

*Mikołaj Skulich, Anna Szafarczyk*

**OPTYMALIZACJA METOD POMIAROWYCH  
W ASPEKCIE PROJEKTOWANIA  
POMIARÓW EKSTREMALNYCH ODKSZTAŁCEŃ  
NA TERENACH OSUWISKOWYCH**

**OPTIMISATION OF MEASUREMENT METHODS  
IN THE ASPECT OF DESIGNING THE MEASUREMENTS  
OF EXTREME STRAINS IN THE LANDSLIDE AREAS**

**Streszczenie**

Monitoring terenu podlegającego procesom osuwiskowym jest procesem niezbędnym dla celów zapewnienia bezpieczeństwa obiektów znajdujących się na jego obszarze. W niniejszym artykule przedstawiono opis i wyniki badań eksperymentalnych mających na celu zoptymalizowanie technologii geodezyjnych obserwacji deformacji terenu podlegającego procesom osuwiskowym z wykorzystaniem rozet pomiarowych. Pomiarzy wykonano przy użyciu trzech instrumentów pomiarowych- LEICA (tachimetry: TCA 2003, TCR 303, TC 407) na badawczym polu testowym. Na podstawie wykonanych badań określono optymalny sposób i dobór sprzętu który może zostać wykorzystany do wykonania obserwacji na rzeczywistym terenie podlegającym procesom osuwiskowym.

**Słowa kluczowe:** monitoring osuwisk, rozeta pomiarowa, optymalizacja technologii pomiarowej

**Summary**

*The monitoring of the terrain subdued to landslide processes is necessary for the safety of the objects within that area. This article presents the description and the results of the measurement studies to optimise surveying technologies of the observations of ground deformations in the area subdued to landslide*

*processes with the use of rosettes. The measurements were carried out with the use of three instruments (total stations: TCA 2003, TCR 303, TC 407) on the test field. Based on the carried out studies, the optimal way and instruments were selected for the potential use in the observations on the actual area subdued to the landslide processes.*

**Key words:** landslide monitoring, rosette, optimisation of measurement technology

## WSTĘP

Aktywność procesów osuwiskowych uzależniona jest od ukształtowania terenu, budowy geologicznej i szeregu czynników środowiskowych. Człowiek nie ma możliwości ograniczenia występowania tych czynników, ale może na bieżąco dokonywać monitoringu zjawiska, a przy znajomości jego kinematyki przewidzieć możliwość powstania nagłej utraty stateczności gruntu. Ma to niezaprzeczalne znaczenie w przypadkach zapewnienia bezpieczeństwa obiektów budowlanych lub infrastruktury technicznej usytuowanych na terenach zagrożonych występowaniem ruchów masowych.

Dla lepszego i pełnego opisu kinematyki zjawiska konieczne jest wykonanie szeregu badań o charakterze geologiczno-inżynierskim, jak również prowadzenie monitoringu geodezyjnego.

W ramach pomiarów geodezyjnych wyznaczane są wskaźniki deformacji terenu, które są podstawą do wnioskowania na temat bezpieczeństwa obiektów budowlanych. Spośród wskaźników deformacji największe znaczenie dla bezpieczeństwa większości obiektów ma odkształcenie poziome. Występowanie odkształceń poziomych gruntu o dużych wartościach powoduje powstawanie rys, szczelin i spękań.

Jednym ze sposobów wyznaczania odkształceń terenu jest wykonanie seryjnych pomiarów długości odcinków obserwacyjnych zastabilizowanych w terenie. Względna zmiana długości tych odcinków jest utożsamiana w geodezji z odkształceniem poziomym, oznaczana jako  $\varepsilon$  i wyznaczana według zależności [Gustkiewicz 1980]:

$$e^c = \varepsilon = \lambda - 1 = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

gdzie:

- $e^c$  – wielkość odkształcenia liniowego w sensie Cauchy'ego,
- $l_0$  – długość odcinka w stanie niezdeformowanym,
- $l$  – długość odcinka w stanie zdeformowanym,
- $\lambda$  – wielkość definiowana jako,

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (2)$$

Poza określeniem wartości odkształceń wybranych odcinków dla opisu kinematyki zjawiska w danym rejonie wskazane jest określenie wartości występujących odkształceń ekstremalnych  $\varepsilon_{max}$  i  $\varepsilon_{min}$ , kierunków ich występowania  $\beta$  i zmian tych wielkości w poszczególnych stadiach ruchu osuwiskowego.

