

ARTUR ZIELIŃSKI<sup>1)</sup>EWELINA MAZURKIEWICZ<sup>2)</sup>MIKOŁAJ ŁYSKOWSKI<sup>3)</sup>DARIUSZ WIECZOREK<sup>4)</sup>

## USE OF GPR METHOD FOR INVESTIGATION OF THE MASS MOVEMENTS DEVELOPMENT ON THE BASIS OF THE LANDSLIDE IN KAŁKÓW

### ZASTOSOWANIE METODY GEORADAROWEJ DO OCENY ROZWOJU RUCHÓW MASOWYCH NA PRZYKŁADZIE OSUWISKA W KAŁKOWIE

**STRESZCZENIE.** Osuwanie jest rodzajem ruchów masowych, które może stanowić poważne zagrożenie szlaków komunikacyjnych. W 2010 roku i później wystąpiło w Polsce wiele zsuwów oraz doszło do licznych uszkodzeń dróg i budynków. W związku z tym badania osuwisk stały się powszechniejsze. Umożliwiają one poznanie przyczyn i mechanizmów inicjujących ruchy gruntów. Bywa, że nawet małe zsuwy powodują szkody o znacznych wartościach, czego przykładem jest osuwisko w Kałkowie. W artykule przedstawiono próbę rozpoznawania struktury osuwiska metodą georadarową. Założono, że badania takie pozwolą ujawnić wewnętrzną naturę deformacji. Dzięki zastosowaniu pomiarów geofizycznych zdiagnozowano płytkie struktury o anomalnym przebiegu, które nie zostały wyłonione w wyniku badań geologiczno-inżynierskich. Zaletą metody georadarowej w porównaniu do rozpoznania wiertniczego jest możliwość wykonania tych badań dzięki niższym nakładom środków i czasu. Nie bez znaczenia są też ograniczenia wynikające z dostępności terenu, które łatwiej pokonać lżejszym sprzętem pomiarowym. Uzyskane analizy wskazują, że zastosowanie metody georadarowej w przypadku osuwisk stanowi dobre uzupełnienie oraz może być wykorzystywane jako badanie rozpoznawcze.

**SŁOWA KLUCZOWE:** metoda georadarowa, osuwisko, ruchy masowe, uszkodzenia drogi.

**ABSTRACT.** Landslides are a kind of mass movements posing a major threat to the transport routes. There were numerous landslides in Poland in 2010, damaging many roads and buildings. As a result landslide surveys have become more common. Their purpose is to understand the causes and mechanisms that initiate such earth movements. It happens that even minor landslides can cause considerable losses, Kałków being an example. This paper presents the landslide structure investigation with the use of Ground Penetrating Radar (GPR) method. The underlying assumption was that such investigation would reveal the internal structure of the deformation. Geophysical measurements enabled identification of shallow anomalous structures which were not identified during the preceding geo-engineering investigation. The advantage of the GPR method in comparison to subsurface exploration by boring is that it can be performed with less cost and time. Access restrictions are also to be taken into account and these can be overcome easier with lighter measuring apparatus. The analysis output allows the authors to conclude that the GPR method can be an option at the exploratory stage of landslide analysis.

**KEYWORDS:** GPR method, landslide, mass movements, road damage.

DOI: 10.7409/rabd.016.004

<sup>1)</sup> Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Instytut Geografii; ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce; artur.zielinski@ujk.edu.pl

<sup>2)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska; Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; emazurek@geol.agh.edu.pl (✉)

<sup>3)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska; Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; lyskowski@geol.agh.edu.pl

<sup>4)</sup> Świętokrzyskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk Geologicznych; ul. Zgoda 21, 25-378 Kielce; dariusz.a.wieczorek@gmail.com

## 1. WPROWADZENIE

Intensywne opady atmosferyczne mogą inicjować szereg procesów hydrologicznych i geomorfologicznych o katastrofalnych skutkach [1, 2] oraz wywoływać ruchy masowe ziemi. W Polsce za teren najbardziej zagrożony osuwiskami uznawane są Karpaty [3, 4]. Wyżyny Polskie oraz Niż Polski są w mniejszym stopniu narażone na powstawanie osuwisk [5], jednak i tutaj są miejsca, gdzie dochodzi do ich rozwoju. Osuwisko jest formą powstałą w wyniku nagłego i zazwyczaj dynamicznego grawitacyjnego ześlizgiwania mas ziemnych lub skalnych podłoża, po jednej lub kilku powierzchniach poślizgu [6, 7]. Przemieszczone w ten sposób masy nazywane są koluwiami. Osuwanie może być wywołane siłami przyrody lub zainicjowane działalnością człowieka. W wyniku osuwania, na stoku najczęściej zaznacza się nisza osuwiskowa (obszar skąd materiał ziemny lub skalny oderwał się). Poniżej tworzy się rynna osuwiskowa oraz jezor osuwiskowy, czyli miejsce, w którym materiał został odłożony. Gdy osuwisko jest młode a jezor koluwiów wystaje ponad otaczający teren, to jego najdalszy element nazywany jest czołem.

## 2. OBSZAR BADAŃ

Rejon Kałkowa położony jest w obrębie Wyżyny Kieleckiej [8], na pograniczu Płaskowyżu Suchedniowskiego oraz Wyżyny Sandomierskiej. Kałków znajduje się w gminie Pawłów w województwie świętokrzyskim. Osuwisko opisują współrzędne geograficzne: 50°57'30,8" N, 21°11'11,7" E. Zasięgiem swym objęło ono fragment drogi powiatowej nr 0903T Kałków – Wióry Zapora – Doły Biskupie. Na powierzchni terenu występują tutaj lessy górnoplejstoceniowe, a w ich podłożu warstwy piaskowcowo-mułowcowo-lupkowe dolnego triasu, dokładnie piaskowca pstrego środkowego [9]. Utwory triasowe w rejonie Kałkowa mają upad kilku stopni w kierunku S-SW-W, stąd stok, na którym powstało osuwisko jest konsekwentny. Miąższość pokrywy lessowej jest zróżnicowana, najczęściej osiąga kilka metrów. W pasie drogowym występują też warstwy konstrukcyjne zbudowane z utworów nasypowych. Powierzchnia terenu generalnie dość wyrównana, porożciniana jest wąwozami. Obszar ten odwadniany jest przez Świślinę.

