

# Koncepcja i realizacja fotoelektrycznego inklinometru do otworów wiertniczych i zastosowanie go w praktyce

ADAM KANCIRUK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Jedną z metod badań stanu przypowierzchniowych warstw górotworu w rejonach niestabilnych geologicznie jest stała kontrola deformacji otworów wiertniczych, w tym zmian ich wychylenia na różnych głębokościach. Do tego celu mogą służyć inklinometry instalowane na stałe we wspomnianych otworach. W niniejszym opracowaniu przedstawiono koncepcję budowy inklinometru fotoelektrycznego, którego konstrukcja umożliwi umieszczenie go w otworze wiertniczym. Na podstawie tej koncepcji zrealizowano prototypowy inklinometr, który został zainstalowany w uzbrojonym stalową rurą otworze wywierconym w bezpośrednim sąsiedztwie niszy osuwiskowej. Uzyskane za pomocą inklinometru wyniki pomiarowe pozwalają na określenie wielkości wychylenia skarpy osuwiska i jego azymutu.

**Słowa kluczowe:** inklinometr, pomiar wychyleń i przemieszczeń osuwiska

## 1. Wstęp

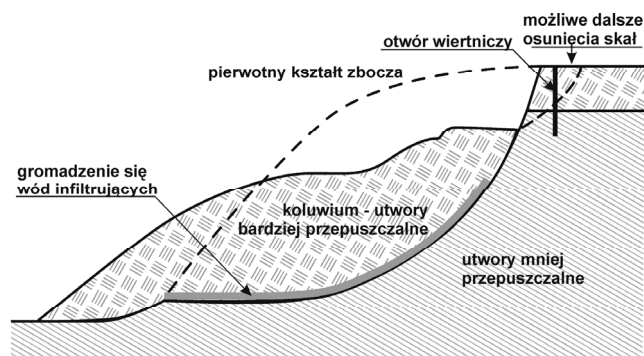
Badanie stanu przypowierzchniowych warstw górotworu w rejonach niestabilnych geologicznie ma duże znaczenie dla środowiska naturalnego i gospodarki narodowej. Jednym z przejawów tej niestabilności jest nagłe występowanie ruchów masowych tych warstw, które potocznie nazywane są osuwiskami. Tym samym terminem jest też nazywany obszar, na którym te ruchy masowe miały miejsce. Jak podaje w swym opracowaniu Ministerstwo Środowiska RP [1], znaczna część osuwisk w Polsce (95 %) ma miejsce w Karpatkach, a więc na terenie województw: małopolskiego, podkarpackiego i w mniejszym stopniu śląskiego. Liczba osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami wzrasta w szybkim tempie, gdyż o ile w roku 2005 wynosiła ona w przybliżeniu 20 000, to obecnie (w roku 2017) jest ona ekstrapolowana na 50 000-60 000. Na wzrost ten z pewnością mają wpływ zmiany klimatyczne, a konkretnie występujące ostatnio intensywne i długotrwałe opady atmosferyczne, które przykładowo w 2010 roku doprowadziły do katastrofalnych osuwisk w rejonie Lanckorony, Limanowej i innych. W opracowaniu powyższym wprowadzono tzw. „wskaźnik osuwiskowości”, według którego wielkość obszaru objętego i zagrożonego osuwiskami stanowi 30÷40% powierzchni terenu polskich Karpat. Liczba ta świadczy bardzo wyraźnie o znacznych zagrożeniach dla środowiska i gospodarki, szczególnie dla budownictwa we wspomnianych 3 województwach, tym bardziej, że są to rejony Polski o znacznej urbanizacji.

Osuwiska powstają w naturalny sposób, są też bardzo często zainicjowane działalnością człowieka. Naturalne osuwiska urozmaicają rzeźbę terenu i są często rejonami o wybitnych walorach krajobrazowych, np. północne stoki Babiej Góry, czy Jeziorka Duszatyńskie w Bieszczadach. Osuwiska zainicjowane działalnością człowieka prowadzą niemal zawsze do dewastacji środowiska i znacznych strat gospodarczych. Autorowi znana jest historia wzgórz Krásna w Koszycach (Słowacja) które, jako zalesione, do lat 50-tych XX wieku było generalnie stabilne. Po znacznych wycinkach lasu, który stanowił system wiążący i drenujący potencjalnie niestabilne warstwy skalne i budowie osiedla willowego, które dodatkowo obciążało stoki wzgórz, powstały katastrofalne osuwiska, w konsekwencji których osiedle zostało całkowicie zniszczone (Rys. 1). Podobnie wycinka pierwotnej puszczy karpackiej i rozwój osadnictwa w polskich Karpatach uczyniły ten rejon geologicznie niestabilnym. Budownictwo, oprócz obciążania stoków masą wzniesionych budynków, wskutek niwelacji terenu prowadzi też do podcinania stoków, zwłaszcza wzdłuż dróg i linii kolejowych.



**Rys. 1.** Wzgórze Krásna w Koszycach (Słowacja). Osuwisko na zboczu nachylonym w kierunku rzeki Hornad.  
Fot. autora, rok 1999

Osuwiska dzielą się na wiele rodzajów [2]. Rysunek 2 przedstawia uproszczony schemat często występującego osuwiska rotacyjnego, konsekwentnego. Kształt płaszczyzny poślizgu takiego osuwiska jest cylindryczny, poślizg następuje na granicy utworów o różnej przepuszczalności wody. Stąd osuwiska te uaktywniają się szczególnie w okresach dużych opadów atmosferycznych, gdyż gromadząca się w strefie powierzchni poślizgu woda jest czynnikiem zmniejszającym tarcie międzyziarnowe nasączonych warstw.

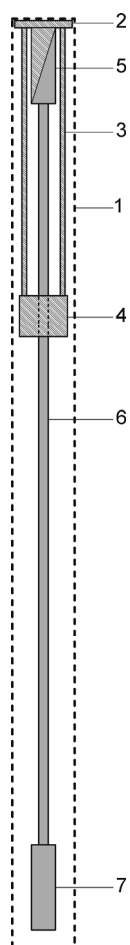


**Rys. 2.** Uproszczony schemat osuwiska

## 2. Proponowana metodyka badań stabilności osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami

Utrata stabilności zboczy nie zachodzi bez ostrzeżenia. Powodowana jest ona najczęściej wzrostem nawodnienia gruntu i skał. Osunięcia na wielką skalę są też poprzedzone niewielkimi lokalnymi ruchami, często niezauważalnymi naocznie na powierzchni. W Pracowni Odkształceń Skał od wielu lat rozwijana jest metodyka pomiarów tensometrycznych przemieszczeń gruntu i skał, głównie na obszarach objętych wpływem podziemnej eksploatacji górniczej. Wydaje się, że zastosowanie tej metodyki do badań obszarów osuwiskowych powinno dać pozytywny efekt. Niestety, niewielka baza pomiarowa tensometrów gruntowych (kilka metrów) zbytnia rozległość tych obszarów i duża nieregularność występowania osuń powoduje, że zastosowanie tensometrów gruntowych do ich kontroli jest problemem technicznie zbyt złożonym i kosztownym. Dlatego obecnie tereny tego typu badane są jedynie metodami geodezyjnymi, które w przeciwieństwie do metod tensometrycznych umożliwiają pomiary przemieszczeń bezwzględnych, a nie tylko względnych. Nie pozwalają one jednakże na stały monitoring obszarów zagrożonych, gdyż wykonywane są one ręcznie, z niewystarczającą częstotliwością.

