



## SYSTEM MONITOROWANIA KONSTRUKCJI KOPCA KOŚCIUSZKI W KRAKOWIE

TOMASZ HOWIACKI, *howiacki.tomasz@gmail.com*

MAŁGORZATA MIESZCZAK

SEBASTIAN JEDLIŃSKI

Politechnika Krakowska

**Streszczenie:** Kopiec Kościuszki w Krakowie to budowla geotechniczna szczególnie wrażliwa na deformacje, między innymi ze względu na niekorzystny budulec i bardzo strome pochylenie zboczy. W przeszłości wielokrotnie dochodziło do jego awarii, a największa miała miejsce po powodzi w 1997 r. Kompleksowy, kosztowny remont nie przyniósł oczekiwanych rezultatów i nie zatrzymał destrukcyjnego wpływu natury. Było to jedną z przyczyn, dla których w roku 2012 zainstalowano na obiekcie nowoczesny, automatyczny system monitorowania. Dostarcza on informacji na temat różnych wielkości fizycznych związanych z pracą kopca, m.in. przemieszczeń pionowych, odkształceń obwodowych i promienistych oraz ciśnienia wody porowej gruntu wewnątrz bryły i wilgotności jego warstwy wierzchniej. Korelacja uzyskanych wyników z pomiarami geodezyjnymi, inklinometrycznymi oraz meteorologicznymi (pochodzącymi ze stacji pogodowej będącej częścią systemu monitorowania) umożliwi kompleksową ocenę mechanizmów pracy warstw gruntowych w obrębie bryły kopca i ułatwi zaprojektowanie jego wzmocnień w przyszłości.

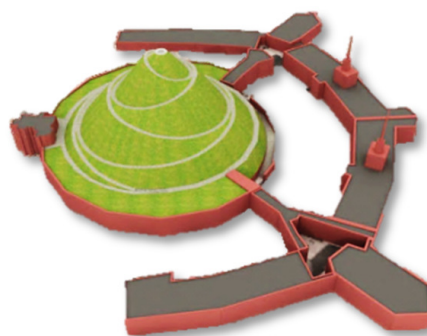
**Słowa kluczowe:** Kopiec Kościuszki, systemy monitorowania konstrukcji, czujniki strunowe, ekstensometry.

### 1. Budowa i geologia Kopca Kościuszki

Kopiec Kościuszki w Krakowie to bardzo nietypowa konstrukcja geotechniczna, jest on pomnikiem narodowym oraz pełni funkcje turystyczne. Kopiec został usypany na wzgórzu bł. Bronisławy w Krakowie w latach 1820–1823 w celu upamiętnienia wybitnego polskiego i amerykańskiego bohatera, generała, inżyniera i fortyfikatora – Tadeusza Kościuszko.



a)

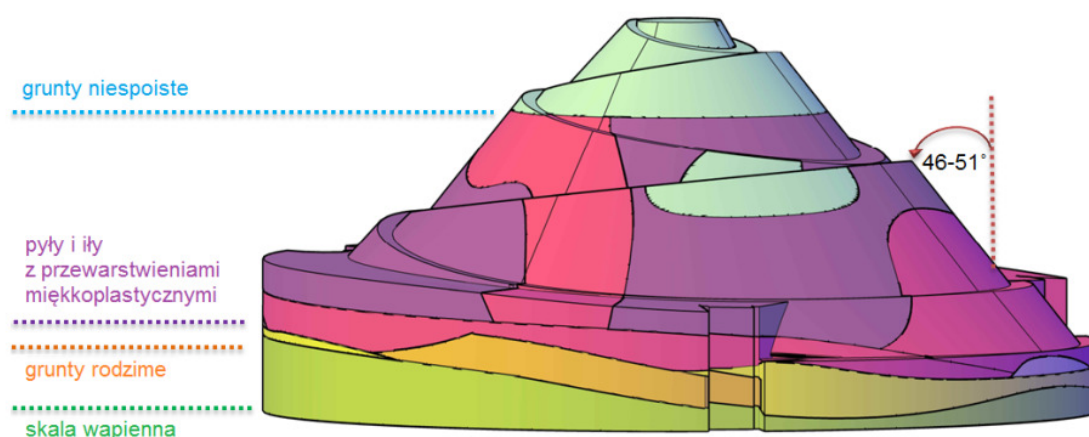


b)

