamiczne ruchy wystąpiły w górnej części, gdzie maksymalny wyznaczony wektor przemieszczenia poziomego osiągnął wartość 87,5 m, minimalny 6,2 m, a średni 84,5 m. W dolnych partiach maksymalne wyznaczone przemieszczenie poziome wyniosło 65,5 m, minimalne 10,3 m, a średnie 54,8 m. Ruch odbywał się w kierunku południowym i południowo-zachodnim (azymut 185°). Porównywalną analizę wykonali pracownicy Oddziału Karpackiego PIG-PIB. Przedmiotem ich rozważań był kierunek i wartość maksymalnych wektorów przemieszczenia poziomego (Chowaniec i in., 2012).

Terenowy rozmiar piksela zdjęć z 2009 r. był większy niż zdjęć z 2010 r. Za miarę dokładności przesunięć przyjęto średnie błędy orientacji bezwzględnej stereogramu z 2009 r. Na błędy te w dużej mierze wpływa dokładność identyfikacji punktów pomiarowych. Błędy dla współrzędnych x i y wyniosły odpowiednio 0,59 i 0,87 m, co daje liniową wartość 1,05 m. Powyższe wartości przyjęto za średnie błędy wyznaczenia wektorów przemieszczeń. Kontrolnie określono przemieszczenia kilku punktów poza obszarem osuwiska. Powinny one mieć wartość zerową. Średnia wartość kontrolnie wyznaczonych przemieszczeń wyniosła 0,9 m, co potwierdza, że dokładność ich określenia jest w przybliżeniu równa dokładności orientacji bezwzględnej stereogramu. Błąd średni wyznaczenia przemieszczeń o wartości 1,0 m można uznać za zadowalający, ze względu na wartość wektora przesunięcia, wynoszącego ok. kilkudziesięciu metrów.



**Ryc. 4.** Fotogrametrycznie wyznaczone wektory przemieszczeń poziomych (2009–2010 r.; podkład – GoogleMaps)

**Fig. 4.** Horizontal displacement vectors determined using photogrammetric methods (between 2009 and 2010; background – GoogleMaps)

## GEODEZYJNE POMIARY PRZEMIESZCZEŃ

Za relatywnie dokładną metodę wykorzystaną do monitoringu przemieszczeń powierzchni terenu, uznano połączenie techniki GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) i klasycznych pomiarów geodezyjnych (tachimetria), wykonywanych okresowo na powierzchniowej sieci punktów (Szafarczyk & Puniach, 2011; Ćwiakała i in., 2014). Zrezygnowano z przeprowadzania analiz z użyciem sateli-

tarnych zobrazowań radarowych (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). Metoda ta pozwala w sposób ilościowy wyznaczyć względne wartości przemieszczeń. Główną jej wadą jest niejednoznaczność wyników na obszarach pokrytych roślinnością (Chowaniec i in., 2012). Zastosowane rozwiązanie pozwala na uzyskanie dokładności rzędu kilku milimetrów, mając pewność, że wynik pomiarów obrazuje rzeczywiste przemieszczenie gruntu w bliskim sąsiedztwie monitorowanego punktu. W celu wyznaczenia wartości przemieszczeń rozległego obiektu (np. osuwiska), konieczne jest założenie odpowiednio gęstej sieci pomiarowej. Wada takiego rozwiązania to długi czas trwania pomiarów.

### Projekt sieci pomiarowej

Projekt sieci monitoringu wykonano na podstawie wytycznych zawartych w „Instrukcji opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000” (Instrukcja, 2008). Elementy sieci zlokalizowano na osuwisku oraz w jego najbliższym otoczeniu. Warunkiem wykonania sieci pomiarowej było takie umiejscowienie punktów w projektowanych ciągach, żeby spełniały warunek wzajemnej widoczności. Ponadto nad wybranymi punktami musiał być odpowiednio otwarty horyzont (wymogi stosowania pomiaru GNSS). Punkty rozmieszczono równomiernie (tam gdzie to było możliwe) na obszarze badań, odzwierciedlając morfologię. Na podstawie powyższych założeń ustalono ostateczny kształt sieci i zastabilizowano 68 punktów pomiarowych (ryc. 3).