W tym celu wykorzystuje się poniższe wzory:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + 4\varepsilon_{12}^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + 4\varepsilon_{12}^2}. \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}, \quad (5)$$

gdzie:

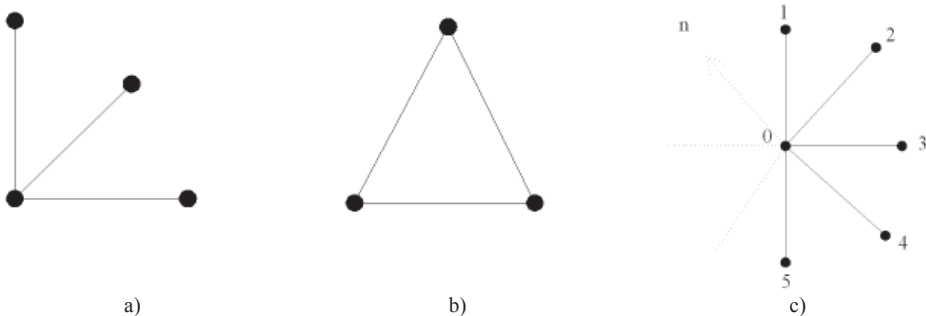
$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$  – wartości odkształceń na kierunkach zgodnych z osiami przyjętego układu współrzędnych,

$\varepsilon_{12}$  – połowa wartości odkształcenia postaciowego.

Wartości wyznaczone w wyniku obliczeń zestawia się w funkcji czasu.

Koncepcja monitoringu terenu podlegającego odkształceniom z wykorzystaniem konfiguracji sieci pomiarowych w formie rozet została już pozytywnie zweryfikowana w ramach badań prowadzonych na terenach górniczych [Pielok 2005].

Możliwe konfiguracji sieci pomiarowych wykorzystywanych do wyznaczenia ekstremalnych wartości odkształceń przedstawiono na rysunku 1.



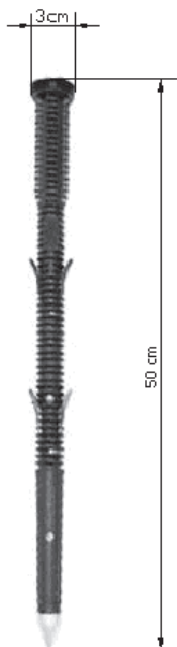
Źródło: Pielok 2005

**Rysunek 1.** Rodzaje rozet pomiarowych  
**Figure 1.** Kinds of measurement rosettes

Dla wyznaczenia wartości odkształceń ekstremalnych występujących na osuwisku, najkorzystniej jest założyć w terenie pęk boków wychodzących z jednego punktu i tworzących tak zwaną rozetę prostokątną [Szafarczyk 2008].

### ZAPROJEKTOWANE OBSERWACJE NA POLU TESTOWYM

Na zboczu osuwiska objętego monitoringiem w ramach prowadzonego projektu badawczego założona została rozeta prostokątna o bokach długości około 20 m. Punkty stanowiące rozetę zastabilizowano na głębokości 50 cm przy wykorzystaniu dostępnych w sprzedaży punktów typu Plastmark (rys. 2) wykonanych ze stali, pokrytych karbowaną osłoną z tworzywa sztucznego. Nieregularne kształty osłony oraz wypustki oporowe dają gwarancję ochrony przed usunięciem przez osoby niepowołane oraz stabilność usytuowania punktu w terenie.

