



Deformacje powierzchni Kopca Wandy w Krakowie w świetle badań geodezyjnych

Rafał Gawalkiewicz¹



Surface deformations of the Wanda Mound in Kraków in the light of geodetic surveys. *Prz. Geol.*, 72: 252–261; doi: 10.7306/2024.11

A b s t r a c t. The Kraków mounds are a group of monumental historic earthen structures, subdued to mass movements, where the dominating type of movements is downhill creep, and in extreme cases, landslide. The subject of the analysis of geometric changes is the Wanda Mound in Kraków. It was formed from less-like soils obtained from the vicinity, with unfavourable physico-mechanical characteristics. Unlike other monumental mounds in Kraków, it has not been correctly secured. It has constantly been subdued to external factors (atmospheric conditions, tourism), and it is subject to continuous uneven deformations. Carried out since 2013, regular geodetic studies have allowed us to define the kinematics, which is a necessary condition for future work on efficient methods of the prevention of mass movements in this type of earthworks. The article presents the results of surveying carried

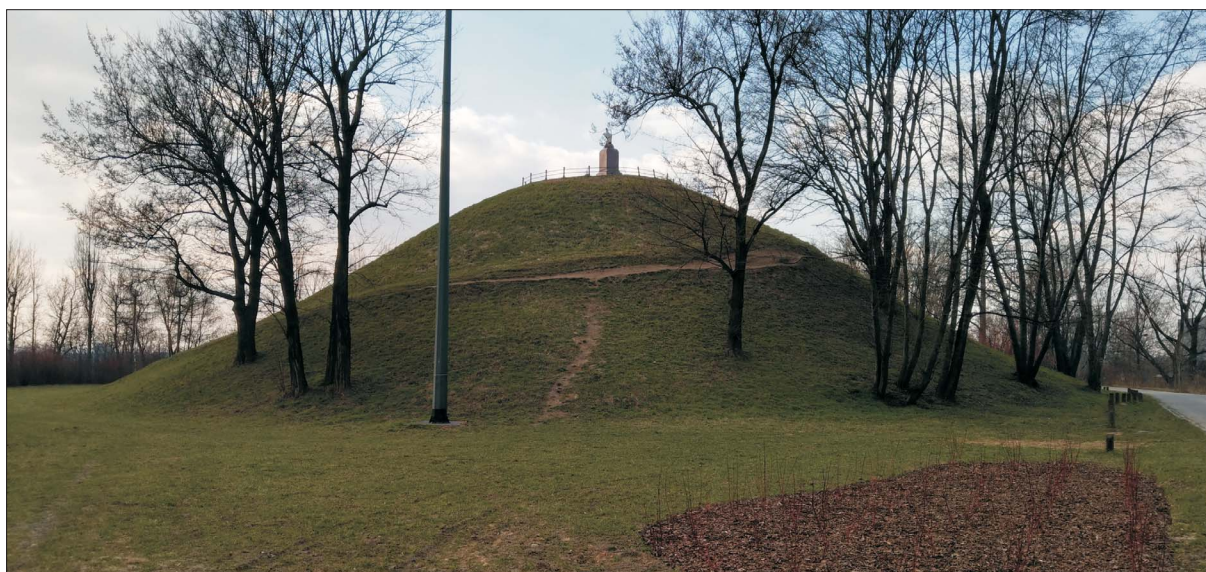
out in 2013–2022, based on the network of control points permanently stabilized on the surface (measurements based on discrete points) and the characteristics of changes in the surface (of significantly increased number of points) based on measurement profiles (measurements with the application of robotic total stations), using mathematical and information tools, allowing us to convert point models into continuous models representing real geometry of an earth monument in the possibly most accurate way.

Keywords: geodetic monitoring of landslide, historic earthworks, inventory of mounds, Wanda Mound in Kraków

Kopiec Wandy (ryc. 1) jest znaczącym, polskim, wczesnośredniowiecznym zabytkiem, datowanym na VII/VIII w. i jednym z czterech kopców ziemnych w Krakowie (Ślupecki, 1999; Lempart, 2012). Od wieków krąży legenda, że ta monumentalna, ziemna budowla o wysokości ok. 14 m jest mogiłą księżniczki Wandy, córki króla Kraka, która rzuciła się do Wisły, ponieważ nie chciała wyjść za Niemca. Dziś kopiec ten pełni funkcję atrakcji turystycznej oraz platformy widokowej, z której można podziwiać panoramę Klasztoru Cystersów w Mogile oraz Nowej Huty

w Krakowie. Budowla ta podlega deformacjom, wyraźnie widocznym zwłaszcza przy krawędzi galeryjki widokowej zbudowanej na szczycie kopca. Zabytek ten jest chętnie odwiedzany przez mieszkańców Krakowa i turystów, dlatego zmiany zachodzące w jego geometrii powinny budzić zainteresowanie lokalnych władz odpowiedzialnych za jego stan techniczny i bezpieczeństwo użytkowników.

Dotychczas Kopiec Wandy, pomimo wielowiekowej historii, uzyskał w gminnej ewidencji zabytków jedynie status zabytku archeologicznego (o nr: C-2/M 5.06.2009 r.



Ryc. 1. Kopiec Wandy w Krakowie. Fot. R. Gawalkiewicz

Fig. 1. Wanda Mound in Kraków. Photo by R. Gawalkiewicz

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30–059 Kraków; gawalkie@agh.edu.pl; ORCID ID: 0000-0003-4261-1697

– wg stanu na 31.05.2023 r.), a nie jak pozostałe kopce zabytku nieruchomego. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest mniejszy zakres jego ochrony. Obiekt ten nie doczekał się rozpoznania archeologicznego, geologicznego, geotechnicznego oraz kompleksowego zabezpieczenia powierzchni przed oddziaływaniem czynników atmosferycznych i szkodliwym oddziaływaniem ruchu turystycznego, mimo że powinien być traktowany jako budowla zabytkowa, a jego konserwacja i ochrona finansowane ze środków Urzędu Miasta Krakowa. Jedynie w okolicy galerijki widokowej szczyt kopca przykryto ochronną warstwą geowłókniny, lecz dziś w wielu miejscach jest ona mocno porwana.

Na podstawie geodezyjnych obserwacji Kopca Wandy w latach 2013–2015 stwierdzono powolne spływanie przypowierzchniowych warstw gruntu i wyraźne przyspieszenie tego procesu w trakcie długotrwałych opadów w sierpniu 2013 r. (Gawałkiewicz, Szafarczyk, 2016, 2017). Dotychczasowy stan wiedzy o kopcu pozwala na wnioskowanie, że jego deformacje zachodzą przede wszystkim w strefie przypowierzchniowej. Jednak brak odpowiedniego rozpoznania geologiczno-inżynierskiego uniemożliwia ocenę zjawisk zachodzących w głębszych partiach kopca i ich wpływ na stabilność budowli. Nie można zatem określić, czy i kiedy wzrost naprężenia przekroczy wytrzymałość na ścinanie i spowoduje osuwisko na zboczu budowli.

W artykule przedstawiono analizę wyników pomiarów powierzchniowych przemieszczeń gruntu na Kopcu Wandy w latach 2013–2022. Ponadto, korzystając z tachimetrii elektronicznej, zilustrowano wyniki geodezyjnej inwentaryzacji geometrii kopca w latach: 2013, 2018, 2022, oraz dokonano analizy zmian geometrycznych mikrorzeźby na podstawie matematycznych modeli powłokowych.

CHARAKTERYSTYKA KOPCA WANDY I STAN JEGO ROZPOZNANIA

Kopce krakowskie, w tym Kopiec Wandy, są usypane z utworów lessopodobnych o bardziej zróżnicowanym uziarnieniu niż lessy właściwe (Maruszczak, 2000; Gawałkiewicz, 2013; Kos, Wódka, 2014; Wójcik i in., 2016). Utwory te w stadium syngenetycznym zostały pozbawione niektórych składników, np. węglanów. Lessy i grunty lessopodobne charakteryzują się dużą wrażliwością na zmiany zawartości w nich wody i mają skłonność do osiadania zapadowego, powierzchniowych ruchów masowych, sufozji, krasu lessowego oraz erozji liniowej i powierzchniowej (Kolano, Cała, 2011). W czasie ulewnych deszczy czy roztopów wiosennych zawodnione lessy i utwory lessopodobne tracą strukturę makroporowatą i ulegają uplastycznieniu, co sprzyja rozwojowi erozji. Rozpoznanie geologiczno-inżynierskie tych gruntów umożliwiłoby ocenę przyczyn i pewnych prawidłowości deformacji ziemnej bryły kopca oraz prognozowanie możliwych zmian.