Osuwisko powstało w sierpniu 2014 roku i skategoryzowano je jako aktywne [10]. Obecne obserwacje potwierdzają ten stopień kwalifikacji. Przyczyną wystąpienia ruchów masowych był znaczny wzrost wilgotności gruntu oraz obciążenie stoku przez nasyp drogi [10]. W lipcu 2014 r. wielkość opadów w rejonie Kałkowa wyniosła około 140 mm i była o około 160% większa od średniej miesięcz-

## 1. INTRODUCTION

Heavy rainfall can initiate a number of hydrological and geomorphological processes with catastrophic consequences [1, 2] and cause mass movement. The most landslide-prone area in Poland are the Carpathians [3, 4]. Landslides can also occur in the less landslide-prone areas of Poland, i.e. in the Uplands and in the Lowland of Poland [5]. A landslide is a landform created by sudden and most often rapid slipping of ground or rock masses over one or a few surfaces of shear under gravitational forces [6, 7]. The displaced masses (slide material) are referred to as colluvium. Sliding can be caused by natural or human causes. The usual slope deformation resulting from the sliding of the material is the landslide niche (the surface from where ground or rock material had been detached). The landslide channel and the tongue – the area where the displaced material accumulates – are the other features located further down the slope. In young landslides with the tongue protruding above the ground surface, its front end is called toe.

## 2. STUDY AREA

Kałków is located in the Kielce Upland [8] in the transition zone between the Suchedniów Plateau and the Sandomierz Upland. From the administrative perspective Kałków is located in the Pawłów Community in the Świętokrzyskie Voivodeship. The landslide area is bounded by the following geographical coordinates: 50°57'30.8" N, 21°11'11.7" E. The landslide encroached on a part of the subregional road No. 0903T connecting Kałków with Wióry Zapora and Doły Biskupie. The surface material comprises the loess of the Upper Pleistocene underlain by shale, mudstone and sandstone material of the Lower Triassic, specifically Middle Bunter Sandstone [9]. In the area of Kałków the Triassic deposits dip a few degrees toward S-SW-W and hence there is a consequent sliding surface. The thickness of the loess deposits varies, yet in most places it is in the order of about a few metres. Moreover, there are structural fill layers within the road right-of-way. The terrain surface is generally quite even, yet incised by gorges. The area is drained by the Świślina River.

The landslide occurred in August 2014 and it was classified as an active one [10]. This classification has been confirmed by the current observations. The mass movement was caused by a considerable increase of the soil moisture accompanied by the load imposed by the road embankment [10]. In July 2014 the amount of precipitation in the

nej z wielolecia [11]. Warto pamiętać, że opady w porze letniej często są związane ze zjawiskami burzowymi i cechują się znacznym natężeniem. Taki opad mógł ostatecznie przyczynić się do powstania tego zsuwu. Powierzchniowy spływ wód po stoku koncentrował się w spływ liniowy o coraz większej sile erozyjnej. Woda uszkodziła podbudowę opaski odwadniającej skarpe drogi, a transportowany przez nią materiał zasypał ten system odwodnienia. Zwiększony spływ wód opadowych po powierzchni terenu oraz przepływ śródpokrywowy zaowocował znacznym upłynięciem osadów. Można przypuszczać, że gwałtowny opad deszczu mógł wywołać ruch mas ziemnych, jednak z pewnością nie był jedyną jego przyczyną. Zapewne wcześniej w podłożu drogi zachodziły zmiany o charakterze progresywnym, które wpływały na charakter gruntu. Intensywne opady zainicjowały jedynie destrukcyjny proces osuwiskowy.

Zsuw ma 22 m długości, 32 m szerokości, zajmuje 0,07 ha powierzchni, a miąższość koluwiów wynosi 8 m [10]. Osuwisko zaznaczyło się wyraźnie w górnej części, gdzie uszkodziło drogę (Rys. 1). Powstały uskok przeciął warstwy konstrukcyjne w taki sposób, że zachodni pas jezdni obniżył się o 0,6-0,8 m. Doszło też do deformacji chodnika oraz bariery energochłonnej. Na szczęście nie doszło do uszkodzenia podziemnej linii energetycznej i światłowodowej, przebiegającej pod chodnikiem na głębokości około 0,8 m. Zastanawiające jest, że mimo dużego ubytku mas ziemnych w koronie drogi na stoku poniżej nie widać wyraźnego nagromadzenia koluwiów (czoła).



Osunięciu uległy grunty nasypowe przesycone wodą, stanowiące warstwy konstrukcyjne drogi. Nie można wykluczyć, że uległy także deformacjom lessy i utwory lessopodobne, których naturalna struktura została naruszona w trakcie budowy drogi. Na stoku powyżej drogi widoczna jest stara nisza osuwiskowa. Zauważono również zniekształcenia obudowy rowu odwadniającego ciąg komunikacyjny.

area of Kałków was about 140 mm, this being ca. 160% above the multi-year average precipitation [11]. It is worth noting that rains in summer are often heavy and accompanied by storms. Such heavy rain event could have triggered the landslide process. The surface flow concentrated into linear paths flowing down the slope with increasing erosion potential. The water damaged the base of the perimeter cut-off drain of the road and clogged it with the transported material. Increased overland and subsurface return flow (interflow) caused considerable liquefaction of deposits. While it is possible that heavy rain actually provoked the mass movement, it was definitely not the only factor responsible for it. Most probably some progressive changes had been going on in the road subgrade affecting the soil characteristics. The role of heavy rain was thus limited to generating the landslide process.

The slide is 22 m long, 32 m wide, covers the area of 0.07 ha and the colluvium thickness is 8 m [10]. The landslide is clearly marked in the upper part where it damaged the road (Fig. 1). The resulting fault cut through the road courses in such a way that the west facing lane of the road subsided by 0.6-0.8 m. Also the pedestrian lane and the safety barrier were deformed. Fortunately enough, the buried power and fibre-optic lines running at ca. 0.8 m depth below the path have remained unaffected. It is worthwhile noting that despite a considerable loss of material in the road structure there is no clearly seen depositional area (landslide toe).

The landslide material consisted of saturated material of the road structure. However, it cannot be excluded that loess and loess-like deposits, whose natural structure was disturbed during the road construction, were deformed as well. Moreover, there is an old landslide niche on the uphill side of the road. Deformation of the roadside drain lining was also noted.