Rys. 1. Kopiec Kościuszki: a) widok [5]; b) wizualizacja [dzięki uprzejmości SHM System]

Obiekt miał stanowić symbol trwałości i stabilności. Niestety, zarówno sposób budowy, jak również wykorzystany do tego celu budulec, okazał się podatny na wpływy środowiskowe. Kopiec usypano z gruntów lessopodobnych, przede wszystkim w postaci glin pylastych i pyłów, których struktura jest bardzo wrażliwa na oddziaływanie wody. Pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego cząstki gruntu konsolidują się, co skutkowało w przeszłości i skutkuje

obecnie osiadaniem i deformacjami bryły. Niebagatelny wpływ na zachowanie się budowli ma także znaczne nachylenie zboczy, sięgające  $46\text{--}51^\circ$ , czyli znacznie więcej (w pewnych miejscach ponad dwukrotnie) niż kąt tarcia wewnętrznego tego rodzaju gruntów. Fakt ten czyni z Kopca Tadeusza Kościuszki w Krakowie konstrukcję geotechniczną wyjątkową w skali świata. Nie bez znaczenia na główne kierunki deformacji jest także ukształtowanie stropu skał wapiennych (pochylenie w kierunku wschodnim) oraz sama geometria tamburu (znacznie niższy od strony wschodniej).



Rys. 2. Wizualizacja warstw gruntowych Kopca Kościuszki w Krakowie [opracowanie własne]

## 2. Uszkodzenia i awarie Kopca Kościuszki

W przeszłości bryła Kopca Kościuszki wielokrotnie ulegała zniszczeniom, przede wszystkim w postaci zsuwów, spływów, szczelin, spękań oraz uszkodzeń ścieżek, przez które woda opadowa mogła swobodnie dostawać się do wnętrza bryły. Przed rokiem 1979 nie wykonywano istotnych badań geologicznych czy zabiegów inżynierskich, które poprawiłyby stan techniczny obiektu. Ograniczono się jedynie do określenia rodzaju gruntu w warstwach przypowierzchniowych oraz opisu powstałych na skutek zewnętrznych oddziaływań szkód. W późniejszym okresie, do roku 1997, zrealizowano wiele drobnych remontów, polegających m.in. na uszczelnieniu spękań gliną, wykonaniu systemu nawadniającego, mechanicznym zabezpieczeniu zboczy poprzez palisady z mikropali czy systemy kotew gruntowych. Niestety wszystkie prace naprawcze okazały się nieskuteczne m.in. dlatego, że były projektowane przy niepełnym rozpoznaniu budowy bryły Kopca.

Największe zniszczenia miały miejsce po powodzi w 1997 r. Stan Kopca uznano wtedy za katastrofę budowlaną i wyłączono go zupełnie z użytkowania na okres ok. 3 lat. Intensywne opady deszczu spowodowały bowiem znaczną erozję stoków, w wyniku czego ścieżki zostały praktycznie całkowicie zdewastowane (rys. 3). Ogromne spękania otworzyły drogę do nieograniczonej penetracji wód opadowych. W latach 2000–2002 wykonano wiele kosztownych zabiegów, mających na celu przywrócenie pierwotnego stanu pomnika. Między innymi usunięto dziewięć metrów górnych warstw gruntowych, wykonano wodoszczelną geomembranę PEHD i ponownie usypano wierzchołek, tym razem z gruntu niespoistego, zbrojonego siatkami geotechnicznymi. Usunięto z warstw przypowierzchniowych uplastycznione grunty, spękania wypełniono iłem, a powierzchnię pomnika wzmocniono materacami z siatki stalowej. Ponadto zrealizowano różnego typu drenaże i odwodnienia, a także wzmocnienie ścieżek kostką granitową. Skarpy przy ścieżkach podparto niskimi żelbetowymi murkami. W trakcie remontu pobocznice wzmocniono także 6. metrowymi gwoździami ze stali nierdzewnej, w liczbie ponad 500 sztuk. Skarpy zostały zabezpieczone geomatą położoną na geowłókninie