Kopiec Wandy znajduje się na tarasie nadzalewowym rzek Wisły i Dłubni, przykrytym pokrywą lessów (Bażyński, 1955; Bąk i in., 2006). Lessy te są mało spoiste i makroporowate, składają się głównie z pyłu kwarcowego, węglanów wapnia, skaleni, minerałów ilastych i związków żelaza (Malinowski, 1959; Żaba, 2003).

Nie przeprowadzono dotychczas inwazyjnych badań Kopca Wandy, takich jak wkopy i wiercenia rdzeniowane ani innych badań geologiczno-inżynierskich, które niewątpliwie rozwiązałyby wielowiekową tajemnicę budowli, a tym samym dostarczyłyby szczegółowych informacji i precyzyjnych danych o strukturze obiektu, co jest warunkiem

koniecznym do określenia procesów zachodzących w jego wnętrzu i wpływu tych zjawisk na stabilność kopca.

Dotychczasowe próby zbadania wnętrza budowli nieważyjną metodą georadarową, prowadzone w 2017 r. przez trzy niezależne zespoły badawcze (AGH z Krakowa oraz firmy *GPR24* i *Georadar* z Warszawy), nie udzieliły odpowiedzi na temat jej struktury i istnienia komory grobowej, choć oznaczono kilka anomalnych stref wymagających dalszych badań. Firma *GPR24* wykorzystwała do badań dodatkowo metodę elektrooporową, która także nie dała oczekiwanych rezultatów (https://www.rm24.pl/fakty/polska/news-kopiec-wandy-odkrywa-swoja-tajemnice-sa-wyniki-badan-georada,nId,2330856#crp_state=1). Przyczyną ograniczonych danych, jakie uzyskano z badań georadarowych, może być materiał, z którego usypano kopiec. Według opinii specjalistów wykonujących pomiary georadarowe w 2017 r. niewielki zasięg „pola widzenia” urządzeń radarowych może wynikać z obecności w głębi kopca gruntów o większej spoistości niż w warstwie przypowierzchniowej.

Materiałem wykorzystanym do usypania Kopca Wandy są, jak już wspomniano, grunty lessopodobne. Występują one na całej powierzchni kopca (40 miejsc poboru próbek na głębokości 20–30 cm). Właściwości tych gruntów określił Urbański (2019). Badania granulometryczne przeprowadzono metodą aerometryczną Casagrande’a (Tyszkiewicz i in., 2019) w modyfikacji Prószyńskiego, najbardziej przydatną do oznaczania składu granulometrycznego piasków gliniastych, glin i ilów (Dobrzański, 1958). Według klasyfikacji gruntów przyjętej przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze w 2008 r. przypowierzchniową warstwę kopca uformowano z pyłów ilastych i glin pylasto-ilastych, drobnoziarnistych i spoistych, o niewielkim współczynniku wodoprzepuszczalności i silnym podciąganiu kapilarnym (Wiłun, 2013), których właściwości znacząco zależą od zmian wilgotności (w porze mokrej uplastyczniają się, a w okresach suchych zmniejsza się ich objętość i ulegają osiadanemu zapadowemu) i są klasyfikowane jako grunty wysadzinowe. Zatem taki rodzaj gruntu jest problematycznym budulcem obiektów ziemnych, do których należą kopce, groble, wały itp.

Woda opadowa i roztopowa destrukcyjnie oddziałuje na budowle ziemne uformowane z lessów lub gruntów lessopodobnych, jakie występują w województwie małopolskim, w tym na terenie Krakowa (Gruszczyński, 2014), powodując pogorszenie stateczności ich skarp. Pod wpływem zawilgocenia lub dodatkowego obciążenia grunty te są podatne na odkształcenia (spływanie, zsuw), a w okresach suchych, zwłaszcza w fazie przesychnania, wykazują skłonność do pęknięcia (pęknięcia zanikają, gdy zwiększa się wilgotność gruntu).

Jak dotąd nie wykonano geotechnicznej analizy fizycznych, chemicznych i mechanicznych właściwości gruntu wypełniającego Kopiec Wandy. Od lat obserwuje się natomiast jego deformacje (Gawałkiewicz, Szafarczyk, 2016).

METODYKA REJESTRACJI DEFORMACJI KOPCA WANDY

Podstawowymi geodezyjnymi metodami rejestracji zmian morfologii powierzchni są poligonizacja i niwelacja precyzyjna (pomiary dyskretne), gwarantujące najwyższą możliwą dokładność pozycjonowania punktów fizycznych w przestrzeni 3D. Najprostszym i zarazem najdokładniejszym sposobem wyznaczania zmian geometrycznych powierzchni budowli ziemnych jest monitoring geodezyj-

ny sieci dwufunkcyjnych punktów kontrolnych (punktów poligonowych i reperów), stabilizowanych w warstwie przypowierzchniowej. Zaletą metody jest możliwość precyzyjnego pozycjonowania punktu kontrolnego.

Przemieszczenia punktów kontrolowanych określano metodą różnic współrzędnych (Baryła, Paziewski, 2012) w państwowym systemie odniesień przestrzennych, czyli układzie współrzędnych płaskich PL-2000 oraz wysokościowym – Kronsztadt (już nieobowiązującym na terenie Krakowa). Analizie poddano przemieszczenia poziome, określone metodą poligonizacji (pozycjonowanie poziome punktów z dokładnością $m_{pmax} < \sim \pm 1,7$ mm, $m_{psr} = \sim \pm 1,0$ mm) i przemieszczenia pionowe (pozycjonowanie wysokościowe z dokładnością $mH < \pm 0,3$ mm), wyznaczone za pomocą niwelacji precyzyjnej. Zastosowanie metody poligonizacji (pomiaru kąto- liniowe) umożliwiło wykrycie zmian położenia dowolnego punktu kontrolnego w nawiązaniu do punktów sieci referencyjnej zlokalizowanej poza podstawą kopca (punkty o kontrolowanej stałości, usytuowane na powierzchni masywnych, żelbetowych fundamentów lamp ulicznych), definiujących tzw. orientację zewnętrzną w płaszczyźnie poziomej XY (przemieszczenia poziome punktów W_{XY}). Pomiar przemieszczeń poziomych punktów sieci kontrolnej stabilizowanych trwale na Kopcu Wandy wykonywano z zastosowaniem stacji robotycznej Trimble SPS930 oraz zestawu przyrządów firmy Nestle metodą poligonizacji (pomiaru kąto- liniowe). Wadą tej metody jest zazwyczaj niewielka liczba punktów na powierzchni badanego obszaru lub obiektu, co może czasem ograniczać detekcję stref istotnych zmian i ocenę ryzyka zagrożeń ruchami osuwiskowymi.

Precyzyjne pomiary przemieszczeń pionowych (W_H) wykonano z zastosowaniem niwelatora DiNi03 oraz inwaryjnej łaty kodowej w nawiązaniu do repera głębinowego nr 1016, zlokalizowanego w pobliżu kopca, stanowiącego jeden z punktów niwelacyjnej sieci przemysłowej (pierwotnie sieci Kombinat Metalurgicznego Huty im. Lenina, a później im. Sendzimira). Integracja danych pozyskanych opisanymi metodami umożliwiła uzyskanie odpowiedniej dokładności pozycjonowania przestrzennego punktów kontrolnych. Pomiaru kąto- liniowe wykonywano dwa razy w roku (w porze wiosennej i jesiennej), a wysokościowe trzykrotnie (w porze wiosennej, letniej i jesiennej).

Do kompleksowego opisu geometrii powierzchni stosuje się także technologię satelitarną RTK GPS (*Real Time Kinematic Global Positioning System*) oraz tachimetrię elektroniczną. W tachimetrii elektronicznej najwyższą możliwą dokładność pozycjonowania przestrzennego dowolnego punktu badanego powierzchni uzyskuje się z zastosowaniem stacji robotycznej i sygnału aktywnego

(metoda biegunowa). Technologia ta pozwala zdefiniować pozycję dowolnej liczby punktów, a o stopniu odwzorowania i dokładności finalnego modelu 3D (po obróbce matematyczno-informatycznej) decyduje liczba pozyskanych punktów oraz ich rozkład na badanej powierzchni (schemat geometrii siatki punktów pomiarowych).

W celu wykrycia deformacji powierzchni kopca posłużono się stacją robotyczną SPS930 Trimble i sygnałem aktywnym MT1000. Przyjęta technologia pomiaru, tj. tachimetria elektroniczna z zastosowaniem sygnału aktywnego, ogranicza oddziaływanie czynnika ludzkiego na wyniki obserwacji (wynikające z błędów celowania) i dostarcza dane przestrzenne wolne od wpływu na nie różnych stadiów wegetacji roślin.

