

Metody monitoringu osuwisk i wczesnego ostrzegania on-line na przykładzie badań geologiczno-inżynierskich w Beskidzie Niskim i Średnim

Zbigniew Bednarczyk¹



Landslide monitoring and on-line early warning methods based on geological engineering investigations in the Beskid Niski and Beskid Średni Mountains. Prz. Geol., 63: 1220–1229.

Abstract. The objective of this paper is to present results and conclusions from landslide monitoring and early warning methods implemented by the author for road and infrastructure stabilization projects. Research present monitoring for 23 Carpathian landslides and 8 counteraction projects. Implemented instrumentation besides standard monitoring methods included automatic on-line measurements with real-time transfer of landslide data to the Internet. The initial site investigations were funded under the Landslide Counteraction Project (2005–2009). Standard monitoring measurements were financed by author and Poltegor-Institute (2006–2015). Real-time measurements were realized inside the EU Innovative Economy Programme (2008–2013). These measurements are conducted and financed by the author till now. The instrumentation consists of 26 standard inclinometers to depths of 5–21 m. Up to fifty five series of measurements performed 4–9 times a year from 2006 till now detected displacement from several millimetres to 49 cm. These were observed at depths of 1–17 m. Modern automatic, early warning, real time system was installed in May 2010. The system is the first of its kind in Poland and one of several such a systems in the world. The installation was carried out in consultation with the Local Road Authority in Gorlice. It contained three automatic field stations investigating landslide parameters to the depths of 12–16 m and the weather station. The displacements were measured by in-place inclinometers, and innovative 3D continuous inclinometer systems with sensors located every 0.5 m. It has possibility to measure much greater range of movements compare to the standard systems. The obtained data allowed better recognition of geohazards triggering parameters and control of landslide stabilization works. It included definition of risk conditions. The early-warning about the risk to the road owner and the Carpathian Branch of Polish Geological Survey were implemented. Chosen monitoring methods and numerical modelling could help in forecasting of the landslide movement for estimation of remediation possibilities and improve effectiveness of stabilization works. However, landslide stabilization works are usually difficult and should be connected with control monitoring measurements.

Keywords: landslide monitoring systems, engineering geology investigations, landslide stabilization

W polskich Karpatach występuje ok. 35000 osuwisk, co stanowi ponad 95% osuwisk w kraju. Każdego roku powodują one ogromne straty ekonomiczne, co szczególnie uwidoczniło się w maju i czerwcu 2010 r.. Szacuje się, że na każdy kilometr kwadratowy powierzchni i pięć kilometrów długości drogi publicznej przypada jedno osuwisko (Rączkowski & Mrozek, 2002). Powodują one zagrożenie dla ludzi, straty w infrastrukturze i utrudnienia w funkcjonowaniu gospodarki.

Koluwia osuwisk karpaccyckich reprezentują typ grunto-skalny, wg Hutchinsona (1988) oraz Crudena i Varnesa, (1996). Głównym czynnikiem aktywującym przemieszczenia głębokie były zazwyczaj intensywne opady atmosferyczne. Fliszowe koluwia grunto-skalne wymagały użycia specjalnych metod badań. Utwory tego typu były trudne dla wykonania testów *in situ* i badań laboratoryjnych. Było to spowodowane tym, że niektóre z metod badań geologiczno-inżynierskich gruntów nie są przydatne w przypadku skał fliszowych. Należy też podkreślić, że zazwyczaj oprócz głównego czynnika aktywującego osuwiska, jakim było nachylenie stoku lub budowa geologiczna występowało kilka dodatkowych przyczyn.

Najbardziej powszechnie używaną w Polsce metodą badań osuwisk są wiercenia obrotowe, często jedynie świdrem spiralnym. Dobrej jakości wiercenia rdzeniowe są bardzo ważne, ale jednocześnie stosunkowo kosztowne i nie są w stanie dostarczyć wszystkich danych, np. związanych z wielkościami, kierunkiem i głębokością występujących przemieszczeń. Dlatego przy prognozowaniu aktywności

osuwisk najlepiej stosować różnorodne metody badawcze, przy czym szczególnie przydatny może być monitoring geologiczno-inżynierski i badania geofizyczne. Standardowe metody pomiarów wymagają licznych, a przez to zazwyczaj kosztownych prac w terenie. Systemy automatycznego wczesnego ostrzegania on-line są także zazwyczaj drogie, ale bardzo użyteczne w obszarach wysokiego ryzyka (Agnelli i in., 2000; Larsen, 2002; Senneset, 1998). Są one stosowane np. w USA, Japonii, Chinach, Włoszech, Austrii i Norwegii. Pozwalają na szybki i łatwy dostęp do danych osuwiskowych w czasie rzeczywistym lub prawie rzeczywistym. Uzyskane wyniki pomiarów umożliwiają ostrzeganie o zagrożeniach. Pozwalają także, w połączeniu z modelowaniem numerycznym, na określenie możliwości efektywnej stabilizacji, projektowanie prac zabezpieczających oraz ich kontrolę. Systemy monitorowania osuwisk w Polsce były stosowane dotychczas stosunkowo rzadko, chociaż w ostatnich latach częściej (Neścieruk & Rączkowski, 2012). Dostęp do reprezentatywnych danych z monitoringu ma jednak zasadnicze znaczenie dla efektywnego projektowania zabezpieczeń. Badania geologiczno-inżynierskie i projekty prac stabilizacyjnych w Polsce są wykonywane zazwyczaj w bardzo krótkim okresie czasie (np. w okresie 4–5 miesięcy wraz z wykonaniem projektu zabezpieczenia osuwiska i uzyskaniem pozwolenia na budowę). Często uniemożliwia to poznanie wszystkich niezbędnych parametrów osuwiskowych oraz może grozić zastosowaniem nieefektywnych metod stabilizacji.

Lokalna administracja i zarządy drogowe często nie posiadają danych monitoringowych dotyczących aktywno-

¹ Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Poltegor-Institut, ul. Parkowa 25, 51-616 Wrocław; zbigniew.bednarczyk@igo.wroc.pl.

ści i zasięgu tych geozagrożeń. Autor artykułu przez okres dziewięciu lat prowadził standartowy monitoring osuwisk karpackich w wybranych lokalizacjach karpackich (Bednarczyk 2008a, b, 2009, 2011, 2012a, b). Instalację standartowej sieci monitoringu osuwisk wykonano w ramach Programu Osłona Przeciwoświsowska. Część pozostałej instrumentacji została zrealizowana w ramach projektu UE Innowacyjna Gospodarka, zleceń Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, lokalnych samorządów oraz środków własnych Poltegoru-Institutu i autora artykułu. Nowo zainstalowany system on-line w Beskidzie Niskim jest pierwszym tego rodzaju w Polsce i działa od maja 2010 r. Wykonane prace miały za zadanie określenie możliwości przeciwdziałania osuwiskom w celu ochrony dróg i infrastruktury w Beskidzie Niskim i Średnim, poznanie głównych czynników aktywujących ruchy masowe i możliwości stabilizacji osuwisk oraz wdrożenie systemu wczesnego ostrzegania. Wyniki prac przedstawione w tym artykule zostały dostarczone do lokalnych samorządów i administracji drogowej w celu ostrzegania o zagrożeniach.

