

Analiza aktywnego osuwiska i pełzania strefy przypowierzchniowej na zabudowanym wzgórzu Chełm k. Bochni

Łukasz Kaczmarek¹, Kamil Kielbasiński², Paweł Dobak², Piotr Nescieruk³



Ł. Kaczmarek



K. Kielbasiński



P. Dobak



P. Nescieruk

Analysis of active landslides and surface creep in the built-up area of Chelm Hill near Bochnia. *Prz. Geol.*, 73: 1090–1111; doi: 10.7306/2025.117

Redaktor prowadzący: Paweł Łukaszewski

Abstract. The paper discusses comprehensive stabilization solutions implemented in a settled, active/periodically active landslide area (SOPO ID number: 2833, 2841) on the north-eastern slope of Chelm Hill (boundary zone of the Outer Carpathians and the Carpathian Foredeep, Bochnia district). In addition to previously documented large-scale landslides, the slope has been affected for years by slow creep movements within the weathered material, which have had a negative impact on infrastructure and residential buildings. The applied geotechnical solutions – including drainage systems, retaining walls, and slope re-profiling – are presented as components of a coherent stabilization framework. Furthermore, the multi-aspect analysis incorporates satellite data from the Sentinel-1 programme, which enabled remote assessment of displacement rates over a longer time frame using radar interferometry (InSAR) techniques. The presentation of the geological engineering conditions also draws on data from inclinometer and piezometer measurements (surveys undertaken by PGI-NRI). The results allow for the assessment of the scale of dynamic hazards and their spatial and hydrodynamic conditions. They also generally indicate the effectiveness of the implemented solutions, while emphasizing the need for continued monitoring due to the active nature of the landslide. The proposed approach can provide a benchmark for comparable cases under similarly challenging geological settings.

Keywords: engineering geology, stability, geotechnics, satellite observations, digital elevation model

Osuwiska o różnych formach – od klasycznych, nagłych ruchów po powierzchniach kołowo-cylindrycznych poprzez zsuwy i spływy błotne aż po powolne pełzanie – są na niektórych terenach częstymi procesami powodującymi awarie budowlane, a niekiedy katastrofy, warunkowane zarówno czynnikami przyrodniczymi, jak i wynikającymi z antropopresji (Mizerski, Graniczny, 2017). Na obszarach zabudowanych osuwiska mogą wyrządzać znaczne straty materialne. Rozpoznanie przyczyn i dynamiki powierzchniowych ruchów masowych jest niezbędne do podejmowania środków zapobiegawczych i zaradczych. W południowej Polsce, w strefie kontaktu Zachodnich Karpat Zewnętrznych z zapadliskiem przedkarpackim, jednym z poligonów tego typu analiz jest północno-wschodnie zbocze wzgórza Chełm k. Bochni (powiat Bośnia, woj. małopolskie), z zabudową wolnostojącą, na którym od lat występuje istotny problem utrzymania stateczności stoku. Świadczą o tym ślady dawnych osuwisk o głębokiej powierzchni poślizgu, uwarunkowanej częściowo strukturalnie, a także obserwowane współcześnie procesy powolnego spłyzywania gruntuwej

pokrywy zwietrzelinowo-koluwalnej o miąższości kilku metrów.

W niniejszym artykule opisano wyniki kompleksowej analizy warunków geodynamicznych na wzgórzu Chełm, obejmującej klasyczne metody geologiczno-inżynierskie, modelowanie numeryczne MES (ZSoil), monitoring *in situ* (inklinometry) i analizę danych *InSAR Sentinel-1*. Cel badawczy osiągnięto, odpowiadając na pytania:

- ❑ Jakie jest aktualne tempo i przestrzenne zróżnicowanie pełzania w strefie zwietrzelinowo-koluwalnej?;
- ❑ Jaka jest dokładność obserwacji *InSAR* i jej ograniczenia w warunkach rozwiniętej rzeźby terenu?;
- ❑ Czy wdrożone rozwiązania stabilizacyjne (odwodnienie, mury oporowe, profilowanie) skutecznie zwiększają wskaźnik stateczności (SF)?

Novum względem dotychczasowych opracowań (Warmuz, Wójcik, 2010; Kaczmarek i in., 2017) jest: integracja wieloletnich danych *InSAR* (2015–2025), analiza aktualizowanych wyników wglębnych pomiarów inklinometrycznych i model kierunków spływu wód powierzch-

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00–653 Warszawa; lukasz.kaczmarek@pw.edu.pl; ORCID ID: 0000-0001-5207-3816

² Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02–089 Warszawa; k.kielbasinski@uw.edu.pl, p.dobak@uw.edu.pl; ORCID ID: K. Kielbasiński – 0000-0003-2655-5031; P. Dobak – 0000-0001-7096-0515

³ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; piotr.nescieruk@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0002-8863-3210

niowych wraz z identyfikacją miejsc tworzenia się zastoin wody.

OBSZAR BADAŃ

Analizie poddano warunki geodynamiczne na północno-wschodnim zboczu wzgórza Chełm, które stanowi północną krawędź nasunięcia karpackiego. Wzgórze to znajduje się w pobliżu Bochni, ~35 km na wschód od Krakowa (ryc. 1). Z trzech stron opływa je rzeka Raba. Strefa kontaktu fliszu karpackiego z ilami mioceniowymi zapadliśka przedkarpackiego charakteryzuje się skomplikowanym układem warstw strukturalnych. Ze względu na taką specyfikę budowy geologicznej i notowane przejawy geodynamiki regionalnej północna krawędź obszaru polskich Karpat fliszowych należy do szczególnie zagrożonych ruchami masowymi. Procesy osuwiskowe zachodzą na obszarach wykazujących wcześniejszą aktywność geodynamiczną, ale są inicjowane także tam, gdzie dotąd nie występowały (Mrozek i in., 2004; Mizerski, Graniczny, 2017).

Wzgórze Chełm jest objęte wieloletnim monitoringiem Systemu Osłony Przeciwsuwiskowej (SOPO). Obszary osuwiskowe na stoku wzgórza Chełm o nr 2833 i 2841 w bazie SOPO (łącznie ~13,05 ha) są zagospodarowane – znajduje się na nich zabudowa osiedlowa, której towarzyszą lokalne drogi oraz infrastruktura energetyczna i wodociągowa. Dwa inne obszary osuwiskowe, sąsiadujące z tymi obszarami od wschodu (nr 2844 i 2854 w bazie SOPO: łącznie ~15,65 ha), nie są zabudowane.

Podłoże gruntowo-skalnym na wzgórzu Chełm są górnomiocenijskie łupki ilaste należące do warstw chodenickich (ryc. 2; wydzielenie IV na przekrojach w

→

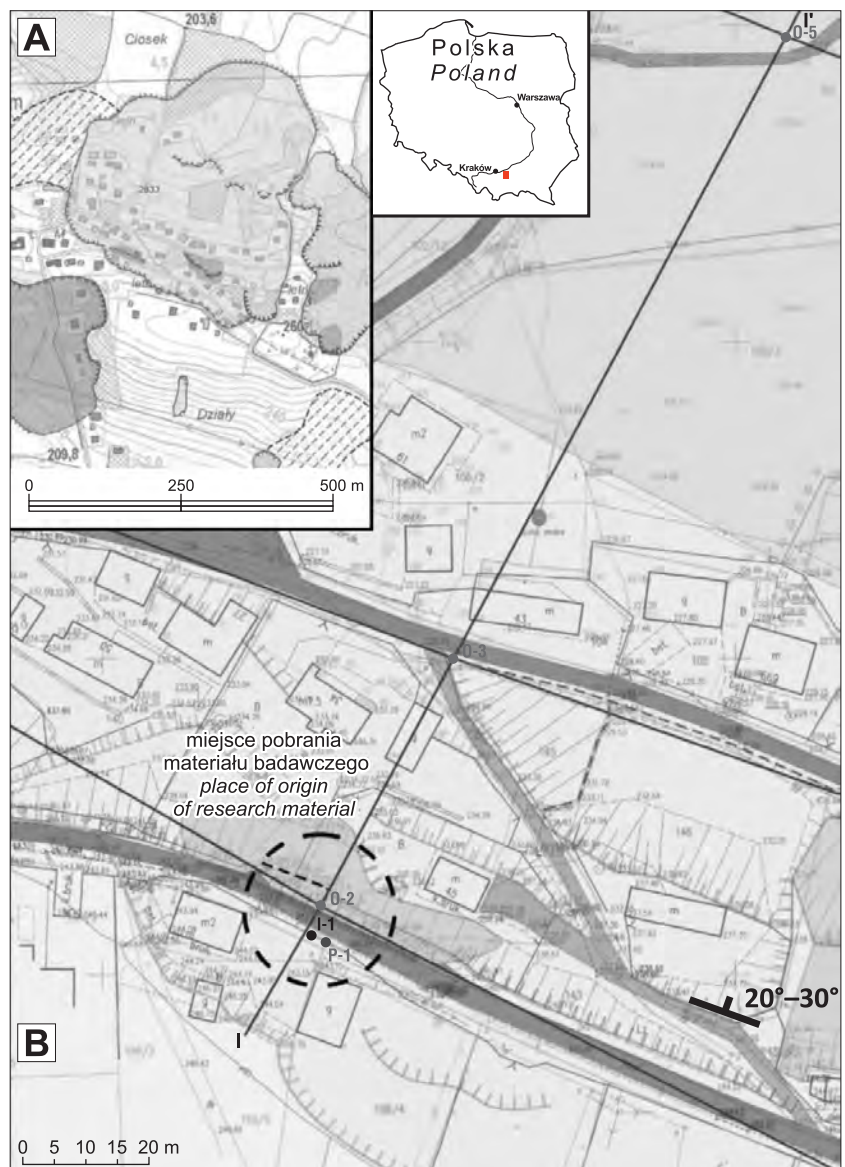
Ryc. 1. Obszar osuwiskowy na wzgórzu Chełm – nr 2833 wg bazy SOPO (zmodyfikowane za Kaczmarek i in., w druku): **A** – topografia (na podstawie Warmuz, Wójcik, 2010); **B** – monitoring geodynamiczny Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB (Jaskólski i in., 2013); otwory wiertnicze: **I-1** – inklinometryczny, **P-1** – piezometryczny, **O-2** – geologiczno-inżynierski; **I-I'** – linia przekroju geologiczno-inżynierskiego; 20–30° – przybliżony bieg i upad warstw chodenickich (na podstawie Skoczylas-Ciszewska, Burtan, 1954; Warmuz, Wójcik, 2010; Jaskólski i in., 2013)