Powszechnie stosowane na świecie oprogramowanie środowiska CAD (*AutoCAD, GStarCAD, ZWCAD, BricsCAD* itp.) umożliwia budowę modeli trójwymiarowych na podstawie szkieletu konstrukcyjnego składającego się ze splajnow (gładka krzywa sklejana przechodząca przez ciąg wskazanych na ekranie punktów) oraz elementów wypełniających w postaci płatów Coonsa (powierzchnie będące wynikiem interpolacji, liniowej lub innej, czterech brzegowych parametrycznych krzywych przestrzennych; Gawalkiewicz, 2022). Jest to jeden z coraz popularniejszych wariantów budowania modeli 3D badanych powierzchni lub budowli, które charakteryzują się dużą zmiennością morfologiczną. Procedury te, polegają na zaawansowanych funkcjach aproksymacyjnych (Gawalkiewicz, 2006; Lenda, 2006, 2014), których zadaniem jest zamiana „ograniczonego” modelu punktowego na powierzchniowy (ciągły). Dziś zastosowanie tego typu technik matematyczno-graficznych zyskało popularność w modelowaniu obiektów przemysłowych (chłodni, kominów, zbiorników płynów i gazów, pieców szybowych itp.), obiektów technicznych (czasz radioteleskopów) lub użyteczności publicznej (amfiteatrów) oraz w procesie oceny stopnia ich deformacji. Połączenie splajnow i płatów Coonsa umożliwia opis lokalnych deformacji powierzchni, a także: szybkie konstruowanie gładkiego modelu powłokowego (siatkowego) z uwzględnieniem geodezyjnie zarejestrowanych krawędzi nieciągłości; definiowanie stref odkształceń, także poza punktami modelu dyskretnego na podstawie powtarzalnych pomiarów kontrolnych ułatwia modyfikację modelu w wybranych obszarach na podstawie aktualizacji danych bez konieczności przebudowy całej sieci oraz uzyskiwanie wysokiej dokładności konstrukcji pod warunkiem zachowania względnie regularnego rozkładu punktów pomiaru (Gawalkiewicz, 2022).

Tab. 1. Podstawowe parametry trójwymiarowych modeli Kopca Wandy
Table 1. Basic parameters of the Wanda Mound 3D models

Parametr / <i>Parameter</i>	Model 1	Model 2	Model 3
Data pomiaru / <i>Measurement date</i>	Listopad 2013 r. <i>November 2013</i>	Maj 2018 r. <i>May 2018</i>	Listopad 2022 r. <i>November 2022</i>
Liczba danych / <i>Number of data items</i>	1733	2543	2105
Liczba profili pomiarowych / <i>Number of measurement profiles</i>	38	57	45
Zagęszczenie danych [pkt/m ²] / <i>Data density [points/m²]</i>	1,8	1,3	1,6
Liczba elementów modelu <i>Number of model's elements</i>	Płaty Coonsa / <i>Coons patches</i>	1556	1400
	Regiony / <i>Regions</i>	24	51
Rzędne terenu [m n.p.m.] <i>Terrain ordinates [m a.s.l.]</i>	Maksymalna / <i>Maximum</i>	238,34	238,34
	Minimalna / <i>Minimum</i>	224,99	224,98
Powierzchnia rzeczywista kopca [m ²] / <i>Actual area of the mound [m²]</i>	3225,0	3267,8	3305,7
Powierzchnia galerijki [m ²] / <i>Gallery area [m²]</i>	78,1	78,2	79,5

Przemieszczenia powierzchniowych warstw gruntu na Kopcu Wandy zmierzono w trzech cyklach pomiarowych, tj. w listopadzie 2013 r., w maju 2018 r. oraz listopadzie 2022 r. Na podstawie wyników tych pomiarów utworzono w programie *AutoCAD v.2023* przestrzenne modele kopca, wykorzystując do tego celu profile sygnalizowane w terenie.

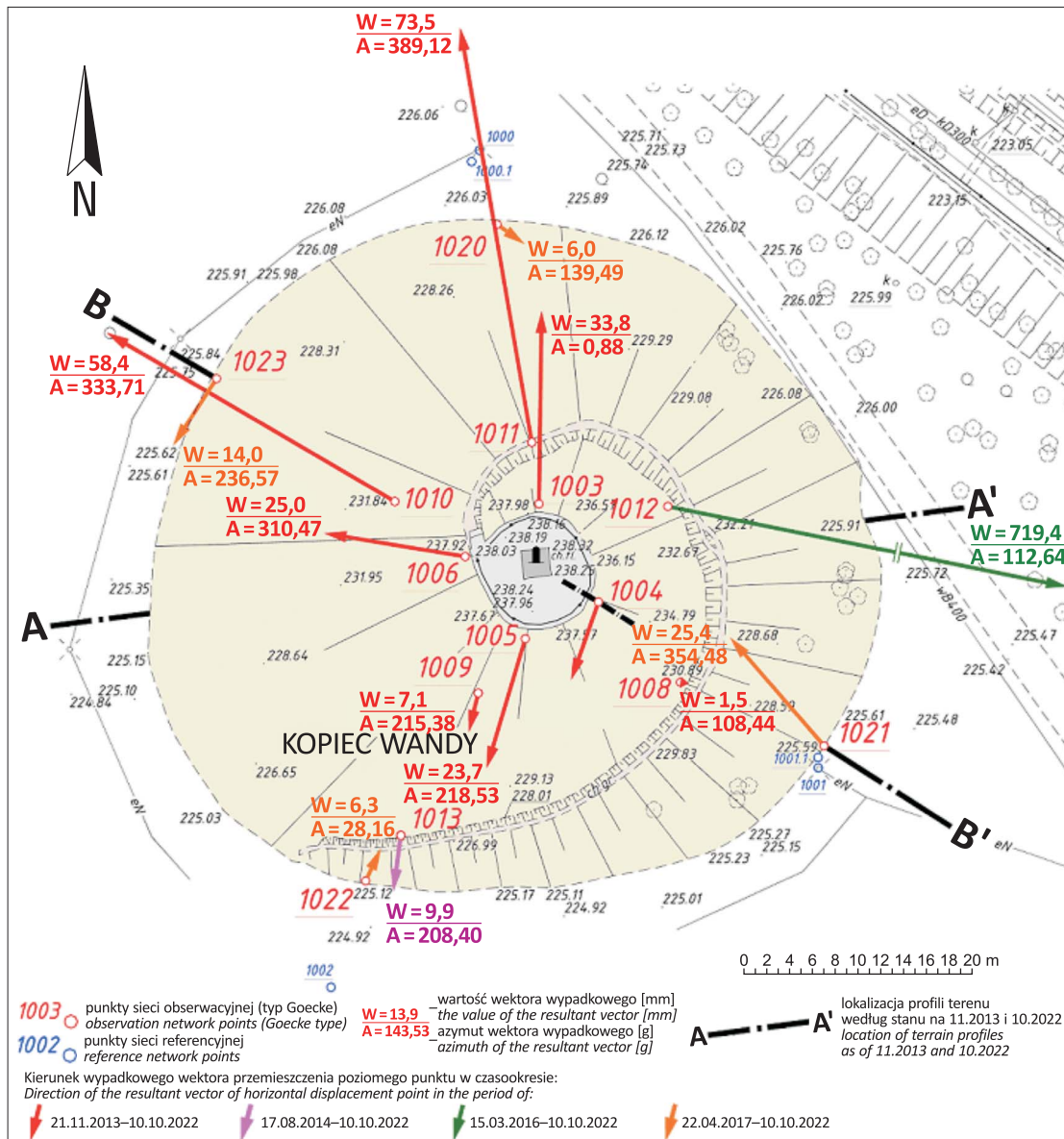
Zadawalająca dokładność przestrzennego pozycjonowania punktów na powierzchni, duża liczebność punktów modelu punktowego (tab. 1) oraz zastosowanie narzędzi informatyczno-matematycznych *AutoCAD* (splajny, płyty Coonsa) sprawiły, że uzyskano precyzyjne modele trójwymiarowe. Dokładność wygenerowania powierzchni modelu w punkcie, określona błędem RMSE (*root mean square error*), nie przekroczyła wartości $RMSE_{3D} = \pm 39,4$ mm (Gawłkiewicz, 2022). Liczba punktów kontrolnych określających jakość budowanych modeli trójwymiarowych n wynosiła od 200 do 232, co stanowiło 9,1–11,5% zbiorów danych. Budując model szkieletowy i stosując powierzchnie bikubiczne w postaci płyt Coonsa (Zieniuk i in.,

2004; Zieniuk, Szerszeń, 2006; Rogozińska-Nieśluchowska, 2009; Kiciak, 2019), uzyskano możliwość tworzenia plastycznych wizualizacji bryły kopca w wielu popularnych programach środowiska *CAD*. W celu zobrazowania procesu deformacji powierzchni kopca w czasie nałożono na siebie modele obrazujące jego kształt w listopadzie 2013 r. i w maju 2018 r. oraz w listopadzie 2013 r. i listopadzie 2022 r.