Uzupełnieniem metod geodezyjnych mogłyby być metody pozwalające na obserwacje ruchów względnych przypowierzchniowych warstw gruntu i skał. W tym celu należałoby na zagrożonym terenie wykonać sieć otworów wiertniczych, przecinających szacowany poziom powierzchni poślizgu (Rys. 2). Uzbrojenie tych otworów, które należałoby wykonać w postaci odpowiednio sztywnych, grubościennych rur, wykazywałoby wychylenie wskutek przemieszczania się warstw gruntu i skał po sobie. Wychylenie to mogłoby być łatwo mierzalne za pomocą umieszczonych wewnątrz tych rur inklinometrów. Podłączenie ich do odpowiedniej aparatury pomiarowo-rejestrującej, a nawet transmitującej dane pomiarowe do ośrodków decyzyjnych pozwalałoby na prowadzenie pomiarów automatycznie z dużą częstotliwością, a nawet stały monitoring stanu zagrożonego terenu.



Rys. 3. Układ mechaniczny inklinometru fotoelektrycznego

## 3. Koncepcja i realizacja inklinometru fotoelektrycznego

Budowa i zastosowanie inklinometrów strunowych nie jest dla autora zagadnieniem nowym. Prototypowy inklinometr strunowy został skonstruowany i zastosowany z powodzeniem do badań wychylenia wieży zabytkowego budynku kościoła posadowionego w rejonie podziemnej eksploatacji węgla [3, str. 45, 72, 158]. Inklinometr ten pozwala nie tylko na pomiar wartości wychylenia, ale też i jego azymutu. Niestety jego gabaryty i delikatna konstrukcja nie są odpowiednie do instalacji wewnątrz rur otworów wiertniczych na głębokościach kilku – kilkunastu metrów. Dlatego został opracowany zapewne mniej dokładny, ale o mniejszych gabarytach i mocniejszej konstrukcji inklinometr fotoelektryczny. Podobnie jak wspomniany inklinometr strunowy pozwala on również na pomiar wartości wychylenia i jego azymutu.

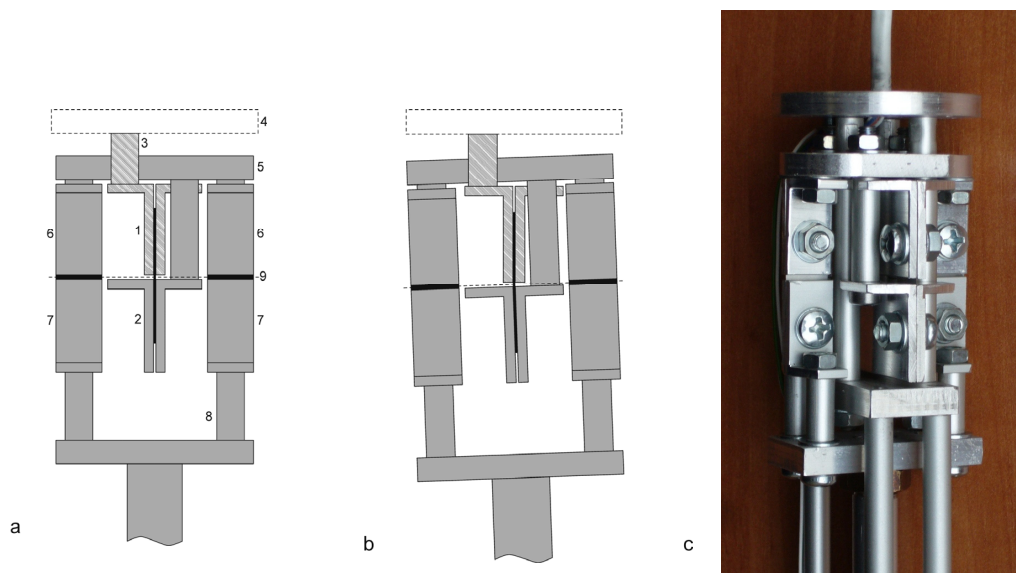
Inklinometr składa się z 4 zasadniczych podzespołów: zawieszenia Cardana, wahadła, zespołu fotoelektrycznego i hermetycznej obudowy.

Rysunek 3 przedstawia schemat układu mechanicznego inklinometru i jego fotografię. Układ ten składa się z elementów połączonych sztywno z obudową 1 (na schemacie zakreśkowane) i elementów połączonych z nią wahlwie (na schemacie zacieniowane). Elementy połączone sztywno z obudową to podstawa 2, wspornik zespołu fotoelektrycznego 3 i sam zespół 4 oraz część nieruchoma zawieszenia Cardana 5. Część ruchoma tego przegubu połączona jest z wahadłem (6 – drążek, 7 – ciężar



żarek). Poprzez podstawę 2 i obudowę 1 inklinometr jest stabilizowany wewnątrz rury otworu wiertniczego. Układ mechaniczny inklinometru pozwala na użycie jako jego obudowy niedrogiej, powszechnego użytku rury z PCW o średnicy wewnętrznej 50 mm wyposażonej w dwie zaślepki. Poszczególne podzespoły inklinometru i ich działanie przedstawione są w następnych akapitach.

Rysunek 4 obrazuje schemat zawieszenia Cardana i jego fotografię. Zawieszenie to umożliwia wychylanie się wahadła względem obudowy w dowolnym kierunku, nie pozwalając jednakże na jego obrót względem osi.