W górnej partii zbocza powyżej osuwiska, elementy sieci zostały opracowane na bazie geodezyjnej łączącej dwa gniazda pomiarowe, składające się z 10 punktów. W rejonie skarpy głównej oraz rynny osuwiskowej zlokalizowano 13 punktów pomiarowych, z których cztery utworzyły czworobok geodezyjny. Na przyległych progach wewnątrz osuwiskowych, zlokalizowano cztery dodatkowe punkty. Na jednym z punktów pomiarowych (904), z powodu trudnych warunków terenowych, były wykonywane jedynie pomiary satelitarne.

W obrębie jezora i czoła osuwiska zastabilizowano 15 punktów pomiarowych. Poza obszarem osuwiska w kierunku zachodnim i południowym po 10, a w kierunku wschodnim 6 punktów. W tym rejonie punkty sieci w przybliżeniu odzwierciedlały przekroje poprzeczne. Średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wyniosła 150 m. Takie rozmieszczenie umożliwiło przeprowadzenie pomiarów tachimetrycznych na zamkniętym ciągu poligonowym. Od niego odchodzą jedno stanowiskowe ciągi wiszące, poprzeczne pikiety oraz dodatkowy ciąg zakończony nawiązaniem do paru punktów (401–403) mierzonych z wykorzystaniem techniki GNSS.

W celu zapewnienia prawidłowej identyfikacji ruchów masowych i spełnienia warunku trwałości posadowienia, stabilizację wykonano za pomocą stalowych rurek o długości 1 m. W pojedynczych przypadkach, zastosowano rurki o długości 0,5 m. Każda z nich została zaspawana od góry. Na powierzchni spawu nawiercono otwór, który służył jako miejsce centrowania instrumentów podczas wykonywania pomiarów.

### Pomiary bezpośrednie

Prace terenowe składały się z pomiarów GNSS na 22 punktach oraz pomiarów kątowno-liniowych w sieci ciągów

poligonowych. Realizacja założonego celu badawczego wymuszała zastosowanie technologii zapewniającej dokładność rzędu kilku milimetrów. Pomiary satelitarne wykonano metodą statyczną, a pomiary klasyczne za pomocą zrobotyzowanego tachimetru precyzyjnego. Do pomiarów wykorzystano odbiorniki satelitarne Leica GPS System 500, Leica System 1200 oraz tachimetr Leica TCRA 1102plus.

Każda z 7 sesji statycznych GNSS trwała minimum 45 minut (Zalecenia techniczne, 2011). W celu powiązania obserwacji pomiędzy kolejnymi sesjami założono, że odbiorniki pracujące na 2 punktach nie będą przemieszczane. Na sześciu punktach odbiorniki były uruchamiane przez dwie następujące po sobie sesje pomiarowe. Natomiast odbiornik ustawiony w punkcie 902 pracował przez cały czas trwania pomiarów satelitarnych, w celu wyznaczenia wektora nawiązania do zewnętrznej stacji referencyjnej sieci ASG-EUPOS w Nowym Sączu (Graszka, 2007). Specyfika pomiarów przemieszczeń nie wymagała nawiązania do układu zewnętrznego, ale w przypadku wystąpienia dynamicznych ruchów mas koluwalnych jest to korzystne, gdyż umożliwia wyznaczenie przemieszczeń bezwzględnych (Prószyński & Kwaśniak, 2006).