WYNIKI BADAŃ

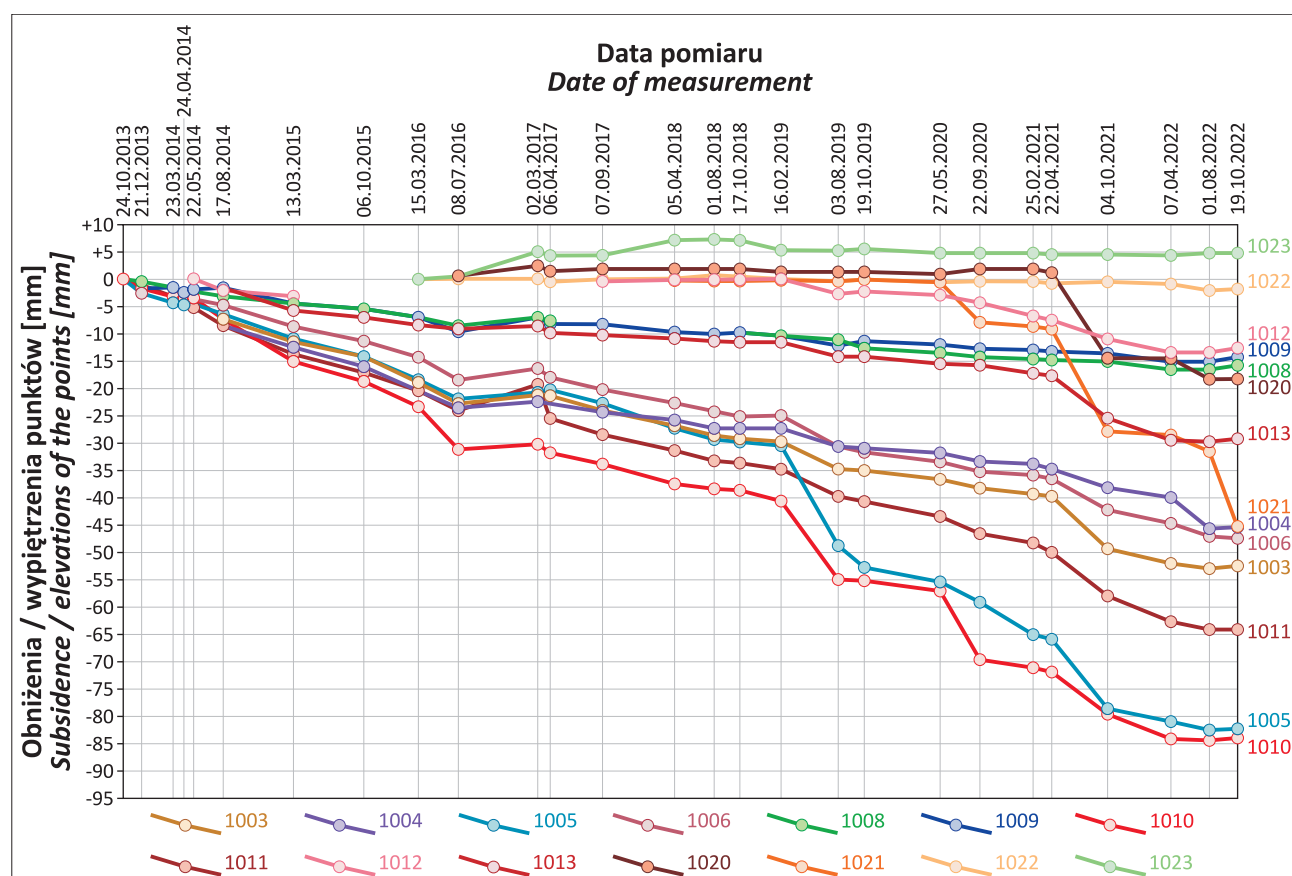
Rozpoznanie deformacji Kopca Wandy na podstawie monitoringu geodezyjnego punktów sieci obserwacyjnej

Wypadkowe wektory poziomych i pionowych przemieszczeń punktów zlokalizowanych na powierzchni Kopca Wandy i u jego podstawy, rejestrowanych od listopada 2013 r. do listopada 2022 r., wskazują na występowanie w różnych częściach tej ziemnej budowli powierzchniowych ruchów masowych (ryc. 2 i 3).



Ryc. 2. Wektory przemieszczeń poziomych W_{xy} punktów sieci kontrolnej stabilizowanych trwale na Kopcu Wandy od 21.11.2013 r. do 10.10.2022 r.

Fig. 2. Vectors of horizontal translocations of W_{xy} points of the control network in the duration of 21.11.2013 – 10.10.2022 permanently stabilized on the Wanda Mound



Ryc. 3. Wykresy obniżenia i wypiętrzeń trwale stabilizowanych punktów sieci kontrolnej na Kopcu Wandy w okresie od 24.10.2013 r. do 19.10.2022 r.

Fig. 3. Charts of subsidence and elevations of the points of the control network, permanently stabilized on the Wanda Mound in 24.10.2013–19.10.2022

Rozmieszczenie odkształceń na powierzchni kopca jest nierównomierne, co wynika głównie z właściwości absorpcyjnych gruntu (nasyconia wodą) oraz jego termiki (zależnej od nasłonecznienia zbocza), które lokalnie kształtują proces przesuszenia lub zawilgocenia gruntu (Gawalkiewicz, Szafarczyk, 2016). Rozkład wilgotności przypowierzchniowej warstwy gruntu na południowym i południowo-wschodnim stoku Kopca Wandy jest podobny niezależnie od pory roku (ryc. 4) i wyraźnie różni się on od rozkładu wilgotności rozpoznanego w innych częściach budowli. Wynika to m.in. z ekspozycji stoków na promieniowanie słoneczne, rodzaju pokrycia terenu roślinnością (zmiennosc gatunkowa i gęstość), stopnia osłonięcia terenu przez drzewostan (zlokalizowany w dolnej strefie kopca w po stronie wschodniej i południowo-wschodniej) oraz lokalnych warunków gruntowo-wodnych. Zależność tę potwierdzają mapy powierzchniowego rozkładu wilgotności objętościowej (ryc. 4), reprezentatywne dla warunków letnich i zimowych, sporządzone na podstawie wskazań wilgotnościomierza TDR350 *Spectrum FieldScout* (rozdzielczość – 0,1% VWC; User Guide, 2019).

Na północno-zachodnim zboczu budowli, w strefie alejki gruntowej (punkty 1010 i 1011) nastąpiły ponad dwukrotnie większe przemieszczenia gruntu niż w sąsiedztwie galeryjki widokowej na jej szczycie (punkty 1003 i 1006). Do anomalnych przemieszczeń punktu 1011 obok alejki (wartości wektorów: $W_{XY} = 73,5$ mm, $W_H = -64,4$ mm) mógł

się przyczynić nie tylko ruch zwiedzających, ale także czynniki atmosferyczne, duże nachylenie skarpy w strefie nadległej oraz duża wilgotność gruntu niezależnie od pory roku.

Poziome przemieszczenia niektórych punktów zlokalizowanych u podstawy kopca (np. 1020 i 1023) mają nietypowy kierunek – zachodzą niemal wzdłuż krawędzi obrysu podstawy budowli. Przy czym punkt 1023 w całym okresie analizy wypiętrzał się ($W_H = +4,5$ mm), a punkt 1020 od 2013 r. do kwietnia 2021 r. podlegał wypiętrzaniu ($W_H = +1,1$ mm), a następnie do października 2022 r. znacząco przemieścił się w dół ($W_H = -18,4$ mm). Wektory poziomych przemieszczeń punktów 1020 i 1023 są w przybliżeniu prostopadłe do kierunku spadku stoku, co prawdopodobnie świadczy o wykształceniu się pomiędzy nimi lokalnej kumulacji mas ziemnych u podstawy kopca, która spowodowała ich przemieszczenie w kierunku w przybliżeniu prostopadłym do spływanego materiału ze stoku. Przypuszczenie to mogą potwierdzić wyniki kolejnych cykli pomiarowych.