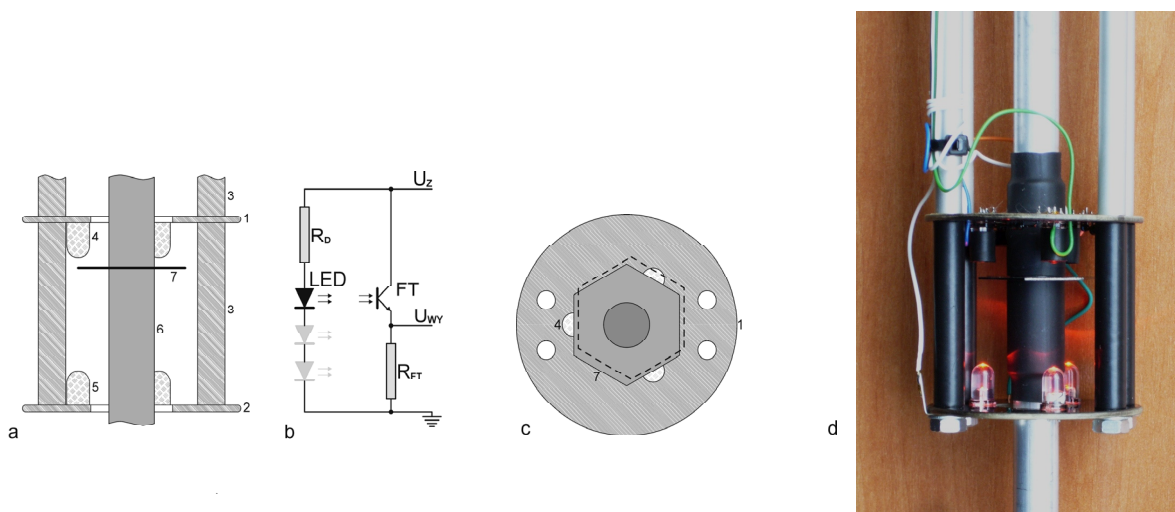
Rys. 4. Schemat zawieszenia Cardana i jego fotografia

Rysunek 4a to schemat zawieszenia w stanie spoczynku, 4b – przy wychyleniu wahadła o  $2^\circ$  w prawo, a 4c – fotografia gotowego zawieszenia. Jego konstrukcja jest bardzo prosta. Z podstawą inklinometru 4 (Rys. 4a) poprzez 3 tuleje 3 (na rysunku widoczna dla przejrzystości tylko jedna) połączona jest para kątowników 1. Pary kątowników 1 i 2 i zaciśnięte pomiędzy nimi 2 odcinki płaskiej sprężyny (oznaczone czarnym kolorem) to przegub sprężysty pozwalający na wychył wahadła w płaszczyźnie rysunku, tak jak to obrazuje rysunek 4b. Przegub działający w płaszczyźnie prostopadłej do poprzedniego składa się z płytki pośredniej 5, dwóch par kątowników 6 i dwóch par kątowników 7. Odpowiednie pary połączone są dwoma odcinkami płaskiej sprężyny, co pozwala na wychylanie się par kątowników 7 i w konsekwencji zawieszono na nich za pomocą tulejek i płytki 8 wahadła, prostopadle do powierzchni rysunku. Wszystkie przeguby pracują zatem w jednej płaszczyźnie 9 (Rys. 4a), co jest zgodne z zasadą funkcjonowania zawieszenia Cardana. Gotowy przegub (Rys. 4c) wydaje się być układem bardziej złożonym, a to z powodu konieczności przeprowadzenia przez niego zamocowania 3 zespołu fotoelektrycznego 4 (Rys. 3), które nie jest jego częścią.

Zespół fotoelektryczny składa się z części nieruchomej 4 (Rys. 3) względem obudowy zmontowanej z użyciem 2 płytek drukowanych i z części ruchomej – przesłony połączonej trwale z drążkiem wahadła 6. Dokładniej zespół ten obrazuje rysunek 5.

Jak wspomniano, zespół fotoelektryczny to 2 płytki drukowane: jedna z wlutowanymi 3 fototranzystorami 4 (Rys. 5a), druga z podobnie zamontowanymi diodami elektro-luminescencyjnymi (LED) 5, związany mechanicznie z obudową inklinometru tulejami 3. Elementem ruchomym zespołu jest sześciokątna przysłona 7, przymocowana do drążka wahadła 6. Diody 5 i fototranzystory 4 umieszczone są naprzeciwko siebie, parami w równej odległości od osi inklinometru, co  $120^\circ$ . Schemat ideowy zespołu obrazuje rysunek 5b. Trzy diody elektroluminescencyjne LED zasilane są wspólnie z napięcia  $U_Z$  przez rezystor szeregowy  $R_D$ . Szeregowo z fototranzystorem FT jest połączony rezystor  $R_{FT}$  i napięcie proporcjonalne do fotoprądu FT które na nim występuje jest napięciem wyjściowym zespołu LED-FT. Pozostałe dwa układy FT- $R_{FT}$  są identyczne.

Zasadę działania zespołu ilustruje rysunek 5c. W położeniu neutralnym przysłona 7 przysłania w poziomie światło padające z diod na fototranzystory. Są one zatem oświetlane w równym stopniu i na rezystorach połączonych z nimi szeregowo występują równe napięcia. Zmiana położenia przysłony względem fototran-



Rys. 5. Zespół fotoelektryczny inklinometru

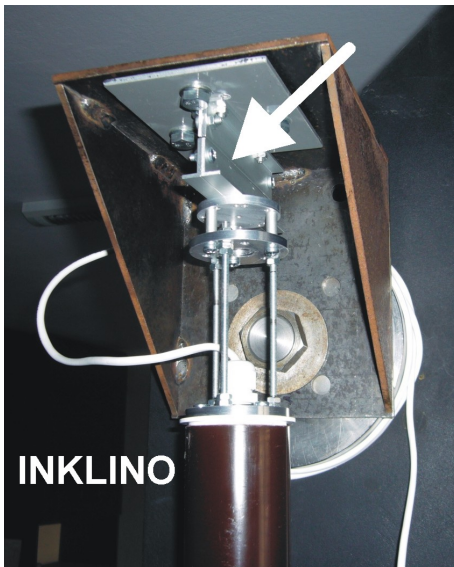
zystorów narusza tę równowagę (zarys przysłony narysowany linią przerywaną), co zmienia też wartość prądu fotoelektrycznego płynącego przez te fototranzystory i w konsekwencji zmienia wartości napięć na końcówkach poszczególnych rezystorów. Napięcia te przekazywane są na zewnątrz za pomocą kabla, którym też przesyłane jest zasilanie zespołu fotoelektrycznego. Wychylenie wahadła z pozycji neutralnej generuje zatem mierzalne zmiany 3 napięć, które przy znajomości charakterystyki inklinometru powinny umożliwić wartość tego wychylenia i jego azymut. Dla wygodnej i jednoznacznej identyfikacji poszczególnych 3 par dioda (*LED*) – fototranzystor zespołu fotoelektrycznego przypisano im kolory poszczególnych żył kabla, są więc pary: ‘zielona’, ‘biała’ i ‘niebieska’. Do budowy zespołu użyto niedrogich, powszechnie dostępnych na rynku fototranzystorów typu *LTR-3208* i nieoznaczonych diod elektroluminescencyjnych określanych potocznie jako ‘czerwone superjasne’. Fototranzystor *LTR-3208* ma maksymalną czułość dla promieniowania o długości fali 900 nm [4], a więc promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni. Typowe diody *LED* ‘czerwone’ mają szczyt swojej charakterystyki dla fali o długości w przybliżeniu 650 nm [5]. W tym zakresie wspomniany fototranzystor ma swą względną czułość ok. 75%, co do prawidłowego działania inklinometru jest w zupełności wystarczające. Diody ‘podczerwone’ są trudniej dostępne. Rysunek 5d to fotografia gotowego zespołu.