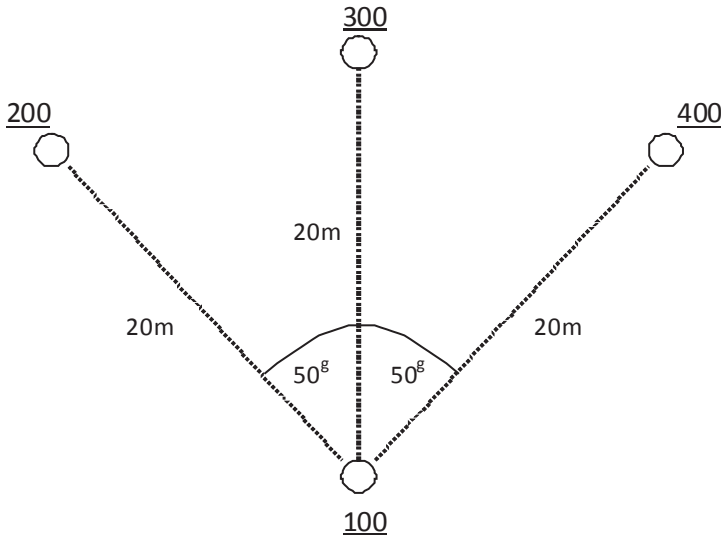


Źródło: opracowanie własne autorów

**Rysunek 2.** Punkt pomiarowy Typu Plastmark wykorzystywany do stabilizacji  
**Figure 2.** Measurement point of Plastmark Type for stabilization

Przed przystąpieniem do pomiarów rozety zastabilizowanej na osuwisku wykonano testy na bazie terenowej w Parku Jordana w Krakowie, na rozecie o analogicznej konstrukcji, posadowionej z wykorzystaniem takich samych punktów pomiarowych.

Testy te polegały w pierwszej kolejności na zastabilizowaniu w terenie czterech punktów pomiarowych tworzących kształt rozety prostokątnej o trzech dwudziestometrowych bokach, usytuowanych pod kątem  $50^{\circ}$  w stosunku do siebie. Na tak utworzonym polu badawczym wykonano obserwacje kątowno-liniowe, wykorzystując w tym celu trzy tachimetry elektroniczne: TCA 2003, TCR 303 oraz TC 407. Kształt utworzonej rozety pomiarowej przedstawiono na rysunku 3. Obserwacje wykonane zostały na terenie nie podlegającym wpływowi eksploatacji górniczej, jak również innym czynnikom mogącym wpływać na otrzymane wyniki. Wykonywane one były w bardzo krótkim odstępie czasu (ok. 30 min pomiędzy każdym z instrumentów) w jednakowych, sprzyjających warunkach atmosferycznych.



Źródło: opracowanie własne autorów.

**Rysunek 3.** Schemat rozety pomiarowej na polu badawczym  
**Figure 3.** The scheme of the measurement rosette in the study field

Wykonywane obserwacje polegały na pomiarze wszystkich odległości pomiędzy punktami tworzącymi boki rozety prostokątnej oraz kątów wierzchołkowych w dwóch seriach. Obserwacje wykonywane były kolejno ze wszystkich punktów rozety w kolejności począwszy od punktu 100 poprzez 200, 300 i 400. Sygnalizacja celów każdorazowo odbywała się poprzez ustawienie na statywach

zestawu precyzyjnych luster firmy Leica. Podczas pomiarów niezależnie od wykorzystanego instrumentu stosowano najlepszy dostępny w instrumencie tryb precyzyjnego pomiaru odległości.