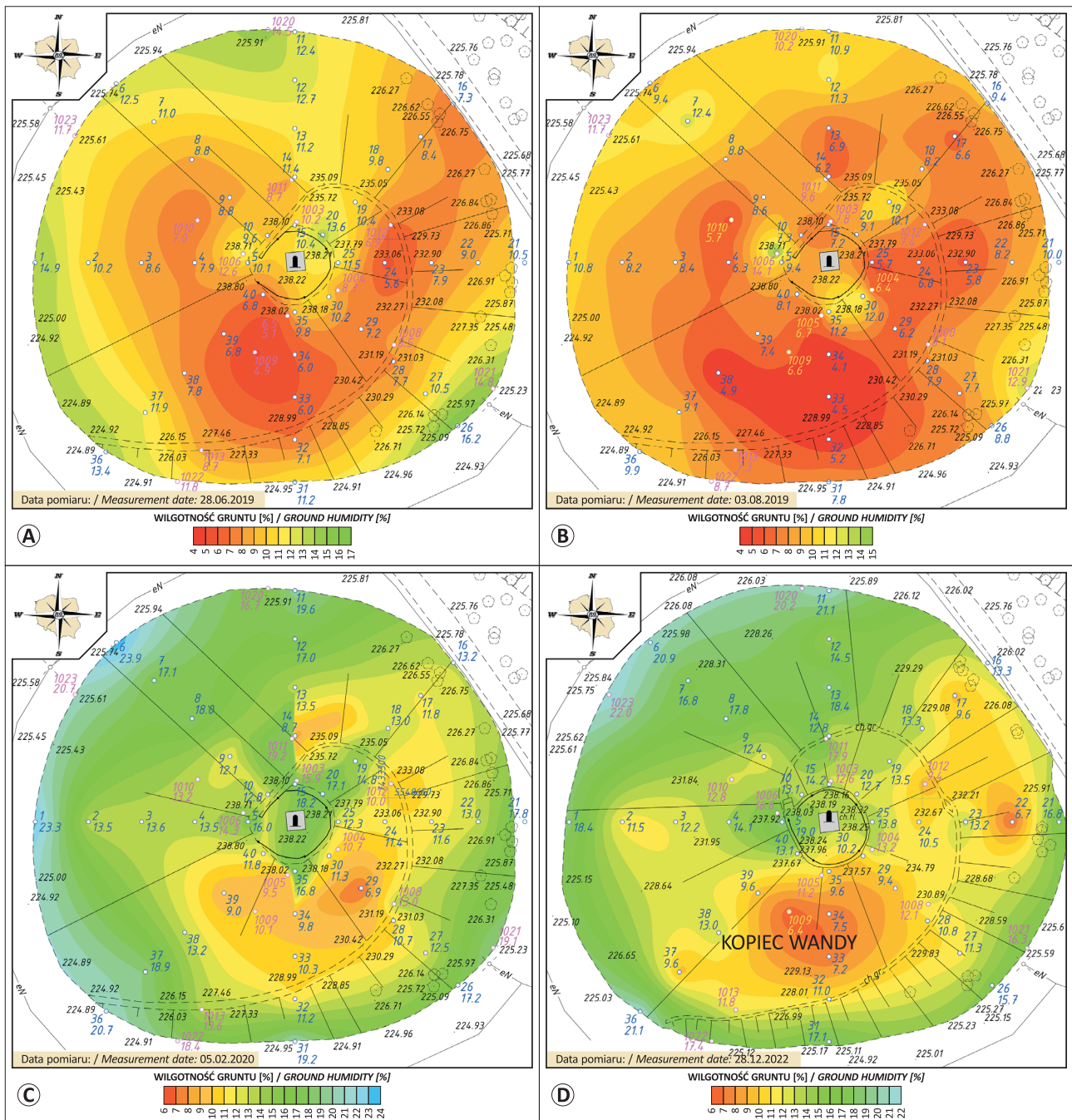
Na wschodnim stoku kopca znaczącemu przemieszczeniu poziomemu ($W_{XY} = 708$ mm) w okresie od 22.04 do 07.09.2017 r. uległ punkt 1012, usytuowany nad krawędzią stromej skarpy, bezpośrednio nad ziemną alejką prowadzącą na szczyt budowli. W tym samym czasie nastąpiła niewielka zmiana położenia tego punktu w pionie. Wilgotność gruntu w tej części stoku była względnie stabilna.

Punkty na południowym i południowo-wschodnim zboczu kopca, w szczytowej (1004 i 1005) i środkowej (1009 i 1013) części skłonu, przemieściły się w kierunku SSW (ryc. 2). Jednak tempo tych deformacji było wolniejsze niż na zboczu północnym, co może wynikać z mniejszego zawilgocenia gruntu po stronie południowej.

W sąsiedztwie obrzeża galerijki widokowej poziome przemieszczenia punktów (1004–1005) są trzykrotnie większe od pionowych ($W_{XY} \sim 3 \times W_H$). Niewielka zmiana pozycji punktu 1009 (ryc. 2, 3; $W_{XY} \sim 2 \times W_H$), usytuowanego na wysokości około 2/3 stożka, wskazuje na widoczne wyhamowanie procesu spęływania. Nato-

miast punkt 1013 (na wysokości $\sim 1/4$ wysokości kopca), należący do linii profilu 1022–1013–1009–1005, uległ nieznacznemu przemieszczeniu w płaszczyźnie poziomej (zachowując relację $W_{XY} \sim 3 \times W_H$).

Punkty u podstawy kopca od strony południowej i południowo-wschodniej (1021 i 1022) przemieściły się w poziomie w kierunku przeciwnym do pozostałych, tzn. w stronę środka budowli. To wymaga dłuższych obserwacji i analiz w kolejnych cyklach pomiarowych. Należy zaznaczyć, że punkt 1021 istotnie przesunął się nie tylko w poziomie ($W_{XY} = 25,4 \text{ mm}$), ale i w pionie ($W_H = -47,3 \text{ mm}$; $W_H \sim 2 \times W_{XY}$). Warto zwrócić uwagę na to, że punkty



Ryc. 4. Mapy rozkładu wilgotności objętościowej w przypowierzchniowej warstwie gruntu na Kopcu Wandy: A – 28.06.2019 r.; B – 03.08.2019 r. C – 05.02.2020 r. oraz D – 28.12.2022 r.

Fig. 4. Maps of the distribution of bulk humidity in the topsoil layer on the Wanda Mound: A – 28.06.2019; B – 03.08.2019; C – 05.02.2020 and D – 28.12.2022

zlokalizowane u podstawy kopca ulegają widocznym przemieszczeniom w warunkach zwiększonej wilgotności gruntu niezależnie od pory roku.

Największe pionowe przemieszczenia punktów sieci obserwacyjnej nastąpiły w sąsiedztwie obrzeża betonowo-kamiennej podbudowy galerijki widokowej (ryc. 3; punkty 1003, 1004 i 1005) oraz na wysokości 2/3 kopca (1010 i 1011). W czasie 10 lat obserwacji (2013–2022) ruch tych punktów w płaszczyźnie pionowej przeważnie był jednostajny, z pewnymi wyjątkami, kiedy zaobserwowano szybsze tempo przemieszczeń, np. w okresie wiosenno-letnim 2019 r. (punkty 1005 i 1010), 2020 r. (punkt 1010 na zboczu), 2021 r. (punkty 1020 i 1021 u podstawy kopca), jak również w okresie letnio-jesiennym 2022 r. (punkt 1021).