Fig. 1. View of the damaged road – September 2014  
Rys. 1. Widok na uszkodzenia drogi – wrzesień 2014  
photo / fot. J. Rubinkiewicz

### 3. METHODS OF INVESTIGATION

The subject of this project is the suitability of the Ground Penetrating Radar (GPR) method for field investigation of the landslide in Kałków. The survey was to determine the internal structure of the slide and obtain spatial picture of ground displacement. Such information could be useful in assessing the potential for the development of landslide



### 3. METODY BADAWCZE

Celem badań była próba wykorzystania metody georadarowej do rozpoznania charakteru osuwiska w Kałkowie. Pomiarzy te miały określić strukturę wewnętrzną zsuwu i dać przestrzenny obraz przemieszczeń gruntu. Taka wiedza mogłaby okazać się przydatna w ocenie możliwości rozwoju ruchów osuwiskowych. Rezultaty pomiarów porównano z wynikami geologiczno-inżynierskiego rozpoznania osuwiska [12]. Badania przeprowadzono przy użyciu georadaru ProEx szwedzkiej firmy MalaGeoscience z podłączoną anteną ekranowaną 250 MHz. Zastosowana metoda należy do geofizycznych technik geoelektrycznych. Aparatura georadarowa generuje falę elektromagnetyczną propagującą w głąb badanego ośrodka. Podlega tam zjawiskom załamania, rozproszenia i odbicia od granic obiektów różniących się właściwościami elektrycznymi. Aparatura składa się z jednostki centralnej, nadajnika, odbiornika oraz anten [13]. Warto nadmienić, że im niższa częstotliwość, tym większy jest zasięg głębokościowy, ale niższa rozdzielczość pomiaru [14].

Badania wykonano wzdłuż czterech linii poprzecznych i jednej podłużnej w stosunku do osi osuwiska. Linie poprzeczne wiodły zgodnie z przebiegiem drogi, zaś podłużna zgodnie z osią spadku terenu i ruchem koluwiów. Zastosowany układ profili wynikał z dostępności terenu. Charakter badanego ośrodka warunkował przyjęcie prędkości propagacji fali elektromagnetycznej na poziomie 0,1 m/ns – piaski o średnim stopniu zawiłocenia [15].

W celu rozpoznania charakteru osuwiska i podłoża geologicznego wykonane zostały 2 otwory rdzeniowe (W1 i W2) oraz 4 otwory – sondy rdzeniowe (WS-1, WS-2, WS-3, WS-4) [12] – Rys. 2.

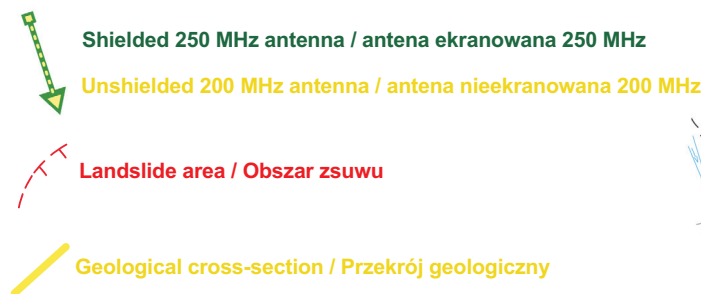
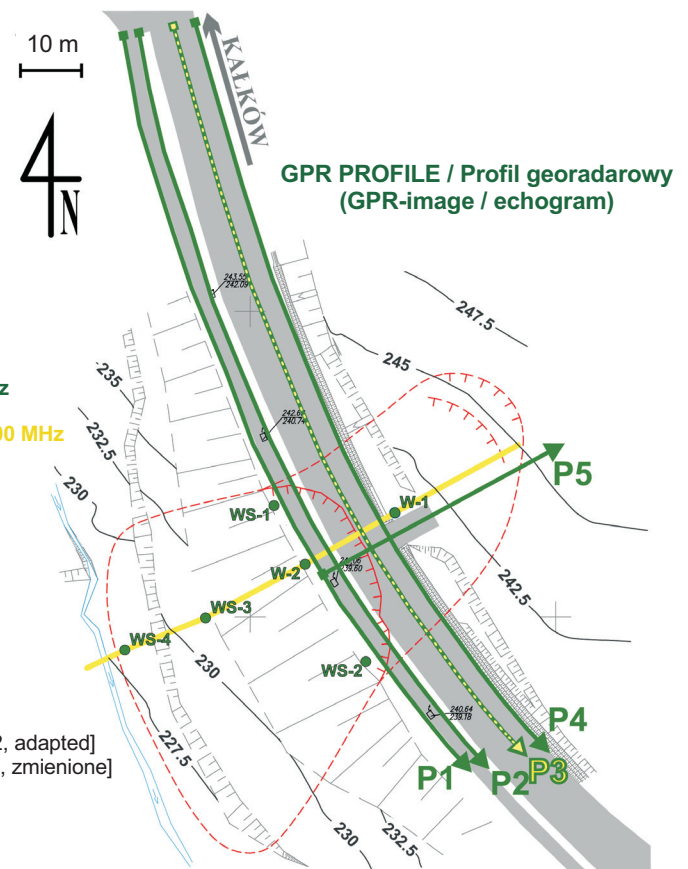


Fig. 2. Landslide sketch showing the GPR traverse lines [12, adapted]  
 Rys. 2. Szkic osuwiska z lokalizacją profili pomiarowych [12, zmienione]

movements. The GPR results were compared with the output of geo-engineering landslide investigation. The GPR equipment used in the testing was ProEx system from Sweden company MalaGeoscience coupled with a shielded 250 MHz antenna. The used test method is one of the geoelectrical methods applied in geophysical explorations. The GPR equipment generates an electromagnetic wave which propagates inside the material medium. On the way across the medium the wave is refracted, dispersed and reflected at the interfaces between objects with different electrical properties. The set-up comprises the control console, the signal generator, the receiving unit and the antenna [13]. Note that the decrease of frequency increases the penetration depth and decreases the measurement resolution [14].

The survey was performed along four transverse lines and one longitudinal line (in relation to the landslide axis). The transverse lines run parallel to the road alignment, while the longitudinal line is parallel to the slope line and to the mass movement axis. This adopted grid was defined by the access restrictions. The wave propagation velocity was assumed as 0.1 m/ns as appropriate to the type of the medium, namely moderately saturated sand [15].