z nasionami traw i podsypce z ziemi próchniczej o gr. 10 cm. Geowłóknina została zamocowana za pomocą szpilek, a geomata – stalowymi linami mocowanymi do kotew. Te i inne zabiegi pozwoliły na przywrócenie Kopca do stanu bezpiecznego użytkowania, jednak nie zatrzymały destrukcyjnego wpływu natury.



Rys. 3. Widok zniszczonego Kopca Kościuszki po powodzi z 1997 r. [1]

Po zakończeniu generalnego remontu na poboczniczy Kopca zainstalowano ok. 50 reperów geodezyjnych oraz zlokalizowano 4 rury inklinometryczne. Na podstawie pomiarów przemieszczeń pionowych oraz poziomych stwierdzono, że przez kolejnych 10 lat, Kopic osiadł ok. 0,50 m oraz przechylił się w kierunku wschodnim. Nie udało się zatem powstrzymać ruchów masowych. Podobnie jak w przypadku wcześniejszych wzmocnień, projektanci nie dysponowali pełnym rozpoznaniem głębszych warstw bryły Kopca.

### 3. Struktura systemu monitorowania

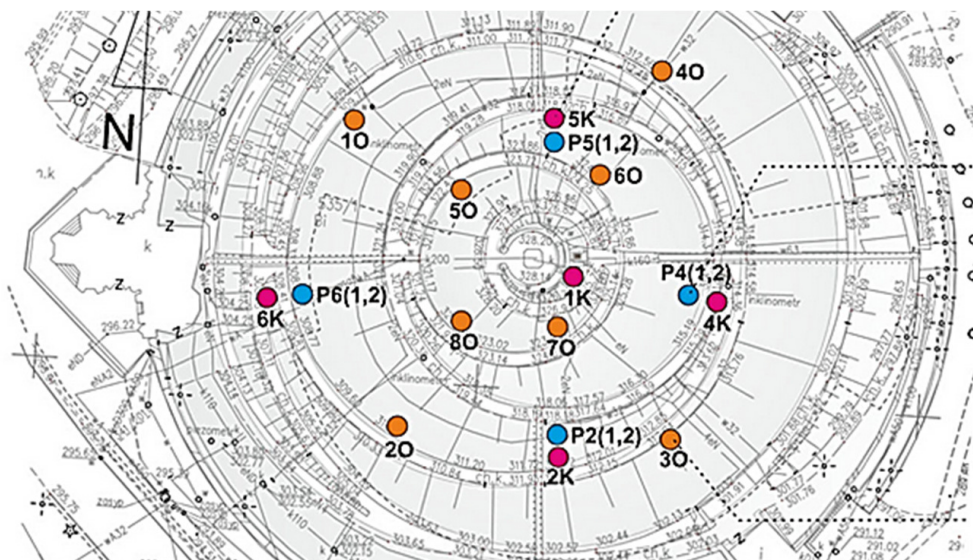
Obecnie stan Pomnika pozwala na jego normalne użytkowanie, choć lokalnie obserwuje się zsuwy ziemi i erozję zboczy. Niepełna skuteczność wcześniejszych napraw oraz postępująca degradacja na skutek oddziaływań środowiskowych (np. powódź w 2010 r.) wymuszają na projektantach konieczność opracowania rozwiązań mających na celu ochronę zabytku przed kolejną katastrofą oraz zapewnienie jego bezpiecznego funkcjonowania przez dziesiątki lat. Między innymi dlatego, w roku 2012, podczas prowadzenia badań geologiczno-inżynierskich w obrębie bryły Kopca, zdecydowano się na zainstalowanie automatycznego systemu pomiarowego (ang. *Structural Health Monitoring*), dzięki któremu możliwa jest obserwacja i kontrola pracy kopca w całej jego objętości w czasie rzeczywistym. Cykliczny pomiar odpowiednio wybranych wielkości fizycznych umożliwi poznanie mechanizmów destrukcji Pomnika, a także pozwoli na lepsze zrozumienie zachodzących w nim zjawisk.