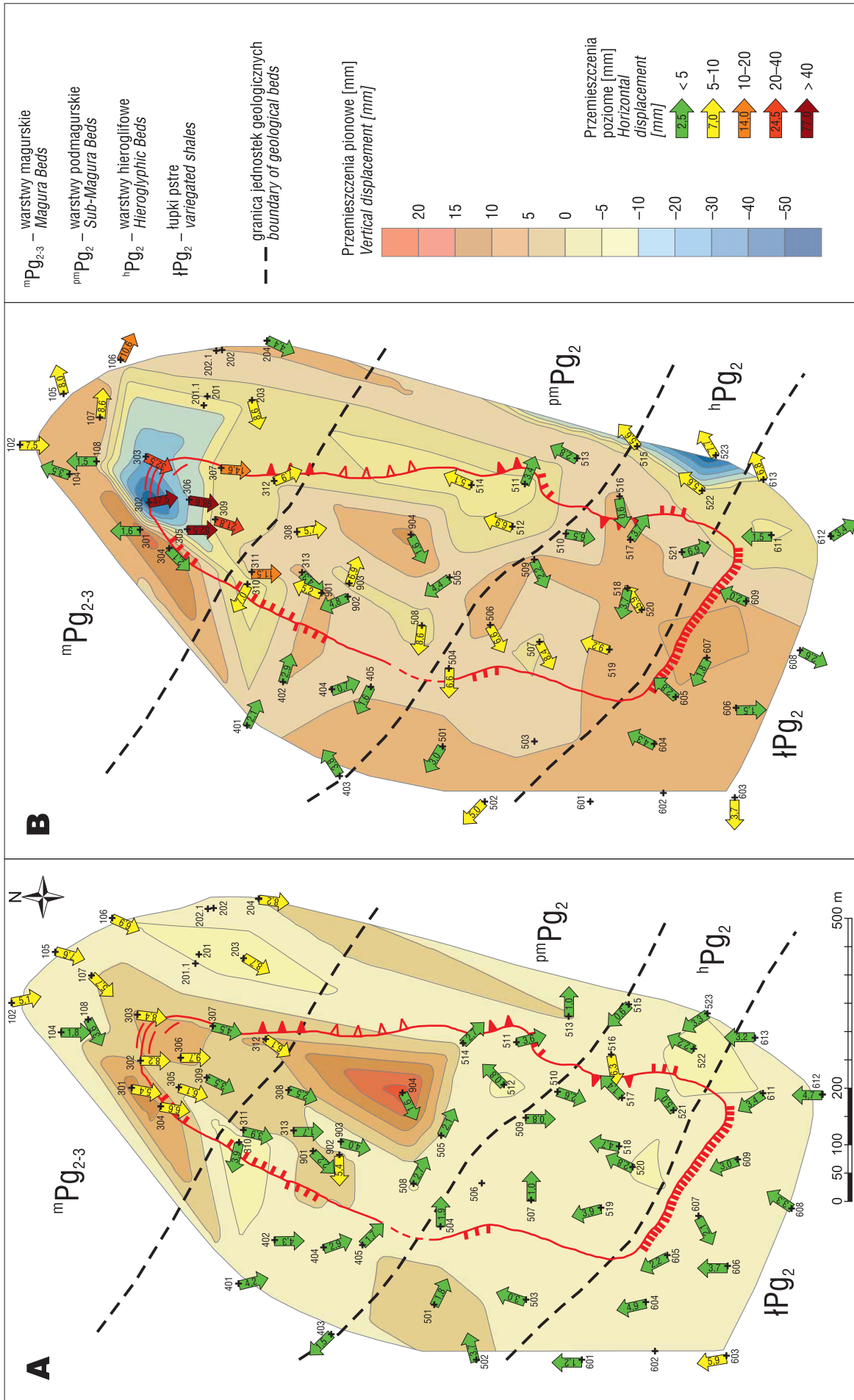
W kolejnym etapie przeprowadzono pomiary tachimetryczne. Obserwacje kątowno-liniowe wykonywano metodą kierunkową, w sieci składającej się z ciągów poligonowych i pikiet. Każdy z przyrządów celowniczych był centrowany i poziomowany nad punktem na statywie geodezyjnym. Ciągi były nawiązywane do punktów pomierzonych techniką GNSS. Na każdym stanowisku obliczano wyrównanie stacyjne kierunków w celu kontroli dokładności pomiaru.