## 4. WYNIKI BADAŃ

Na echogramie (obrazie georadarowym) uzyskanym na profilu 1 widoczny jest szereg niewielkich hiperbol, które są efektem odbicia fali elektromagnetycznej od metalowych słupków konstrukcyjnych przydrożnej bariery (Rys. 3). Na 40 mb profilu zaznacza się pionowa anomalia z wyraźnie widoczną hiperbolą, której pochodzenie powiązano z obecnością słupa technicznego z przewodem elektrycznym. Niewielkie, płytkie zakłócenia spowodowane są istnieniem studzienek technicznych. Od 60 mb do końca rejestracji na głębokości około 2 m widoczna jest odcięta warstwa, której źródło przynajmniej częściowo może stanowić płaszczyzna poślizgu. Na 80 mb profilu widoczna anomalia jest najprawdopodobniej odzwierciedleniem przerwania ciągłości warstw. W terenie granice osuwiska widoczne były pomiędzy 78 a 120 mb linii pomiarowej. Obserwowana od 60 mb odcięta warstwa jest więc po części związana z osuwiskiem, a po części może wskazywać na miejsca przyszłych ewentualnych ruchów grawitacyjnych.

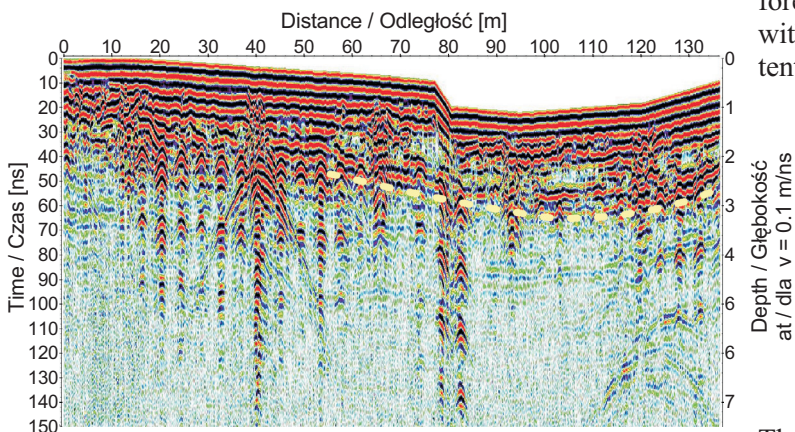


Fig. 3. GPR-image of traverse line No. 1  
Rys. 3. Echogram profilu 1

Na echogramie profilu 5 (podłużny) widoczne są wyraźne zmiany ciągłości warstw ośrodka pomiędzy 10 a 17 mb rejestracji, zaznaczone szczególnie na 14 mb (Rys. 4). Nie zarejestrowano jednak odzwierciedlenia typowej płaszczyzny poślizgu. Między 18 a 20 mb zaznacza się zdudnienie, którego źródłem jest betonowy mostek. Nałożona na nie hiperbola pochodzi od obiektu znajdującego się na powierzchni terenu.

Wyniki badań georadarowych mogą wskazywać na istnienie płytkiej powierzchni poślizgu występującej na głębokości 2-3 m. Prawdopodobnie to zsuw po tej powierzchni spowodował największe zniszczenia. Jednakże mimo ubytku mas ziemnych w drodze, nie widać nagromadzenia koluwiów poniżej jezdni. Należy przypuszczać, że w wyniku zsuwu doszło w tej strefie jedynie do zagęszczenia utworów (w wyniku kolapsu).

The nature of the landslide and the geological characteristics of the formation were determined on the basis of two cored boreholes (W1 and W2) and four cores obtained with tubular soil sampler (WS-1, WS-2, WS-3, WS-4) [12] – Fig 2.

## 4. TEST RESULTS

The GPR-image obtained on traverse line No. 1 shows a series of small hyperbolas created by the wave being reflected back by the metal posts of the roadside barrier (Fig. 3). At 40 m (*running meter*) there is a vertical anomaly with clearly marked hyperbola attributed to the utility post. Small interferences at shallow depths are attributed to the buried utility chambers. A faulted stratum extends from 60 m to the limit of recording at ca. 2 m depth whose origin could be linked, at least partly, to the slide surface. This fault is most probably represented by the anomaly noticed at 80 m. In field the limits of landslide area can be seen between 78 and 120 m of the traverse line. Therefore, the faulted layer starting at 60 m is partly associated with the landslide, and in a part can indicate the area of potential movements under gravitational forces in the future.

The GPR-image of profile 5 (longitudinal line) shows clear changes in the medium continuity between metres 10 and 17 m, particularly evident at 14 m (Fig. 4). However, no reflection trace representing a typical slide surface was noted. The reverberation observed between 18 and 20 m is attributed to the exiting concrete culvert. The superimposed hyperbola comes from an object located on the ground surface.

The results of the GPR survey may be interpreted as indicating a shallow slide surface at the depth range of 2-3 m. It is probably the material which slid down this slide surface that caused the greatest damage. Nevertheless, despite the loss of material from the road structure no accumulation colluvium zone can be seen on the downslope side of the road. Probably in this area the landslide effects were limited to compacting the deposits (as a result of collapse).

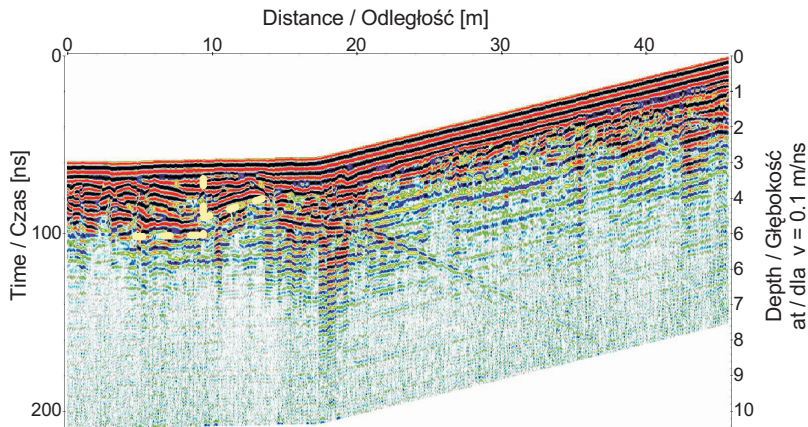


Fig. 4. GPR-image of traverse line No. 5  
Rys. 4. Echogram profilu 5

## 5. ANALIZA DANYCH GEOTECHNICZNYCH

W celu przeprowadzenia dokładnej analizy wyników uzyskanych na drodze badań geofizycznych zapoznano się z dokumentacją geologiczno-inżynierską osuwiska [12]. Według niej, w podłożu osuwiska, stwierdzono najgłębiej grunty zwietrzelinowe w przewadze spoiste, powstałe na bazie łupków dolnotriasowych, a w rejonie potoku piaski gliniaste z okruskami piaskowca, będące zwietrzeliną słabozwięzłego piaskowca dolnotriasowego (Rys. 5). Mają one korzystne parametry geotechniczne. Stanowią podłoże osuwiska, chociaż nie biorą udziału w ruchach masowych. Na zwietrzelinach występują górnoplejstocieńskie lessy o miąższości do 3 m, a w rejonie drogi nasypy budowlane o miąższości do 8,2 m. Powierzchnia kontaktu skał triasowych (tutaj zwietrzałych) z gruntami nasypowymi i lessami jest najbardziej krytycznym elementem budowy geologicznej z punktu widzenia odporności na ścinanie (analogiczna interpretacja w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [12]).

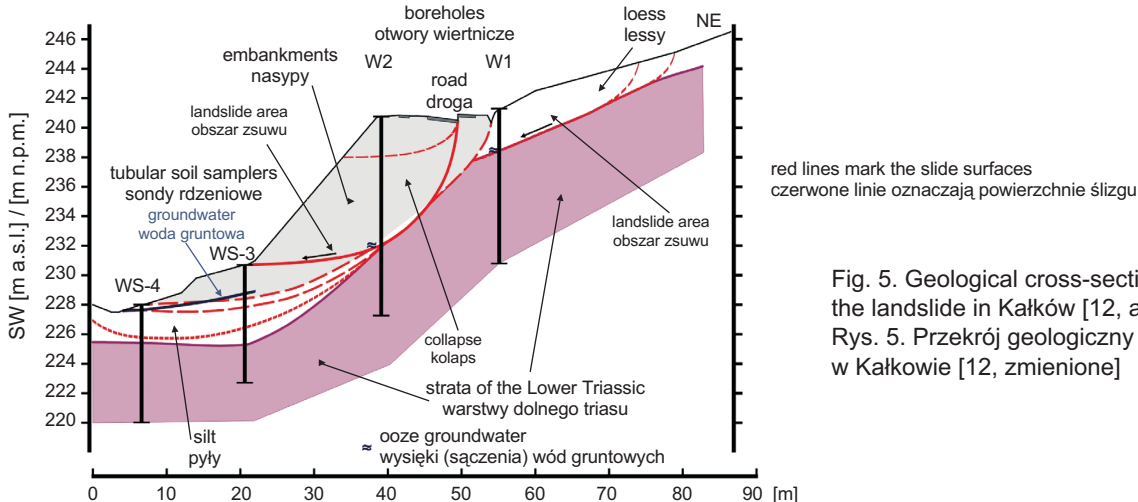


Fig. 5. Geological cross-section through the landslide in Kałków [12, adapted]  
Rys. 5. Przekrój geologiczny przez osuwisko w Kałkowie [12, zmienione]

## 5. ANALYSIS OF GEOTECHNICAL DATA

In order to enable a detailed analysis of the results obtained in the geophysical tests the geo-engineering survey documentation of the landslide was studied first [12]. According to its content, the basement material below the slide plane includes residual soil, most often cohesive, resulting from the weathering of shales of the Lower Triassic, as the lowermost stratum and, along the rivulet – loamy sand including pieces of sandstone, developed from the weathering of weakly cemented Lower Triassic sandstone (Fig. 5). This material has favourable geotechnical properties. It constitutes the landslide basement without taking part in the mass movement. The residual soils are overlain with loess layers of the Upper Pleistocene, up to 3 m thick, and near the road – structural fill of up to 8.2 m in thickness. The interface between the Triassic bedrock (weathered in this case) with the fill layers (road embankment) and loess deposits is the most vulnerable part of the ground structure in terms of the shear resistance (this is in line with the interpretation provided in the geo-engineering documentation [12]).



Lessy, niekiedy z domieszkami substancji organicznej i mułów oraz przewarstwieniami piasków średnich, to grunty mało i średnio spoiste [12]. W ujęciu geotechnicznym są to pyły, gliny pylaste i gliny pylaste zwięzłe. Grunty te mają zróżnicowane parametry geotechniczne, korzystne (przy małej wilgotności, stan twardoplastyczny lub półzwały) i niekorzystne (gdy są wilgotne, a ich stan jest plastyczny lub miękoplastyczny). W gruntach o niekorzystnych parametrach wytworzyły się lub mogą rozwinąć się powierzchnie poślizgu.

Nasypy budowlane wbudowywane były warstwami, a powstały z pyłów, glin pylastych, glin zwięzłych z domieszką piasków średnich, okruchów piaskowca i mułowca [12]. Stwierdzono w nich także substancje organiczne. Grunty nasypowe generalnie mają niekorzystne parametry geotechniczne, stąd m.in. uznano je za niekontrolowane. Są one mało wilgotne lub wilgotne, a ich stan jest w zakresie od miękoplastycznego do półzwałowego. W ich spągu występuje główna powierzchnia poślizgu (wysięki na 8,4 m w otworze W2).

W czterech otworach w pobliżu drogi zaobserwowano sączenia śródwarstwowe na głębokościach od 2,9 do 8,4 m [12]. Mogą one wskazywać lokalizację powierzchni poślizgu. W dwóch kolejnych otworach (w dnie dolinki) dowiercono się do wód gruntowych, których poziom niewiele różni się od poziomu wód w korycie cieku. Do oceny stateczności zbocza wykonano analizy i obliczenia metodą Sarma i Bishopa, dla parametrów całkowitych oraz efektywnych. Przeprowadzono je w przekroju zgodnym z ruchem koluwiów, przy założeniu kołowych i/lub łamanych powierzchni poślizgu oraz zbadanych parametrów gruntów [12].

Zbocze uważa się za stabilne, gdy wskaźnik stateczności  $F > 1$ , a w przypadku dróg, gdy  $F \geq 1,5$ . Po uwzględnieniu parametrów całkowitych obliczenia wykazały, że zbocze nie spełnia tych wymagań, a uzyskane wartości (Bishop:  $F = 0,43$ ;  $F = 0,39$ ; Sarma:  $F = 0,67$ ;  $F = 0,63$ ) sugerują, że zbocze jest niestateczne i może ulec deformacji [12]. Przy parametrach efektywnych, w trzech przypadkach na cztery, otrzymano spełnienie współczynnika minimalnej stateczności (Bishop:  $F = 1,17$  lub  $F = 0,69$ ; Sarma:  $F = 1,45$  lub  $F = 1,28$ ), jednak nie jest spełniony współczynnik dla dróg. Wobec tego nawet mała zmiana parametrów gruntów, wywołana na przykład ich nawodnieniem, może spowodować zachwianie czasowej równowagi zbocza i wywołanie ruchów masowych. We wszystkich obliczeniach powierzchnia poślizgu obejmuje drogę, a w symulacjach metodą Sarma powiększa się o tereny położone powyżej niej [12].

Loess, sometimes including some organic matter, mud and medium sand lenses, are classified as low or medium cohesive material [12]. From the geotechnical perspective this material classifies as silt, silty clay and cohesive silty clay. It has varying geotechnical properties which can be favourable (stiff or semi-cohesive at low moisture content) or unfavourable (plastic or soft at a higher moisture content). Thus slide surfaces have already developed or can develop depending on the parameters of soil.

The embankments were constructed in lifts and are built of silt, silty clay, cohesive clay including medium sand, pieces of sandstone and mudstone [12]. Organic matter was also found. The fill material was found to have generally unfavourable geotechnical parameters which is one of the reasons to classify it as loose fill. In terms of moisture content the material is slightly moist or moist in the consistency range from soft to medium stiff. The main slide surface is located in the floor of these deposits (ooze groundwater were observed at 8.4 m depth in borehole W2).

Ooze groundwater was noted in four boreholes located near the road at the depth range of 2.9-8.4 m [12]. These outflows can indicate slide surface location. Groundwater table was encountered in the two next boreholes (located in the valley bottom) at the depth approximating the elevation of the water table in the channel bed. The slope stability was assessed using the Sarma's and Bishop's methods for both total and effective stresses. The calculations were carried out for the profile corresponding to the downslope movement of colluvium for circular and/or kinked slide surfaces, and for the experimentally determined properties of soil [12].

The slope is considered stable with  $F > 1$  when there is no road, and  $F \geq 1.5$  when there is a road running on the slope. Taking the total stress values into consideration, the slope failed to meet these criteria and the values obtained with the two methods (Bishop:  $F = 0.43$ ;  $F = 0.39$ ; Sarma:  $F = 0.67$ ;  $F = 0.63$ ) indicate that the slope is instable and can be deformed [12]. Taking the effective stress values, the criterion of the minimum safety factor is met in three out of the total of four cases (Bishop:  $F = 1.17$  or  $F = 0.69$ ; Sarma:  $F = 1.45$  or  $F = 1.28$ ), yet it still fails to meet the safety criterion for slope including the road. If so, even a minor change to the soil parameters, for example resulting from saturation, can change the temporary equilibrium condition triggering mass movements down the slope. In all the above calculations the slide surface includes the road and in simulations with the Sarma's method also the areas on the upslope side of the road are considered [12].

## 6. DYSKUSJA I WNIOSKI

Przeprowadzone badania wskazują na pewne ograniczenia metody georadarowej wynikające z właściwości fizycznych badanego ośrodka gruntowego. Najbardziej problematyczne są w tym przypadku ośrodki charakteryzujące się dużym zawilgoceniem oraz znacznym udziałem materiałów ilastych – silnie tłumiących falę elektromagnetyczną generowaną przez aparaturę GPR. Nie oznacza to jednak, że metoda ta jest mało użyteczna. Rozpoznanie wiertniczne osuwiska, jakkolwiek dokładniejsze, ma ograniczenia wynikające z kosztów takich badań oraz z dostępności terenu. Wydaje się, iż metoda georadarowa może być uzupełnieniem badań wiertniczych, dając w korelacji z nimi pełniejszy obraz struktur osuwiskowych.

W obrazie echogramów można dopatrzeć się pewnych wskazań co do istnienia powierzchni poślizgu na głębokości 2-3 m. W geologicznych otworach badawczych, wykonanych w rejonie drogi na podobnych głębokościach, rejestruje się zmianę cech gruntów oraz obserwuje się sączenia śródwarstwowe [12]. W otworze W1 do głębokości 2,9 m zalegają gliny pylaste z humusem i pyły (lessy), poniżej zaś nawiercono utwory triasowe, a właściwie ich zwietrzelinę. W otworze W2 na głębokości 1,9 m następuje zmiana gruntów z pyłów na gliny pylaste. W sondach WS-1 i WS-2 wykonanych w pobliżu bocznych granic osuwiska w profilu zaznacza się zmiana stanu gruntów nasypowych.

Nie można wykluczyć, że na omawianym osuwisku mamy do czynienia z zawaleniem się form sufozyjnych, powstałych w nasypie drogowym, a przez wiele lat niewidocznych w terenie. Na istnienie w zlewni Świśliny i uaktywnianie się takich form po gwałtownych opadach o dużej wydajności zwracano uwagę już wcześniej [16, 17]. Być może w pewnym momencie formy sufozyjne nie wytrzymały nacisku nasypu drogowego oraz ruchu samochodowego, a nawodnione masy gruntów odprowadzone zostały w ich głąb (kolaps). Z jednej strony tłumaczyłoby to ubytek masy w podbudowie drogi, a z drugiej brak czoła koluwiów. Badania geologiczno-inżynierskie wykazały, że cały nasyp drogowy należy uznać za niekontrolowany, a to z uwagi na różnorodność zastosowanych w nim gruntów, różny ich stan oraz uwilgotnienie i ogólnie niekorzystne parametry geotechniczne [12]. Można przyjąć, że podczas budowy nasypu grunty te nie były dostatecznie zagęszczone do właściwych parametrów, zaś zastosowany materiał był niewłaściwy, ponieważ zawierał m.in. substancję organiczną. Niektóre grunty mogły mieć też większą porowatość. Dopóki nie były one zbytnio nawodnione, dopóty nasyp i zbocze wytrzymywały obciążenia statyczne (nacisk nasypu) i dynamiczne (ruch pojazdów).

## 6. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The tests carried out under this research have indicated some restrictions on the application of the GPR method related to the physical properties of the analysed medium. The most problematic in this case are the mediums with high contents of moisture and clay fraction which strongly attenuate the GPR signal. However, this does not mean that the method is of little use. This is because boring survey, although more accurate, has its own limitations related to cost and accessibility of land. Thus the GPR study can be added to the boring survey in order to obtain, by correlating the results of these two methods, a more comprehensive representation of the landslide structures.

In the GPR-images there are some indications of the slide surface running at 2-3 m depth. Variation of the soils parameters and ooze groundwater were noted in the geological exploratory boreholes near the road at similar depths [12]. In borehole W1 silty clay including humus and silt (loess) were found, reaching to 2.9 m depth, underlain with the formations of the Triassic or their residue, to be more precise. In borehole W2 transition from silt to silty clay occurs at the depth of 1.9 m. The soil samples WS-1 and WS-2 taken near the side boundaries of the landslide area show change of the state of fill.

However, the possibility of collapse of voids formed in the road embankment by suffosion, which could have remained unnoticed for years, cannot be excluded. It has been reported that such forms exist in the drainage area of Świślina River and that they can become active following heavy rains [16, 17]. It is possible that at some point they could no longer resist the combined load from the road embankment and from the traffic and as a result saturated soil masses sunk into these voids (process of collapse). This would explain both the loss of material from the road foundation and the lack of the landslide toe. Due to different types of material, their state, moisture content and generally unfavourable geotechnical parameters, as determined in the geo-engineering survey [12], the embankment as a whole classifies as non-engineered fill. It can be assumed that during embankment construction the material was not sufficiently compacted and, moreover, it was not suitable for construction for reasons including contamination with organic matter. Some soil materials could also feature higher porosity. As long as they were not excessively saturated with water both the embankment and the slope had sufficient capacity to resist the combined permanent loads (dead weight of the embankment) and live loads (road traffic).



O takich możliwościach interpretacji można wnosić także na podstawie obserwacji wód gruntowych [12]. W otworze W1 sączenie śródwarstwowe zaobserwowano na głębokości 2,9 m. Występuje ono w spagu lessów na stropie ilastych utworów triasowych. W otworach wykonanych poniżej drogi (W2, WS-1, WS-2) sączenia wód gruntowych stwierdzono właściwie w spagu nasypów budowlanych, na głębokościach 8,4; 5,9 i 6,0 m. Tutaj też występują one na stropie utworów triasowych. Zwraca uwagę, że na odcinku kilku metrów występuje również kilkumetrowa różnica położenia sączeń. Taką zmianę można próbować tłumaczyć istnieniem pustek w gruncie, być może o genezie sufozycznej. W rejonie tym mogły niegdyś występować źródła [12], które zanikły lub zostały zasypane. Prawdopodobne jest, że powyżej drogi zapisał się starszy fragment osuwiska, dziś słabo widoczny.

Rozpoznanie w terenie wskazuje, że na powierzchniowe ruchy mas ziemnych w tym rejonie mogą być narażone inne fragmenty drogi powiatowej, bowiem w pokrywie lessowej obserwowano m.in. liczne studnie sufozyczne. Pośrednio mogą na to wskazywać także badania modelowe stateczności zbocza, które pozostaje w stateczności chwilowej i nawet mała zmiana parametrów gruntów może spowodować zachwianie czasowej jego równowagi [12]. Biorąc pod uwagę istotę zjawisk osuwiskowych i zagrożenia jakie mogą sprawiać, należy w przyszłości rozważyć prowadzenie dalszych badań georadarowych na tej drodze. Powinno się je przeprowadzić poprzecznie do osi jezdni, na odcinku prowadzącym w kierunku do zapory. Badania takie, wykonywane np. w stałych odstępach czasu, mogłyby stanowić dobry wskaźnik dynamiki zachodzących przeobrażeń wewnątrz warstw. Alternatywnie stosowana może być metoda tomografii elektrooporowej, która również bywa wykorzystywana w badaniach osuwisk [18].

Warto raz jeszcze podkreślić, że użycie w budownictwie drogowym nasypowych gruntów antropogenicznych o złych parametrach (np. niezagęszczonych lub ze znaczną zawartością humusu czy lessów podatnych na rozmywanie), może przyczynić się w przyszłości do powstawania ruchów masowych i przynieść znaczne straty materialne (jak w opisywanym przypadku). Niewłaściwe prowadzenie prac związanych z tworzeniem nasypu, być może powodowane oszczędnościami lub dużym tempem robót, można uznać za prawdopodobną przyczynę powstania osuwiska.

Na koniec należy powrócić do tematu zabezpieczenia tej drogi od wpływu ze strony wód opadowych i gruntowych. Ze względu na charakter osadów budujących otoczenie należy rozpatrywać zastosowanie do tego celu drenażu powierzchniowego (rowy przydrożne), jak i podziemnego

Such interpretation is supported also by groundwater observations. An ooze groundwater was noted in borehole W1 at the depth of 2.9 m. It occurs at the floor of the loess deposit and on the roof of the clay Triassic deposits. In the boreholes located downslope of the road (W2, WS-1, WS-2) oozes were noted generally at the floor of constructed fill at the depths of 8.4 m, 5.9 m and 6.0 m. Here they occur also on the floor of the Triassic deposits. It is worth noting a few metre difference in the oozing depth on a distance of only a few metres. Such difference in depth can be explained by the presence of voids, possibly created by suffosion. There could have been water springs in the area [12] which either dried up or were buried. Upslope of the road there is apparently a fragment of some earlier landslide which, however, is hardly visible today.

The field survey revealed features, such as numerous suffosion holes in the loess cover, which make other fragments of the subregional road under analysis prone to mass movements. This is indirectly indicated by the slope stability model analyses, according to which the slope is in the state of temporary equilibrium which could be disturbed by even a small change in the parameters of the soil [12]. Taking into account the nature of the landslide phenomena and the hazards they carry it is recommended to have further GPR surveys done for that road. The traverses should run perpendicular to the roadway axis on the section heading to the dam. Such tests, for example repeated at constant time intervals, could be a reliable indicator of the progress of subsurface transformations. An alternative to such GPR monitoring could be Electrical Resistivity Tomography (ERT) – a method used for landslide surveys [18].

It is worthwhile to repeat that unsuitable man-made fill material (for example not compacted or unsuitable due to a high content of humus or loess prone to scouring) in road construction projects can contribute to the occurrence of mass movements bringing major losses (as it happened in the case under analysis). The probable cause of the landslide could be poor quality of embankment construction works, possibly due to over-tight budget or schedule.

Finally, the issue of protecting the road from the effects of surface runoff and groundwater should return. Taking into account the nature of deposits making up the surrounding soil it ought to be considered as a system combining both surface and subsurface drainage (roadside ditches and French drains). The principles of best engineering practice must be applied during the design,

(francuski). Oba muszą zostać należycie zaprojektowane i wykonane, a następnie użytkowane. Konieczna jest zatem ich stała konserwacja.

## PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować dr *Jackowi Rubinkiewiczowi* z Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie, za udostępnienie zdjęć osuwiska z okresu jego powstania oraz za możliwość ich wykorzystania w niniejszej publikacji. Dziękujemy także Panu mgr inż. *Leszkowi Śmigasowi*, Dyrektorowi Zarządu Dróg Powiatowych w Starachowicach, za udostępnienie „Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla zadania odbudowy drogi powiatowej nr 0903T Kałków – „Wióry” Zapora – Doły Biskupie likwidacja osuwiska w miejscowości Kałków na działkach 522, 394/6, 732, gmina Pawłów, powiat starachowicki, woj. świętokrzyskie”.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Starkel L.* (red.): Geomorfologiczny i sedymentologiczny zapis lokalnych ulew. Dokumentacja Geograficzna, 11. Wydawnictwo IGIPZ PAN, Kraków, 1998
- [2] *Zieliński A.*: Katastrofalne skutki gwałtownych opadów deszczu w okolicach Kromiołowa (dzielnica Zawiercia) w maju 1996 roku. XLVI Zjazd PTG, OA PTG. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Zegrze, 1997, 92-95
- [3] *Ziętara T.*: Procesy grawitacyjne, w: *Starkel L.* (red.) Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze. PWN, Warszawa, 1991, 430-434
- [4] *Poprawa D., Rączkowski W.*: Osuwiska Karpat. Przegląd Geologiczny, **51**, 8, 2003, 685-692
- [5] *Wojciechowski T., Mrozek T., Laskowicz I., Kulak M.*: Podatność osuwiskowa Polski, w: Materiały konferencyjne. Ogólnopolska Konferencja O!SUWISKO, Wieliczka, 2015, PIG-PIB Warszawa, 119-120
- [6] *Jaroszewski W., Marks L., Radomski A.*: Słownik geologii dynamicznej. Wydawnictwo WG, Warszawa, 1985
- [7] *Grabowski D., Marciniak P., Mrozek T., Nescieruk P., Rączkowski W., Wójcik A., Zimnal Z.*: Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1:10 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, 2008
- [8] *Kondracki J.*: Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa, 2001
- [9] *Filonowicz P.*: Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Słupia Nowa (817). WG, Warszawa, 1966
- [10] *Rubinkiewicz J., Rycio E.*: Karta dokumentacyjna osuwiska wraz z opinią, numer 26-11-042-ST-01. Miejscowość Kałków, gmina Pawłów, pow. starachowicki. woj. świętokrzyskie. 2014, <http://www.zdp-starachowice.pl/index.php/item/show/204>, 28.05.2015
- [11] *Ustrnul Z., Limanówka D., Biernacik D., Czekerda D., Kilar P., Mizera M.*: Biuletyn monitoringu klimatu Polski, lipiec 2014 r. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego, Warszawa, 2014, 1-23
- [12] *Jurczak S., Russocki M., Banek I., Kurkowski S., Kulig D.*: Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zadania odbudowy drogi powiatowej nr 0903T Kałków - „Wióry” Zapora - Doły Biskupie likwidacja osuwiska w miejscowości Kałków na działkach 522, 394/6, 732, gmina Pawłów, powiat starachowicki, woj. świętokrzyskie. Wykonawca: Przedsiębiorstwo Usług Geologiczno-Laboratoryjnych Sp. z o.o. „CHEMKOP-LABORGEO” w Krakowie, 2015
- [13] *Karczewski J., Ziętek J., Tomecka-Suchoń S.*: Zastosowanie metody georadarowej do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych. Nauki o Ziemi w badaniach podstawowych, złożowych i ochronie środowiska na progu XXI wieku. Kraków, 2001, 305-307
- [14] *Reynolds J.M.*: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd, UK, 2011
- [15] *Annan A.P.*: Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software Inc., Ontario, Canada, 2001
- [16] *Biernat T., Ciupa T.*: Geomorfologiczne skutki opadu deszczu w dniach 23-25 lipca 2001 w bezpośredniej zlewni budowanego zbiornika wodnego „Wióry” na rzece Świślinie, w: *Ciupa T., Kupczyk E.* (red.) Wpływ użytkowania terenu i antropogenicznych przekształceń środowiska przyrodniczego na elementy obiegu wody w zlewni rzecznej. Przewodnik sesji terenowej, Kielce - Wólka Milanowska, 2001, 125-127
- [17] *Ciupa T.*: Zagrożenia dla środowiska związane z występowaniem opadów nawałnych na terenach lessowych Niecki Nidziańskiej i Gór Świętokrzyskich. Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej w Kielcach, 7, 2002, 269-280
- [18] *Kamiński M., Ziętara P., Krawczyk M.*: Wykorzystanie tomografii elektrooporowej do badania osuwisk – osuwisko „Dzianisz” (południowo-zachodnie Podhale). Przegląd Geologiczny, **62**, 4, 2014, 198-203

installation and operation phases. As such, the continuous maintenance program is indispensable.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Dr. *Jacek Rubinkiewicz* from the Polish Geological Institute – National Research Institute in Warsaw for providing the photographs of the landslide taken at the time when it occurred, and for enabling to include them in this paper. Acknowledgements are also due to Mr. *Leszek Śmigas*, the Director of the Subregional Roads Management Office in Starachowice for providing the “Geo-engineering documentation for the reconstruction of subregional road No. 0903T Kałków – “Wióry” Zapora – Doły Biskupie, reinstatement of landslide in Kałków on the land plots No. 522, 394/6, 732 municipality of Pawłów, county of Starachowice in Świętokrzyskie province of Poland”.