Jednym z podstawowych założeń projektu systemu monitorowania było rozpoznanie pracy warstw gruntowych w całej objętości bryły w celu przeprowadzenia kompleksowej, trójwymiarowej analizy mechanizmów zachowania się budowli. Zdecydowano się zatem na pomiar przemieszczeń pionowych z uwzględnieniem zmian grubości poszczególnych warstw gruntowych (ekstensometry pionowe), odkształceń w płaszczyźnie poziomej (obwodowych i promienistych), a także na obserwację zmian ciśnienia wody w porach gruntowych, wilgotności gleby oraz temperatury. Zainstalowane czujniki wykorzystują w swej budowie strunową technikę pomiarową [2].



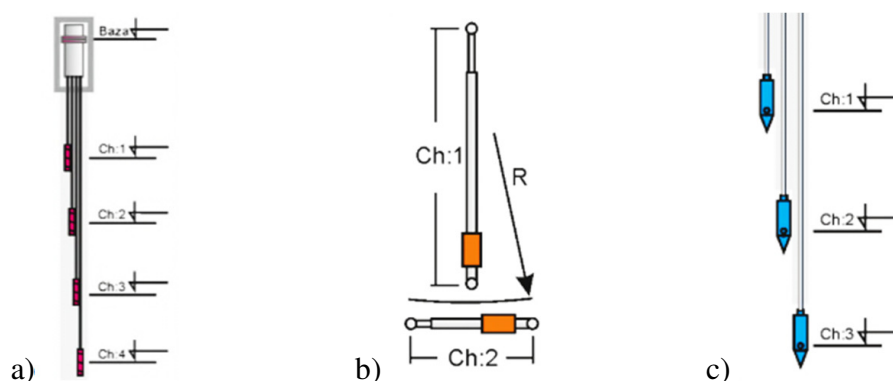
Rys. 4. Instalacja systemu SHM na Kopcu Kościuszki w Krakowie [dzięki uprzejmości SHM System]

Na poniższym rysunku przedstawiono lokalizację punktów pomiarowych systemu monitorowania w rzucie z góry.



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych („K” – odkształcenie pionowe, „O” – odkształcenia obwodowe, promieniowe i wilgotność gruntu; „P” – ciśnienie wody i temperatura) [dzięki uprzejmości SHM System]

Pomiary przemieszczeń pionowych wykonywane są przez pionowe ekstensometry ciągnowe (rys. 6a) w pięciu lokalizacjach. Szczegóły związane z zasadą ich pracy, przykładowe dane oraz interpretację wyników przedstawiono w punkcie 4. Pomiary odkształceń poziomych wykonywane są przez ekstensometry ciągnowe zainstalowane obwodowo wzdłuż pobocznic oraz promieniście wewnątrz bryły (rys. 6b). Usytuowane w ośmiu miejscach przetworniki posiadają bazy pomiarowe 200 mm (ekstensometry promieniste) oraz 1000 mm (ekstensometry obwodowe). Ponieważ główną, aktywną przyczyną deformacji Kopca Kościuszki jest infiltracja wody oraz związana z tym zmiana wilgotności gruntów, w ramach systemu monitorowania zainstalowano w czterech punktach pomiarowych, na trzech głębokościach, czujniki ciśnienia porowego wody w gruncie (rys. 6c).