### Opracowanie i analiza wyników pomiarów

Opracowanie danych dla każdej z serii pomiarowych składało się z dwóch etapów. Pierwszym z nich było przetworzenie statycznych obserwacji satelitarnych przy użyciu post-processingu w programie LeicaGeo Office. Opracowaniu podlegały obserwacje zebrane z 22 punktów kontrolowanych oraz dane pobrane z serwisu ASG-EUPOS (stacja Nowy Sącz). W obliczeniach użyto danych kalibracyjnych anten odbiorników, a także efemeryd precyzyjnych (Bosy & Figurski, 2003). W celu nawiązania sieci pomiarowej do zewnętrznego układu odniesienia wyznaczono wektor nawiązania o długości ok. 18 km między stacją referencyjną w Nowym Sączu (NWSC – oznaczenie stacji w systemie ASG-EUPOS), a punktem bazowym na osuwisku (902). W odniesieniu do punktu 902 wyznaczono wektory GNSS do poszczególnych punktów pomiarowych, uwzględniając położenie punktów wiążących sesje pomiarowe. Wyznaczono 61 wektorów przemieszczenia, tworzących sieć obserwacji satelitarnych. W kolejnym kroku wyrównano je metodą najmniejszych kwadratów. Następnie przeliczono współrzędne punktów z układu WGS 84 do układu 2000, strefa 7 (Instrukcja techniczna G-2, 2001).

Drugim etapem było wyrównanie ściśle sieci pomiarowej metodą najmniejszych kwadratów w programie Geonet. Sieć kątowno-liniową wyrównano w nawiązaniu do punktów, których współrzędne wyznaczono metodą satelitarną. Duża liczba obserwacji nadliczbowych umożliwiła wieloetapową identyfikację i eliminację błędów grubych oraz obserwacji odstających. We wszystkich seriach uży-





**Ryc. 5.** Mapa przemieszczeń pionowych (skala barwna) i poziomych (strzałki) na tle budowy geologicznej. A – III pomiar – kwiecień 2014 r., B – IV pomiar – październik 2014 r. Wyniki odniesione do I pomiaru wyjściowego – maj 2013 r.  
**Fig. 5.** Map of the vertical displacements (color scale) and horizontal displacements (color arrows) on the background of the geological structure. A – measurement III – April 2014, and B – measurement IV – October 2014. Results in relation to initial measurement I – May 2013

skano średni błąd położenia punktu poniżej 4 mm, przy średnim błędzie jednostkowym w zakresie  $0,64 \pm 0,98$ . Po zakończeniu analizy uzyskano współrzędne wszystkich punktów sieci dla każdej z serii pomiarowych.

W kolejnym etapie wyznaczono najbardziej prawdopodobne wartości wektorów przemieszczeń punktów pomiarowych. Za punkty, które uległy przemieszczeniu uznano te, których wektory przemieszczeń przekroczyły wartość potrójnego średniego błędu wyznaczenia współrzędnych. W trakcie analiz odrzucono uszkodzone punkty – 201, 202 i 602, których wartości przemieszczeń wyraźnie różniły się od pozostałych. Punkty 201 i 202 zastąpiono punktami 201.1 i 202.1. W przypadku analizy przemieszczeń pionowych i poziomych pozostałych punktów zauważono, że dla II i III pomiaru, wartości przemieszczeń są mniejsze od przyjętego kryterium stałości punktów. Dla punktów położonych w górnej partii zbocza oraz w obrębie skarpy głównej zaobserwowano nieznaczne przemieszczenia związane z ruchami mas gruntu. Stan ten obrazują kierunki i wartości wektorów przemieszczeń. W przypadku punktów usytuowanych na południe od rumowiska skalnego, wyznaczone wartości przemieszczeń poziomych i pionowych mogą być wynikiem naruszenia punktów lub przypadkowych błędów pomiarowych (ryc. 5A).