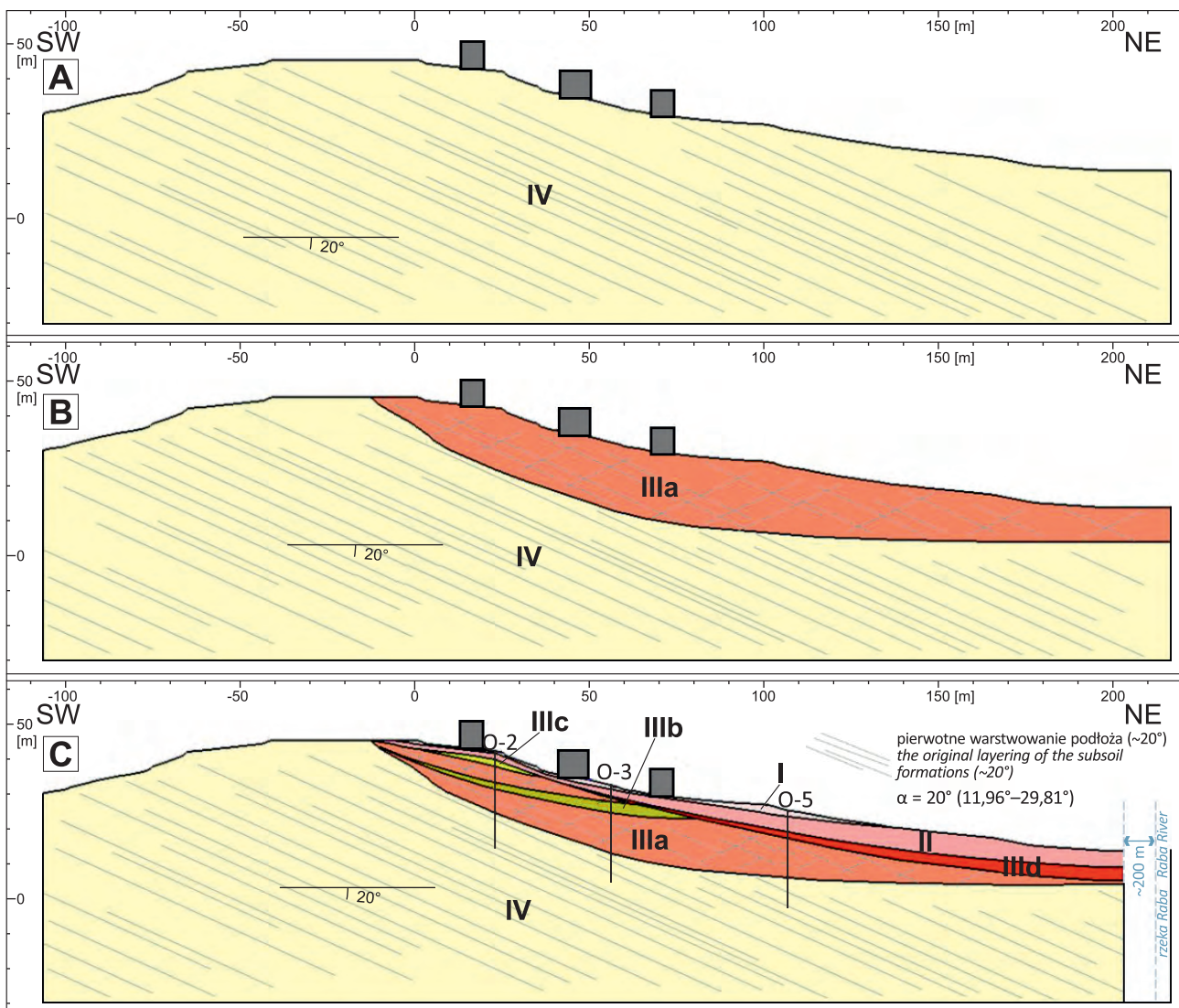
Fig. 1. Landslide area on the Chełm Hill – SOPO No. 2833 (modified from Kaczmarek et al., in press): **A** – topographic map (based on Warmuz, Wójcik, 2010); **B** – geodynamic monitoring map performed by the Polish Geological Institute – NRI (Jaskólski et al., 2013); boreholes: **I-1** – inclinometer, **P-1** – piezometer, **O-2** – geological and engineering; **I-I'** – geological and engineering cross-section line; 20–30° – approximate strike and dip of the Chodenice Beds (based on Skoczylas-Ciszewska, Burtan, 1954; Warmuz, Wójcik, 2010; Jaskólski et al., 2013)

dokumentacji geologiczno-inżynierskiej wg Jaskólskiego i in., 2013). Otwory te są przykryte pakietem zwietrzelin i koluwiów ilastych o miąższości do 20 m. Stopień dezintegracji zwietrzelin ilastej jest zróżnicowany – od osadów silnie rozluźnionych do bardziej spoiwystych (warstwy IIIa–IIIId na ryc. 2). Lokalnie w przypowierzchniowej części profilu geologicznego występują antropogeniczne grunty nasypowe (warstwa I) i przypowierzchniowo zaburzone grunty rodzime (warstwa II) o małej miąższości.

Istotną cechą łupków ilastych jest ich insekwentne zapadanie względem północno-wschodniego nachylenia stoku (Warmuz, Wójcik, 2010). Sprzyja to powstawaniu licznych nieciągłości i lokalnych powierzchni poślizgu, choć nie tworzy jednej płaszczyzny osuwiskowej. Wieloletnie procesy wietrzenia ilów miocenijskich, ich depozycji i filtracji wody doprowadziły do obniżenia wartości parametrów wytrzymałościowych (szczególnie spójności), sprawiając, że koluwium to stało się szczególnie podatne na pełzanie.

Obszar osuwiskowy na wzgórzu Chełm jest rozległy i ma formę starego terenu zaangażowanego geodynamicznie, tj. pofalowaną morfologię i wiele stref reaktywacji ruchu osuwiskowego. W przeszłości rejestrowano tu głębokie osuwiska rotacyjne, o czym świadczą linie poślizgu





Ryc. 2. Schematyczny przekrój geologiczno-inżynierski przez osuwisko na wzgórzu Chełm (I – antropogeniczne grunty nasypowe; II – przypowierzchniowo zaburzone grunty rodzime; IIIa–IIIc – kompleks zwierzelin i koluwiów ilastych o różnym stopniu dezintegracji – od silnie rozluźnionych do bardziej spoiстых; IV – górnomiocenijskie łupki ilaste warstw chodenickich): A – hipotetyczny początkowy etap rozwoju zabudowy, B – etap uruchomienia aktywności osuwiskowej, C – etap współczesny, w którym budowa geologiczna uległa zróżnicowaniu z powodu procesów wietrzeniowych i powierzchniowych ruchów masowych

Fig. 2. Schematic geological–engineering cross-section through the Chelm Hill landslide (I – anthropogenic embankment soils; II – disturbed near-surface native soils; IIIa–IIIc – a complex of weathered clay and colluviums with varying degrees of disintegration – from strongly loosened to more cohesive; IV – Upper Miocene clay shales of the Chodenice Beds): A – hypothetical initial stage of development with buildings; B – stage of landslide activation; C – current stage, when the geological structure has diversified due to weathering processes and surface mass movements

widoczne w profilach otworów wiertniczych i aktywizacja powierzchni osuwiskowej, jaka nastąpiła na głębokości ok. 20 m podczas intensywnych opadów w 2010 r., doprowadzając do znacznych przemieszczeń w ośrodku grunto-skalnym. Procesy te wymusiły podjęcie interwencji technicznych (Warmuz, Wójcik, 2010).

W ostatnich latach na stoku wzgórza Chełm dominują powolne ruchy mas gruntu, skoncentrowane przede wszystkim w przypowierzchniowej części profilu grunto-skalnego (na gł. 3–4 m). Próba stabilizacji sytuacji geodynamicznej na stoku było wybudowanie w jego środkowej części muru oporowego. Współcześnie u podnóża muru są obserwowane uszkodzenia drogi i elementów infrastruktury towarzyszącej (ryc. 3). W dolnej części stoku są widoczne niewielkie skarpy wtórne i szczeliny, które wskazują na stopniowe poszerzanie się zasięgu aktywnej części osuwiska.

Powierzchniowe ruchy masowe prowadzą do przemieszczeń gruntu o zróżnicowanej prędkości, co wywiera negatywny wpływ na infrastrukturę techniczną i zabudowę. W ich wyniku uszkodzeniu uległy odcinki lokalnej drogi dojazdowej i ogrodzenia posesji. W strefie czołowej osuwiska powstały w ostatnich latach zarysowania i deformacje konstrukcyjne fundamentów dwukondygnacyjnego budynku mieszkalnego. Liczne szczeliny w gruncie i niewielkie skarpy wtórne potwierdzają postępujący rozwój strefy poślizgu.

METODY OBSERWACJI I STABILIZACJI ZBOCZA

W celu zatrzymania postępu ruchów masowych na stoku wzgórza Chełm i przeciwdziałania dalszej degradacji infrastruktury zainstalowano kilka zabezpieczeń geotech-

nicznych. Działania stabilizacyjne wdrożono stosownie do wcześniejszego rozpoznania uwarunkowań geologiczno-inżynierskich i wyników długookresowego monitoringu prowadzonego przez PIG-PIB (karta dokumentacyjna osuwiska założona 16.07.2010 r.).