Wahadło jest podzespołem tak prostym, że nie ma potrzeby ilustrować jego budowy osobnym rysunkiem. Na fotografii (Rys. 3) widać wyraźnie, że składa się z drążka i ciężarka oraz przykręconej na pewnym dystansie tarczki. Tarczka ta zanurzona w odpowiedniej cieczy (oleju), której pewną ilość wystarczy nalać do dolnej części obudowy (zaślepki) spełnia rolę hydrodynamicznego tłumika wahadła, tłumiącego jego periodyczne oscylacje.

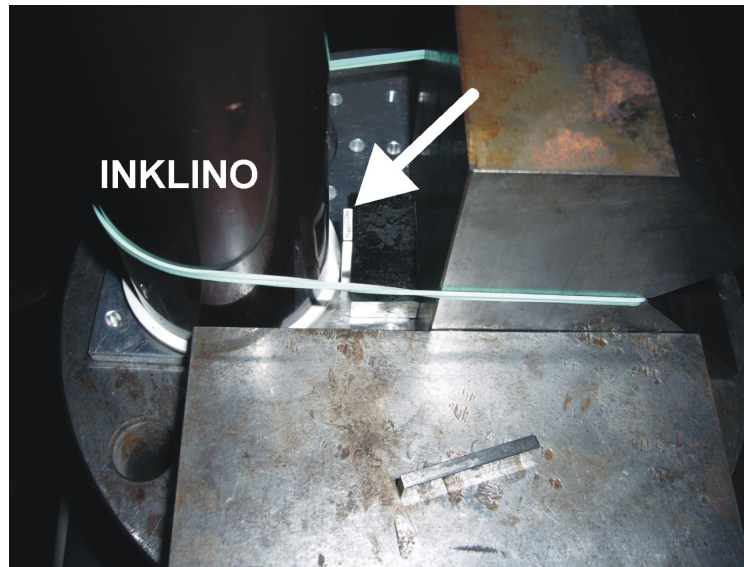
Powyższy opis funkcjonowania został dla przejrzystości przedstawiony tak, jakby elementami nieruchomymi inklinometru była jego obudowa i związany z nią mechanicznie zespół fotoelektryczny, a elementem ruchomym wahadło. W rzeczywistości, w pomiarach wychyleń uzbrojenia rur otworów wiertniczych elementem nieruchomym względem Ziemi jest wahadło, a ruchomym – obudowa i zespół fotoelektryczny.

#### 4. Badanie parametrów metrologicznych inklinometru

Do badań parametrów metrologicznych inklinometru zostało przygotowane stanowisko pomiarowe, a więc precyzyjne zawieszenie inklinometru zamocowane do stabilnej konstrukcji, jaką jest masywna, o masie ok. 10 Mg rama prasy ustawiona na odpowiednich do tej masy stopach fundamentowych (Rys. 6). Zawieszenie to zawiera podobny jak zastosowany w zawieszeniu Cardana inklinometru przegub sprężysty umożliwiający wychył badanego przyrządu w jednej płaszczyźnie. Zamocowanie inklinometru wykonano tak, aby tę płaszczyznę w każdym przypadku wyznaczała oś inklinometru i oś jednej z par dioda (*LED*) – fototranzystor (‘zielonej’, ‘białej’ albo ‘niebieskiej’). Zadawanie wychylenia realizowano za pomocą zaimprovizowanego, choć pewnego w działaniu, układu z użyciem płytek wzorcowych o grubościach do 10 mm (Rys. 7). Zespół fotoelektryczny zasilono napięciem stabilizowanym, pomiar jego napięć wyjściowych przeprowadzano z użyciem 3 multimetrów cyfrowych.

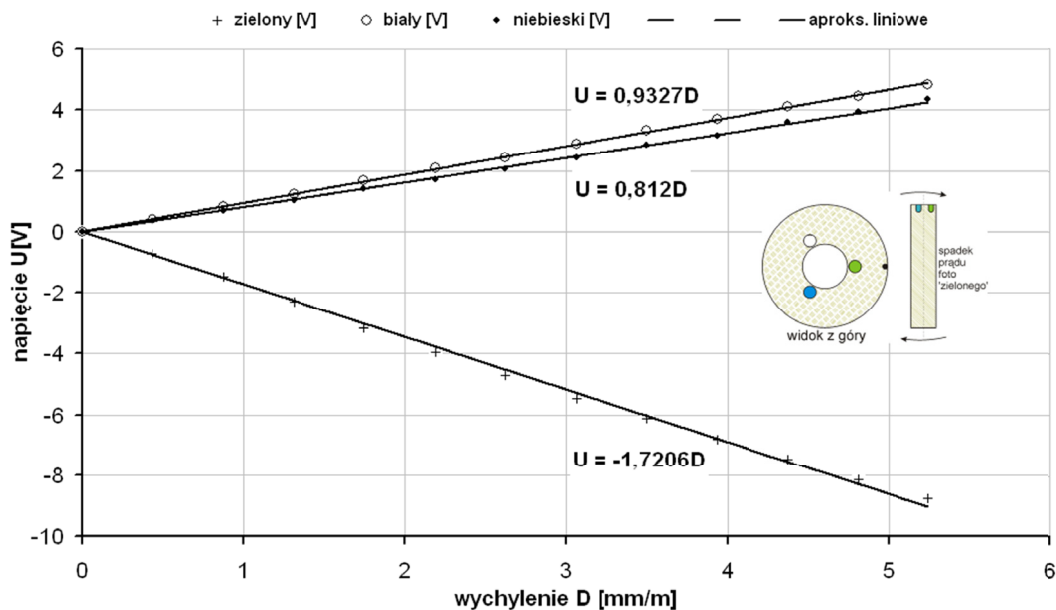


Rys. 6. Zawieszenie inklinometru do testów.  
Strzałka wskazuje przegub sprężysty