W pierwszym etapie badań pomiaru dokonano wykorzystując jeden z najbardziej precyzyjnych tachimetrów elektronicznych firmy Leica – serwowmotoryczny model TCA 2003 [Instrukcja]. Dla przyjętych ustawień dostosowanych do przyjętych uwarunkowań pomiarowych instrument ten charakteryzuje się dokładnością pomiaru kąta poziomego rzędu  $6^{\text{cc}}$  oraz błędem standardowym pomiaru odległości  $1 + 1$  ppm. Umożliwia on dodatkowo dzięki zastosowanemu systemowi automatycznego rozpoznawania celu ATR zautomatyzowanie wykonywanych pomiarów. Podczas pomiarów zastosowano wewnętrzny program instrumentu Sets of angles. Program ten wykorzystywany jest do pomiaru kątów metodą kierunkową pomiędzy obserwowanymi punktami. Przy pomiarze w dwóch (lub więcej) seriach program umożliwia wyliczenie odchyleń standardowych pomierzonych kierunków oraz wyliczenie odchyleń standardowych średnich wartości pomierzonych kierunków. Mierzac powyższym instrumentem zastosowano w pierwszej kolejności manualny sposób wykonywania pomiarów (obserwator samodzielnie dokonuje precyzyjnego nacelowania na kolejne cele) a następnie pomiar powtórzono wykorzystując automatyczną funkcję ATR.

Kolejnym wykorzystanym do badań instrumentem był tachimetr elektroniczny firmy Leica TCR 303 [Folder]. Instrument ten nie posiada możliwości zautomatyzowania pomiarów, jednak przy przyjęciu założonych warunków obserwacyjnych charakteryzuje się on wysoką dokładnością pomiaru kąta poziomego rzędu  $6^{\text{cc}}$  oraz błędem standardowym pomiaru odległości  $3 + 2$  ppm. Obserwację tym instrumentem wykonano manualnie zgodnie z przyjętą technologią.

Ostatnim z wykorzystanych do badań tachimetrów był jeden z najpopularniejszych instrumentów firmy Leica stosowanych powszechnie do typowych zastosowań pomiarowych w geodezji – tachimetr TC 407 [Folder]. Charakteryzuje się on dokładnością pomiaru kąta poziomego rzędu  $15^{\text{cc}}$  oraz błędem standardowym pomiaru odległości  $2 + 2$  ppm przy przyjęciu precyzyjnego trybu pomiaru odległości do luster. W przypadku tego instrumentu pomiar również wykonano manualnie zgodnie z przyjętą technologią.

Na podstawie wykonanych pomiarów uzyskano obserwacje kątowno-liniowe, które posłużyły do wyznaczenia wartości kątów poziomych oraz odległości pomiędzy punktami tworzącymi boki rozety prostokątnej. W pierwszym etapie obliczeń, przy użyciu programu *Geodezja*, dokonano redukcji pomierzonych odległości nachylonych, uzyskując wartości poziomych długości boków rozety wraz z ich dokładnością. Następnie, na podstawie pomierzonych kierunków, określono wartości kątów poziomych pomiędzy bokami tworzącymi rozetę. W pierwszym wariancie wyrównania wprowadzono do programu *Geodezja* zarówno wartości pomierzonych kątów jak i odległości, natomiast w drugim

wariancie wyrównano sieć składającą się jedynie z obserwacji odległościowych. Każdorazowo w wyniku wyrównania sieci uzyskiwano błąd średni jednostkowy  $m_0$  nie przekraczający wartości 1, co potwierdza dla założonych uwarunkowań pomiarowych słuszność przyjętej dokładności obserwacji.

Na podstawie wyrównanych współrzędnych punktów rozety, w oparciu o macierz wariancyjno-kowariancyjną, wyznaczono w każdym z przypadków wartości długości boków rozety wraz z ich dokładnością. Wartości otrzymanych z wyrównania sieci kąto-liniowych długości boków rozety przedstawiono w tabeli 1, natomiast wartości otrzymanych z wyrównania sieci liniowych długości boków rozety przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 1.** Długości boków rozety wyznaczone z wyrównania sieci kąto-liniowej  
**Table 1.** The lengths of the sides of the rosette marked with the alignment of angle-linear network

Instrument bok	TCA 2003		TCA 2003 (ATR)		TCR 303		TC 407	
	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]
100-200	20.0703	0.4	20.0699	0.4	20.0701	1.0	20.0704	0.2
100-300	20.0236	0.4	20.0242	0.4	20.0238	1.0	20.0244	0.2
100-400	19.9899	0.4	19.9903	0.4	19.9899	1.0	19.9907	0.2

Źródło: opracowanie własne autorów.