Działania ochronne i monitoringowe, zastosowane oraz wciąż rozwijane, postępują w sposób kroczący, stosownie do rozwoju masowych ruchów powierzchniowych. Obecnie są podejmowane trzy grupy działań mające na celu: odwodnienie gruntów na zboczu wzgórza, profilowanie



Ryc. 3. Północno-wschodni stok wzgórza Chełm (28.11.2015 r.): **A** – korona zbocza; **B** – górna krawędź stoku objęta ruchami osuwiskowymi; **C** – mur oporowy posadowiony w środkowej części stoku, w rejonie przylegającym do przekroju geologicznego zaznaczonego na ryc. 1; **D** – uszkodzony odcinek drogi asfaltowej; **E** – ogrodzenie uszkodzone na skutek powolnych przemieszczeń gruntu
Fig. 3. North-eastern slope of Chełm Hill (28.11.2015): **A** – the upper edge of the slope; **B** – upper edge of the slope affected by landslide movements; **C** – retaining wall founded in the middle part of the slope, in the area adjacent to the cross-section marked in Fig. 1; **D** – damaged section of the asphalt road; **E** – damaged fence as a result of slow ground displacements

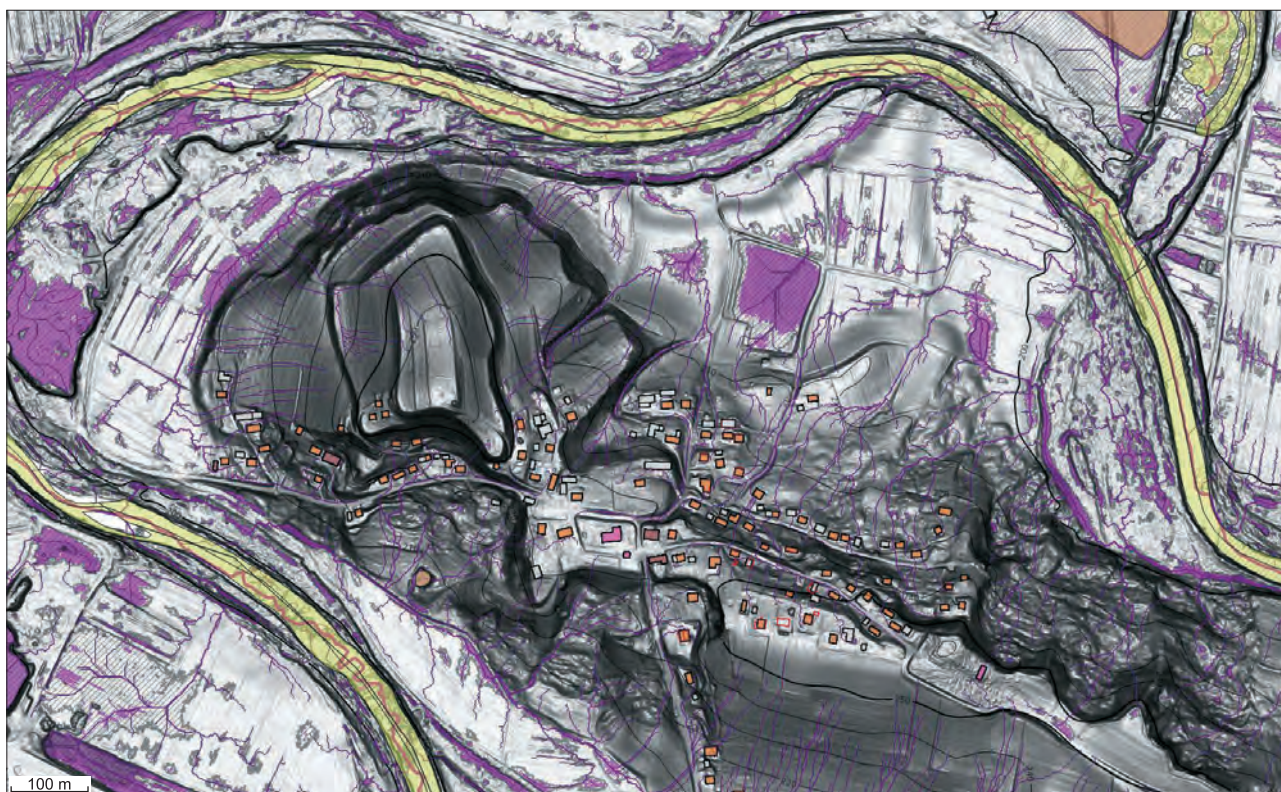
fragmentów zbocza o nadmiernym nachyleniu i wzmocnienie skarp za pomocą konstrukcji oporowych. Zastosowano kilka metod obserwacji i analizy zmian stanu równowagi geodynamicznej: monitoring inklinometryczny i hydrogeologiczny, nowoczesną interpretację zdalnej rejestracji danych satelitarnych, a także modelowe obliczenia numeryczne.

W celu scharakteryzowania warunków stanu równowagi zbocza przeprowadzono opcjonalne obliczenia wartości wskaźnika stateczności. Podstawą zdefiniowania wariantowych modeli obliczeniowych było przede wszystkim rozpoznanie strefy zaangażowanej geodynamicznie. Na podstawie opisu profili wiertniczych wydzielono sześć warstw gruntów ilastych (*I-III*d) o zróżnicowanym stopniu zwietrzienia. Zalegają one na łupkach ilastych warstw chodnickich, nachylonych pod kątem 20° , co odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu potencjalnych powierzchni poślizgu. Parametry wytrzymałościowe poszczególnych warstw osadów (spójność efektywna c' , kąt tarcia wewnętrznego φ' , ciężar objętościowy γ) określono na podstawie badań laboratoryjnych, które obejmowały standardowe testy trójosiowe do wyznaczania parametrów efektywnych i badania pierścieniowe (*ring-shear*) pozwalające określić opór przedniej powierzchni ścicia (wartość wytrzymałości rezydualnej). Zrealizowano także wieloetapowe badania pełzania w trójosiowym stanie odkształcenia, które umożliwiły analizę stopniowej redukcji wartości parametrów wytrzymałościowych na skutek długotrwałego obciążenia. Parametry dobrano zgodnie z wymaganiami normy Eurokod 7 (2008). Do analizy stateczności wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) z zaimplementowaną techniką redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR,

zw. metoda c-fi redukcji; Griffiths, Lane, 1999; Potts, Zdravkovic, 1999). Symulacje prowadzono m.in. w dwóch kluczowych wariantach: stan aktualny – z uwzględnieniem zabudowy i powierzchni krawędziowej i udokumentowanego profilu koluwalnego i zwietrzelinowego, oraz wariant warunków osłabionych – zakładający zredukowane parametry wytrzymałościowe, odzwierciedlające negatywne oddziaływanie wody uaktywniającej czynnik pełzania gruntu (por. Leroueil, 2001). Porównanie wyników stateczności w tych dwóch wariantach pozwoliło wskazać potencjalne kierunki rozwoju powierzchni poślizgu.

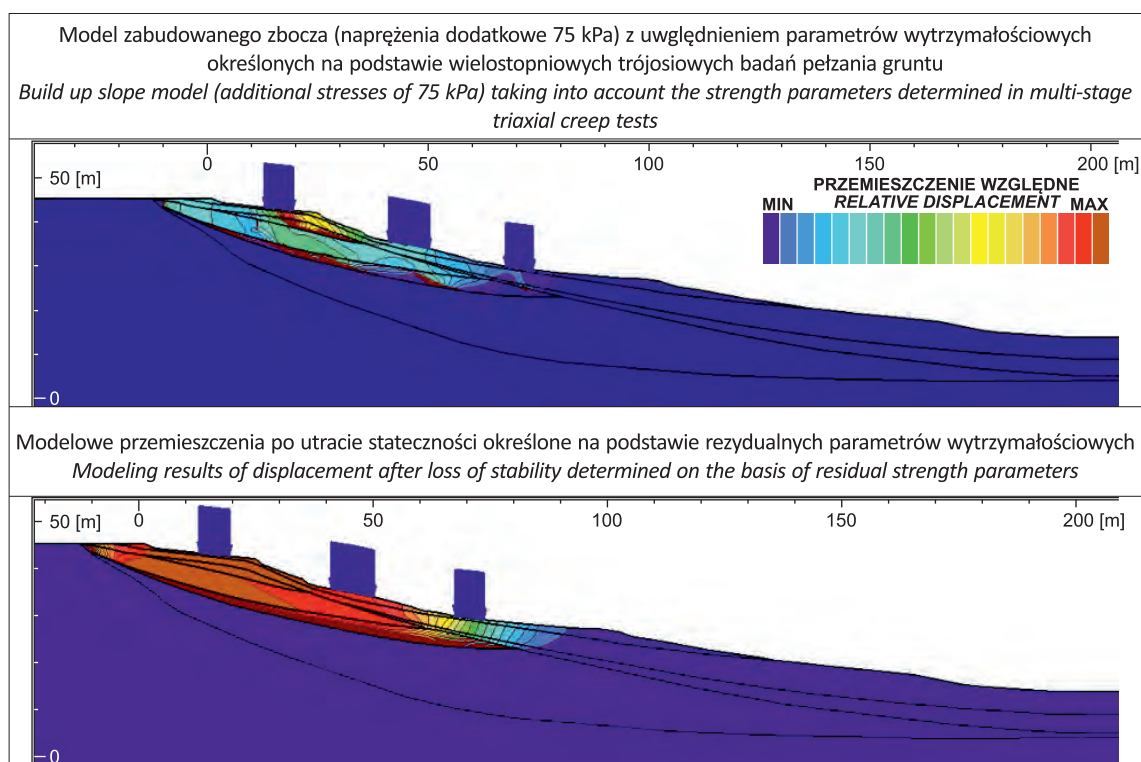
Od czasów Terzaghie'go w mechanice gruntów przyjmuje się, że największym wrogiem stateczności zboczy jest woda (Mizerski, Graniczny, 2017; Zabuski, 2022) – zarówno powierzchniowa (w tym opadowa), jak i podziemna oraz relacje hydrauliczne między nimi. Rozwój procesów grawitacyjnych jest warunkowany zmniejszeniem tarcia między ziarnami gruntów niespoistych, uplastycznianiem gruntów spoistych, zwiększaniem ciężaru własnego gruntu na skutek przyjmowania wód opadowych i roztopowych, działaniem ciśnienia sphywowego na szkielet gruntowy, jak również intensyfikacją procesów wietrzeniowych zarówno w osadach zliptyfikowanych, jak i niezliptyfikowanych.

Numeryczny model rzeźby terenu wzgórza Chełm (ryc. 4) ukazuje najważniejsze kierunki spływu wód opadowych i miejsca ich akumulacji. Obszary starych nisz osuwiskowych na tym wzgórzu są szczególnie narażone na skutki infiltracji wód opadowych, dlatego jednym z pierwszych zabiegów było ich odwodnienie. W ten sposób starano się ograniczyć infiltrację wody i ograniczyć jej dopływ do stref potencjalnych poślizgów na uplastycz-



Ryc. 4. Numeryczny model rzeźby terenu wzgórza Chełm z zaznaczonymi kierunkami spływu wód powierzchniowych i miejscami akumulacji wód opadowych – zakładając wysokość opadów = 10 cm (symulacja numeryczna za pomocą programu *Scalgo*)

Fig. 4. Digital elevation model (DEM) of Chełm Hill, showing surface water flow directions and zones of rainwater accumulation for a rainfall event of approx. 10 cm (numerical simulation results by *Scalgo*)



Ryc. 5. Wyniki obliczeń stateczności płn.-wsch. zbocza wzgórza Chełm w postaci pola względnych przemieszczeń wybranego przekroju obliczeniowego

Fig. 5. Results of stability calculations of the north-eastern slope of Chełm Hill, shown as a field of relative displacements for the selected cross-section

nionych przewarstwieniach gruntów spoistych lub wzdłuż starych powierzchni poślizgu. Zamierzono to osiągnąć poprzez układanie drenaży, prowadzące m.in. do obniżenia poziomu zwierciadła wód gruntowych i zredukowania ciśnienia porowego. Zastosowano systemy odwadniania powierzchniowego i podpowierzchniowego, ponieważ opady deszczu stanowiły najistotniejszy czynnik przyspieszający pełzanie. Kluczową kwestią są działania prowadzące do zmniejszenia dynamiki pełzania. Szczególnie ważne jest zapobieganie procesowi przekształcania się pełzania o malejącej lub quasistalnej prędkości w pełzanie przyspieszające, prowadzące do reaktywacji osuwisk. Wykonano rowy odwadniające i – tam, gdzie było to możliwe – drewny w postaci rowów wypełnionych materiałem filtracyjnym, mające na celu obniżenie poziomu wód gruntowych w koluwium – przykładem jest odwadnianie w rejonie muru oporowego (ryc. 3C).