Rys. 7. Sposób zadawania przemieszczenia dolnego końca inklinometru.  
Strzałka wskazuje płytkę wzorcową

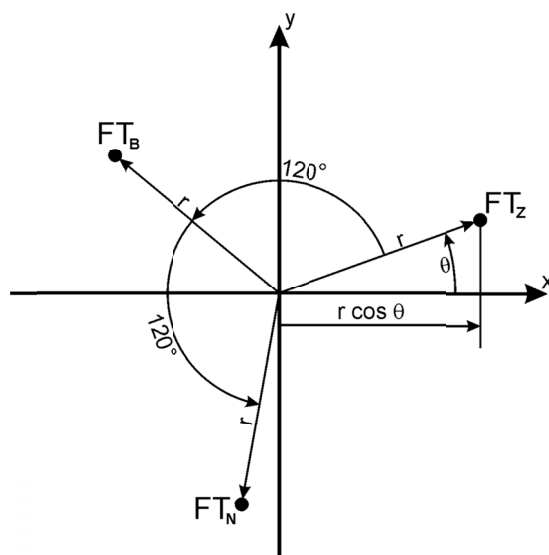
Dzięki takiemu sposobowi zawieszenia inklinometru i zadawania przemieszczenia fototranzystor z pary znajdującej się w płaszczyźnie wychyłu inklinometru powinien mieć teoretycznie czułość największą, a pozostałe fototranzystory czułości dwukrotnie mniejsze i równe sobie. Rysunek 8 przedstawia wynik testu dla inklinometru zawieszono w ten sposób, że para 'zielona' znalazła się w płaszczyźnie wychyłu.



Rys. 8. Test – wzorcowanie inklinometru, para LED – fototranzystor 'zielona' w płaszczyźnie wychyłu

Zakres zmian zadawanych przemieszczeń został zawężony do środkowych 6 mm, poza nim charakterystyki były zbyt nieliniowe, gdyż przysłona całkowicie odsłaniała bądź zasłaniała strumień światła z LED do fototranzystora. Niewielka nieliniowość charakterystyki fototranzystora 'zielonego' jest spowodowana zapewne kołowym, a nie prostokątnym (o stałej szerokości) kształtem strumienia światła pochodzącego z diody. Stała czułości fototranzystora  $k_z$  wynosi 1.72 (Rys. 8).

Jak wspomniano, inklinometr którego wahadło jest połączone trwale z sześciokątną przysłoną, umieszczoną pomiędzy 3 zespołami dioda elektroluminescencyjna (LED) – fototranzystor, rozmieszczonymi w jednakowej odległości od osi przyrządu co  $120^\circ$  powinien pozwolić na wyznaczenie kąta wychylenia obiektu do którego jest przymocowany od pionu  $\alpha$  i azymutu tego wychylenia  $\theta$ . Do wyznaczenia tych kątów na



**Rys. 9.** Widok z góry układu 3 fototranzystorów  $FT_Z$ ,  $FT_B$  i  $FT_N$  odległych od środka układu współrzędnych  $xy$  o  $r$ . Oś  $x$  leży w płaszczyźnie wychylenia inklinometru

podstawie wartości napięć wyjściowych z fototranzystorów: ‘zielonego’  $FT_Z$ , ‘białego’  $FT_B$  i ‘niebieskiego’  $FT_N$  posłużymy się rysunkiem 9.

3 fototranzystory  $FT_Z$ ,  $FT_B$  i  $FT_N$  położone są w odległości  $r$  od środka układu współrzędnych  $xy$ , przez który przechodzi przez płaszczyznę rysunku oś przyrządu. Napięcia z poszczególnych fototranzystorów przy wychyleniu inklinometru a są równe:

$$U_Z = k_Z \cos \theta \sin \alpha \quad (1)$$

$$U_B = k_B \cos(\theta + 120^\circ) \sin \alpha \quad (2)$$

$$U_N = k_N \cos(\theta + 240^\circ) \sin \alpha \quad (3)$$

gdzie:

$U_Z$ ,  $U_B$ ,  $U_N$  – napięcia wyjściowe z fototranzystora ‘zielonego’, ‘białego’ i ‘niebieskiego’

$k_Z$ ,  $k_B$ ,  $k_N$  – stałe czułości ww. fototranzystorów

Korzystając ze wzorów na cosinus sumy kątów otrzymujemy:

$$U_B = k_B \left( -\frac{1}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \right) \sin \alpha \quad (4)$$

$$U_N = k_N \left( -\frac{1}{2} \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \right) \sin \alpha \quad (5)$$

Suma napięć wywołanych odchyleniem od pionu inklinometru jest teoretycznie równa zero:

$$U_Z + U_B + U_N = 0 \quad (6)$$

Stosunek napięć  $U_B$  i  $U_Z$  wynosi:

$$\frac{U_B}{U_Z} = \frac{k_B}{k_Z} \frac{-\frac{1}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta}{\cos \theta} \quad (7)$$

$$\frac{U_B}{U_Z} = \frac{k_B}{k_Z} \left( -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right) \quad (8)$$

Zatem:

$$\tan \theta = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left( 2 \frac{U_B k_Z}{U_Z k_B} + 1 \right) \quad (9)$$

$$\theta = \arctan \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} \left( 2 \frac{U_B k_Z}{U_Z k_B} + 1 \right) \right) \quad (10)$$

Podobnie dla napięć  $U_N$  i  $U_Z$ :

$$\frac{U_N}{U_Z} = \frac{k_N}{k_Z} \frac{-\frac{1}{2} \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta}{\cos \theta} \quad (11)$$

$$\frac{U_N}{U_Z} = \frac{k_N}{k_Z} \left( -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right) \quad (12)$$

$$\tan \theta = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 2 \frac{U_N k_Z}{U_Z k_N} + 1 \right) \quad (13)$$

$$\theta = \arctan \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 2 \frac{U_N k_Z}{U_Z k_N} + 1 \right) \quad (14)$$

i napięć  $U_N$  i  $U_B$ :

$$\frac{U_N}{U_B} = \frac{\frac{U_N}{U_Z}}{\frac{U_B}{U_Z}} = \frac{k_N \left( -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right)}{k_B \left( -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right)} \quad (15)$$

$$\frac{U_N}{U_B} k_B \left( -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right) = k_N \left( -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \theta \right) \quad (16)$$

$$-\frac{1}{2} \frac{U_N k_B}{U_B} + \frac{1}{2} k_N = \frac{\sqrt{3}}{2} k_N \tan \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_N k_B}{U_B} \tan \theta \quad (17)$$

stąd:

$$\tan \theta = \frac{k_N - \frac{U_N k_B}{U_B}}{\sqrt{3} \left( k_N + \frac{U_N k_B}{U_B} \right)} \quad (18)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{k_N - \frac{U_N k_B}{U_B}}{\sqrt{3} \left( k_N + \frac{U_N k_B}{U_B} \right)} \right) \quad (19)$$