LOKALIZACJA BADANYCH OSUWISK

Analizowane osuwiska były zlokalizowane w południowo-wschodniej Polsce w Beskidzie Niskim, Średnim i częściowo na przedgórzu Karpat. Badania geologiczno-inżynierskie 23 osuwisk prowadzono począwszy od 2005 r. w miejscach, gdzie poważnie zagrażały one drogom publicznym lub infrastrukturze. W pobliżu Gorlic ponad drogą powiatową Szymbark–Bystra zainstalowano system monitoringu i ostrzegania. Standardowe pomiary monitoringu realizowano od stycznia 2006 r.. Monitoring w czasie rzeczywistym rozpoczęto w maju 2010 r., przed rekordowym okresem aktywności osuwisk podczas powodzi w południowej Polsce. Lokalizację osuwisk i elementów sieci monitoringu w rejonie Gorlic przedstawiono na rycinie 1, natomiast osuwiska, dla których prowadzono monitoring w celu prac stabilizacyjnych przedstawiono w tabeli 1.

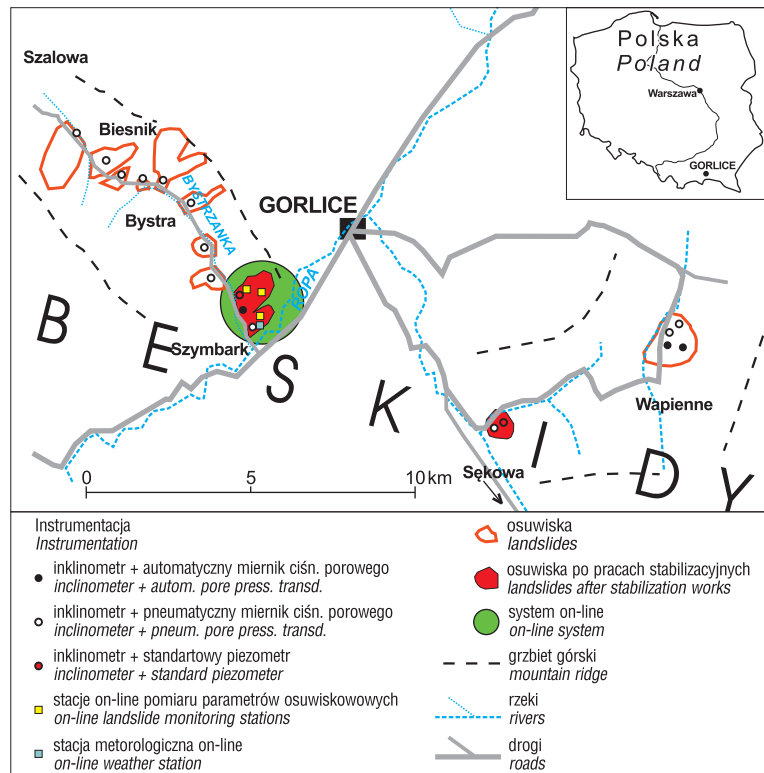
BUDOWA GEOLOGICZNA

Wybrane do badań osuwiska obejmowały najczęściej w morskie eocenijskie osady fliszowe, składające się z wielu cienkich warstw ilowców i piaskowców. Zostały one sfałdowane, wypiętrzone i zaburzone dysjunktywnie w czasie orogenezy alpejskiej. Zmiana klimatu w holocenie doprowadziła do utworzenia miększych stref zwietrzelinowych i uruchomienia ogromnej liczby osuwisk, wielokrotnie później aktywowanych (Margielewski, 2008). Budowa geologiczna, nachylenie stoków, procesy erozyjne w dolinach rzecznych, wysoki poziom wód gruntowych oraz intensywne opady i wiosenne topnienie pokrywy śnieżnej składały się na zespół czynników sprzyjających rozwojowi procesów spęływania gruntów (Gil & Długosz, 2006). Główną przyczyną osuwisk było stosunkowo duże nachylenie stoków w połączeniu z silnie nawodnionymi warstwami ilastymi o odpowiednich parametrach mechanicznych. Warunki te powodowały, że ruchy masowe

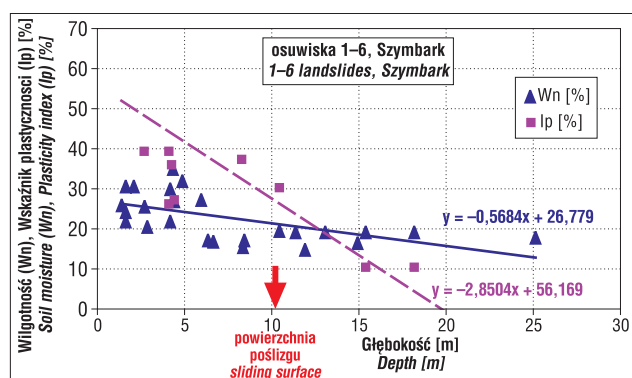
były reaktywowane wiele razy w okresach intensywnych opadów atmosferycznych.

BADANIA TERENOWE

Staranne rdzeniowanie wiertłem o średnicą 132 mm, do głębokości 9–30 m, zapewniło wysoki uzysk rdzenia i możliwość wykonania dokładnych opisów profili. Prace wiertnicze obejmowały także pobieranie próbek o nienaruszonej strukturze (NNS). W celu lepszego poznania budowy geologicznej pomiędzy otworami zrealizowano ponad 50 km profilowania RAMAC-GPR. Były one uważnie skalowane przez otwory wiertnicze. Dla wykonania map terenów osuwiskowych wdrożono pomiary GPS umożliwiające uzyskanie dokładności w poziomie i pionie do jednego centymetra, po wprowadzeniu współrzędnych znanych pomiarowych (*post-processing*). Realizacja badań geofizycznych pozwoliła na szczegółowe poznanie struktury wewnętrznej koluwiów i głębokości warstw związłego podłoża. Pomiary GPS uzupełnione standardowymi pomiarami geodezyjnymi umożliwiły uwspółcześnienie odwzorowania morfologii terenu, co miało duże znaczenie ze względu na brak aktualnych map terenów osuwiskowych. Zbudowana sieć monitoringu posłużyła do pomiarów, które realizowano przez okres 9 lat (częściowo z innych zleceń autora, z powodu braku źródeł finansowania). Pomiary przemieszczeń wgłębnych, poziomu i ciśnienia wód gruntowych dostarczyły informacji dotyczących dynamiki i głębokości osuwisk. W 2010 r. ponad drogą powiatową Szymbark–Bystra został zainstalowany nowy system wczesnego ostrzegania on-line. Uzyskane wyniki wykorzystano do modelowania numerycznego oraz przy projektach stabilizacji osuwisk.