Kolejnym działaniem na rzecz poprawy stateczności zbocza wzgórza Chełm, bardziej radykalnym, była modyfikacja jego profilu, polegająca na łagodzeniu nachylenia najbardziej stromych fragmentów zbocza i wzmocnieniu jego podstawy, co umożliwiło redukcję oddziaływania stycznej składowej siły ciężkości i zapobiegło dalszym niekorzystnym deformacjom (zmniejszenie możliwości wypierania materiału z podnóża stoku). Zabiegi te zmieniły przestrzenny rozkład potencjału energii grawitacyjnej na zboczu i przyczyniły się do poprawy jego stateczności. Na górnej skarpi wzgórza, w jej środkowej części, najbardziej narażonej na osunięcie, zainstalowano mur oporowy z żelbetu wraz z systemem odwadniającym masyw koluwium, a fragment drogi najbardziej podatny na deformacje zabezpieczono za pomocą pali wierconych o średnicy 0,8 m i długości 20 m, rozmieszczonych co 2–3 m. System ten miał na celu przecięcie powierzchni poślizgu i stabilizację

sił ścinających. Jest to sprawdzone rozwiązanie geotechniczne, ale w przeciwieństwie do wcześniej opisanych jest ono zdecydowanie droższe, a jego wykonanie bardziej skomplikowane. W analizowanym przypadku poniesienie kosztów było konieczne i uzasadnione przez relatywnie dużą wartość chronionych budynków mieszkalnych i infrastruktury.

Integralnym elementem programu zabezpieczeń był monitoring przemieszczeń osiowych (inklinometry) i hydrogeologiczny (piezometry). W górnej części stoku zainstalowano kolumny inklinometryczne (I-1, I-2), które umożliwiały rejestrację przemieszczeń wgłębnych w czasie. Dane te zestawiono z wynikami obserwacji geodezyjnych punktów powierzchniowych, odczytami piezometrycznymi i rejestracją opadów atmosferycznych. Taki zestaw pomiarów pozwolił na ścisłą korelację aktywności osuwiska z epizodami intensywnych opadów, a także stanowił podstawę kalibracji rozwijanych modeli numerycznych i oceny skuteczności wdrożonych działań.

Poddano analizie satelitarne obrazy radarowe z misji *Sentinel-1* (Przyłucka i in., 2025). *Sentinel-1* to system satelitów wyposażonych w radar z syntetyczną aperturą (SAR – ang. *Synthetic Aperture Radar*). Radar ten dzięki ruchowi satelity i cyfrowemu przetwarzaniu sygnałów tworzy wirtualny szyk antenowy o wymiarach znacznie przekraczających fizyczny rozmiar rzeczywistej anteny i tym samym osiąga dużo lepszą rozdzielczość. Przeanalizowano dane z okresu od sierpnia 2015 r. do sierpnia 2025 r. Procedurę analizy danych SAR wykonano z wykorzystaniem programu SNAP. Badania te są częścią programu *Copernicus* Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA). W celu obliczenia przemieszczeń pionowych importowano dane radarowe *Sentinel-1* w formacie SLC. Filtracja danych SAR polega na selekcji par obrazów radarowych, które

mają optymalną geometrycznie odległość bazową (*baseline*), co jest kluczowe dla jakości interferogramów i końcowych wyników pomiarów *InSAR* (ang. *Interferometric Synthetic Aperture Radar*). *Baseline* to różnica pozycji satelity między kolejnymi przelotami nad tym samym obszarem. Zbyt duża odległość bazowa obniża koherencję sygnału i dokładność pomiarów, dlatego wybiera się pary obrazów o niewielkiej wartości *baseline*, aby uniknąć dekorelacji geometrycznej. W analizie wykorzystano 102 obrazy *Sentinel-1* (51 par), które następnie poddano kalibracji i korekcji geometrycznej. Na ich podstawie, metodą interferometrii radarowej (*InSAR*) utworzono interferogramy, dokonano filtracji danych i rozwiązywania fazy *unwrapping*. Następnie obliczono przemieszczenia pionowe wzdłuż kierunku LOS (*Line Of Sight*), z uwzględnieniem kąta padania wiązki mikrofalowej. Założono brak ruchów poziomych, co stanowi istotne uproszczenie. Analiza miała charakter testowy – sprawdzano możliwości wykorzystania danych SAR do dokumentowania bardzo powolnych ruchów masowych i zmian tempa pełzania spowodowanego opadami. Wyniki (*InSAR Sentinel-1*) zwizualizowano i opracowano w postaci map deformacji w programie *ArcGIS PRO*. Rozdzielczość przestrzenna wynikowych map przemieszczeń wynosi ok. 20×20 m, natomiast mapy deformacji pionowych w skali roku mają dokładność milimetrową.

WYNIKI BADAŃ

Północno-wschodni stok wzgórza Chełm charakteryzuje się niejednorodnym stanem bezpieczeństwa, który okresowo lokalnie obniża się do stanu równowagi granicznej. W związku z tym wdrożono kompleksowy program monitoringu oraz działań geotechnicznej stabilizacji tego zbocza. Zarówno wyniki pomiarów inklinometrycznych, jak i wizualnych obserwacji terenu potwierdzają, że obecnie zbocze to jest quasistabilne. Na podstawie danych z obserwacji satelitarnych (*InSAR, Sentinel-1*) stwierdzono powolne, lecz stałe roczne tempo deformacji powierzchni terenu.

Każdy z elementów ochrony zbocza pełni określoną rolę w całym systemie – jedne mają ograniczać czynniki inicjujące ruch osadów (np. dopływ wód powodujący m.in. większe uplastycznienie gruntów o małej wytrzymałości), inne neutralizują skutki postępujących deformacji (spękania, nierówności terenu). Kluczowe było powiązanie technologii zabezpieczeń z lokalnymi uwarunkowaniami geologiczno-inżynierskimi (Kaczmarek, Dobak, 2015). Tam, gdzie polepszanie stanu gruntów było niewystarczające, zastosowano konstrukcje wzmacniające, prowadzone tak, by ominąć warstwy koluwiów i oprzeć je na stabilniejszym podłożu. Dzięki temu cały system funkcjonuje zgodnie ze zintegrowaną koncepcją zarządzania ryzykiem osuwiskowym.

Przeprowadzone wstępne obliczenia numeryczne dotyczące niezabudowanego zbocza wzgórza Chełm (z zastosowaniem MES; programu *Plaxis*) wykazały, że stateczność przekroju obliczeniowego jest zadowalająca: $SF > 2$ (Kaczmarek i in., 2017). Na podstawie wyników analizy MES (przeprowadzonej z wykorzystaniem programu *Z_soil*), uwzględniającej dodatkowe obciążenie od budynków (naprężenia w poziomie posadowienia rzędu 75 kPa), stwierdzono, że wskaźnik stateczności wykazuje niewielki zapas bezpieczeństwa $SF \sim 1,3$. Po uwzględnieniu w obliczeniach mniejszej wytrzymałości warstw przy-

powierzchniowych, spowodowanej ich pełzaniem (tab. 1), wartość wskaźnika stateczności zbocza SF wyniosła $\sim 1,1$. Oznacza to stan quasirównowagi, potwierdzony przez wyniki pomiarów inklinometrycznych, rejestrujących powolne deformacje.

Na podstawie wyników modelowania określono geometrię potencjalnych powierzchni poślizgu. W analizowanych wariantach wyniki obliczeń najczęściej wskazywały na translacyjno-rotacyjne poślizgi w strefie warstw IIIb–IIIc (2–6 m głębokości), co jest zgodne z obserwowanym inklinometrycznie znaczącym przemieszczeniem na głębokości 2,4 m. Wyliczając opór przedniej powierzchni ścięcia (wartość wytrzymałości rezydualnej) ustalono, że w procesie ścinania przemieszczenie mas gruntowych będzie sięgać aż do spągu warstwy IIIb (8–10 m), taki scenariusz potwierdza reaktywacja osuwiska, jaka nastąpiła w 2010 r.

Symulacje numeryczne wskazują, że na skutek dodatkowych obciążeń lub intensywnych opadów wartość wskaźnika SF może się zmniejszyć do < 1 , co prowadziłoby do aktywacji gwałtownych ruchów osuwiskowych. Wyniki obliczeń potwierdzają dużą wrażliwość stateczności zbocza wzgórza Chełm na obciążenia zewnętrzne i długotrwałe pełzanie (uwzględniane w modelach w postaci efektu zmian wartości kohezji i kąta tarcia wewnętrznego warstw IIIb i IIIc), a także zasadność zastosowania pali i murów oporowych, które obecnie stabilizują stok na odcinku, gdzie stan jego równowagi jest bliski granicznemu.

W ramach odwodnienia wzgórza Chełm w środkowej części jego stoku wprowadzono pionowe dreny sięgające do ok. 10 m głębokości, które docierają do warstwy IIIa (zwietrzałe i spękane łył stanowiące kompleks zwiększonej przepuszczalności). Zastosowano dreny składające się z perforowanych rur obsypanych żwirem, co umożliwiło wytworzenie odpowiedniego spadku hydraulicznego w wodzie gruntowej w przestrzeniach porowych i spękaniach, a następnie odpływ grawitacyjny.