Biorąc pod uwagę wyniki IV pomiaru, wartości wektorów przemieszczenia poziomego w górnej partii osuwiska, zwłaszcza w rejonie skarpy głównej, wynoszą od 2 do 94 mm (ryc. 5B). Oba wyniki znacznie przekraczają błąd wyznaczenia przemieszczenia oraz wskazują na rozwój ruchów masowych. Analiza przemieszczeń pionowych wskazuje na pionowe deformacje terenu o wartościach od  $-63$  do  $16$  mm w punktach, gdzie występują największe przemieszczenia poziome. W przypadku punktu 523 można wskazać na uszkodzenie znaku pomiarowego. Wartości przemieszczeń pionowych charakteryzują się niższą dokładnością od wyznaczonych wartości przemieszczeń poziomych. Wyniki analiz dla IV serii pomiarowej zostały dodane po przedstawieniu uwag Recenzentów.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie prowadzonych prac stwierdzono, że:

1. Analiza porównawcza opracowań kartograficznych sporządzonych przez pracowników PIG-PIB w 2010 r. (Wójcik i in., 2011) oraz autorów, pozwala stwierdzić, że po ustaniu zasadniczego ruchu mas skalno-zwietrzelinowych granice zewnętrzne osuwiska, w latach 2013–2014 uległy nieznacznym przesunięciom. Jest to widoczne w południowo-wschodniej części osuwiska, gdzie 17 maja 2014 r. przemieszczeniu uległo ok.  $200 \text{ m}^3$  materiału kluwialnego.

2. Opracowanie fotogrametryczne pozwoliło na określenie skali zmian morfologii terenu, które miało miejsce po wystąpieniu intensywnych opadów atmosferycznych (czerwiec 2010 r.). Maksymalne uzyskane przemieszczenie poziome w górnej partii osuwiska wyniosło  $87,5$  m, a w centralnej i dolnej –  $65,5$  m.

3. Otrzymane wartości wektorów przemieszczeń poziomych i pionowych, z bezpośrednich pomiarów geodezyjnych, dla III pomiaru były niewielkie. Wektor przemieszczenia poziomego wyniósł od  $1,0$  (punkt 308) do  $8,1$  mm (punkt 306), a pionowego dochodził od  $-9,8$  (punkt 310)

do  $13,5$  mm (punkt 301). Błędy wyznaczenia przemieszczeń wyniosły odpowiednio  $4$  i  $10$  mm.

4. IV pomiar wykazał przesunięcia poziome i pionowe, wskazujące na przemieszczenia górnej partii osuwiska – zwłaszcza skarpy głównej. Wyznaczone przemieszczenia poziome punktów pomiarowych dochodzą od  $2$  (punkt 102) do  $94$  mm (punkt 306). Dodatkowo, na obszarze położonym w kierunku północno-wschodnim, powyżej osuwiska zaobserwowano niewielkie przemieszczenia, na granicy błędu ich wyznaczenia. Przesunięcia poziome na pozostałym obszarze są prawdopodobnie wynikiem błędów pomiarowych i zostaną poddane dalszej analizie przy opracowywaniu wyników z kolejnych serii pomiarowych. Ruchy pionowe osiągają wartości od  $-63$  mm (punkt 302) do  $16$  mm (punkt 301). Deformacje te zarejestrowano w tych samych punktach pomiarowych, na których wystąpiły znaczne przemieszczenia poziome, co potwierdza fakt występowania ruchów mas gruntu w górnej partii osuwiska, zwłaszcza w rejonie skarpy głównej.

5. Wyniki pomiarów wskazują na nieznaczny ruch punktów znajdujących się powyżej osuwiska – 102, 105, 106 i 107. Szczególne znaczenie mogą mieć przemieszczenia punktu 106 ( $10,6$  mm), który znajduje się w obrębie starego koluwium. W przyszłości planuje się rozszerzyć pomiary w tym kierunku.

Wyniki prac mają charakter ilościowy i jakościowy. Analiza wartości i kierunków wektorów przesunięcia wskazują na zasadność i potrzebę kontynuowania prac badawczych. W kolejnych latach w analizach zostanie uwzględniona wielkość opadów atmosferycznych.