Rys. 6. Układy pomiarowe: a) ekstensometry pionowe, b) ekstensometry poziome, c) piezometry [dzięki uprzejmości SHM Monitor]

Wszystkie czujniki strunowe wyposażone zostały w termistory w celu równoległego prowadzenia pomiaru temperatur. Umożliwia to kompensację termiczną danych z czujników strunowych [2] oraz pozwala na możliwość oceny wpływu temperatury na globalną pracę konstrukcji geotechnicznej.

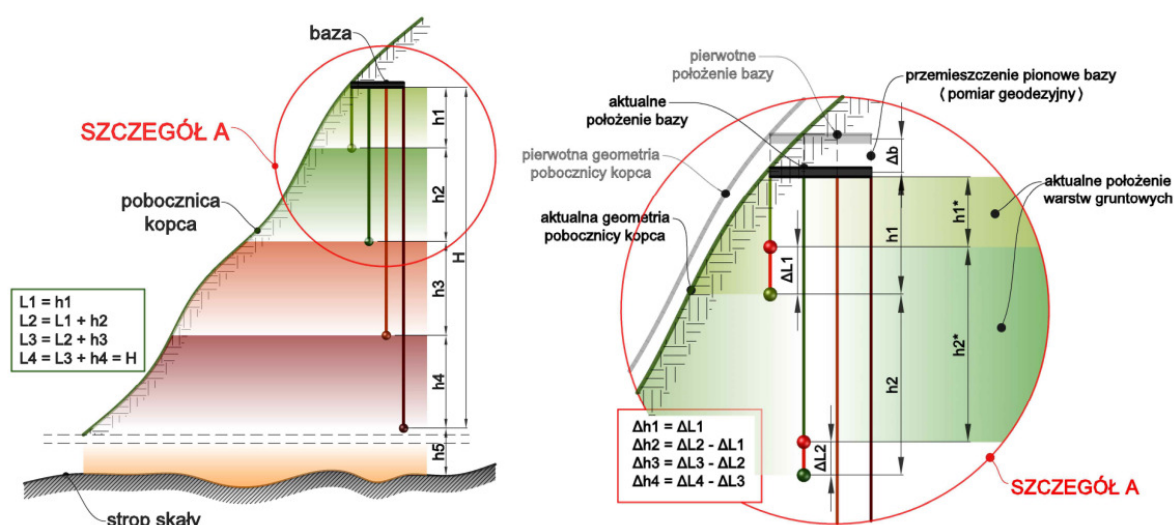
Przedstawione powyżej elementy systemu SHM należy zaliczyć do tzw. monitoringu konstrukcyjnego lub inżynierskiego. W roku 2014 przedmiotowy system uzupełniono o monitoring meteorologiczny. Zainstalowano stację pogodową składającą się z deszczomierza, wiatromierza, czujnika temperatury powietrza i jego wilgotności względnej oraz pyranometru. Uzyskiwane informacje o warunkach atmosferycznych w obrębie Kopca (ilość opadów, wielkość nasłonecznienia oraz siła i kierunek wiatru) są korelowane z danymi pochodzącymi z wnętrza kopca, co ułatwia określenie wpływu zjawisk zewnętrznych na zachowanie całej bryły.

System monitorowania Kopca automatycznie wykonuje pomiary oraz archiwizuje dane co 15 minut od 2012 r., a docelowo przez kilkadziesiąt kolejnych lat. Wszystkie dane przeliczane są zgodnie z opracowanymi procedurami, a dzięki internetowej platformie pomiarowej, wyniki przedstawiane są w sposób przejrzysty na ekranie dowolnego komputera mającego dostęp do sieci www. Umożliwia to łatwą interpretację uzyskanych z systemu danych pomiarowych (np. bezpośrednia obserwacja zmian grubości poszczególnych warstw gruntowych), a także prowadzenie bardziej zaawansowanych analiz.

#### 4. Pomiary ekstensometrami pionowymi

Czujniki ekstensometryczne umożliwiają wyznaczenie zmian długości określonych odcinków i są często wykorzystywane są w pomiarach obiektów geotechnicznych [3]. W ramach systemu monitorowania zainstalowano pięć ekstensometrów, przy czym każdy z nich składał się z czterech czujników. Jeden koniec czujnika przemieszczeń zamocowany był przy powierzchni Kopca (baza), a drugi – poprzez linkę ze stali nierdzewnej, zakotwiony wewnątrz bryły Kopca na różnej głębokości. Zmiany przemieszczeń bazy określane są na drodze pomiarów geodezyjnych, zatem w sposób bezwzględny można wyznaczyć zmiany grubości wszystkich warstw gruntowych w analizowanym punkcie pomiarowym. Strop skały uznano za nieruchome odniesienie, zatem w danym pionie analizowane są deformacje pięciu warstw gruntowych. Zmiana długości rejestrowana przez czujnik nr 1 będzie uwzględniona w pomiarze zmiany długości mierzonej przez czujnik nr 2. Analogicznie pomiary wykonywane są przez pozostałe czujniki. Odejmując od siebie poszczególne wartości przemieszczeń, otrzymamy zmiany grubości warstw gruntowych. Suma zmian grubości czterech warstw (rozieszczonych po długości ekstensometru) jest równa wprost zmianie przemieszczenia wynikającego z pomiaru czujnikiem wyposażonym w najdłuższą linkę (nr 4). Jeśli wartość tę odejmiemy od wartości

przesunięcia bazy (którą uzyskano w pomiarach geodezyjnych), otrzymamy informację na temat przesunięcia punktu zakotwienia tej linki.



Rys. 7. Konstrukcja oraz zasada działania ekstensometrów pionowych [opracowanie własne]

Suma grubości wszystkich warstw (od stropu skały do powierzchni) w konfiguracji aktualnej  $h_i^*$  będzie równa sumie początkowych grubości warstw  $h_i$  pomniejszonych o przesunięcie bazy  $\Delta b$ .

$$\sum_{i=1}^5 h_i^* = \sum_{i=1}^5 h_i - \Delta b \quad (1)$$

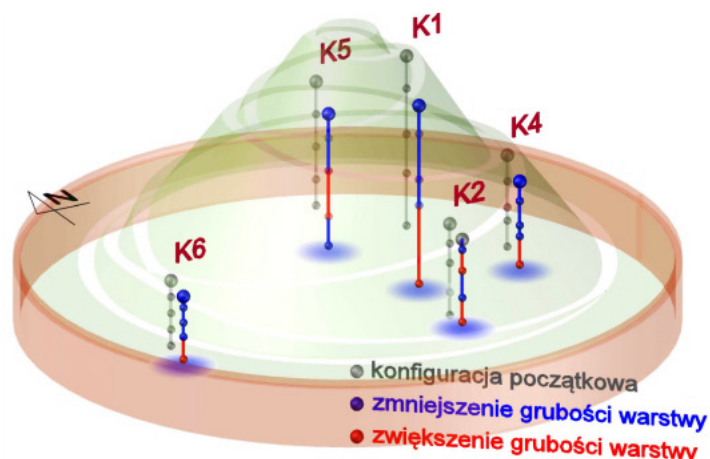
Znając zmianę długości  $\Delta H$  mierzonej czujnikiem nr 4 oraz przesunięcie bazy  $\Delta b$ , możemy określić zmianę grubości warstwy najniższej  $\Delta x$ , zalegającej nad skałą.

$$\Delta X = \Delta b - \Delta H \quad (2)$$

Tabela 1. Zmiany grubości warstw gruntowych [mm] w okresie od 26.06.2013–10.09.2014 (komentarze w tekście)

Nr	$\Delta h_1$	$\Delta h_2$	$\Delta h_3$	$\Delta h_4$	$\Sigma = \Delta H$
1K	4,84	0,96	12,82	-12,77	5,85
2K	4,96	-0,81	2,47	-1,94	4,67
4K	6,91	1,46	0,65	-0,49	8,53
5K	1,32	0,52	-2,96	0,07	-1,05
6K	3,06	0,70	0,44	-0,90	3,31

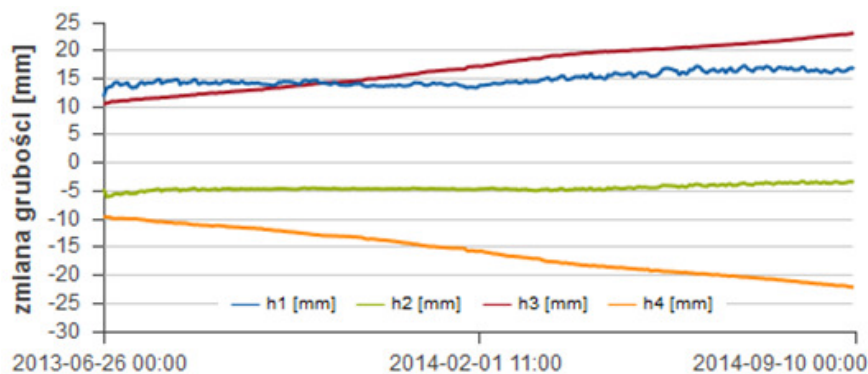
Należy zauważyć, że praca poszczególnych warstw gruntu, z których zbudowano Kopiec, jest bardzo zróżnicowana w zależności od głębokości (wartości zmieniają się także jakościowo w czasie). Interesujące jest to, że grubości pewnych warstw ulegają zwiększeniu (kolor czerwony oraz znak minus w powyższej tabeli), co może świadczyć o występowaniu przewarstwień z gruntów pęczniących. Jakościową, graficzną wizualizację zmian grubości poszczególnych warstw gruntowych w rozpatrywanym okresie czasu pokazano na poniższym rysunku.



Rys. 8. Wizualizacja zmian grubości warstw gruntowych w okresie od 26.06.2013–10.09.2014  
[Opracowanie własne]

Pomiary geodezyjne wykazały w analizowanym okresie czasu największe osiadanie bazy oznaczonej jako KG – 26 mm. Bazy KG oraz KG osiadły 7 mm, a bazy KG i KG – 13 mm. Największe przemieszczenia pionowe zmierzone ekstensometrem K1 wynikają m.in. z lokalizacji najbliższej środka ciężkości bryły Kopca. Skupienie największych mas gruntowych w tym obszarze generuje największe naprężenia.

Analizowany odcinek w punkcie 5K (stok północny) jako jedyny uległ nieznacznemu wydłużeniu, towarzyszyło temu jednak wyraźne obniżenie się bazy – 13 mm, jak i punktu zakotwienia najdłuższej linki – 14 mm. Wydłużenie się odcinka wynika zatem z deformacji warstwy najniższej (zlokalizowanej bezpośrednio nad skałą). Deformacja ta może być powodowana wymywaniem gruntu pylastego z rumoszu skalnego i przemieszczaniem go w szczeliny skalne. Uzyskiwane wyniki pomiarów na bieżąco prezentowane są na platformie pomiarowej w postaci wykresów, tabel i zestawień statystycznych.



Rys. 9. Wykresy zmian grubości warstw w punkcie K1 [dzięki uprzejmości SHM System]

## 5. Podsumowanie

Zainstalowany na Kopcu Kościuszki w Krakowie system monitorowania konstrukcji automatycznie oraz w sposób ciągły od 2012 r. dostarcza informacji na temat wybranych wielkości fizycznych związanych z pracą bryły Kopca. Analiza jakościowa i ilościowa danych pochodzących z systemu SHM, pomiarów geodezyjnych, inklinometrycznych i meteorologicznych ma pomóc w odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób trwale zabezpieczyć Pomnik przed postępującą degradacją. Niniejszy artykuł jest pierwszym podsumowaniem dwuletniego okresu

zbierania danych pomiarowych i ich analizy. W ramach projektu „Żywe Konstrukcje” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (przedsięwzięcie pn. „Ścieżki Kopernika”) wykonany został w Politechnice Krakowskiej przestrzenny model MES Kopca w programie Plaxis. Wyniki pomiarów posłużyły do kalibracji danych wejściowych do modelu. Prace nad analizą wyników jeszcze trwają.

Opisany w referacie system monitorowania jest przykładem, w jaki sposób projektowanie geotechniczne można wspomagać pomiarami. Pewne zadania realizowane w klasie obiektów geotechnicznych wymagają takich pomiarów, gdyż klasyczne rozpoznanie geologiczne jest niewystarczające. Należy pamiętać, że pozyskiwanie danych o właściwościach mechanicznych gruntów na podstawie badań odbywa się zawsze w danej chwili czasowej, podczas gdy na skutek różnych wpływów, parametry te mogą ulegać zmianom w czasie. Systemy SHM mogą nam te informacje uzupełnić. Dodatkowo, systemy monitorowania umożliwiają obserwację pracy konstrukcji podczas ich wznoszenia oraz po zakończeniu budowy. Obserwacje te mogą służyć projektantom do weryfikacji założeń projektowych i obliczeń, w przypadku stwierdzenia niezgodności wyników analiz z rzeczywistymi pomiarami. Takie podejście do projektowania jest obecnie zalecane przez [4].

Obecnie obserwuje się w Polsce wzrost zastosowania systemów monitorowania konstrukcji w realizacjach geotechnicznych. Zjawisko to jest zgodne z tendencjami ogólnoswiatowymi, gdzie w zasadzie wszystkie duże i odpowiedzialne konstrukcje z gruntu, których konsekwencje zniszczenia byłyby bardzo istotne, wyposażane są w urządzenia pomiarowe umożliwiające ciągłą obserwację ich pracy w czasie oraz szybkie reagowanie w przypadku niewłaściwego zachowania.

### Literatura

1. Rokosz M., 2007: Katastrofa Kopca Kościuszki w 1997 r. i pierwsze próby ratowania zabytku
2. Bednarski Ł., Sieńko R. Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, *Inżynieria i Budownictwo*, 11/2013, s. 615–619.
3. Sieńko R. Rola monitoringu w bezpieczeństwie użytkowania znaczących obiektów budowlanych, I Konferencja Naukowo-Techniczna: Problematyka Projektowania i Wykonawstwa w Aspekcie Nowych Technologii, Materiałów i Nowoczesnej Techniki w Budownictwie "TECH-BUD 2013", Kraków 23–25.10.2013.
4. PN-EN 1997 Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne, Część 1: Zasady ogólne.
5. [www.kopieckosciuszki.pl](http://www.kopieckosciuszki.pl)

### STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM FOR THE KOŚCIUSZKO MOUND IN CRACOW

**Abstract:** The Kościuszko Mound is a geotechnical structure susceptible to deformation mainly due to the unfavorable lumber and very steep slopes. In the past, it was repeatedly destroyed and the largest damage took place after the flood in 1997. Complex and expensive repair didn't bring the expected results and didn't stop the disruptive nature. That was one of the reasons why the modern automatic structural health monitoring system was installed in 2012. It provides information on the various physical quantities related to the work of the mound, including vertical displacements, radial and peripheral strains as well as water pressure in the ground pores inside the solid and humidity of the surface layer. Correlation between obtained results and geodetic, inclinometric and meteorological measurements (coming from the weather station being part of the SHM system) enables a comprehensive evaluation of work mechanisms of the ground layers in whole capacity of the solid and facilitates decisions related to the design of its strengthening in the future.

**Keywords:** the Kościuszko Mound, structural health monitoring systems, vibrating wire sensors, extensometers.