U podstawy zbocza zainstalowano dodatkowo poziome dreny wachlarzowe, skierowane w stronę kontaktu koluwiów z podłożem skalnym, pełniące rolę odciążającą w strefie przypowierzchniowej. Równocześnie poprawiono odwodnienie powierzchniowe: umocniono rowy przydrożne, uzupełniono przepusty i wyłożono wybrane odcinki wykładzinami, aby ograniczyć infiltrację i niekontrolowane podsiąkanie koluwiów. Efektem tych działań było utrzymanie gruntów w stanie względnie niskiej wilgotności, umożliwiającej zachowanie lub zwiększenie pierwotnej wytrzymałości na ścinanie i powstrzymującej ryzyko podwyższenia ciśnienia wody w porach gruntu. Ze względu na złożoną budowę i zróżnicowaną miąższość koluwiów nie sposób precyzyjnie określić pełnej skali skutków tych oddziaływań. Obserwacje wskazują jednak, że redukcja nasycenia (a tym samym zwiększenie ciśnienia ssania) pozytywnie wpływa na stan naprężenia i w efekcie poprawia stateczność zbocza.

Symulacje numeryczne potwierdziły, że długotrwałe pełzanie, skorelowane z intensywną infiltracją opadów, może w analizowanych sytuacjach obniżyć współczynnik stateczności nawet o $\sim 20\%$. Drenaż nie eliminuje całkowicie ruchów osuwiskowych, lecz istotnie ogranicza jeden z głównych mechanizmów ich aktywizacji w okresach intensywnych opadów atmosferycznych.

Skuteczność przyjętych rozwiązań potwierdzają wyniki monitoringu piezometrycznego. Po zainstalowaniu systemu odwodnienia poziom wód gruntowych zauważalnie

Tab. 1. Fizyczne i wytrzymałościowe parametry warstw geologiczno-inżynierskich wyróżnionych na zboczu wzniesienia Chełm (Dłużewski, 1997; Jaskólski i in., 2013; Kaczyński, 2017 i badania własne)**Table 1.** Physical and strength parameters derived for the specified geological-engineering layers of the slope of the Chełm hill (Dłużewski, 1997; Jaskólski et al., 2013; Kaczyński, 2017 and own research)

Litologia warstw <i>Layer lithology</i>		Nr warstwy <i>Layer No.</i>	Wilgotność nat. <i>Water content</i> w_n [%]	CieŜar objęto- <i>Bulk density</i> γ [kN/m ³]	Efek. kąt tarcia wew. <i>Eff. internal friction angle</i> ϕ' [°]	Efektowna spójność <i>Eff. cohesion</i> c' [kPa]	Moduł Younga ¹ <i>Young's modulus</i> ¹ E [MPa]	Współczynnik Poissona ¹ <i>Poisson's ratio</i> ¹ ν [-]
Grunty zmienione antropogenicznie <i>Anthropogenically disturbed soils</i>	ił z pyłem, piasek gliniasty ^{2,3} <i>clay with silt, clayey sand</i> ^{2,3}	I	36	18,9	9	17	55	0,3
	ił z pyłem i piaskiem ^{2,3} <i>clay with silt and sand</i> ^{2,3}	II	35,5	19,6	10	27,5	25	0,35
Ilasty materiał zwietrzelinowo-koluwialny <i>Clayey weathered and colluvial material</i>	ił i iłolupki ^{2,3} <i>clay and clayey shale</i> ^{2,3}	III d	31	18,7	11	48	30	0,35
	ił i iłolupki (poten. strefa poślizgu II) <i>clay and clayey shale (potential slip zone II)</i>	III c	30	19,2	32,5*	0*	35	0,35
					33,3**	0,6**		
					9,5***	0***		
	ił i iłolupki (poten. strefa poślizgu I) <i>clay and clayey shale (potential slip zone I)</i>	III b	26	19,8	20*	28,4*	40	0,35
					28**	0**		
ił, iłolupki, łupki <i>clay, clayey shale, shale</i>	III a	23	20,2	27,4'	6,4'	45	0,35	
				8***	0***			
Utwory macierz. <i>Bedrock</i>	iłolupki, łupki ^{2,3} <i>clayey shale, shale</i> ^{2,3}	IV	21	20,5	7'	65'	650	0,3
					18''	150''		

¹Dłużewski, 1997; ²Jaskólski i in., 2013; ³Kaczyński, 2017*TRX CU – badania trójosiowego ściskania z konsolidacją i drenażem / *triaxial compression consolidated-drained type*; ** badanie pełzania / *creep tests*; *** wytrzymałość rezydualna / *residual strength*' w osi quasirównoległej do powierzchni osłabienia / *in the axis quasi-parallel to the surface of weakness*'' w osi quasi prostopadłej do powierzchni osłabienia / *in the axis quasi-perpendicular to the surface of weakness*

się obniżył, szczególnie podczas opadów, co świadczy o efektywności zastosowanych zabiegów.

Kolejnym etapem programu stabilizacji obszaru osuwiskowego były powierzchniowe prace ziemne profilujące wybrane części stoku, których celem było zmniejszenie największych lokalnych nachyleń, a tym samym zmiana rozkładu sił grawitacyjnych i ograniczenie stycznej siły składowej sprzyjającej przemieszczeniom koluwium. Nachylenie północno-wschodniego zbocza wzniesienia Chełm miejscami osiągało 30°, zwłaszcza w rejonie dawnych skarpi osuwiska. W ramach prac ziemnych wykonano stopniowanie tych fragmentów zbocza poprzez przycięcie jego górnych partii i wykorzystanie zdjętego materiału do wypełnienia obniżzeń. Wylimitowano w ten sposób ciągłe odcinki stoku, na których kąt nachylenia przekraczał ~18–20°, i uzyskano tarasowe zbocze o łagodniejszym nachyleniu. Przykładem takiej interwencji były prace ziemne zrealizowane w rejonie wtórnej skarpy zlokalizowanej w połowie wysokości stoku, powyżej muru oporowego. Jej nachylenie zmniejszono z ~28° do ~15° poprzez usunięcie ok. 2–3 m gruntu. Pozyskany materiał posłużył do wykonania wału u podstawy zbocza, który w formie zagęszczonego nasypu ziemnego wzmocnił stopę stoku

i zwiększył opór wobec ruchów osuwiskowych. Choć profilowanie wymagało znaczącej ingerencji w rzeźbę i usunięcia części drzew, okazało się rozwiązaniem bardziej oszczędnym w porównaniu z zabiegami wprowadzającymi dodatkowe i często mało skuteczne konstrukcje oporowe. Co istotne, uzyskano też dodatkowe korzyści: odciążono górne partie skarpy, a utworzenie nasypu u podstawy stoku zwiększyło stateczność całego zbocza.

Wyniki monitoringu inklinometrycznego świadczą o tym, że tempo pełzania w profilowanych przekrojach znacząco się zmniejszyło, co potwierdza skuteczność zastosowanych rozwiązań redukcji obciążeń niszczących. Jednak w tych partiach północno-wschodniego zbocza, gdzie z powodów ograniczonego dostępu do terenu (np. praw własności) lub logistycznych profilowanie zbocza nie zostało wykonane, lokalne zjawiska powierzchniowych przemieszczeń gruntu nadal występują i stwarzają realne ryzyko gwałtownej reaktywacji osuwisk.

Zasadniczą funkcję stabilizacyjną osuwiska pełni ściana palowa przy podstawie stoku. Palisadę wykonano w latach 2014–2015, po dużych i nagłych przemieszczeniach infrastruktury drogowej u podnóża osuwiska. Konstrukcja o długości ok. 50 m składa się z pali wierconych o średnicy

0,8 m, zagłębionych na ponad 20 m w stabilne podłoże skalne (warstwa geologiczno-inżynierska IV). Pale rozmieszczono w regularnych odstępach co ok. 2,5 m i zespolono oczepem oraz monolityczną, żelbetową obudową czołową, formując konstrukcję wzmacniającą strefę głębokiej powierzchni poślizgu (~20 m p.p.t.) i tworząc ścianę wspornikową hamującą przemieszczające się powierzchniowo masy koluwium. Zastosowanie tego rozwiązania geotechnicznego spowodowało istotną poprawę stateczności zbocza, a monitoring terenowy potwierdził brak znaczących deformacji wzmacnianego obszaru od momentu jej wykonania. Należy podkreślić, że długoterminowa efektywność konstrukcji była przedmiotem dyskusji – między innymi PIG-PIB sygnalizował ograniczoną możliwość prognozowania trwałości systemu w okresie 25 lat i dłuższym.

Drugim elementem systemu stabilizacji osuwiska jest ściana kaszycowa z prefabrykatów żelbetowych z wypełnieniem żwirowym o wysokości ok. 2 m i długości 30 m. Konstrukcję tę wykonano ok. 2015 r. w środkowej części zbocza, w strefie maksymalnej aktywności jezora osuwiskowego. Zaletą ściany kaszycowej jest jej niewrażliwość na nadmierne odkształcenia, w tym nierównomierne osiadanie, co doskonale sprawdza się w tworzeniu oporowych konstrukcji zabezpieczających tereny powierzchniowych ruchów masowych. Dodatkowo stabilizację głębszych warstw osiągnięto przez zastosowanie wielu krótkich, 9-metrowych pali wierconych. Ściana pełni funkcję bariery geotechnicznej, wprowadzając podział stoku na segmenty górny oraz dolny i stabilizując przemieszczającą się masę koluwalną. Wyniki monitoringu przemieszczeń, prowadzonego od ukończenia konstrukcji, potwierdzają skuteczność działania tej formy stabilizacji.

Konstrukcje oporowe na wzgórzu Chełm poprzez wzmocnienie podstawy zbocza i jego krytycznych segmentów przyczyniają się do zwiększenia współczynnika stateczności i minimalizują prawdopodobieństwo reaktywacji procesów osuwiskowych.