Składamy serdeczne podziękowania władzom i pracownikom Urzędu Gminy Limanowa za owocną współpracę i pomoc w trakcie prowadzenia badań. Podziękowania kierowane są również do pracowników AGH w Krakowie – prof. Macieja Pawlikowskiego oraz mgr inż. Piotra Olchowego. Składamy także podziękowania Recenzentom oraz Redaktorom Przeglądu Geologicznego za cenne uwagi dotyczące treści zawartych w artykule. Prace zrealizowano ze środków pochodzących z funduszu badań statutowych Katedry Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa AGH w Krakowie, nr 11.11.150.005, środków pochodzących z budżetu gminy Limanowa oraz Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie.

## LITERATURA

- BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach Flisowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 340: 115–162.
- BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A., NESCIERUK P., JÓŻKÓW G. & SURALA M. 2011 – Exploration of different data sources to determine the Klodne landslide activity. [W:] 12<sup>th</sup> Czech-Polish Workshop on Recent Geodynamics of the Sudeten and Adjacent Areas – Abstracts, 20–22 October, Jugowice: 15.
- BOSY J. & FIGURSKI M. (red.) 2003 – Problematyka opracowania obserwacji satelitarnych GPS w precyzyjnych sieciach lokalnych. *Wyd. Akad. Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław*.
- BURTAN J. & SKOCZYLAS-CISZEWSKA K. 1964 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Męcina. *Inst. Geol., Warszawa*.
- CHOWANIEC J. & WITEK K. 1997 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000. Ark. Męcina wraz z objaśnieniami. *Państw. Inst. Geol., Warszawa*.
- CHOWANIEC J., WÓJCIK A., MROZEK T., RĄCZKOWSKI W., NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., MARCINIEC P., ZIMNAL Z. & GRANOSZEWSKI W. 2012 – Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas – przewodnik. Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Zespół Geologii, Kraków: 84–88.
- ĆWIĄKAŁA P., DRWAŁ P., DAROCH M. & GRABEK P. 2014 – Temporary monitoring of areas prone to landslides illustrated with



the example of the Kłodne village. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich – Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 2014/4 (1): 1089–1099.

GRASZKA W. 2007 – Wielofunkcyjny system precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego ASG-EUPOS. *Geodeta – Magazyn Geoinformacyjny*, 2: 4–8.

INSTRUKCJA 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

INSTRUKCJA techniczna G-2 2001 – Szczegółowa pozioma i wysokościowa osnowa geodezyjna i przeliczenia współrzędnych między układami. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.

KONDRACKI J. 2011 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.

PAULO A. 2000 – Objasnienia do mapy geologiczno-gospodarczej Polski 1 : 50 000, ark. Męcina (1018). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

PERSKI Z., BORKOWSKI A., WOJCIECHOWSKI T. & WÓJCIK A. 2011 – Application of persistent scatterers interferometry for landslide monitoring in the vicinity of Roznow Lake in Poland. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8 (3): 319–323.

PRÓSZYŃSKI W. & KWAŚNIAK M. 2006 – Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Of. Wyd. PW, Warszawa.

PULINOWA M.Z. 1981 – Przyczynek do znajomości wpływu deformacji podłoża na kinematykę osuwisk. *Kwart. Geol.*, 25: 555–569.

ROZPORZĄDZENIE 2007 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi, Dz.U. z 2007 r. Nr 121 poz. 840.

STUPNICKA E. 1997 – Geologia regionalna Polski. Wyd. UW, Warszawa.

SZAFARCZYK A. & PUNIACH E. 2011 – Osuwiska – wyznaczenie czasokresów prowadzenia obserwacji geodezyjnych przemieszczających się mas ziemnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2011/04: 141–150.

WÓJCIK A., PERSKI Z., BORKOWSKI A. & WOJCIECHOWSKI T. 2011 – Zastosowanie teledetekcji lotniczej i satelitarnej do badania dynamiki czynnych osuwisk w 2010 r. na przykładzie osuwiska w Kłodnem koło Limanowej. *Polski Kongres Drogowy*, 30 marzec –1 kwietnia 2011, Zakopane: 111–120.

WYTYCZNE techniczne G-1.10 2001 – Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych. GUGiK, Warszawa.

ZALECENIA techniczne 2011 – Pomiary satelitarne GNSS oparte na systemie stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 12.06.2014 r.

Akceptowano do druku 27.08.2015 r.