Ryc. 1. Lokalizacja sieci monitoringu geozagrożeń w rejonie Gorlic
Fig. 1. Geohazard network localization in Gorlice region



Ryc. 2. Wyniki badań laboratoryjnych wilgotności naturalnej (Wn) i wskaźnika plastyczności (Ip)

Fig. 2. Laboratory test results moisture content (Wn) and plasticity index (Ip)

BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne zawierały testy podstawowych parametrów fizycznych gruntów (uziarnienie, wilgotność naturalna, granica płynności, granica plastyczności, gęstość objętościowa, gęstość szkieletu gruntowego, zawartość części organicznych/bitumicznych). Wykonywano także badania w aparacie bezpośredniego ścinania, edometryczne badania ścisłości oraz testy trójosiowe CIU i CID w wysokiej klasy aparacie trójosiowego ściskania. Badania wykazały, że grunty koluwalne reprezentowały gliny pylaste, łą, pospółki gliniaste do łożysk (skały zwięzłe). Miały one bardzo wysoką wilgotność naturalną 18–37%, zmienny stopień plastyczności 0,1–0,8, spójność 6,5–10,0 kPa, kąt tarcia wewnętrznego 11–15° i charakteryzowały się bardzo dużą ścisłością. Najwyższe wartości wilgotności i wskaźnika plastyczności zanotowano w próbkach pobranych z osuwiska w Szymbarku, w pobliżu powierzchni poślizgu, do głębokości ok. 10 m (ryc. 2). Głębokości powierzchni poślizgu na innych osuwiskach wahały się od 2 do 18 m i były one w dobrej korelacji zarówno z maksymalnymi wartościami wilgotności naturalnej, jak i wskaźnikami plastyczności.

STANDARDOWE POMIARY MONITORINGOWE

Monitoring ma zasadnicze znaczenie dla poznania stopnia zagrożeń osuwiskowych i możliwości przeciwdziałania (ryc. 3). W pełni skuteczne metody przewidywania, mogące określić ich dokładny czas oraz wyeliminować zagrożenia dla infrastruktury, zdrowia i życia ludzi nie zostały jednak jak dotąd wynalezione. Jest to spowodowane niezwykle złożoną genezą osuwisk. Zwykle oprócz dominującej przyczyny ich powstania występuje kilka wzajemnie się na siebie nakładających czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Sposób zalegania warstw, budowa litologiczna, nachylenie stoku, występowanie uskoków i fałdów, parametry mechaniczne gruntów i skał, wielkości opadów atmosferycznych, wypływy wód, procesy wietrzenia i erozji, a także szereg niewymienionych tutaj procesów mogą rozmaicie wpływać na rozwój osuwisk. Z powodów ekonomicznych bardzo duże i aktywne przemieszczenia masowe nie są możliwe do stabilizacji. Inne znajdujące się w obszarach o dużym znaczeniu dla gospodarki powinny być wcześniej bardzo sta-



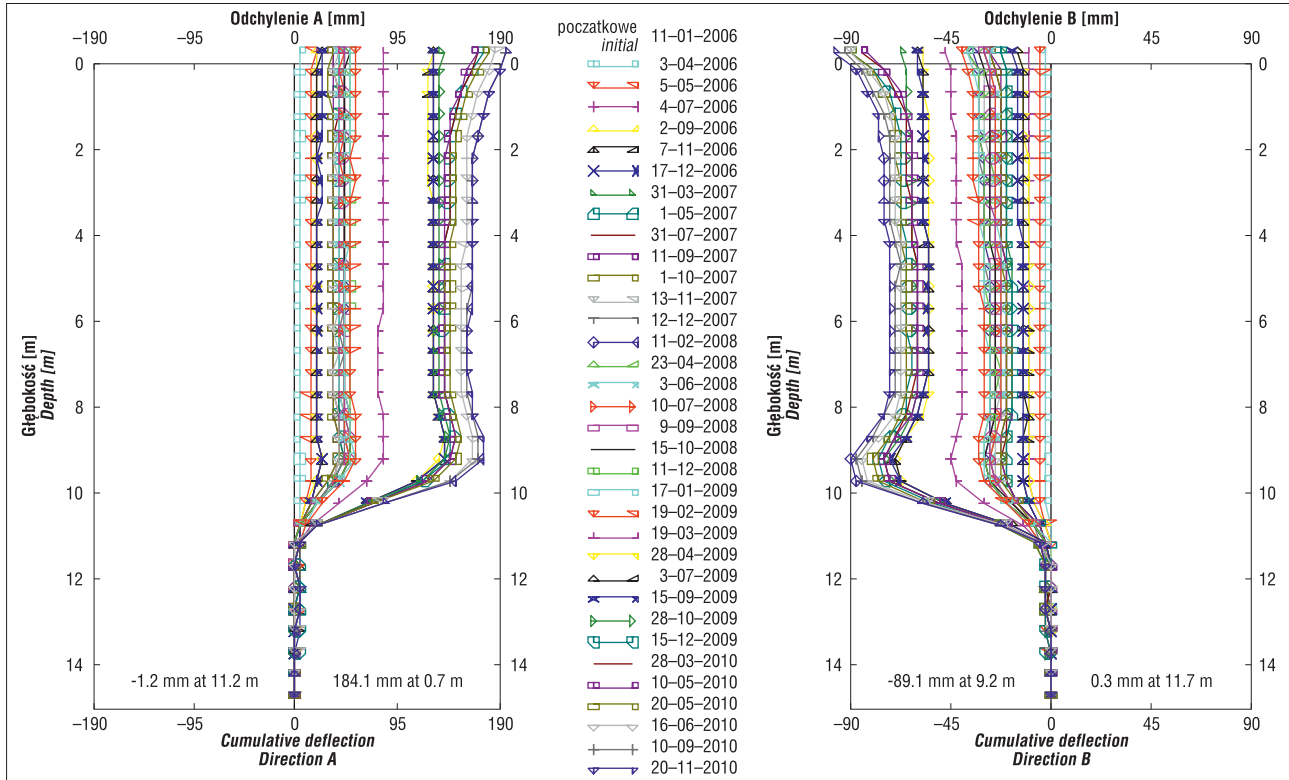
Ryc. 3. Monitoring inklinometryczny i piezometryczny
Fig. 3. Inclinometer and piezometer monitoring

rannie rozpoznane. Jest to szczególnie ważne przed podjęciem decyzji o zazwyczaj niezwykle kosztownych pracach stabilizacyjnych. W celu poznania parametrów wybranych osuwisk autor miał możliwość zbudować własną sieć monitoringu na wybranych aktywnych oraz zabezpieczonych osuwiskach w Karpatach. Instrumentacja zawierała ponad 400 m rur inklinometrycznych ABS wyposażonych w specjalne ruchome przeguby, zwiększające ich wytrzymałość, oraz umożliwiające pomiar osiadań na głębokości powierzchni poślizgu. Pomiary głębokości poziomu wód gruntowych oraz ciśnienia porowego wykonywano w celu oszacowania wielkości efektywnych naprężeń w górotworze.

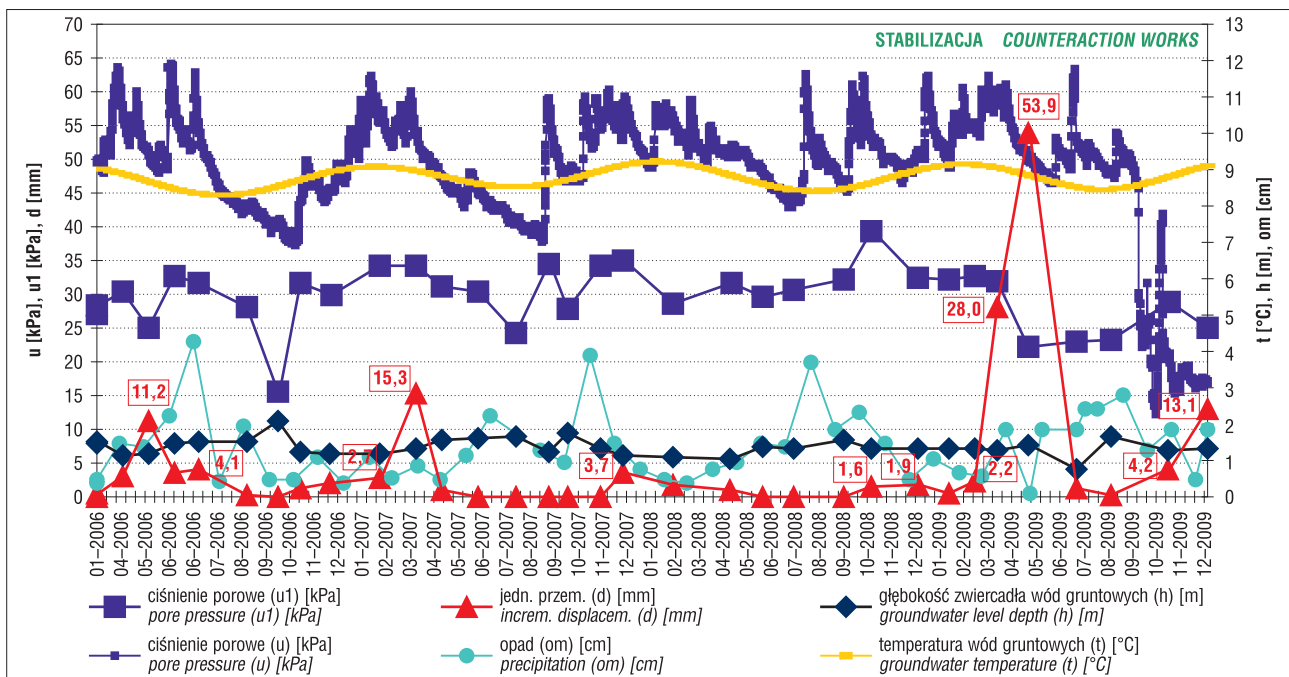
Do monitoringu wykorzystano standardowe piezometry oraz pneumatyczne i automatyczne piezoelektryczne przetworniki ciśnienia porowego. Sieć pomiarowa obejmowała 26 lokalizacji składających się z punktów pomiarów inklinometrycznych i piezometrycznych (lub pomiarów ciśnienia porowego). W ciągu dziewięciu lat (2006–2015) program monitoringu, obejmujący odczyty w sieci pomiarowej z częstotliwością 30–45 dni (2006–2011) oraz 90–180 dni (2012–2015), umożliwił weryfikację wyników pomiarów. Pozwoliło to na dokładne rozpoznawanie reprezentatywnych skumulowanych i jednostkowych przemieszczeń w badanych profilach osuwiskowych oraz na określenie wielkości, głębokości i kierunków przemieszczeń wgłębnych (ryc. 4). Przykładową analizę zależności pomiędzy wielkością przemieszczeń wgłębnych (d) a ilością średnich miesięcznych opadów atmosferycznych (om), głębokością wód gruntowych (h), temperaturą (C) i ciśnieniem porowym wód mierzonych metodą piezoelektryczną (u1) oraz pneumatyczną (u) na osuwisku w Szymbarku przedstawiono na rycinie 5. Porównanie to wskazuje, że największe przemieszczenia wystąpiły, gdy wartości ciśnienia porowego uległy obniżeniu po osiągnięciu wysokich wartości (60–65 kPa). Największe przemieszczenia jednostkowe wystąpiły w maju 2006 r. (11,2 mm), w marcu 2007 r. (15,3 mm) podczas stabilizacji w 2009 r. (53,9 mm) oraz w maju–czerwcu 2010 r. (do 100 mm). Zarejestrowane skumulowane przemieszczenia, w badanym okresie, w zależności od stopnia aktywności badanych osuwisk wynosiły od kilku do 400 mm (po uszkodzeniu rur inklinometrycznych). Na osuwisku w Szymbarku standardowe obudowy inklinometryczne zostały uszkodzone przez przemieszcze-

nia o wielkości 150–180 mm na głębokości 11 m. Na osuwisku w Sękowej największe miesięczne przemieszczenia, wynoszące 12 mm, zaobserwowano w okresie maj–czerwiec 2006 r. Wystąpiły one po rekordowych opadach miesięcznych 230 mm, które wpłynęły na wysokie wartości ciśnienia porowego wód gruntowych wynoszących 45–50 kPa. Przemieszczenia zwykle były aktywne w okresie, gdy ciśnienie porowe na powierzchni poślizgu osiągało wartości

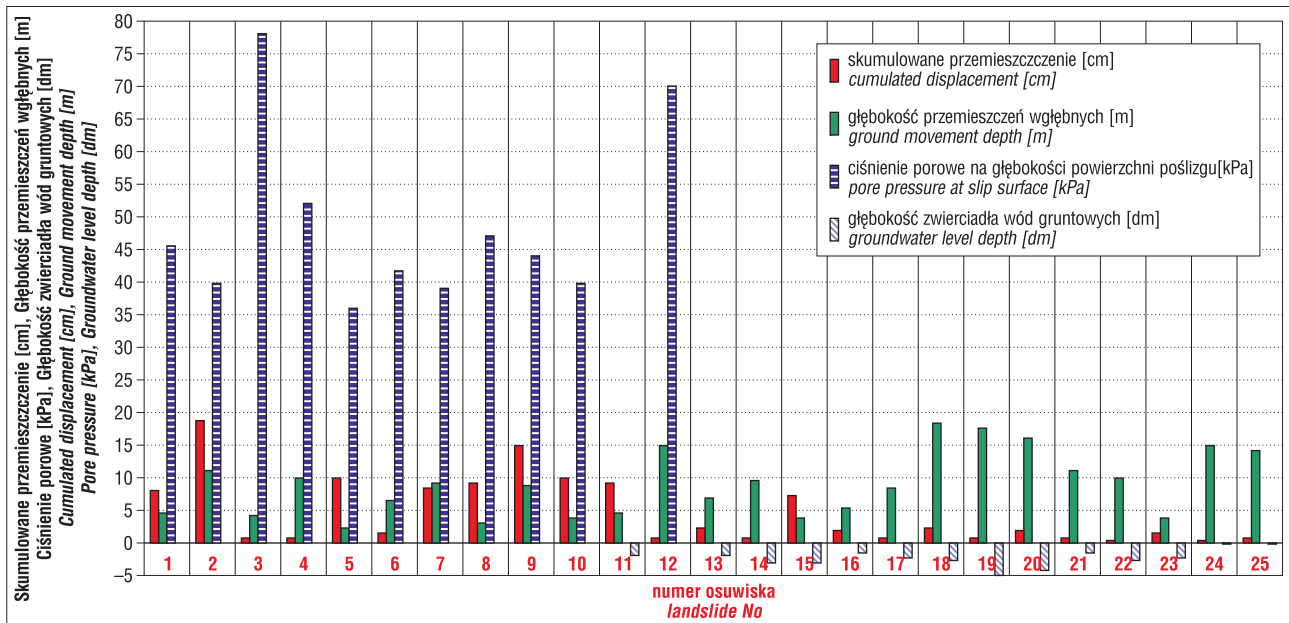
50–65 kPa (ryc. 5). Wielkości przemieszczeń miały lepszą korelację z wielkościami ciśnienia porowego niż z głębokością poziomu wód gruntowych. Uzyskane dane monitoringowe zostały wykorzystane w analizach stateczności do opracowania odpowiednich dla lokalnych warunków koncepcji i projektów stabilizacji. Porównanie wyników standardowego monitoringu wykonywanego w latach 2006–2013, co 30–45 dni przedstawiono na rycinie 6. Przeprowa-



Ryc. 4. Skumulowane przemieszczenia w głębokości, Szymbark
Fig. 4. Cumulated ground displacements, Szymbark



Ryc. 5. Wykres parametrów monitoringu, Szymbark
Fig. 5. Monitoring results plot, Szymbark



Ryc. 6. Porównanie wyników monitoringu osuwisk (2006–2013) w 25 punktach pomiarowych
 Fig. 6. Comparison of landslide monitoring results (2006–2013) in 25 measurements points

dzone pomiary wykazały przemieszczenia wgłębne od kilku milimetrów do 40 cm zachodzące na głębokości 1,3–18,0 m. Pomiary ciśnienia porowego wykazały wartości 15–50 kPa, a głębokość zwierciadła wód gruntowych znajdowała się na głębokości 0,5–5,0 m p.p.t.

MONITORING ON-LINE I WZCZESNE OSTRZEGANIE

Na przełomie maja i czerwca 2010 r. na osuwiskach w Szymbarku zainstalowano pierwszy w Polsce system monitoringu w czasie rzeczywistym. Czas wykonywania instalacji zbiegł się z rekordowo wysokimi opadami atmosferycznymi (odczyt z zainstalowanej automatycznej stacji meteorologicznej 2 czerwca 2010 r. – 100 mm/m² w ciągu 3h). Cztery polowe stacje pomiarowe zostały zabudowane

ponad drogą publiczną Szymbark–Szalowa (ryc. 7, 8 – patrz str. 1239).

W ramach systemu zastosowano nowatorskie ciągłe systemy inklinometryczne z czujnikami 3D rozmieszczonymi co 0,5 m do głębokości 12 i 16 m (łącznie 66 czujników nachylenia). Pozwalają one na pomiar przemieszczeń wgłębnych o znacznie większym zakresie niż standardowe inklinometry, w niektórych przypadkach nawet do 500 mm. Na osuwiskach zainstalowano także jeden inklinometr typu *in-place* (14 m, 3 czujniki jednoosiowe), trzy automatyczne mierniki ciśnienia porowego i poziomu wód gruntowych oraz stację meteorologiczną. System on-line umożliwia interpretację wyników i wczesne ostrzeżenie za pomocą specjalnego programu komputerowego (ryc. 9). Wyniki pomiarów przemieszczeń i naprężeń ścinających on-line wskazują, że największe ich wartości zanotowano na głębokości 12–16 m (ryc. 10, 11). Model 3D przemieszczeń przedstawiono na rycinie 12.

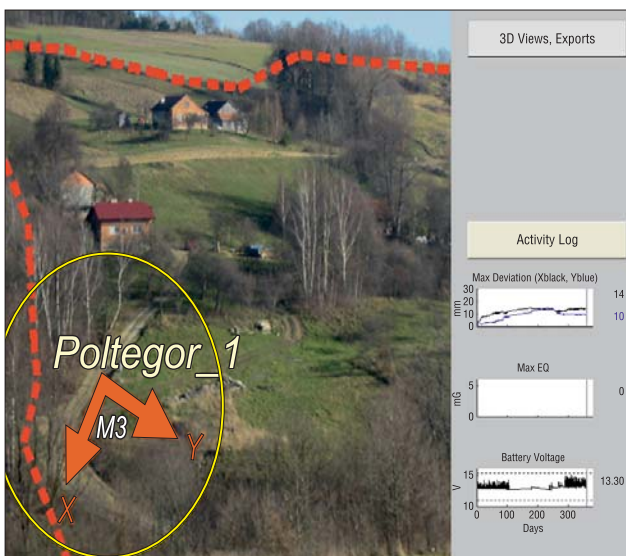
Wypadkową wielkość całkowitych deformacji wgłębnych d [mm] obliczono na podstawie równania:

$$d = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad [1]$$

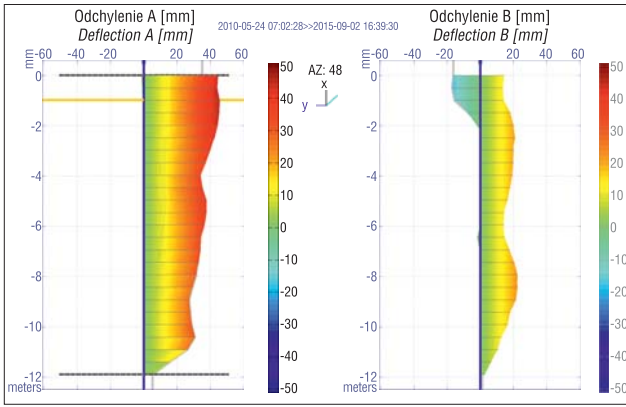
gdzie:

x – przemieszczenie w kierunku nachylenia stoku [mm],
 y – przemieszczenie w kierunku prostopadłym do nachylenia stoku [mm].

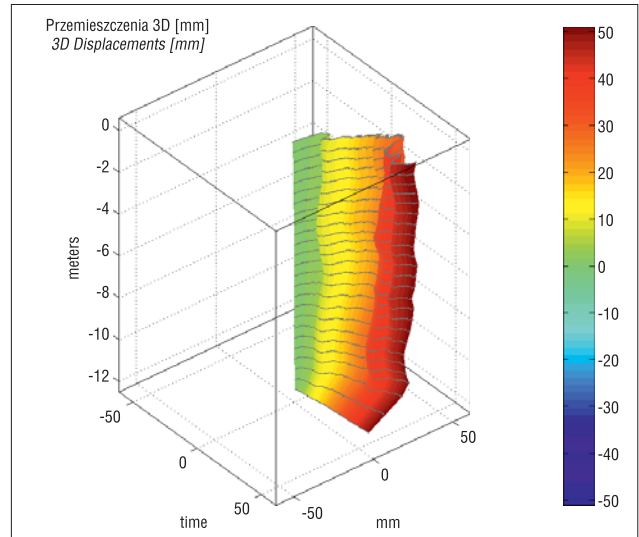
Wyniki monitoringu on-line przemieszczeń wgłębnych, ciśnienia porowego i wielkości opadów w jednej ze stacji przedstawiono na rycinie 13. Podczas pierwszych 34 miesięcy pracy systemu maksymalne całkowite przemieszczenia, w zależności od lokalizacji, osiągnęły 32–50 mm. Analiza statystyczna 22 000 serii wyników monitoringu on-line wykonanych w latach 2010–2013 wskazuje, że po intensywnych opadach atmosferycznych, o sumach dobowych 50–100 mm, następował prawie dwukrotny wzrost ciśnienia porowego na głębokości 10 m (np. do 98,2 kPa 9.07.2010 r. i 98.8 kPa 5.09.2010 r.).



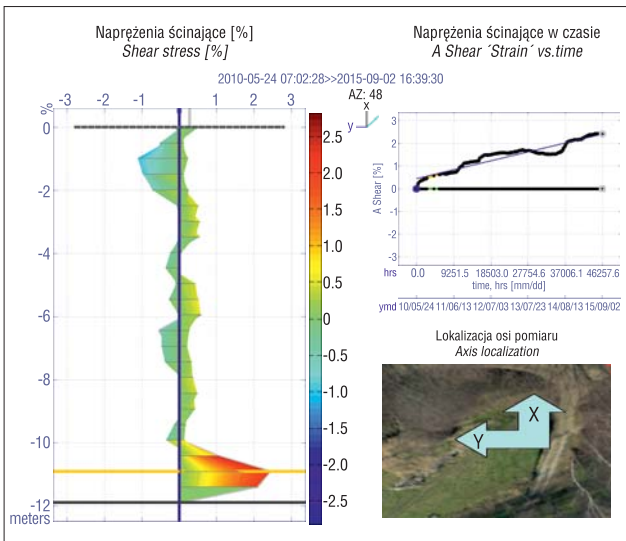
Ryc. 9. Oprogramowanie do analizy wyników, on-line
 Fig. 9. On-line data interpretation software



Ryc. 10. Skumulowane przemieszczenia, on-line [mm]
 Fig. 10. On-line cumulated displacements [mm]



Ryc. 12. Przemieszczenia wgłębne – model 3D, on-line
 Fig. 12. On-line 3D ground displacements model

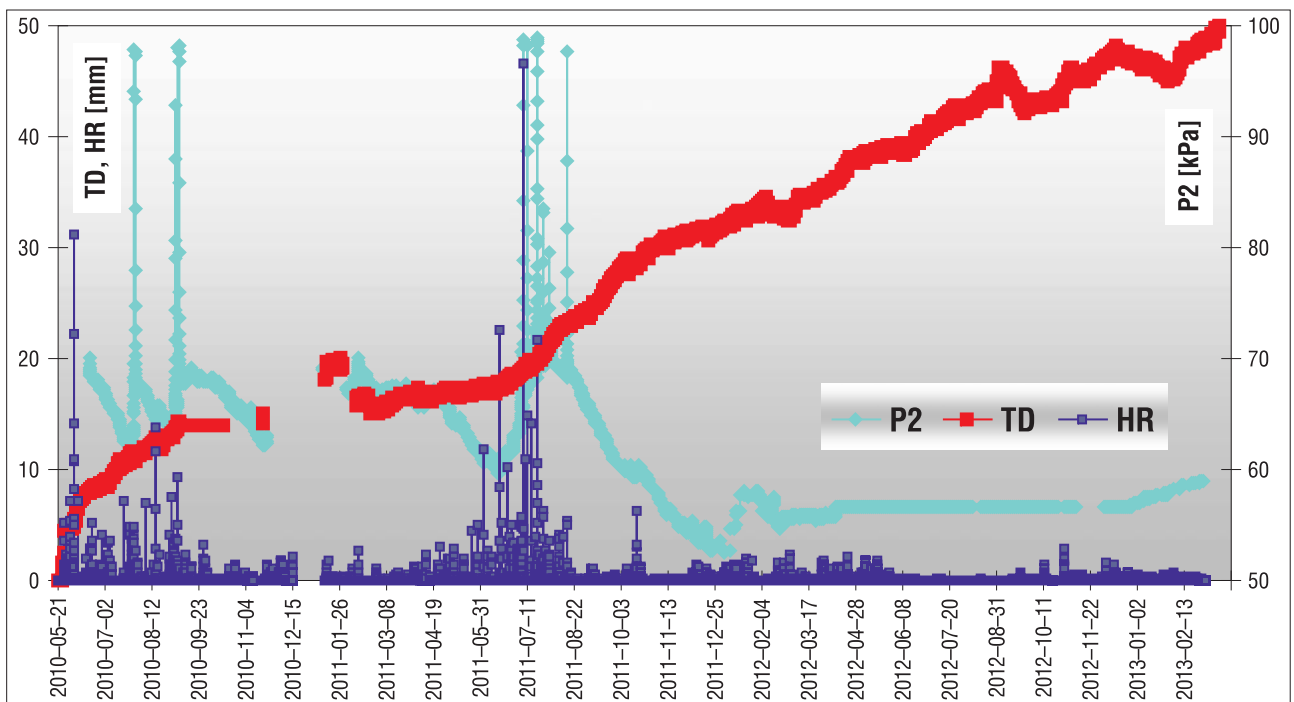


Ryc. 11. Napężenia ścinające, on-line
 Fig. 11. On-line shear strain values

Aktywacja przemieszczeń wgłębnych następowała zazwyczaj po spadku ciśnienia porowego do początkowych wartości. Drugi okres aktywacji osuwisk nastąpił po kolejnym wzroście ciśnienia porów do 98,8 kPa (21 lipca 2010 r.) i 97,7 kPa (16 sierpnia 2010 r.). Analiza statystyczna uzyskanych wyników ujawniła zależność między całkowitymi przemieszczeniami TD [mm], a skumulowaną wielkością opadów CR [mm] o współczynniku korelacji $R^2 = 0,92$. Jest ona opisana przez następujące równanie:

$$TD = 0,0233 CR - 0,2205 \quad [2]$$

Dla celów wczesnego ostrzegania zdefiniowano także wartości ostrzegawcze wynoszące dla przemieszczeń $>1\text{cm}/24\text{ h}$ i wielkość opadów $>100\text{ mm}/24\text{ h}$. Przy takich wielkościach w trakcie trwania projektu system umożliwił



Ryc. 13. Wykresy on-line całkowitych przemieszczeń wgłębnych TD [mm], opadów godzinnych HR [mm] i ciśnienia porowego P2 [kPa]
 Fig. 13. On-line total ground total displacements TD [mm], hourly rainfalls HR [mm] and pore pressures P2 [kPa]

automatycznie wysyłanie ostrzeżenia na serwer internetowy (wiadomości SMS i e-maile na zdefiniowane adresy). Zarejestrowane do marca 2013 r. przemieszczenia on-line wynosiły 34–50 mm do głębokości 12–15 m. Projekt „Innowacyjna Gospodarka” zakończył się w marcu 2013 r., jednak autor do chwili obecnej próbuje finansować jego dalszą pracę ze środków własnych. W maju 2014 r. na jednym z osuwisk nastąpił bardzo znaczny wzrost przemieszczeń, które obecnie wynoszą 490 mm, co jest bardzo blisko górnej granicy pracy tej stacji, grożącej jej uszkodzeniem.

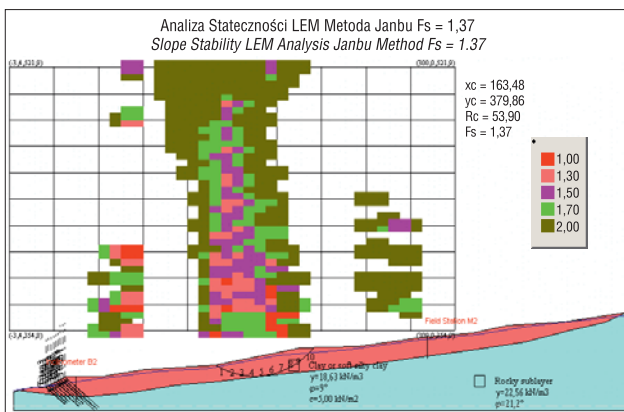
MODELOWANIE NUMERYCZNE

Stopień stateczności badanych stoków był uwarunkowany zmianami poziomów i ciśnienia porowego wód gruntowych oraz procesami erozji rzecznej. Czynniki te zwiększały wartości naprężeń ścinających oraz efektywne naprężenia, co wpływało niekorzystnie na wytrzymałość gruntów na ścianie w obrębie stoków. W niektórych przypadkach, przemieszczenia były aktywowane przez dodatkowe czynniki zewnętrzne, takie jak podcięcie czoła osuwiska podczas budowy dróg oraz wyłączenie gruntów z produkcji rolnej. Większość badanych osuwisk była reaktywowana wiele razy oraz cechowała się złożoną budową wewnętrzną. Wykonane analizy stateczności z konieczności przyjęły uproszczone modele geome-

tryczne, zawierające możliwe do wprowadzenia istotne elementy stoków osuwiskowych. Obliczenia na podstawie metody równowagi granicznej (LEM) Janbu, Bishopa i Morgensterna-Price’a, przyjmujące najbardziej prawdopodobne kołowe linie poślizgu, zostały porównane z metodami wykorzystującymi zdefiniowane linie poślizgu. Proponowane metody przeciwdziałania zostały przetestowane przy użyciu klasycznych metod LEM, z obliczeniem względnego współczynnika stateczności stoku. Na osuwisku w Sękowej wartości F_s , metodą Bishopa, były nieco powyżej $F_s = 1,13$ przed stabilizacją i $F_s = 1,58$ po niej. Na osuwisku w Szymbarku – $F_s = 0,68$ – $1,2$ przed stabilizacją, a $F_s = 1,30$ – $1,37$ po niej (ryc. 14). Po pracach stabilizacyjnych najbardziej prawdopodobne kołowe powierzchnie poślizgu były zlokalizowane poza zagrożonymi odcinkami dróg. Przewidywane wielkości przemieszczeń obliczono również metodami FEM z wykorzystaniem programu SoilVision oraz uwzględnieniem wyników monitoringu w definicji warunków brzegowych. Przewidywane całkowite przemieszczenia w Szymbarku bez zabezpieczenia wynoszące 150–390 mm przedstawiono na rycinie 15. Wyniki modelowania FEM bez wykonanych prac stabilizacyjnych wskazują, że osuwisko było aktywne i niebezpieczne dla drogi powiatowej.

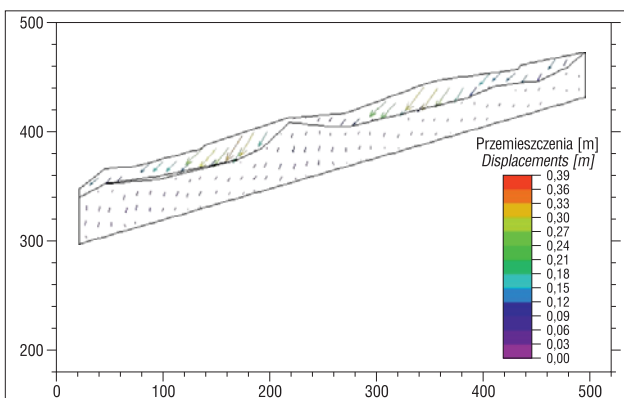
PROJEKTY I KONTROLA STABILIZACJI OSUWISK