Wyniki modelowania przestrzennego deformacji Kopca Wandy

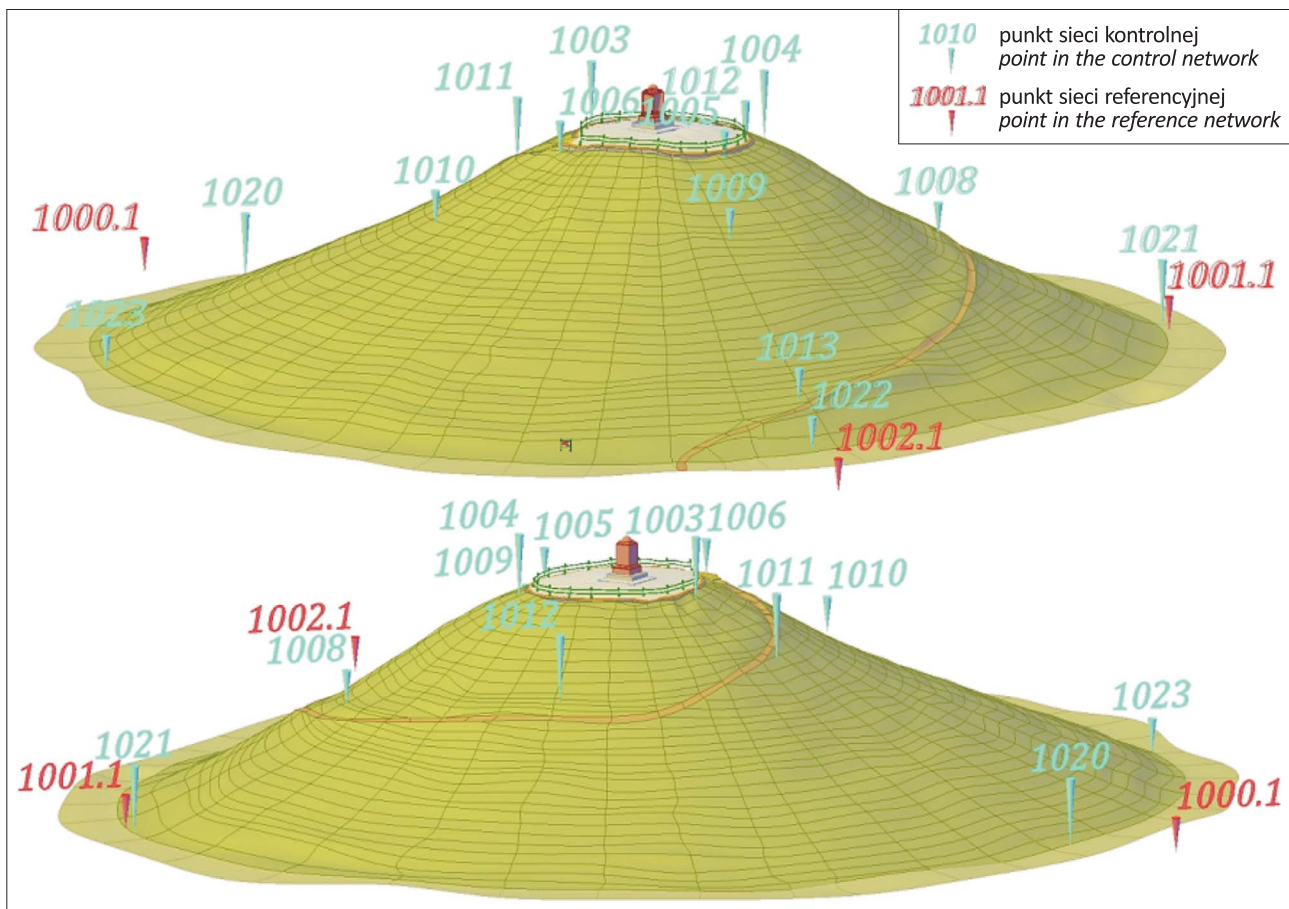
Modele zmian geometrii Kopca Wandy w latach 2013–2022 (ryc. 5 i 6) obrazują większe przemieszczenia przypowierzchniowej warstwy gruntu na zachodnim i północno-zachodnim stoku kopca, co jest skutkiem większej wilgotności gruntu po mniej nasłonecznionej stronie budowli. Proces splezywania gruntu o wiele wolniej zachodzi na lepiej nasłonecznionych stokach południo-

wo-wschodnim i południowym, szczególnie powyżej alejki spacerowej.

Wygenerowane w trakcie modelowania przestrzennego deformacji Kopca Wandy dwa profile – A–A' o kierunku WSW-ENE (ryc. 7) oraz B–B' o kierunku NWW-SEE (ryc. 8) – dokumentują falowy przebieg zmian geomorfologicznych w czasie i obrazują lokalne strefy kumulacji oraz ubytków mas ziemnych. Zmiany przestrzenne zarejestrowane w latach 2013–2022, największe w rejonie alejki, krawędzi galerijki i podstawy kopca, zawierają się w przedziale 0–1,5 m (maksymalne przemieszczenie alejki w kierunku NE).

WNIOSKI

Zaprezentowane w artykule wyniki wieloletnich obserwacji deformacji Kopca Wandy, uzyskane na podstawie pomiarów przemieszczeń stabilizowanych punktów geodezyjnej sieci obserwacyjnej (danych dyskretnych) oraz cyfrowych modeli powierzchni przestrzennych (utworzonych z wykorzystaniem tachimetrii elektronicznej), potwierdzają wyraźne przestrzenne zróżnicowanie deformacji przypowierzchniowej warstwy tej budowli. Wektory wypadkowe przemieszczeń poziomych W_{XY} (ryc. 2) oraz wykresy zmian wysokościowych W_H punktów sieci kontrolnej (ryc. 3) na powierzchni kopca wskazują na ich dużą zmienność. Zróżnicowanie wartości i kierunków wekto-

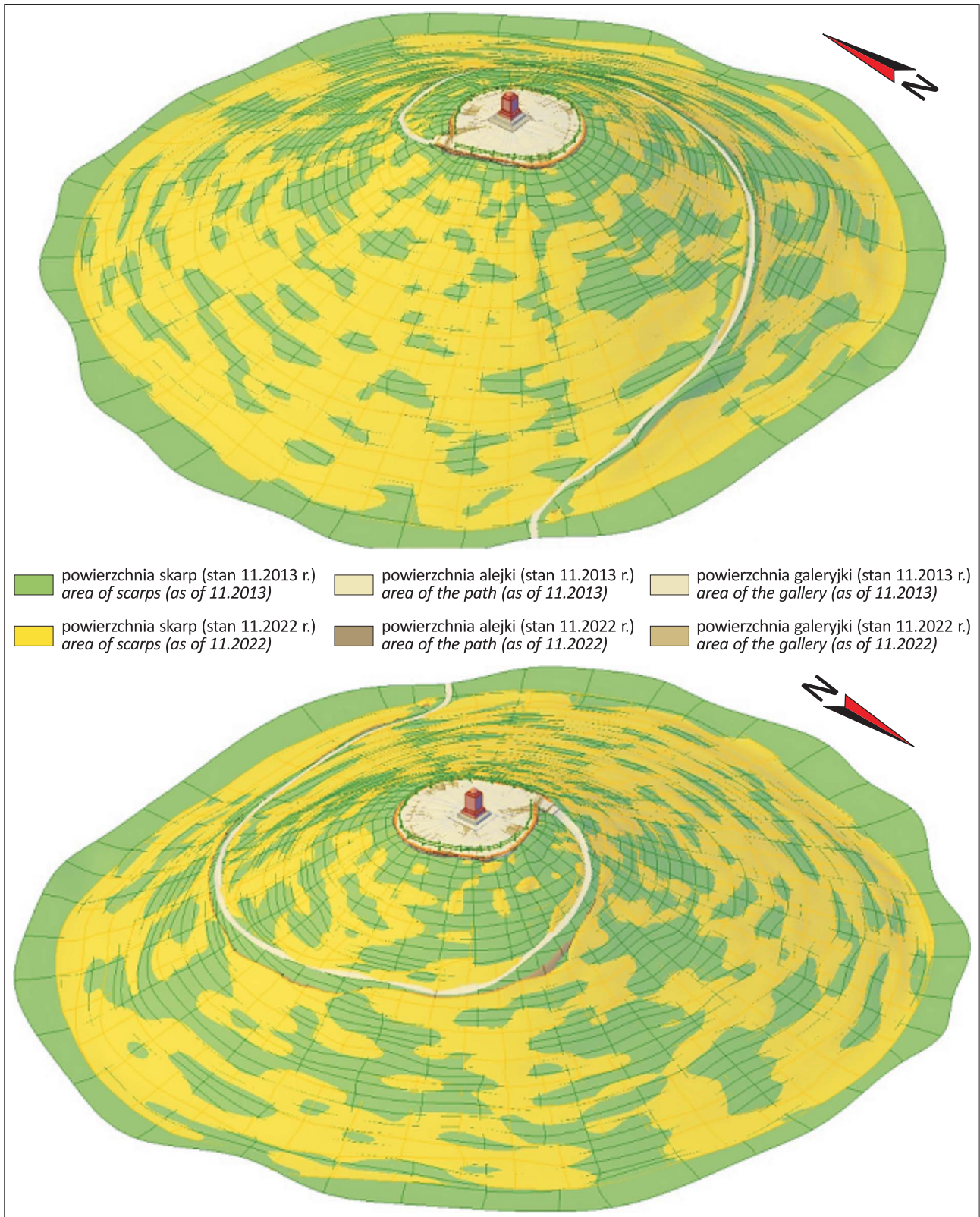


Ryc. 5. Model deformacji powierzchni Kopca Wandy od listopada 2013 r. do maja 2018 r.: **A** – widok od strony południowo-zachodniej; **B** – widok od strony północno-wschodniej

Fig. 5. A model showing the surface deformations of the Wanda Mound from November 2013 to May 2018: **A** – view from the south-west; **B** – view from the north-east