Zważywszy na obserwowane spływanie przypowierzchniowej warstwy gruntów, które może w przyszłości skutkować zwiększeniem oddziaływań na konstrukcje oporowe, zaleca się regularne inspekcje techniczne, szczególnie po intensywnych opadach (Warmuz, Nescieruk, 2019) oraz prowadzenie dalszych obserwacji geodezyj-

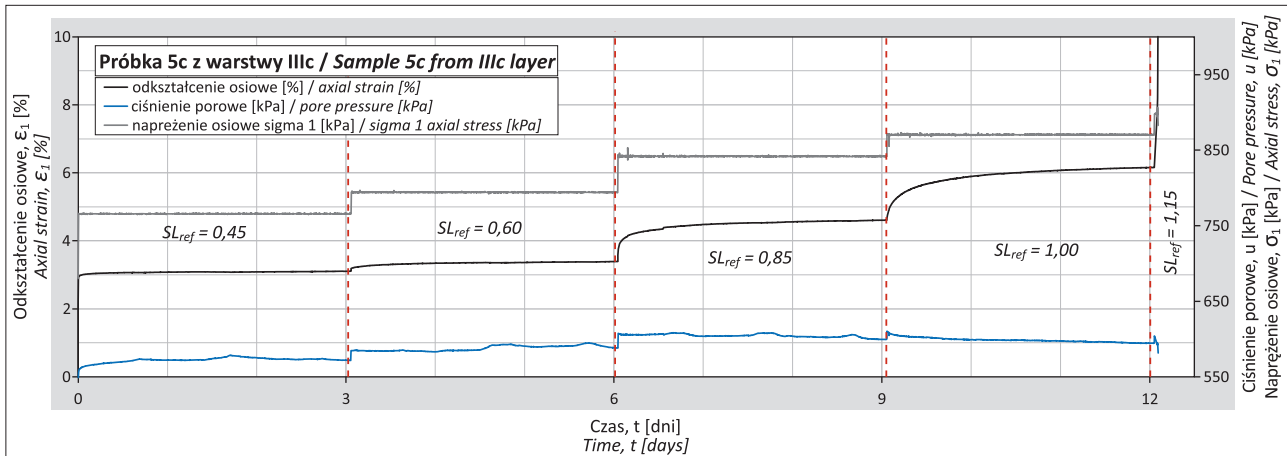
nych celem oceny skuteczności zastosowanych rozwiązań lub też konieczności wykonania uzupełniających konstrukcji wzmacniających, takich jak dodatkowe pale lub kotwy gruntowe.

Ze względu na trudności w osiągnięciu pełnej stabilizacji zbocza, a także na utrzymujące się procesy pełzania, na wzgórzu Chełm wdrożono od 2016 r. zintegrowany system monitoringu geodynamicznego. Obejmuje on inklinometrię, piezometrię, zastabilizowane punkty GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) i deszczomierz. System tych urządzeń rejestruje przemieszczenia masywu i zmiany warunków wodnych. Kluczowym jego elementem jest inklinometr I-1 w górnej części NE zbocza, w osi przekroju wykorzystanego także do obliczeń wskaźnika stateczności. Pomiary są wykonywane co 6 miesięcy, a także po epizodach intensywnych opadów.

Uzupełniające pomiary GNSS pozwalają śledzić przede wszystkim powierzchniowe pełzanie, natomiast dane piezometryczne i opadowe służą do analiz korelacyjnych i kalibracji modeli numerycznych. Zarejestrowane prędkości przemieszczeń wykorzystano m.in. do wyznaczenia parametru pełzania m (Singh, Mitchell, 1968; Kaczmarek i in., 2021), na podstawie którego można prognozować czas do awarii w warunkach długotrwałego obciążenia. Wyniki potwierdzają zgodność zachowania koluwium w terenie z parametrami reologicznymi uzyskanymi w laboratorium – powolne przemieszczenia pełzaniowe mogą mieć charakter spowalniającego, quasistałego lub przyspieszającego – aż do zniszczenia gruntu (ryc. 6).

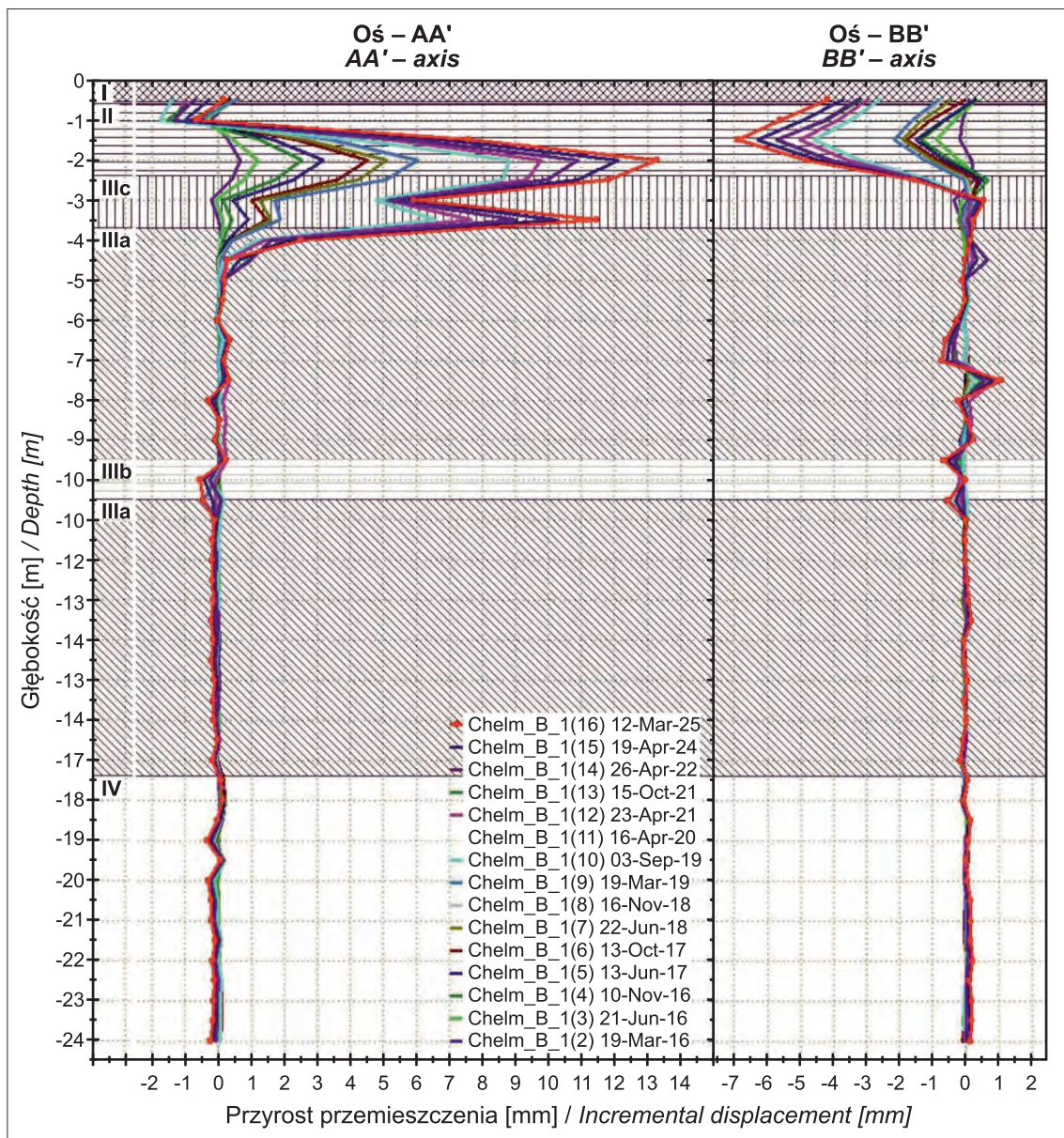
Dane monitoringowe wskazują na dwa główne możliwe scenariusze pełzania: pełzanie zwalniające (związane z częściowym wzmacnianiem gruntu) albo przyspieszające (które może poprzedzać nagłe ruchy reaktywujące osuwisko). Oba mechanizmy są zgodne z teorią pełzania i obserwacjami z innych obszarów. Okresowo stała prędkość pełzania przekształca się zazwyczaj w któryś z opisanych wariantów.

Krzywe przemieszczeń w inklinometrze I-1 (ryc. 7) dokumentują lokalizację aktywnych stref przemieszczeń, szczególnie w obrębie warstw IIIa–IIIc. Na przykład w latach 2017–2018 na głębokości 2,5 m nastąpiło skumulowane przemieszczenie o 3 mm, podczas gdy w 2016 r. (przed pełnym wdrożeniem zabezpieczeń) o ok. 15 mm. Dane te wskazują na wyraźne spowolnienie ruchów dzięki odwodnieniu



Ryc. 6. Wybrane wyniki wieloetapowych badań symulujących proces pełzania ilastych gruntów zwietrzelinowo-koluwalnych na zboczu wzgórza Chełm: SL_{ref} – stosunek naprężenia w badaniu pełzania do referencyjnej wytrzymałości na ścinanie

Fig. 6. Selected results of multistage tests simulating the creep process in soils from clayey weathered–colluvial layers of the Chełm Hill slope: SL_{ref} – ratio of stress in creep testing to reference shear strength



Ryc. 7. Krzywe przyrostu przemieszczenia gruntu wzdłuż profilu głębokościowego inklinometru I-1 na wzgórzu Chełm (wg Nescieruka i in., 2025)

Fig. 7. Curves of the slope incremental displacement along the depth profile axis of inclinometer I-1 on Chełm Hill (after Nescieruk et al., 2025)

i konstrukcjom oporowym. Jednocześnie są rejestrowane wahania sezonowe – niewielkie fluktuacje prędkości przemieszczeń gruntu powiązane z epizodami opadów, które ustępują w okresach suchych (Nescieruk i in., 2025).

Zastosowany system monitoringu pełni więc nie tylko funkcję dokumentacyjną, ale jest też aktywnym narzędziem zarządzania ryzykiem. Umożliwia ocenę skuteczności działań stabilizacyjnych, kalibrację modeli numerycznych i bieżącą kontrolę zagrożeń. Połączenie metod fizycznej stabilizacji (odwodnienie, profilowanie, konstrukcje oporowe) z ciągłą obserwacją stanowi dobrą praktykę w przeciwdziałaniu zagrożeniom osuwiskowym.

Wykorzystując dane satelitarne *Sentinel-1*, opracowano mapę przemieszczeń pionowych skumulowanych w okresie od sierpnia 2015 r. do sierpnia 2025 r. (ryc. 8) i mapę prędkości przemieszczenia pionowego (mm/rok) w okresie 12 miesięcy (08.2024–08.2025; ryc. 9).

W wyniku opracowania par obrazów o rozdzielczości pikseli 5×20 m i późniejszego sumowania wyników przemieszczeń poszczególnych par w tak długim okresie niezbędne było obniżenie rozdzielczości wynikające z przesunięć względnych obrazowań. Z tego powodu zredukowano rozdzielczość wyników map do 40×40 m i przeprowadzono sumowanie dla centralnego punktu obszaru, który posłużył do wyekstrahowania wielkości przemieszczeń z map przemieszczeń poszczególnych par obrazów. Na ryc. 10 zaprezentowano wybrane punkty charakterystyczne wraz z wykresami przemieszczenia w czasie. Na podstawie mapy przemieszczeń można wnioskować, że badany teren jest wciąż aktywny geodynamicznie i zachodzą na nim bardzo powolne powierzchniowe ruchy masowe. Teza ta jest spójna z obrazem uzyskanym z pomiarów inklinometrycznych, w których wciąż są rejestrowane przemieszczenia w przypowierzchniowej warstwie profilu. Prędkości przemieszczeń w okresie 12 miesięcy (08.2024–08.2025)

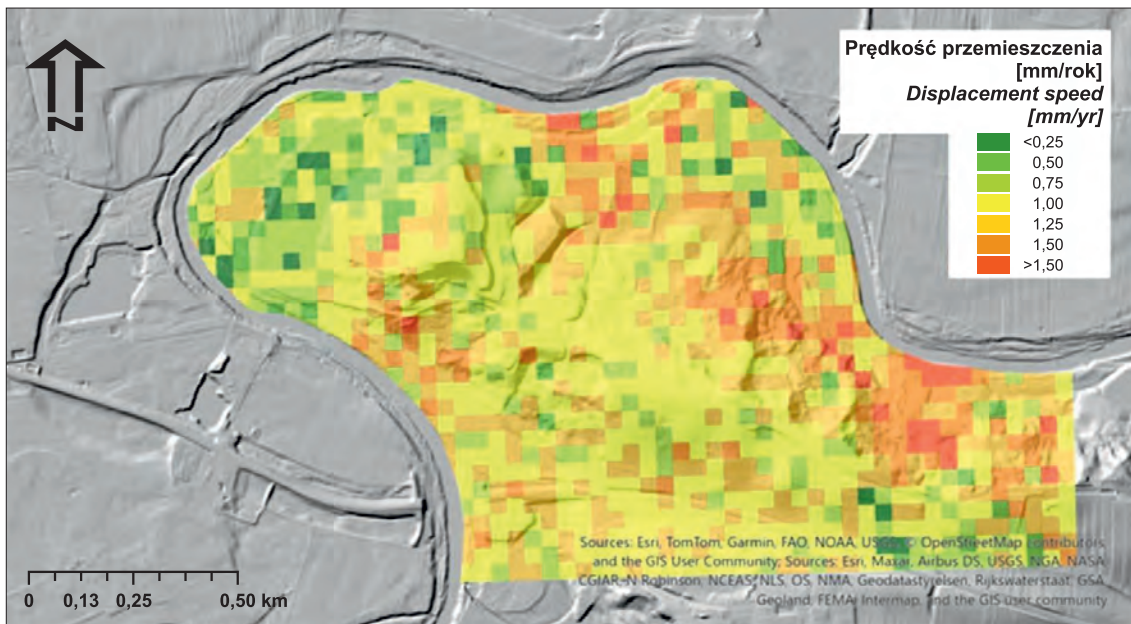
dochodzą do 1,5 mm na rok, co pozwala je wiązać z bardzo powolnym procesem, jakim jest pełzanie. Maksymalne przemieszczenia pionowe i ich maksymalne prędkości są rejestrowane na obszarach osuwisk sklasyfikowanych w bazie SOPO. Natomiast na obszarach o niewielkich spadkach terenu występują najmniejsze przemieszczenia gruntu. W obszarach przykorytowych rzeki Raby obserwuje się różnicowanie prędkości przemieszczeń na brzegach erodowanych (1–1,5 mm/rok) i obszarach akumulacji (0,5–1 mm/rok). Warto zwrócić uwagę, że rejestrowane prędkości przemieszczeń są porównywalne z szacowaną dokładnością pomiarową techniki *InSAR*, co sprawia, że ich interpretacja wymaga szczególnej ostrożności. Istotnego znaczenia nabierają w związku z tym analizy długoterminowych trendów deformacji, ponieważ pojedyncze odchylenia roczne mogą pozostawać w granicach błędu i dopiero

obserwacja wieloletnich zmian kierunkowych umożliwia wiarygodne wyróżnianie rzeczywistych procesów geodynamicznych.

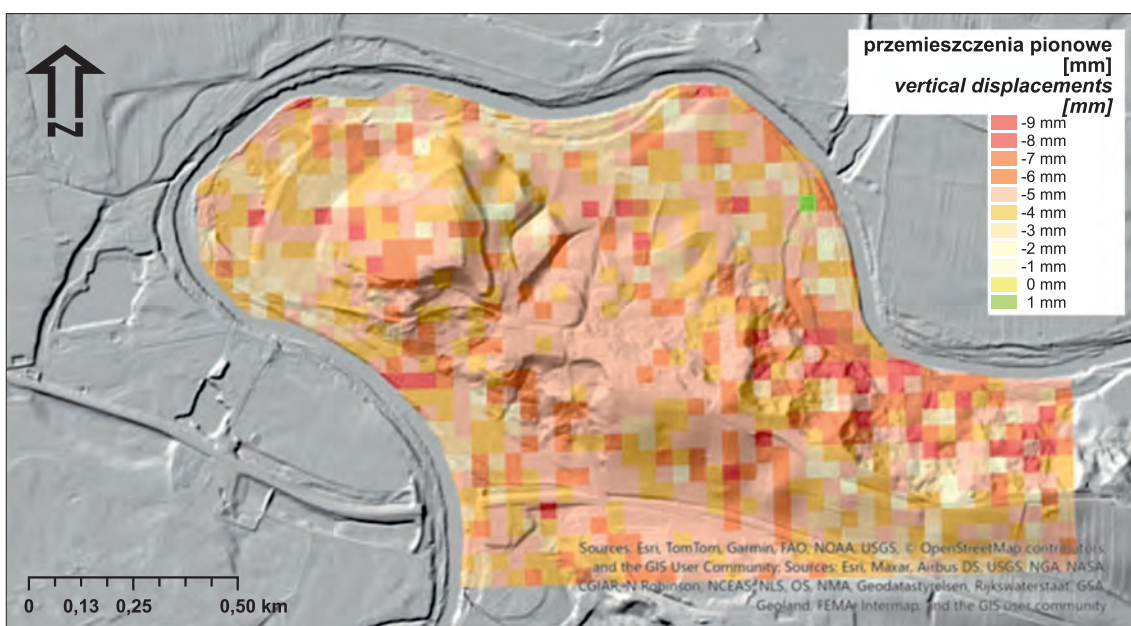
Analiza *InSAR* jest obarczona ograniczeniami:

- 1) brak możliwości obserwacji składowych poziomych (LOS projekcja);
- 2) dekorelacja fazy spowodowana roślinnością krzewiastą i złożoną rzeźbą (koherencja $<0,4$ w 20% punktów);
- 3) niepewność małych przemieszczeń ($\pm 0,5$ – $1,5$ mm/rok) wynikająca z błędów *unwrappingu* i *baseline* (>150 m w 40% par obrazów).

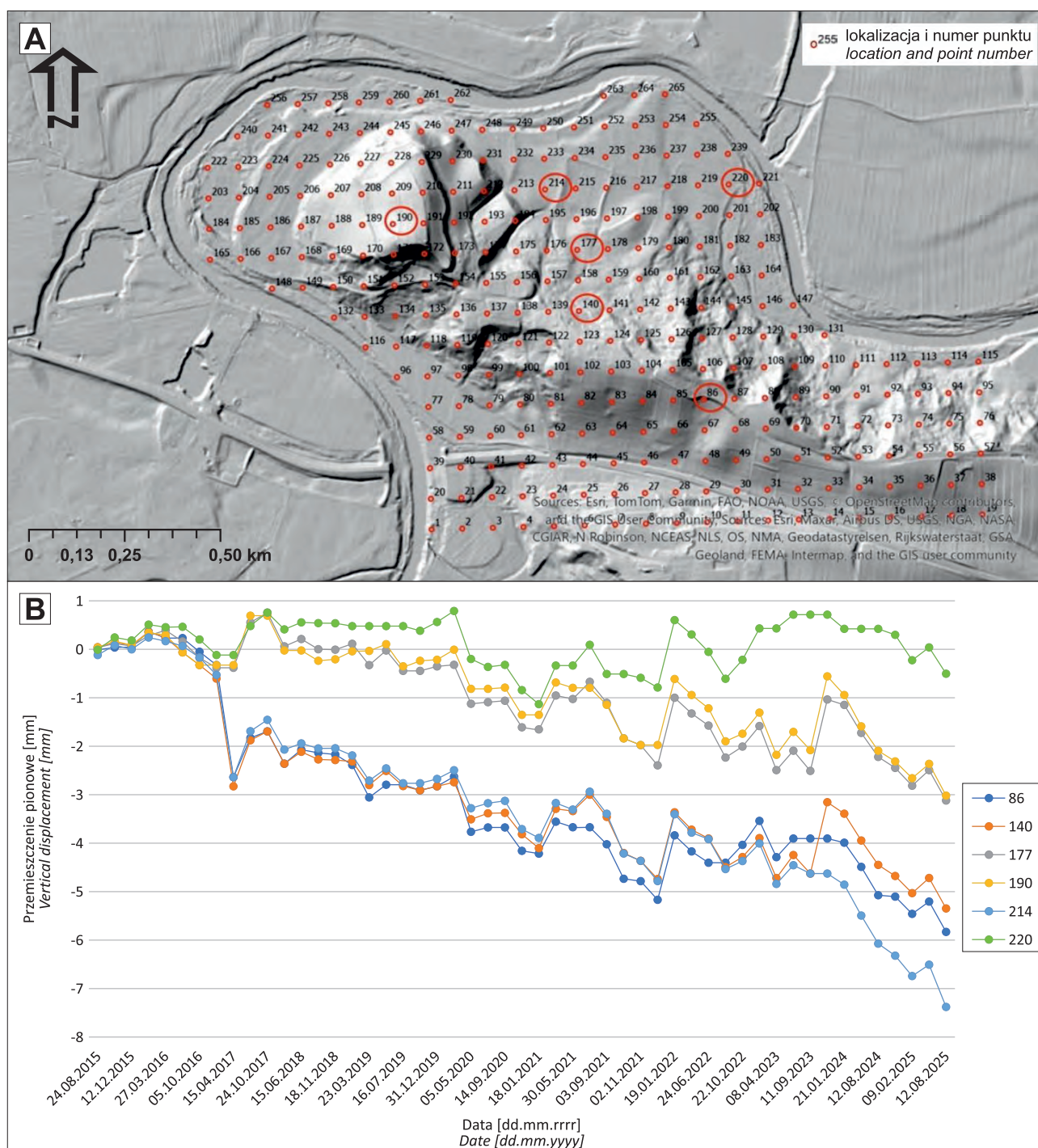
Wzgórze Chełm porastają trawy i krzewy – biorąc pod uwagę takie pokrycie terenu, szacowana dokładność pomiarów przemieszczeń gruntu wynosi ± 1 mm/rok, w strefach o wysokiej koherencji $>0,6$ mm/rok, a na stokach pogarsza się do $\pm 1,5$ mm/rok.



Ryc. 8. Przemieszczenia pionowe na podstawie analizy danych SAR *Sentinel 1* w okresie od 08.2015 do 08.2025 r.
Fig. 8. Vertical displacements based on the analysis of *Sentinel 1* SAR data in the time period from 08.2015 to 08.2025



Ryc. 9. Przemieszczenia pionowe na podstawie analizy danych SAR *Sentinel 1* w okresie od 08.2024 do 08.2025 r.
Fig. 9. Vertical displacements based on the analysis of *Sentinel 1* SAR data in the time period from 08.2024 to 08.2025



Ryc. 10. Przeszyczenia gruntu w wybranych punktach osuwiska na wzgórz Chełm: **A** – szkic lokalizacji na podkładzie numerycznego modelu terenu; **B** – wykresy przeszczeń pionowych w czasie
Fig. 10. Soil displacements at selected points on the landslide on Chełm Hill: **A** – location sketch based on the digital terrain model; **B** – graphs of vertical displacements over time

PODSUMOWANIE

Badania i stabilizacja aktywnego obszaru osuwiskowego na wzgórz Chełm wykazały, że teren ten cechuje się skomplikowanymi warunkami geologiczno-inżynierskimi. Pod grubą pokrywą ilastych gruntów koluwalno-zwietrzelinowych, na których są posadowione liczne budynki mieszkalne, występują tu uwarstwione, neogeńskie łupki ilaste (warstwy chodenickie). Skąły te odznaczają się słabą przepuszczalnością, co sprzyja akumulacji wody opadowej

w strefie przypowierzchniowej. Identyfikacja głównych czynników destabilizujących wskazała na powolne pelzanie zwietrzelinowych utworów ilastych (jak również pylastych), intensyfikowane przez długoletnie procesy denudacyjne i specyficzne cechy strukturalne podłoża. Okresy wzmózonych opadów i infiltracji (np. ulewy i deszcze nawalne w 2010 r.) doprowadziły do reaktywacji ruchów masowych – w obszarze rozpoznania zaobserwowano uformowanie się głównej powierzchni pošlizgu na gębokości ok. 20 m. Istotnym czynnikiem osłabiającym

stateczność zbocza wzgórza Chełm jest także uwarstwienie i spękanie łupków ilastych, które wyznacza podatne płaszczyny poślizgu w masywie gruntowo-skalnym.

W celu zwiększenia stabilności zbocza zastosowano wielokierunkowe działania prewencyjno-ochronne (prowadzone głównie przez PIG-PIB). Przede wszystkim wdrożono system odwodnienia (drenażu) terenu, ograniczający infiltrację wód opadowych i redukujący ciśnienie porowe wody w gruncie. Przeprowadzono także profilowanie (zmniejszenie nachylenia) najbardziej stromych partii osuwiska i wykonano konstrukcje oporowe w newralgicznych miejscach. Zaprojektowano m.in. głębokie pale żelbetowe o średnicy ~80 cm, sięgające poniżej strefy poślizgu (ponad 20 m), rozmieszczone co 2–3 m wzdłuż zagrożonego odcinka. Rozwiązanie to uznano za kluczowe dla zatrzymania procesu osuwiskowego. Ponadto wprowadzono monitoring geotechniczny stoku, obejmujący pomiary przemieszczeń (np. regularne odczyty inklinometrów), co umożliwiła bieżącą ocenę aktywności osuwiska i wczesne wykrywanie ewentualnych przyspieszeń ruchu.

Uzupełnieniem klasycznych metod rozpoznania i monitoringu były obserwacje satelitarne *Sentinel-1*, wykorzystujące techniki interferometrii radarowej (*InSAR*). Analizy te pozwoliły na określenie tempa i przestrzennego zróżnicowania przemieszczeń w dłuższym horyzoncie czasowym, obejmującym lata 2015–2025. Zdalne dane satelitarne potwierdziły wyniki pomiarów inklinometrycznych i geodezyjnych, wskazując na utrzymywanie się wolnych, sezonowych przemieszczeń w górnej części zbocza oraz ich częściowe ograniczenie po wdrożeniu zabezpieczeń inżynierskich. Integracja monitoringu naziemnego i obserwacji satelitarnych dostarczyła pełniejszy obraz dynamiki osuwiska, a także zwiększyła wiarygodność prognoz dotyczących jego dalszej aktywności.

W artykule opisano wyniki wieloletnich obserwacji osuwiska na wzgórzu Chełm, przy czym wyniki monitoringu w ostatnim 5-leciu po raz pierwszy zostały kompleksowo przeanalizowane pod kątem mechanizmu i oceny procesu pełzania. W celu ograniczenia aktywności osuwiska zastosowano działania inżynierskie, obejmujące odwodnienie powierzchniowe i wglębne, wzniesienie murów oporowych, wyprofilowanie skarp i systematyczny monitoring geotechniczny. Podjęte prace stabilizacyjne nie wyeliminowały całkowicie ruchów pełzaniowych, lecz istotnie zmniejszyły tempo deformacji i umożliwiły lepszą ochronę zabudowy. Wzgórze Chełm jest przykładem złożonej interakcji procesów geodynamicznych w warunkach niejednorodnej budowy geologicznej i potwierdza konieczność prowadzenia długoterminowego monitoringu oraz utrzymania zabezpieczeń geotechnicznych.

Modelowanie numeryczne wykazało wartości wskaźnika stateczności stoku (SF) wzgórza Chełm w zakresie 1,1–1,3, co oznacza mały zapas bezpieczeństwa. Symulacje wskazują, że wprowadzenie na skarpe obciążeń od obiektów budowlanych skutkuje obniżeniem wartości wskaźnika stateczności o ok. 25 %. Powoduje to także, jak pokazuje geomonitoring, zwiększenie przemieszczeń, co jest zgodne z obserwowanym wpływem działalności antropogenicznej. Wyniki badań ukazują korzyści wynikające ze zintegrowanego podejścia do ochrony przeciwosuwiskowej: trwała stabilizacja wymaga jednoczesnego zastosowania adekwatnych zabezpieczeń inżynierskich oraz stałego monitoringu. Tylko kompleksowa strategia, łącząca zabiegi stabilizacyjne z ciągłym nadzorem geologicznym

no-inżynierskim oraz geotechnicznym, zapewnia skuteczne i długoterminowe zarządzanie ryzykiem osuwiskowym na wzgórzu Chełm.

Pragniemy serdecznie podziękować Recenzentom za wnikliwą analizę pracy, cenne uwagi oraz konstruktywne sugestie, które przyczyniły się do podniesienia jakości i merytorycznej wartości opracowania.

LITERATURA

- DŁUŻEWSKI J., HYDRO-GEO 1997 – Program elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
- EUROKOD 7 – PN-EN 1997-1: 2008. European Committee for Standardization 2014 – DIN EN 1997-1 Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Brussels: CEN.
- GRIFFITHS D.V., LANE P.A. 1999 – Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49 (3): 387–403.
- JASKÓLSKI Z., KOS J., FORYS M., SZYMONIK L., BAKAJ M. 2013 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zadania pn.: Stabilizacja osuwiska wraz z remontem drogi – działka nr 174/1 w miejscowości Chełm w km 2+740 – 2+940. Przeds. Geol. S.A., Kraków, Arch. CAG PIG, Warszawa, nr inw.1080/2014.
- KACZMAREK Ł., DOBAK P. 2015 – Stability conditions of the Vistula Valley attained by a multivariate approach – a case study from the Warsaw Southern Ring Road. *Geologos*, 21 (4): 249–260.
- KACZMAREK Ł., DOBAK P., KASPRZAK A., POPIELSKI P., NESCIERUK P., KOS J. 2017 – Wybrane metody analiz wytrzymałości gruntów i stateczności zbocza na przykładzie Wzgórza Chełm przy granicy nasunięcia karpackiego. [W:] Bzówka J., Lupieżowiec M. (red.), *Analizy i doświadczenia w geoinżynierii*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice: 325–336.
- KACZMAREK Ł., DOBAK P., SZCZEPAŃSKI T., KIELBASIŃSKI K. 2021 – Triaxial creep tests of glaciotechnically disturbed stiff clay – structural, strength, and slope stability aspects. *Open Geosciences*, 13 (1): 1118–1138.
- KACZMAREK Ł., KIELBASIŃSKI K., DOBAK P., NESCIERUK P. w druku – Geotechnical protection of an active landslide in relation to geological-engineering conditions: an example from the Cracow area (border zone of the Western Carpathians and Podkarpacie). *Proc. 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vienna 2026.
- KACZYŃSKI R. 2017 – Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- LEROUEIL S., PICARELLI L. 2001 – Natural slopes and cuts: Movement and failure mechanisms. *Geotechnique*, 51 (2): 197–215.
- MIZERSKI W., GRANICZNY M. 2017 – *Geozagrożenia*. PWN, Warszawa.
- MROZEK T., POLI S., STERLACCHINI S., ZABUSKI L. 2004 – Landslide susceptibility assessment: a case study from Beskid Niski Mts., Carpathians, Poland. *Polish Geological Institute Special Papers*, 15: 13–18.
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WARMUZ B., KOS J., DACKA J. 2025 – Raporty z prac monitoringowych na osuwisku Chełm k. Bochni przeprowadzone w latach 2016–2025; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- POTTS D.M., ZDRAVKOVIĆ L. 1999 – *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application*. Thomas Telford, London.
- PRZYLUCKA M., PERSKI Z., CISŁO M. 2025 – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski. Badania zmian terenu prowadzone przez PSG na podstawie danych InSAR. *Przegląd Geologiczny*, 73: 631–639.
- SINGH A., MITCHELL J.K. 1968 – General stress-strain time function for soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (1): 21–46.
- SKOCZYŁAS-CISZEWSKA K., BURTAN J. 1954 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, arkusz Bochnia. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- TERZAGHI K. 1925 – *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke.
- WARMUZ B., NESCIERUK P. 2019 – Dynamika przemieszczeń wybranych osuwisk w Karpatach. *Przegląd Geologiczny*, 67 (5): 345–352.
- WARMUZ B., WÓJCIK A. 2010 – Landslide registration card no. 12-01-022-2833; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- ZABUSKI L. 2022 – *Mechanika procesów osuwiskowych – modelowanie, stateczność, stabilizacja*. IBW PAN, Gdańsk.

Praca wpłynęła do redakcji 9.10.2025 r.
Akceptowano do druku 16.12.2025 r.