Ze stosunku wartości dowolnych 2 napięć można zatem wyliczyć kąt  $\theta$  według jednego ze wzorów: 10, 14 lub 19. Zatem podobnie jak kąt  $\theta$ , kąt  $\alpha$  też można wyliczyć korzystając z jednego z przekształconych wzorów 1, 2 i 3:



$$\alpha = \arcsin \frac{U_Z}{k_Z \cos \theta} \quad (20)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{U_B}{k_B \cos(\theta + 120^\circ)} \quad (21)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{U_N}{k_N \cos(\theta + 240^\circ)} \quad (22)$$

W praktyce inżynierskiej kąt  $\alpha$  często zastępuje się wychyleniem  $D$  [mm/m], tak więc wzór np. (20) upraszcza się do:

$$D = \frac{U_Z}{k_Z \cos \theta} \quad (23)$$

Kąt  $\alpha$  [°] lub wychylenie  $D$  [mm/m] można wyliczyć zatem z napięcia wyjściowego jednego fototranzystora (20, 21 i 22), ale suma napięć z wszystkich fototranzystorów, przy założeniu identyczności ich parametrów i identyczności parametrów oświetlających ich diod LED jest równa zero. Stąd wniosek, że jakikolwiek czynnik, np. zmiana temperatury otoczenia inklinometru, powodujący jednakową zmianę napięć z poszczególnych fototranzystorów nie ma wpływu na wynik – wartości kątów  $\theta$  i  $\alpha$ . Przy tym założeniu inklinometr jest urządzeniem samokompensującym się, również temperaturowo.

## 5. Zastosowanie prototypowego inklinometru do badań wychylenia otworu wiertniczego w bezpośrednim sąsiedztwie osuwiska

Gotowy inklinometr zamknięty hermetycznie w obudowie – metrowej rurze o średnicy zewnętrznej 55 mm wykonanej z PCW, został zainstalowany 10 lipca 2017 roku w otworze wiertniczym, oznaczonym symbolem B3, o średnicy ok. 80 mm, uzbrojonym grubościenną rurą o ściance 10 mm. Wewnętrzna średnica tej ścianki wynosi 60 mm, jest więc odpowiednio sztywna dla inklinometru. Otwór ten zlokalizowany jest w bezpośrednim sąsiedztwie osuwiska w miejscowości Dziekanowice, w gminie Dobczyce (Rys. 10, 11).