**Tabela 2.** Długości boków rozety wyznaczone z wyrównania sieci liniowej  
**Table 2.** The lengths of the sides of the rosette marked with the alignment of linear network

Instrument bok	TCA 2003		TCA 2003 (ATR)		TCR 303		TC 407	
	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]	długość [m]	błąd długości [mm]
100-200	20.0700	0.3	20.0702	0.3	20.0702	0.3	20.0702	0.4
100-300	20.0236	0.3	20.0239	0.3	20.0240	0.3	20.0242	0.4
100-400	19.9903	0.3	19.9903	0.3	19.9902	0.3	19.9904	0.4

Źródło: opracowanie własne autorów.

Analiza powyższych wyników pozwala stwierdzić, iż otrzymanie wartości długości boków rozety prostokątnej nie różnią się od siebie, niezależnie od zastosowanego instrumentu, o więcej niż 0,8 mm w przypadku wyrównania sieci kąto-liniowej (bok 100-400) oraz o więcej niż 0,6 mm w przypadku wyrównania sieci liniowej (bok 100-300). Jest to podstawą do stwierdzenia, iż wszystkie z badanych instrumentów mogą być z powodzeniem wykorzystane podczas zaprojektowanego monitoringu terenów osuwiskowych.

## WNIOSKI

Wykonane na zaprojektowanym polu testowym obserwacje pozwoliły na stwierdzenie, iż dla celów określania ekstremalnych odkształceń na terenach osuwiskowych z wykorzystaniem prostokątnej rozety pomiarowej każdy z testowanych instrumentów stanowi doskonale narzędzie obserwacyjne. Użycie któregokolwiek z nich pozwala na określenie z wysoką precyzją wartości odległości pomiędzy punktami stanowiącymi boki rozety, co w konsekwencji prowadzi do dokładnego wyznaczenia ekstremalnych odkształceń badanego terenu. Ze względu na najniższy koszt zakupu i relatywnie najprostszą dostępność autorzy skłaniają się do stwierdzenia, iż optymalnym dla przedstawionych założeń pomiarowych jest wykorzystanie tachimetru TC 407. Oczywiście wykorzystanie zmotoryzowanego TCA 2003 jest o wiele wygodniejsze i nieznacznie przyspiesza czas wykonania pomiarów, jednak wielokrotnie wyższa cena (jak najbardziej usprawiedliwiona przez wielki potencjał tego instrumentu) w tym konkretnym przypadku testowanej technologii pomiarowej nie daje podstaw do konieczności użycia tak zaawansowanego instrumentu.

## BIBLIOGRAFIA

- Gustkiewicz J., *Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwem*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980, s. 149-159.
- Pielok J., *Wyznaczanie powierzchniowego tensora odkształceń na terenach górniczych w oparciu o pomiary geodezyjne*. Wydawnictwo AGH. Kraków 2005, 50ss.
- Szafarczyk A., *Wyznaczanie odkształceń powierzchni terenu górnictwa przy zastosowaniu rozet geodezyjnych*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2008, 150 ss.
- Folder reklamowy tachimetru elektronicznego TCA 2003*, Leica, Szwajcaria 1999 r.,
- Instrukcja obsługi tachimetru elektronicznego TCA 2003*, Leica, Szwajcaria 1997 r.,
- Folder reklamowy tachimetrów elektronicznych serii TPS 400*, Leica, Szwajcaria 2002 r.,

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013,  
jako projekt badawczy NN524 465839.*

Dr inż. Anna Szafarczyk  
szafarcz@agh.edu.pl  
Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa  
Dr inż. Mikołaj Skulich  
skulich@agh.edu.pl  
Katedra Geomatyki  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków