

**METODY INSTRUMENTACJI I MONITORINGU
POWIERZCHNIOWYCH RUCHÓW MASOWYCH
NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH OSUWISK
W KARPATACH (BESKID NISKI, ŚREDNI I POGÓRZE)**

**Methods of surface ground movements instrumentation and monitoring
on the exemplar landslides localized in Carpathian Mountains
(Beskid Niski, Średni and Pogórze)**

Zbigniew BEDNARCZYK

*Institut Górnictwa Odkrywkowego Poltegor-Institut;
ul. Parkowa 25, 51-616 Wrocław;
e-mail: zbigniew.bednarczyk@igo.wroc.pl*

Treść: Artykuł powstał na podstawie doświadczeń autora z badań 24 osuwisk karpaccich w Beskidzie Niskim, Średnim i na Pogórze (Bednarczyk 2004, 2005, 2006, 2007). Projekt był finansowany przez Europejski Bank Inwestycyjny z funduszu na cele zabezpieczenia zagrożonych odcinków dróg publicznych oraz infrastruktury. W jego ramach wykonano dokumentację geologiczno-inżynierskie oraz instrumentację osuwisk. System monitoringu zawierał punkty pomiarów przemieszczeń wgłębnych, piezometrycznego poziomu i ciśnienia wód gruntowych. Badania kontrolne wykonywane latach 2005–2007 umożliwiły identyfikację zasięgu osuwisk i ich dynamiki oraz określenie czynników aktywujących osuwiska i uwarunkowań zastosowanych metod badawczych. Uzyskane dane zostały częściowo wykorzystane w projektach stabilizacji dostosowanych do typów osuwisk, jak również przy sprawdzeniu skuteczności zabezpieczeń. Decyzje o wyborze metody zabezpieczenia osuwisk często są podejmowane bez niezbędnej instrumentacji i pomiarów, co może prowadzić do nieefektywnych decyzji o możliwości i metodzie stabilizacji.

Słowa kluczowe: osuwiska, geologia inżynierska, geotechnika, monitoring geotechniczny, pomiary inklinometryczne, monitoring poziomu i ciśnienia porowego wód gruntowych

Abstract: Presented paper is based on mass movement investigations conducted by the author on twenty-four flysch landslides in Beskid Niski, Średni Mts. and Pogórze. Research financed by European Investment Bank was conducted for the purpose of landslide counteraction, for the roads and infrastructure safeguarding. Inside the project engineering geological reports and landslide instrumentation were prepared. Monitoring network included ground movement, water level and pore pressure transducers. Control monitoring measurements conducted in years 2005–2007 allowed landslide dynamic, depth and activating factors prediction together with instrumentation and monitoring circumstances. Obtained data were partly used in counteraction projects design and control. Decision of stabilization methods often are chosen without instrumentation and monitoring and could cased ineffective decision of stabilization possibilities and methods.

Key words: landslides, engineering geology, geotechnical engineering, geotechnical monitoring, inclinometer measurements, water level and pore pressure monitoring

WSTĘP – LOKALIZACJA I BUDOWA GEOLOGICZNA BADANYCH OSUWISK

Monitoring wykonywany był w trzech głównych rejonach badawczych położonych w Karpatach. Największy z nich, obejmujący 19 osuwisk, zlokalizowany był w rejonie Gorlic, pozostałe w rejonie Suchej Beskidzkiej (2 osuwiska) oraz Dukli (2 osuwiska). Powierzchniowe ruchy masowe będące przedmiotem badań powstały w obrębie utworów fliszowych reprezentujących utwory klastyczne sedymentacji morskiej (głównie łupki i piaskowce), których sedymentacja przebiegała równoległe z wypiętrzaniem Karpat. Warstwy zostały wypiętrzone, sfałdowane i przemieszczone w kierunku północnym podczas orogenezy alpejskiej. W holocenie intensywna erozja i wysoki poziom wód gruntowych spowodował intensyfikację procesów erozyjnych w dolinach rzecznych, co przyczyniło się do powstania ogromnej liczby osuwisk w obrębie osadów ilastych. Badania osadów organicznych zlokalizowanych w pobliżu Szymbarku za pomocą metody C^{14} wykazały, że osuwiska powstały najprawdopodobniej przed 8210 ± 150 laty. W późniejszym okresie były one wielokrotnie reaktywowane. Osady fliszowe w obrębie osuwisk reprezentowane są przez nawodnione ilołupki i piaskowce, czasami pokryte przez zwietrzeliny. Ilołupki na skutek aktywnych procesów geodynamicznych mają niekorzystne parametry mechaniczne typowe dla słabych gruntów spoistych (Rączkowski *et al.* 2002, Rączkowski 2005). Piaskowce najczęściej występują jako cienkie warstwy bądź przewarstwienia o zmiennym stopniu diagenety. Reprezentują one zazwyczaj warstwy bardziej przepuszczalne w obrębie dominujących warstw ilastych – ilołupków, i umożliwiają infiltrację i przepływ wód gruntowych oraz wzrost ciśnienia sphywowego. Spowodowane jest to występowaniem w ich obrębie dużej ilości spękań i nieciągłości dysjunktywnych. Zazwyczaj głębokość osuwisk waha się od kilku do ok. 20 m. Poziom wód gruntowych jest zwykle bardzo płytki i wynosi 0.5–1.5 m p.p.t. Nachylenie stoków osuwiskowych osiąga najczęściej od 15° do 35° .

INSTRUMENTACJA OSUWISK

Instrumentacja osuwisk miała za zadanie dostarczenie danych *in situ* dotyczących zachowania i zasięgu zachodzących procesów, jak również czynników je powodujących. Objęła ona instalację aparatury do pomiarów przemieszczeń wgłębnych oraz piezometrycznego poziomu wód gruntowych. Schemat punktu monitoringu zagrożeń osuwiskowych, który był zlokalizowany ponad drogą publiczną przedstawiono na figurze 1.

W ramach projektu zabudowano następujący sprzęt do monitoringu osuwisk:

- 23 punkty pomiarów inklinometrycznych, łącznie ponad 250 metrów rur inklinometrycznych ABS łączonych na szybkołączki, średnicy 70 mm. Zostały one zamontowane w wykonanych otworach dokumentacyjnych średnicy 132 mm, bezpośrednio po ich odwierceniu. Rury zostały wyposażone w specjalne przeguby zwiększające ich wytrzymałość oraz umożliwiające pomiar osiadań na głębokości powierzchni poślizgu. Do cementacji użyto specjalnie przygotowanej masy cementowo-bentonitowej, dostosowanej do rodzaju występujących w otworze skał i gruntów, zapewniającej dokładne przenoszenia sił działających w górotworze na rury pomiarowe. Głębokość instalacji wahała się od 6 do 21.5 m p.p.t. i była uzależniona od stwierdzonej w dokumentacji powierzchni poślizgu.

- 12 piezometrów wyposażonych w filtry ceramiczne typu „Poltegor” umiejscowione na głębokości 5 m p.p.t. (w otworach odwierconych obok punktów monitoringu przemieszczeń wgłębnych).
- 9 czujników pneumatycznych ciśnienia porowego wód gruntowych.
- 2 automatyczne elektryczne czujniki i rejestratory ciśnienia porowego i temperatury wód gruntowych.

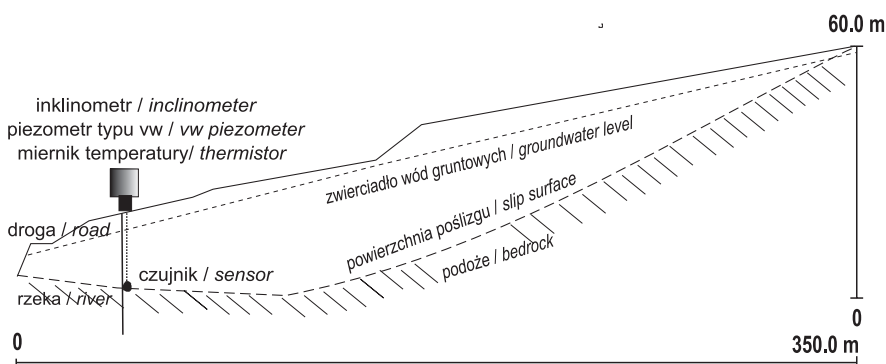


Fig. 1. Schemat punktu monitoringu osuwisk

Fig. 1. Landslide monitoring point scheme

Instrumentacja łącznie z pomiarami kontrolnymi miała za zadanie uszczegółowić informacje na temat budowy geologicznej rozpoznanej w trakcie wykonywania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Określenie głębokości i intensywności zachodzących ruchów masowych było zasadniczym jej celem. Procesy geodynamiczne będące przedmiotem badań, oprócz wpływu czynników geologicznych i nachylenia stoków, zostały zazwyczaj spowodowane zmianami warunków przepływu wód gruntowych oraz stopnia saturacji gruntów. Wzrost ciśnienia porowego w szkielecie gruntowym spowodował zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie oraz zwiększenie wrażliwość na procesy geodynamiczne.

MONITORING OSUWISK

Pomiary przemieszczeń wgłębnych i pomiary piezometryczne na osuwiskach rozpoczęły się na niektórych osuwiskach już od września 2005 roku, natomiast na większości od stycznia 2006 roku (18 punktów zlokalizowanych w Beskidzie Niskim i na Pogórze), były wykonywane w odstępach 1-miesięcznych i trwały przez 24 miesiące.

Monitoring przemieszczeń wgłębnych

Nachylenie rur inklinometrycznych w trakcie pomiarów było mierzone za pomocą dwupłaszczyznowej sondy inklinometrycznej, mierzącej w płaszczyznach A i B, co 0.5 m z dokładnością ± 0.1 mm. Błędy pomiarowe były eliminowane poprzez dwukrotne powtarzanie pomiarów. Pierwszy pomiar był wykonywany w kierunku A (zgodnym z kierunkiem osuwiska) a następnie w kierunku B (odwróconym o 180°). Kolejne wykonywane serie pomiarowe umożliwiły określenie przemieszczeń występujących w gruncie (Fig. 2).

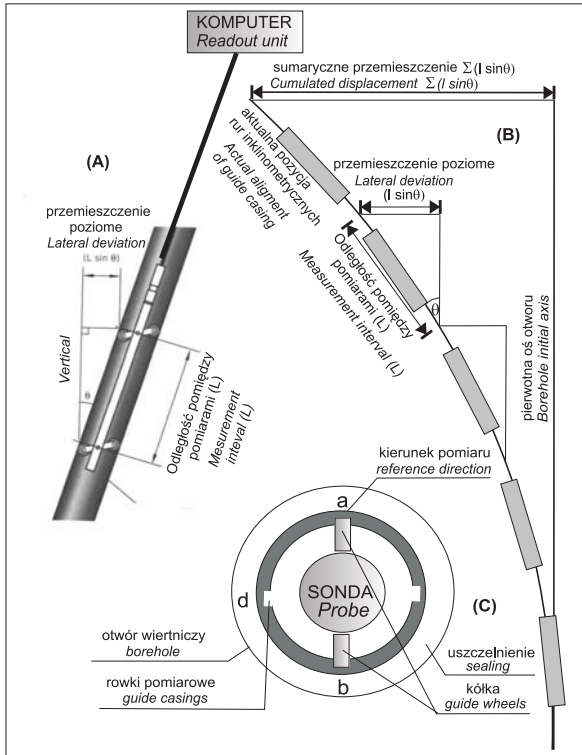


Fig. 2. Zasady pomiarów inklinometrycznych: A – rury inklinometryczne z sondą pomiarową, B – zasady obliczania występujących przeszczeń, C – przekrój przez rury inklinometryczne wraz z zaznaczeniem kierunku pomiarów

Fig. 2. Inclinometer measurement principles: A – inclinometer casings with measuring probe, B – displacement calculations, C – inclinometer casings cross-section with reference directions

Wykonane profile przeszczeń umożliwiły określenie wielkości, głębokości i kierunku ruchu osuwiska. Zmierzone nachylenia rur inklinometrycznych w stopniach zostały przeliczone na wielkości przeszczeń poziomych w milimetrach na podstawie funkcji trygonometrycznych.

Przeszczenia w każdym z otworów i dla każdej serii pomiarowej były obliczane poprzez porównania bieżących odczytów z początkowymi z zastosowaniem wzoru:

$$\Delta u_{iy} = Lx[\sin(\theta_{iy}) - \sin(\theta_{io})] \tag{1}$$

gdzie:

- θ_{iy} – nachylenie sondy w (i) sekcji pomiarowej (y) serii pomiarowej,
- θ_{io} – nachylenie sondy w (i) sekcji pomiarowej (o) w pomiarze zerowym.

Skumulowane przeszczenia były obliczane jako suma wszystkich jednostkowych przeszczeń od dołu do góry otworu według wzoru:

$$\sum \Delta u_{iy} = \sum \{Lx[\sin(\theta_{iy}) - \sin(\theta_{io})]\} \tag{2}$$

Wyniki pomiarów przemieszczeń wgłębnych wykazały, że skumulowane przemieszczenia w okresie 18 miesięcy wahały się od kilku milimetrów do 89 mm i zależały od wielkości i głębokości osuwiska. Jedne z największych wielkości przemieszczeń zaobserwowano na osuwisku w Szymbarku oraz Sękowej (Fig. 3, 4). Największe jednostkowe miesięczne wielkości przemieszczeń (12–20 mm) zaobserwowano pomiędzy majem i czerwcem 2006 i skorelowane są one z największymi zarejestrowanymi średnimi miesięcznymi wielkościami opadów atmosferycznych 230 mm (Fig. 10, 11).

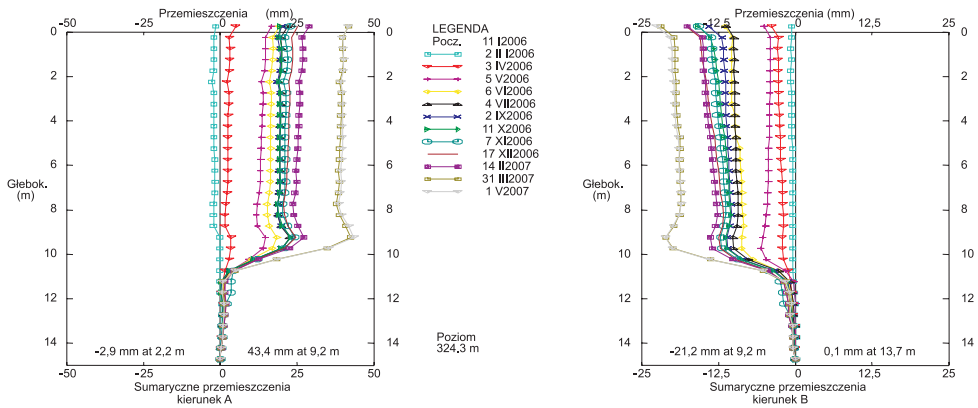


Fig. 3. Sumaryczne przemieszczenia, osuwisko Szymbark
Fig. 3. Cumulative displacements, Szymbark landslide

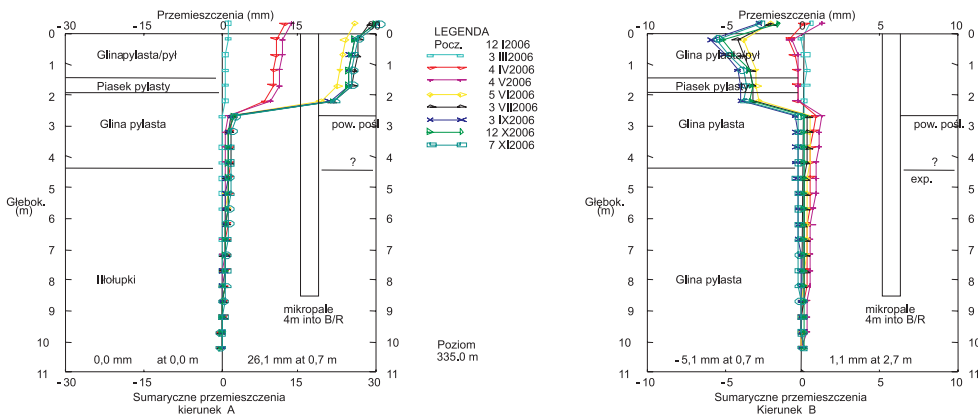


Fig. 4. Sumaryczne przemieszczenia wraz profilem geologicznym i elementami projektu stabilizacji, Sękowa
Fig. 4. Cumulative displacements together with geological profile and elements of stabilisation project, Sękowa

MONITORING PIEZOMETRYCZNY

Monitoring wykonywany jest w celu obliczenia wielkości naprężeń efektywnych występujących w obrębie gruntów i skał objętych przez powierzchniowe ruchy masowe w celu opracowania analiz stateczności. Na badanych osuwiskach pomiary piezometryczne wykonywano z użyciem trzech typów urządzeń, przy czym mierniki ciśnienia porowego montowano w pierwszej kolejności na skomplikowanych i dużych osuwiskach o złożonych warunkach gruntowo-wodnych.

Na największych osuwiskach w celu kalibracji wyników zamontowano wszystkie trzy rodzaje piezometrów:

- piezometry standardowe z filtrem ceramicznym typu „Poltegor” umiejscowionym na głębokości 5 m p.p.t. zilustrowane na figurze 5;
- czujniki pneumatyczne zabudowane w otworach wiertniczych, na głębokości przypuszczalnej powierzchni poślizgu, wewnątrz filtru wykonanego z piasku i uszczelnione od góry bentonitem zilustrowane na figurze 6;
- czujniki automatyczne.

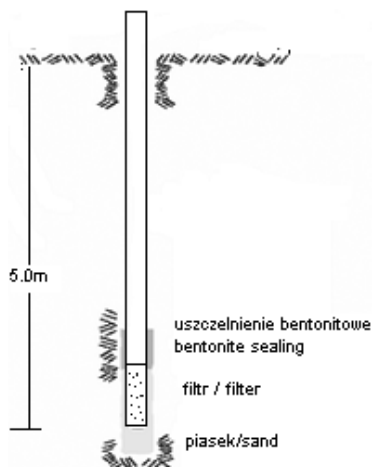


Fig. 5. Standardowy piezometr z filtrem

Fig. 5. Standard standpipe piezometer

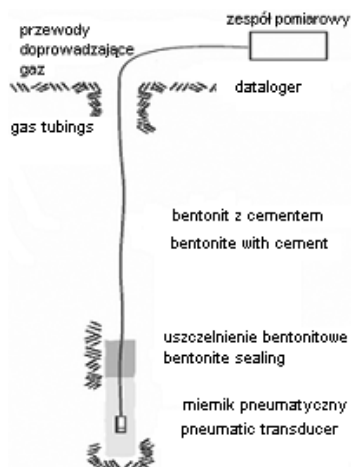


Fig. 6. Pneumatyczny miernik ciśnienia porowego

Fig. 6. Pneumatic pore pressure transducer

Sprężony gaz wykorzystywany do pomiaru był pompowany do czujnika pneumatycznego poprzez specjalne podwójne przewody doprowadzające. Kiedy ciśnienie gazu wyrównało się z ciśnieniem porowym wody, rejestrowano dane wskazywane przez miernik cyfrowy. Zasadę wykonywania pomiaru przedstawiono na figurze 7. W okresie czerwiec 2005 – grudzień 2007 wykonywano dwa standardowe typy pomiarów z przepływem gazu oraz po zamknięciu jego dopływu. Największe wartości ciśnienia porowego zaobserwowano w okresie pomiędzy kwietniem a czerwcem 2006 (Fig. 10), co odpowiada największym średnim miesięcznym wielkościom opadów mierzonych przez Stację Naukową PAN w Szymbarku (dane dzięki uprzejmości IGiZP PAN – Bochenek & Gill 2003). Zanotowane wielkości ciśnienia porowego wahały się w zależności od osuwiska od 0.5 do 45 kPa.

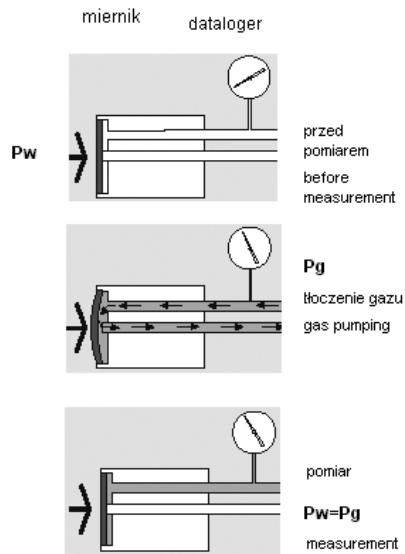


Fig. 7. Zasada działania pneumatycznego miernika ciśnienia porowego

Fig. 7. Principles of pneumatic pore pressure transducer

Czujniki automatyczne umożliwiły ciągły pomiar (cztery razy dziennie) temperatury oraz ciśnienia porowego wód gruntowych. Były one zabudowane na głębokości przewidywanej powierzchni poślizgu w piaszczystym filtrze uszczelnionym od góry korkiem bentonitowym (Fig. 8). Czujniki umożliwiają w połączeniu z rejestratorem dowolną częstotliwość pomiarów oraz przesyłanie danych poprzez modem lub sieć telefonii komórkowej.

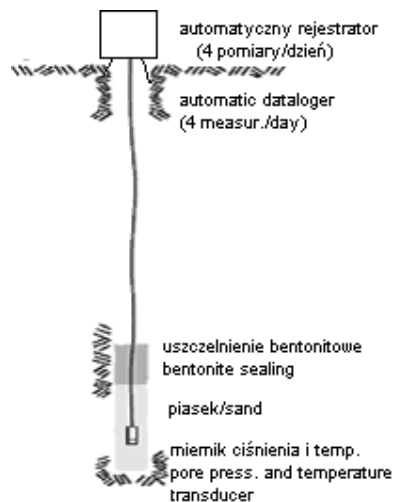


Fig. 8. Automatyczny miernik ciśnienia porowego

Fig. 8. Automatic pore pressure transducer

Czujniki elektryczne rejestrowały wartości ciśnienia w hercach (Hz), które następnie były przeliczone na jednostki ciśnienia i temperatury z wykorzystaniem równania

$$P = Ax^2 + Bx + C \quad (3)$$

gdzie x jest wartością odczytu w Hz, natomiast współczynniki A , B , C są parametrami charakterystycznymi każdego z czujników.

Czujniki zabudowane zostały w uszczelnionych obudowach ze stali nierdzewnej. Przed zamontowaniem i uruchomieniem wymagały saturacji oraz odpowiedniej kalibracji (Fig. 9). Współpracują one z rejestratorem komputerowym oraz oprogramowaniem do zapisywania wyników pomiarów.

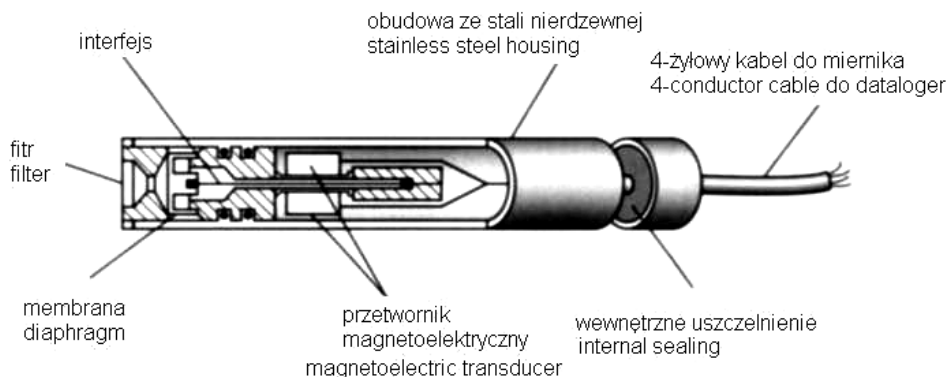


Fig. 9. Zasada działania automatycznego miernika ciśnienia porowego

Fig. 9. Principles of automatic pore pressure transducer

INTERPRETACJA WYNIKÓW

Wyniki otrzymane z monitoringu przemieszczeń wgłębnych zostały porównane ze zmierzonymi poziomami i wartościami ciśnienia porowego oraz temperaturą wód gruntowych (Fig. 10). Zaobserwowano, że zazwyczaj największe sumaryczne przemieszczenia gruntu (11.1–18.9 mm) występowały po osiągnięciu przez ciśnienie porowe wielkości maksymalnych (64 kPa), w okresie ich niewielkiego spadku. Wartości temperatury wód gruntowych były o ok. 0.75°C wyższe w okresie zimowym od temperatur zanotowanych w lecie, co było prawdopodobnie spowodowane zmniejszonym przepływem wód w okresie zimowym.

Dodatkowe informacje uzyskano z porównania zarejestrowanych średnich miesięcznych wielkości opadów ze stacji PAN w Szymbarku. Interpretacja tych danych, przedstawiona na figurze 11, wskazuje, że ciśnienie porowe wód gruntowych rosło po intensywnych opadach atmosferycznych, osiągając maksymalne wartości 45 kPa w czerwcu 2006 r.

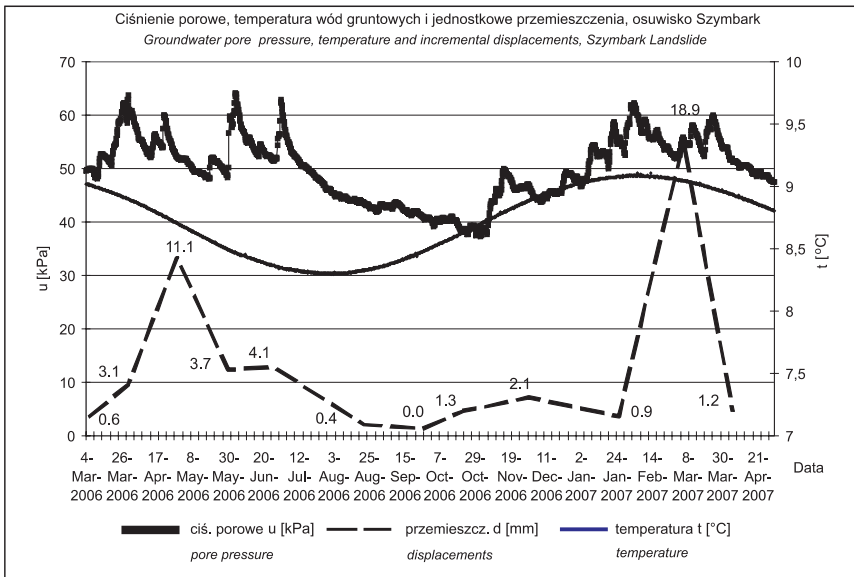


Fig. 10. Porównanie wielkości ciśnienia porowego, temperatury wód gruntowych (miernik automatyczny) i sumarycznych przemieszczeń (osuwisko Szymbark)

Fig. 10. Comparison of groundwater pore pressures and temperature (automatic transducer) and incremental displacements (Szymbark landslide)

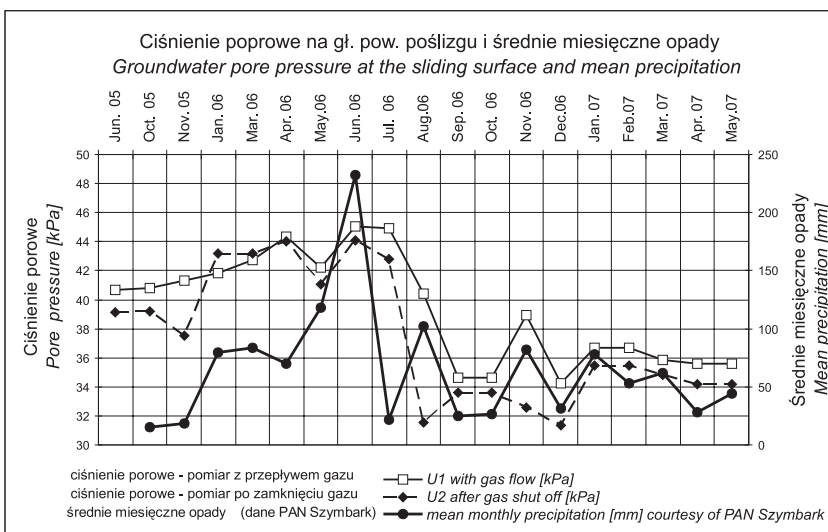


Fig. 11. Porównanie wielkości ciśnienia porowego (miernik pneumatyczny) ze średnimi miesięcznymi wielkościami opadów (osuwisko Sękowa)

Fig. 11. Comparison of groundwater pore pressure values (pneumatic transducer) with mean monthly precipitation values (Sękowa landslide)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania powierzchniowych ruchów masowych na wybranych osuwiskach w Beskidzie Niskim, Średnim i Pogórzu Karpackim polegały na rejestracji ich parametrów różnego rodzaju urządzeniami do pomiarów *in situ*. Dostarczyły one nowych danych oraz umożliwiły charakterystykę geotechniczną osuwisk stwarzających poważne zagrożenia dla dróg publicznych i infrastruktury. Pomiar monitoringowe wykonywane od stycznia 2006 roku wykazały, że znaczna część badanych osuwisk charakteryzuje się wysoką dynamiką przemieszczeń (Fig. 12).

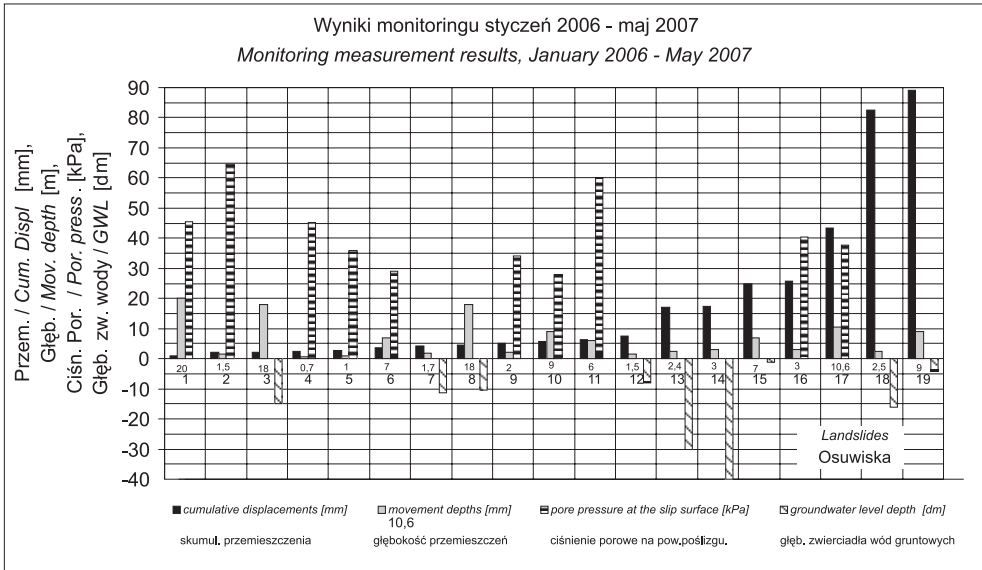


Fig. 12. Zestawienie wyników monitoringu osuwisk (01.2006–05.2007)

Fig. 12. Comparison of landslides monitoring results (01.2006–05.2007)

Sumaryczne zaobserwowane przemieszczenia w okresie styczeń 2006 – maj 2007 wynosiły 2–90 mm, głębokość powierzchni poślizgu 0.7–20 m, wartości ciśnienia porowego 0.5–65 kPa, a poziom zwierciadła wód gruntowych 0.4–4.0 m p.p.t. Instrumentacja i dane uzyskane z monitoringu zostały wykorzystane do modelowania stateczności oraz opracowania czterech projektów budowlanych zabezpieczenia osuwisk. Dzięki wykonanym pomiarom możliwe było zaplanowanie sposobów stabilizacji dostosowanych do konkretnych osuwisk, jak również sprawdzenie ich skuteczności. Jedno osuwisko znajduje się obecnie w końcowym etapie prac stabilizujących, a wykonywane na bieżąco pomiary wykazały, że w zagrożonym odcinku nastąpiła jego stabilizacja. Należy jednak podkreślić, że często decyzje o wyborze metody zabezpieczenia osuwisk są podejmowane bez niezbędnej instrumentacji i pomiarów, co prowadzi do nieefektywnego wykorzystania środków finansowych. Instrumentacja i monitoring osuwisk w Polsce, w przeciwieństwie do państw zachodnioeuropejskich, USA czy Japonii (Finlay *et al.* 1997, Janbu 1998), nie jest zazwyczaj powszechnie

stosowaną metodą, której wyniki są wykorzystywane podczas podejmowania decyzji o możliwościach i sposobie stabilizacji. Należy jednak mieć nadzieję, że w przyszłości ulegnie to zmianie.

LITERATURA

- Bednarczyk Z., 2007. Badania geologiczno-inżynierskie karpackich osuwisk fliszowych w rejonie Gorlic (Beskid Niski). *III Ogólnopolskie Sympozjum „Współczesne problemy geologii inżynierskiej w Polsce”*, Polski Komitet Geologii Inżynierskiej i Środowiska, Wydawnictwo Uniwersytetu Adama Mickiewicza Geologos, Poznań, 331–333.
- Bednarczyk Z., 2006. Landslide monitoring and instrumentation for Sękowa Landslide Stabilization Project (Carpathian mountains). *Proceedings of the Conference „Abiotic environment”*, Centre of Excellence Research on Abiotic Environment (REA) under the guidance of European Community, Warsaw, PGI Spec. Pap., 24, 7–9.
- Bednarczyk Z., 2005. Landslide investigations by static sounding with pore pressure measurements (CPTU), ground penetration radar techniques (GPR) and other chosen methods. *Proceedings of the Conference „Risks caused by the geodynamic phenomena in Europe”*, Centre of Excellence Research on Abiotic Environment (REA) under the guidance of European Community, Warsaw, PGI Spec. Pap., 15, 19–29.
- Bednarczyk Z., 2005. Geotechnical and geophysical methods for soil and rock design parameters characterization in mass movements areas. *Proceedings of the Conference „Mass Movement Hazard in Various Environments”* Centre of Excellence Research on Abiotic Environment (REA) under the guidance of European Community, Krakow, PGI Spec. Pap., 20, 27–35.
- Bednarczyk Z. & Sandven R., 2004. Comparison of CPTU and laboratory tests interpretation for Polish and Norwegian clays. *International Site Characterization Conference ISC-2*, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), International Society of Rock Mechanics (ISRM), International Association Engineering Geology (IAEG), Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Millpress, Rotterdam (Netherlands), 2, 1791–1799.
- Bednarczyk Z., 2004. Wybrane aspekty badań procesów osuwiskowych. *Materiały 62 Konferencji Polskiej Akademii Nauk – Warsztaty Górnicze „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*, Bełchatów, 611–623
- Bochenek W. & Gil E., 2003. *Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geosystemów Polski ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych*. Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Finlay P.J., Fell R. & Maguire P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 811–824.
- Janbu N., 1998. Slope stability evaluations in engineering practice. *NTNU Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for Geoteknikk, Bulletin*, 34, Trondheim (Norway).

- Larsen J.O., 2002. *Some aspects of physical weather related slope processes*. NTNU, Department of Geotechnical Engineering, Trondheim (Norway) (praca doktorska).
- Rybar J., Stemberk J., & Wagner P., 2002. Landslides. *Proceedings of the First European Conference on Landslides*. Prague (Czech Republic), 24–26.
- Rączkowski W. & Mrozek T., 2002. Activating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20th century. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 36, 91–111.
- Rączkowski W., 2005. Landslide investigation and monitoring methods in Poland, Czech Republic and Slovakia. *CEI Plan of Action 2002–2003, Section A-Geology. Geohazards in Central Europe*.
- Senneset K., 1998. Natural and Man-Made Hazards: Landslides, Stability analysis, control, case histories. *General report Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet*, 34, Trondheim.

Summary

Mass movement investigations inside chosen localizations in the Carpathian Mountains (Beskid Niski, Średni and Pogórze) included installation of different types of monitoring devices for in situ measurements (Figs 1, 2, 6–9). They delivered new geotechnical landslide data in areas with treats for roads and infrastructure. Monitoring measurements conducted from January 2006 (Figs 3–6, 10–11) indicated that most of the landslides were characterized by the high values of ground movements. Comparison of landslide monitoring results (Fig. 12) showed that cumulated displacements in these period were 2–90 mm, sliding surface depth 0.7–20 m, pore 0.5–65 kPa and groundwater level 0.4–4.0 m below the natural terrain level. Instrumentations together with monitoring results were used for slope stability calculations and preparation of four landslide stabilization projects preparation and control. One of the landslides is now in the final part of stabilization works and control measurements are conducted. In Poland, in opposite to western European Countries USA and Japan instrumentation and monitoring are not very popular and often prediction of counteraction possibilities and methods are chosen without these important data what could lead to ineffective works however it should be hope that it will be changed in a near future.