Rys. 10. Osuwisko w Dziekanowicach, strzałka wskazuje miejsce otworu B3

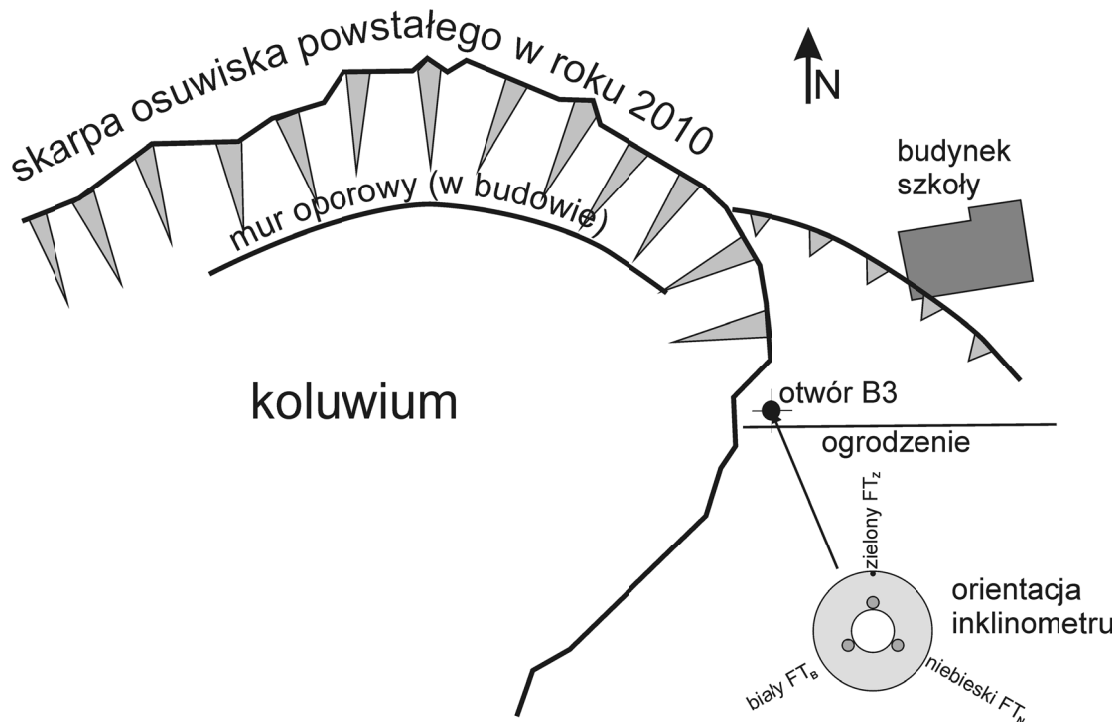


Rys. 11. Miejsce nad skarpą osuwiska, strzałka wskazuje miejsce otworu B3

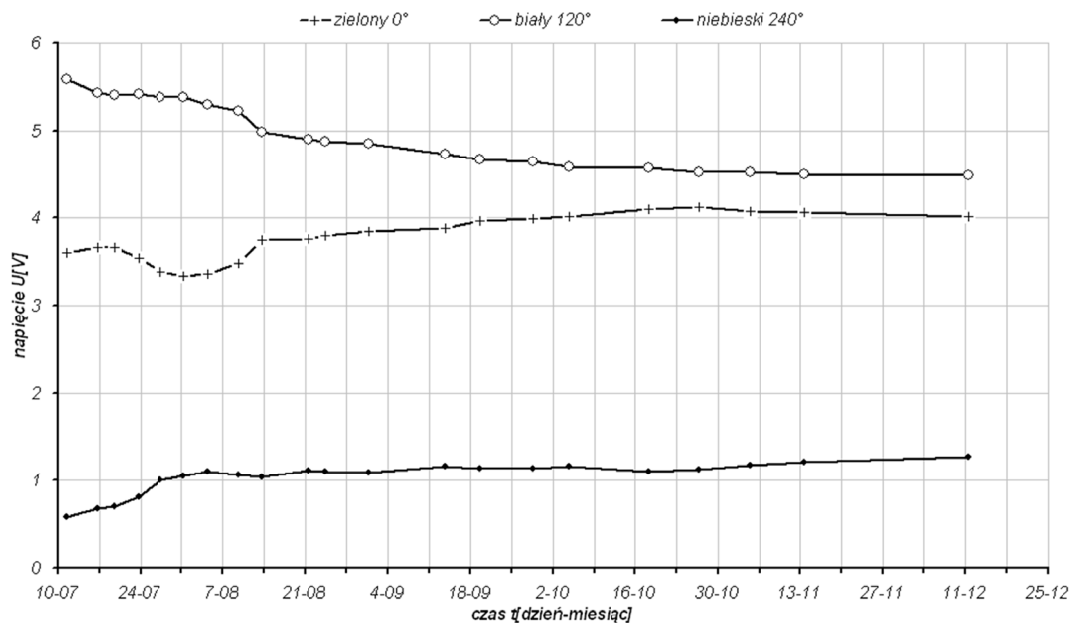
Przekrój poprzeczny tego osuwiska jest podobny do zamieszczonego na rysunku 2. Natomiast jego uproszczony rzut pionowy przedstawia rysunek 12.

Na rysunku tym schematycznie zaznaczono orientację kierunkową inklinometru, który zamocowano w rurze otworu tek, aby para dioda (*LED*)-fototranzystor ‘zielona’ znajdowała się na północ od osi przyrządu. Otwór B3 zlokalizowany jest na trasie ruchu ciężkiego sprzętu budowlanego (Rys. 10) co łącznie ze

szczupłością miejsca wewnątrz rury otworu B3 uniemożliwiło instalację urządzenia rejestrującego wychylenie inklinometru w sposób automatyczny. Dlatego pomiary realizowano ręcznie, początkowo w okresach w przybliżeniu 4-dniowych, ostatnio 8-10, dniowych, sporadycznie rzadziej. Rysunek 13 przedstawia czasowy przebieg napięć uzyskanych z poszczególnych fototranzystorów.



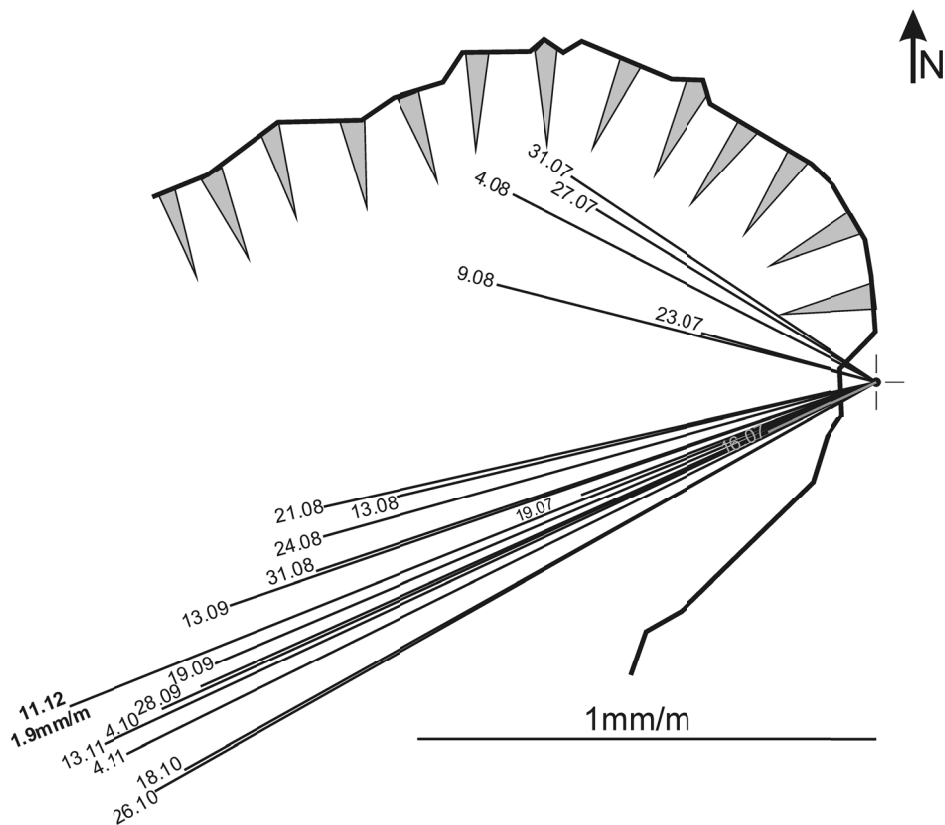
Rys. 12. Uproszczony rzut pionowy osuwiska. Budynek szkoły znajduje się w strefie zagrożonej, niewielkie osunięcia, powodujące pęknięcia południowo-zachodniego naroża powstały w latach 2013-2016<sup>1</sup>



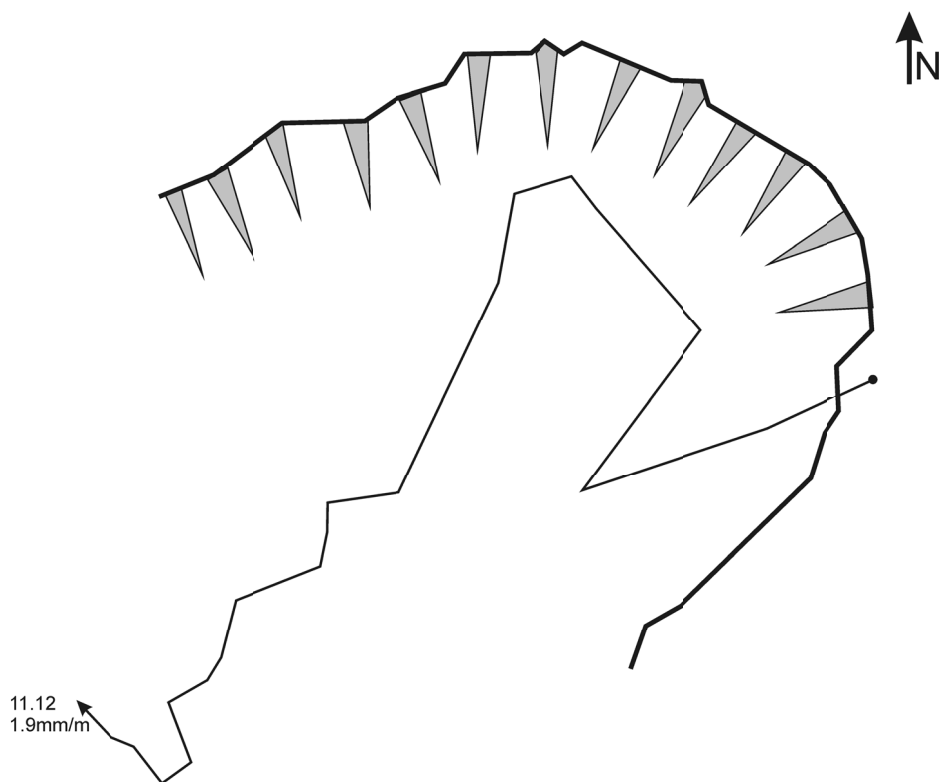
Rys. 13. Czasowy przebieg napięć na wyjściu inklinometru