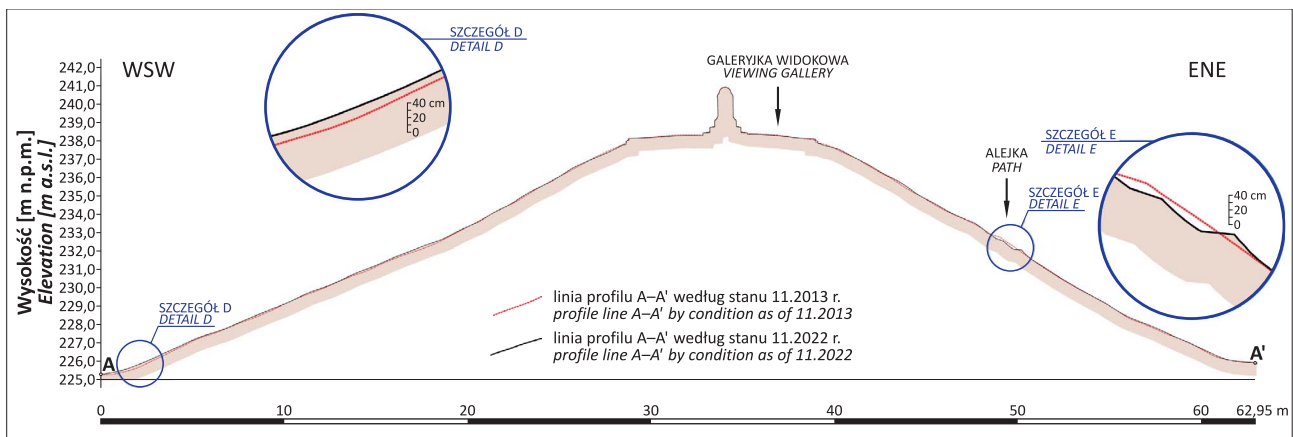
rów przemieszczeń w dużej mierze koresponduje ze stanem wilgotności w strefie przypowierzchniowej w różnych porach roku (ryc. 4). Na stokach południowym i południowo-wschodnim, lepiej nasłonecznionych i częściowo

zasłoniętych przez drzewa, zaobserwowano mniejszą wilgotność gruntu oraz mniejsze wartości wektorów jego przemieszczeń (punkty 1004, 1005, 1008 i 1009). Natomiast na stokach północnym, północno-zachodnim i za-



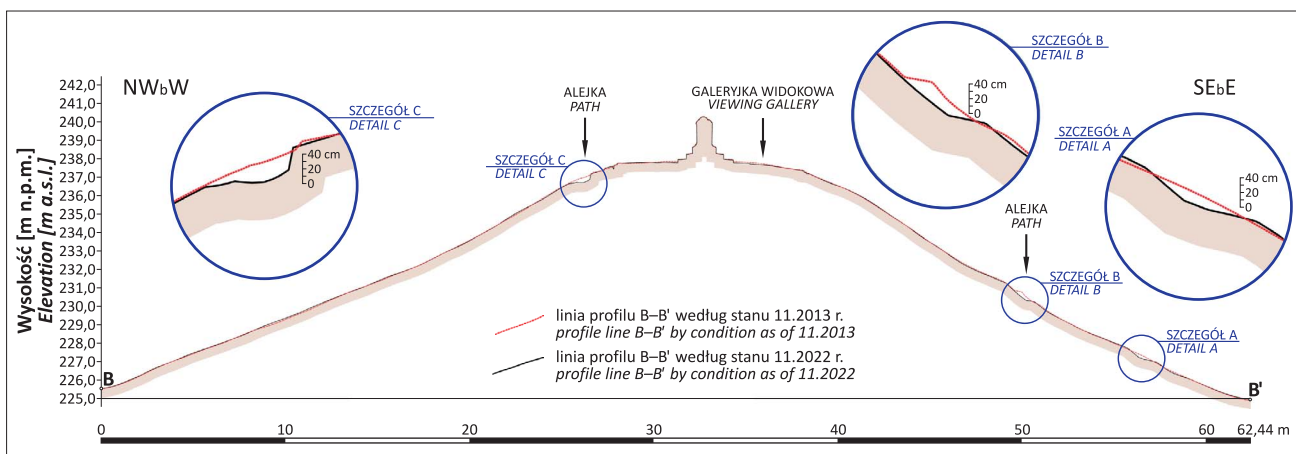
Ryc. 6. Model deformacji powierzchni Kopca Wandy od listopada 2013 r. do listopada 2022 r.: **A** – widok od strony południowo-zachodniej; **B** – widok od strony północno-wschodniej

Fig. 6. A model showing the surface deformations of the Wanda Mound from November 2013 to May 2018: **A** – view from the southwest; **B** – view from the north-east



Ryc. 7. Linie profilu terenu A–A' wygenerowane na podstawie modeli 3D obrazujących powierzchnię Kopca Wandy w listopadzie 2013 i 2022 r. Lokalizację profilu zaznaczono na ryc. 2

Fig. 7. Terrain profile lines A–A' generated on the basis of 3D models showing the condition in November 2013 and November 2022. The location of the profile is shown in Fig. 2



Ryc. 8. Linie profilu terenu B–B' wygenerowane na podstawie modeli 3D obrazujących powierzchnię Kopca Wandy w listopadzie 2013 i 2022 r. Lokalizację profilu zaznaczono na ryc. 2

Fig. 8. Terrain profile lines B–B' generated on the basis of 3D models showing the condition in November 2013 and November 2022. The location of the profile is shown in Fig. 2

chodnim zakres przemieszczeń przypowierzchniowej warstwy gruntu jest zdecydowanie większy, co potwierdza, że woda opadowa przyczynia się do wzrostu zawilgocenia gruntu i przyspiesza proces jego splezywania.

Wizualizacja rzeczywistego procesu deformacji stoków kopca na podstawie niewielkiej liczby punktów dyskretnych sieci kontrolnej zastabilizowanych na jego koronie, mimo wykonania pomiarów z najwyższą możliwą dokładnością, jest za mało szczegółowa.

Wyniki obserwacji pozyskane metodą tachimetrii elektronicznej z zastosowaniem stacji robotycznej i sygnału aktywnego (budowa profili pionowych o zadanym kierunku) wydaje się lepszym rozwiązaniem, do minimum ograniczającym wpływ czynników zewnętrznych na jakość danych pomiarowych. Oznacza to, że rozpoznaje się powierzchnię topograficzną bez konieczności filtracji punktów obciążonych błędem wynikającym ze zniekształceń sygnałów odbitych od roślinności porastającej badany obszar. Zastosowanie metody profili pionowych (bez konieczności ich trwałej stabilizacji w terenie i powtarzalności oraz odtwarzania lokalizacji) umożliwia budowę plastycznych modeli trójwymiarowych o dużej dokładności,

niezależnie od stopnia skomplikowania geomorfologicznej powierzchni. Warunkiem uzyskania dużej dokładności odwzorowania powierzchni terenu jest odniesienie obserwacji tachimetrycznych do punktów sieci referencyjnej (stałych) oraz uzupełnienie profili o punkty definiujące krawędzie nieciągłości rzeczywistego modelu (np. krawędzie skarp ziemnych i alejek oraz sztucznych detali architektonicznych).

Modele przestrzenne konstruowane za pomocą narzędzi programu *AutoCAD v.2023* (połączenie splajnów i płatów Coonsa) są przydatne do oceny zmian geomorfologicznych powierzchni budowli ziemnych. Zaletą takich modeli jest ich łatwa modyfikacja. Na przykład dane pomiarów kontrolnych mogą być szybko i łatwo wykorzystane do korekty modeli przed kolejną interpretacją zmian geomorfologii wynikających ze splezywania lub zsuwów gruntu, co znacząco może zminimalizować błąd RMSE ostatecznej formy modelu.

Zintegrowanie przestrzenne modeli terenu pozyskanych w różnych cyklach pomiarowych, tj. 2013–2018 (ryc. 5) oraz 2013–2022 (ryc. 6), umożliwiło uszczegółowienie opisu procesu deformacji i zarejestrowanie niewielkich

zmian morfologii kopca (w skali mm). Uzyskane obrazy świadczą o intensyfikacji i przyspieszeniu procesu spełznięcia przypowierzchniowej warstwy gruntu. Największe przemieszczenia gruntu odnotowano w rejonie alejki spacerowej wiodącej na szczyt kopca (ryc. 7 i 8), gdzie poza oddziaływaniem wody głównym czynnikiem zmian jej geometrii i lokalizacji jest ruch turystyczny. Duże zmiany w geometrii powierzchni nastąpiły także u podstawy północno-zachodniego zbocza budowli, na co wskazują zaobserwowane przemieszczenia punktów 1020 i 1023.

Wyniki dotychczasowych badań, prowadzonych przez autora artykułu od 2013 r., szczegółowo dokumentują proces przestrzennych zmian geometrii Kopca Wandy i w przyszłości mogą się stać przyczynkiem do ponownego przeprowadzenia podobnych badań terenowych, w celu kontrolowania ruchów masowych zachodzących w strefie przypowierzchniowej kopca i określenia ich zmienności w czasie, a gdy zajdzie taka potrzeba, także opracowania karty rejestracyjnej ewentualnego osuwiska na zboczach tej budowli. Taka karta osuwiska jest ważnym dokumentem w zarządzaniu ryzykiem i zapobieganiu katastrofom naturalnym. Do tej pory na Kopcu Wandy nie wykształciły się formy charakterystyczne dla rzeźby osuwiskowej. Należy mieć jednak świadomość, że budulcem tego zabytku jest materiał lessopodobny, podatny na procesy osuwiskowe, sufozję i nierównomierne osiadanie mas ziemnych. Ponadto dwa inne krakowskie kopce: Kościuszki i Piłsudskiego, doświadczyły już zniszczeń w wyniku procesów osuwiskowych (Kamieniarz i in., 2018). Przemieszczenia gruntu zarejestrowane na Kopcu Wandy są także efektem działalności człowieka. Ziemia alejka prowadząca na szczyt kopca ulega odkształceniom i przemieszczeniom przestrzennym na skutek ruchu turystycznego, a gdzieś tam widać także ślady aktów wandalizmu. Brak odpowiedniego zabezpieczenia budowli będzie pogłębiać skalę jej destrukcji.

Składam serdeczne podziękowania Recenzentom za niezwykle cenne uwagi merytoryczne i wnikliwe spostrzeżenia umożliwiające udoskonalenie treści artykułu.

LITERATURA

BARYŁA R., PAZIEWSKI J. 2012 – Główne założenia koncepcji badania deformacji terenu na podstawie satelitarnych pomiarów GPS sieci kontrolnej. *Biul. WAT*, 61 (2): 39–57.
 BAŻYŃSKI J. 1955 – Przeglądowa mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:300 000, arkusz E3 Kraków. *Inst. Geol.*
 BĄK B., LASKOWICZ I., RADWANEK-BĄK B., SZELĄG A. 2006 – Mapa atrakcji geoturystycznych województwa małopolskiego w skali 1:200 000. *Państw. Inst. Geol.*
 GAWAŁKIEWICZ R. 2006 – Metodyka pomiaru i obróbki danych skaningowych w procesie modelowania na przykładzie inwentaryzacji zabytkowego Kopca Krakusa. *Prz. Bud.*, 7–8: 60–68.
 GAWAŁKIEWICZ R. 2013 – Wykorzystanie nowoczesnych technologii geodezyjnych w inwentaryzacji Kopca Józefa Piłsudskiego. *Pótrocz. Sowniec*, 24 (42): 63–94.
 GAWAŁKIEWICZ R. 2022 – It and surveying technologies in geo-hazards modeling of historic anthropogenic objects on the example of the Wanda Mound in Krakow. *Geoinf. Polon.*, 21: 121–137.

GAWAŁKIEWICZ R., SZAFARCZYK A. 2016 – Surveying in the studies of the stability of earthy constructions, focus on selected historical mounds in Krakow (Poland). *Bol. Cienc. Geod., Curitiba, Brasil*, 22: 324–341.
 GAWAŁKIEWICZ R., SZAFARCZYK A. 2017 – Description of the spatial deformation process in selected Cracow mounds based on the surveying monitoring data. *Acta Geodyn. et Geomat.*, 14 (1): 101–112.
 GMINNA Ewidencja Zabytków – Kraków wg stanu na 31.05.2023 r.; <https://bip.krakow.pl/zalaczniki/dokumenty/n/400543/karta>
 GRUSZCZYŃSKI S. 2014 – Zmiany w środowisku glebowym i ich skutki. *Problemy i Poglądy, Przyszłość: Świat-Europa-Polska*, 2: 36–63. https://www.rm24.pl/fakty/polska/news-kopiec-wandy-odkrywa-swoja-tajemnice-sa-wyniki-badan-georada,nId,2330856#crp_state=1
 KAMIENIARZ S., WÓDKA M., WÓJCIK A. 2018 – Mapa osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1:10 000 powiat Kraków miasto, województwo małopolskie. *Państw. Inst. Geol.-PIB*.
 KICIAK P. 2019 – Podstawy modelowania krzywych i powierzchni: zastosowania w grafice komputerowej. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, wyd. 3 rozsz.
 KLASYFIKACJA uziarnienia gleb i utworów mineralnych. *Pol. Tow. Glebozn.*, *Rocz. Glebozn.*, 60, 2: 5–16.
 KOLANO M., CAŁA M. 2011 – Lessy okolic Sandomierza w świetle badań geologiczno-inżynierskich. *Górn. i Geoinż.*, *Wyd. AGH*, 35 (2): 349–358.
 KOS J., WÓDKA M. 2014 – Warunki geologiczno-inżynierskie i przyczyny powstania osuwiska na północnym stoku Wzgórza Świętej Bronisławy w Krakowie. [W:] *Ogólnopolska Konferencja O!suwisko*, Warszawa, Wieliczka, 19–22 maja 2015: 38–39.
 LEMPART M. 2012 – Zapomniane dziedzictwo Nowej Huty – Mogiła. *Muzeum Historyczne Miasta Krakowa*, Kraków.
 LENDA G. 2006 – Metody tworzenia i modyfikacji funkcji sklepanych na potrzeby opisu kształtu obiektów obserwowanych punktowo. *Zesz. Geodezja*, 12 (2/1): 277–290.
 LENDA G. 2014 – Using spline functions for the shape description of the Surface of shell structures. *Geoinf. Polon.*, 13: 21–32.
 MACIASZEK J., GAWAŁKIEWICZ R., SZAFARCZYK A. 2013 – Geodezyjne metody badania osuwisk. *Wyd. AGH, Kraków*.
 MALINOWSKI J. 1959 – *Geologia inżynierska*, cz. I. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
 MARUSZCZAK H. 2000 – Definicja i klasyfikacja lessów oraz utworów lessopodobnych. *Prz. Geol.*, 48 (7): 580–586.
 ROGOZIŃSKA-NIEŚLUCHOWSKA M. 2009 – Wizualizacja – element warsztatu współczesnego architekta. *Przestrzeń i Forma '11*. *Wyd. Ucz. Zach-Pomor. Uniw. Techn.*, Szczecin: 183–191.
 SŁUPECKI L.P. 1999 – The Krakus' and Wanda's Burial Mounds of Cracow. *St. Mythol. Slavica*, 1: 78.
 TYSZKIEWICZ Z., CZUBASZEK R., ROJ-ROJEWSKI S. 2019 – Podstawowe metody laboratoryjnej analizy gleby. *Skrypt do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu gleboznawstwo dla studentów kierunku architektura krajobrazu Politechniki Białostockiej*. *Oficyna Wyd. Polit. Białost.*, Białystok.
 URBANŃSKI K. 2019 – Określenie charakterystyki gruntu w przypowierzchniowej warstwie Kopca Wandy. *Arch. WGGiŚ AGH, Kraków*.
 USER GUIDE Spectrum FieldScout TDR 350 Soil Moisture Meter, *Spectrum Technologies, Inc.*, 2019.
 WIŁUN Z. 2013 – *Zarys geotechniki*. *Wyd. Komunikacji i Łączności*, Sulejówek.
 WÓJCIK A., GARECKA M., WÓDKA M., KAMIENIARZ S. 2016 – Kopiec Kościuszki i jego podłoże geologiczne. *Urząd Miasta Krakowa*.
 ZIENIUK E., SZERSZEŃ K. 2006 – Solution of 3D Helmholtz equation for boundary geometry modeled by Coons patches using the parametric integral equation system. *Archives of Acoustics*, 31 (1): 99–111.
 ZIENIUK E., SZERSZEŃ K., BOŁTUC A. 2004 – Bézier and Coons surfaces in the modelling and modification of the 3-D potential boundary-values problems. *Computer Information Systems and Applications*, WSFiZ Press, Białystok, 1: 127–134.
 ŻABA J. 2003 – *Ilustrowany słownik skał i minerałów*. *Wyd. Videograf II Sp. z o.o.* Katowice.

Praca wpłynęła do redakcji 3.07.2023 r.
 Akceptowano do druku 5.06.2024 r.