Uzyskane w dniach od 11 lipca do 11 grudnia dane pomiarowe po przeliczeniu według równań (10) i (23) dały następujący obraz rozwoju wychylenia otworu wiertniczego B3 (Rys. 14).

<sup>1</sup> Rysunek wykonano na podstawie danych otrzymanych z Przedsiębiorstwa Geologiczno-Inżynierskiego GEO-INŻ-BUD



Rys. 14. Zmiany wychylenia otworu wiertniczego B3 w okresie od 16 lipca do 11 grudnia 2017 roku



Rys. 15. Zmiany wychylenia otworu wiertniczego w czasie jw., inny sposób interpretacji graficznej

Z powyższego rysunku widać wyraźnie, że wartości wychyleń otworu wiertniczego z czasem zwiększają się, a ich azymut jest w przybliżeniu stały – średnio  $245^\circ$ , zatem otwór wychyla się w kierunku skarpy (Rys. 12). Jedynie na przełomie lipca i sierpnia wychylenie otworu było w kierunku zachodnio-północno-

zachodnim, być może był to wpływ prowadzonych wówczas prac geotechnicznych mających na celu obniżenie poziomu wód gruntowych w strefie skarpy osuwiska. Stopniowe zwiększanie się wychylenia otworu (11 grudnia osiągnęło ono wartość ok. 1.9 mm/m) dowodzi, że skarpa nie jest jeszcze ustabilizowana.

## 6. Podsumowanie i wnioski

Zarówno opracowanie i wykonanie przyrządu pomiarowego – inklinometru nowego typu, jak i jego zastosowanie zostały zrealizowane w bardzo krótkim czasie, co sprzyjało użyciu rozwiązań konstrukcyjnych niedostatecznie sprawdzonych, lub nawet nietrafnych. Mimo to, zastosowanie prototypowego inklinometru w warunkach polowych wykazało jego przydatność do zamierzonego celu, jakim jest badanie stopnia stabilności obszarów potencjalnie niestabilnych. Z pewnością wyniki przedstawione na rysunku 14 obarczone są pewnymi błędami. Wydaje się obecnie, że słabą stroną inklinometru jest znaczny rozrzut czułości zastosowanych w nim 3 fototranzystorów. Dobór tych fototranzystorów ze względu na ich parametry nie jest rozwiązaniem dobrym, gdyż nie zapewnia ich stabilności w dłuższym (nawet wieloletnim) okresie ich użytkowania. Dlatego autor proponuje wyposażenie zespołu fotoelektrycznego inklinometru w układ do testowania czułości fototranzystorów przed każdym pomiarem wartości i azymutu wychylenia. Trwałość diod elektroluminescencyjnych jest bardzo wysoka, dla prawidłowej pracy inklinometru spadek ich mocy promieniowania nie ma znaczenia. Dodatkowym czynnikiem podnoszącym walory metrologiczne inklinometru będzie z pewnością użycie do pomiaru jego napięć wyjściowych automatycznego miernika-rejestrowatora, który wyeliminuje konieczność prowadzenia pomiarów ręcznie, co związane jest z ryzykiem wprowadzania błędów subiektywnych.

Budowa nowych przyrządów pomiarowych i ich zastosowanie *in situ* nie byłaby możliwa bez współpracy z jednostkami zewnętrznymi. W tym miejscu wyrażam serdeczne podziękowania panu mgr inż. Ryszardowi Murzynowi, właścicielowi Przedsiębiorstwa Geologiczno-Inżynierskiego GEO-INŻ-BUD, mającego swą siedzibę w Wiśniowej w powiecie myślenickim, za pomysł badania stabilności osuwisk za pomocą inklinometrów oraz za umożliwienie instalacji prototypowego urządzenia w Dziekanowicach i udostępnienie dokumentacji inżyniersko-geologicznej osuwiska.

Praca powstała w 2017 roku w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

### Literatura

- [1] źródło internetowe: <https://www.mos.gov.pl/srodowisko/geologia/osuwiska/gdzie-wystepuja-osuwiska-w-polsce/>
- [2] źródło internetowe: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Osuwisko#Morfologia\\_osuwisk](https://pl.wikipedia.org/wiki/Osuwisko#Morfologia_osuwisk)
- [3] Kanciruk A., 2012: *Metody tensometryczne w badaniach przemieszczeń, deformacji i zjawisk dynamicznych w gruncie i obiektach budowlanych*. Archiwum Górnictwa, monografia nr 15. Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Górotworu PAN Kraków.
- [4] źródło internetowe: <https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS-50-92-0067/R3208.pdf>
- [5] źródło internetowe: [http://www.dsod.p.lodz.pl/materials/OPT09\\_A00.pdf](http://www.dsod.p.lodz.pl/materials/OPT09_A00.pdf)

## Idea of a photoelectric inclinometer, its construction and application in practice

### Abstract

It is possible to observe the state of surface-close layers in areas which are geological unstable by means of measuring the tilt of test bore-holes. In this purpose such instruments like inclinometers can be used. In this paper an idea of a photoelectric inclinometer is presented, as well as its construction, testing and application. The mechanical system of the inclinometer makes it possible to fix it inside a robust bore-hole tube. The first, prototypic instrument was installed in a bore-hole tube situated at an edge of a landslide. The obtained measurement results make it possible to determine the value of the bore-hole tilt, as well as its azimuth.

**Keywords:** inclinometer, tilt and displacement measurement of a landslide