Realizacja skutecznych prac, stabilizujących osuwiska wymaga reprezentatywnych, dobrej jakości danych dokumentacyjnych i odpowiednio dobranych metod monitoringu. Pomiary kontrolne powinny być wykonywane przez wystarczająco długi okres czasu, minimalnie 10 pewnych pomiarów w okresie 12 miesięcy (Dunnicliff, 1993). Stabilizacja niektórych z badanych osuwisk byłaby bardzo trudna lub nawet niemożliwa do wykonania z powodów ekonomicznych. Wpływały na to rozmiary osuwisk, głębokość oraz zakres obserwowanych przemieszczeń. Dane uzyskane z badań geologiczno-inżynierskich, a także monitoring głębokości, wielkości i kierunku przemieszczeń wraz z kontrolą prac stabilizacyjnych, były niezbędne dla wykonania efektywnych zabezpieczeń. Zaproponowane przez autora wraz z zespołem projekty stabilizacji ośmiu osuwisk umożliwiły poznanie stopnia zagrożenia oraz określenie metod poprawy warunków stateczności. Zrealizowane prace stabilizacyjne objęły sześć osuwisk (nr 1, 3, 4, 5, 6, 7). Dla osuwiska nr 2 opracowano wstępną koncepcję zabezpieczenia, a osuwisko nr 8 było stabilizowane według projektu ITB Warszawa. Jednak ze względu na uwarunkowania formalne projektów, nie na wszystkich osuwiskach monitoring inklinometryczny był prowadzony dostatecznie długo przed podjęciem prac zabezpieczających lub nie został zastosowany, co czasem mogło być u motywowane koniecznością pilnego podjęcia prac stabilizacyjnych. Pomiary wykonane przez autora umożliwiły kontrolę efektywności wykonanych prac zabezpieczających. Należy zaznaczyć, że jedynie w przypadku osuwiska nr 6 monitoring wstępny oraz kontrola prac stabilizacyjnych została zlecona przez inwestora i uzyskała finansowanie. Wyniki monitoringu pozwoliły na interpretację czynników aktywujących procesy osuwiskowe i kontrolę stabilizacji. Szczegółowe dane dotyczące kontroli zabezpieczenia osuwisk przedstawiono w tabeli 1.



Ryc. 14. Analiza stateczności LEM, wartości F_s – osuwisko w Szymbarku po częściowej stabilizacji

Fig. 14. LEM slope stability analysis, F_s value – Szymbark landslide after partial stabilization



Ryc. 15. Analiza stateczności FEM, obliczone wektory przemieszczeń całkowitych – osuwisko w Szymbarku

Fig. 15. FEM slope stability analysis, predicted total displacements vectors – Szymbark landslide

W ramach prac stabilizacyjnych zastosowano różnorodne metody zabezpieczeń. Na przykład na osuwisku w Sękowej wzdłuż rzeki, na odcinku 200 m zbudowano ściany oporowe z gabionów posadowionych na 300 mikropalach sięgających do głębokości 6 m (ryc. 16 – patrz str. 1239). W centralnej części osuwiska ponad drogą, na długości 30 m zbudowano ścianę oporową posadowioną na 60 mikropalach o średnicy 300 mm, w trzech rzędach, do głębokości 11 m. Górne części mikropali połączone specjalnym wieńcem żelbetowym. System drenażu powierzchniowego o łącznej długości 300 m odprowadził wody opadowe z terenu osuwiskowego do rzeki przez nowy przepust pod drogą powiatową. Podczas wykonywania prac stabilizacyjnych na jesieni 2007, po intensywnych opadach atmosferycznych, zaobserwowano aktywację przemieszczeń do 61 mm. Jednak po wykonaniu stabilizacji przemieszczenia zostały zredukowane do ± 5 mm w ciągu 5 lat. Ciśnienie porowe wód gruntowych, wynoszące 45 kPa przed stabilizacją, zostało obniżone po niej do ok. 30 kPa. Poziom wód gruntowych został obniżony z 1,3–1,8 do 2,0–2,2 m. Na osuwisku w Szymbarku, ze względu na jego duże rozmiary i możliwe zagrożenia, rozpatrywano kilka koncepcji stabilizacji, w tym tylko doraźne zabezpieczenie (ryc. 17 – patrz str. 1239). Zastosowane przez inwestora przeciwdziałanie zawierało częściową stabilizację czołowej części za pomocą kotew o długości do 6–20 m, umocowanych w podłożu skalnym, i siatek metalowych o zwiększonej wytrzymałości na rozciąganie. System uzupełniały ściany oporowe z gabionów wzdłuż rzeki Bystrzanki, powierzchniowy i wewnętrzny system odwodnienia (dreny poziome i studnie odwadniające) oraz dwa nowe przepusty pod drogą powiatową. Po zabezpieczeniu rejonu drogi, wartości ciśnienia porowego wód gruntowych spadły (z 48 do 30 kPa w Sękowej i z 50 do 15 kPa w Szymbarku). W Szymbarku

pomimo częściowej stabilizacji zaobserwowano jednak przemieszczenia o wielkości 13–20 mm. Nasiliły się one szczególnie po rekordowych opadach atmosferycznych w maju–czerwcu 2010 r., które spowodowały powódź w sąsiednich regionach. Znaczna aktywacja tego osuwiska nastąpiła także w 2014 r., ale w dużej odległości (ok. 400 m) od drogi powiatowej. Pomiary kontrolne wykazały, że zastosowane metody stabilizacji obniżyły ryzyko osuwiskowe i zabezpieczyły zagrożone odcinki dróg publicznych. W niektórych przypadkach zaobserwowano jednak przemieszczenia w trakcie i po wykonaniu prac stabilizacyjnych. Wartości zmierzonych przemieszczeń wahały się od 26 do 490 mm. W niektórych przypadkach podczas wykonywania tych prac przemieszczenia wzrosły (np. do ponad 60 mm w Sękowej), co było spowodowane prowadzeniem prac pod koniec roku w niesprzyjających warunkach pogodowych. Po wykonaniu stabilizacji przemieszczenia zwykle zostały obniżone do kilku mm. Na osuwisku w Szymbarku, gdzie zastosowano częściowe unieruchomienie, w pierwszym roku pomiarów kontrolnych zarejestrowano przemieszczenia do 10 mm, ale po rekordowych opadach wzrosły one w niektórych miejscach do 18–490 mm, co zostało wykryte w czasie rzeczywistym przez automatyczny system wczesnego ostrzegania. Na osuwisku w Strzeszynie wykonane prace stabilizacyjne, zabezpieczające drogę przyporą z gabionów posadowioną na fundamencie palowym, poprawiły warunki stateczności (ryc. 18 – patrz str. 1239), jednak po ekstremalnie wysokich opadach atmosferycznych w maju 2010 r. nastąpiła bardzo duża aktywacja terenu bezpośrednio pod drogą powiatową, w wyniku czego został zniszczony system drenażu osuwiska. Skuteczne okazało się zabezpieczenie palowe i drenaż osuwiska pod kaplicą św. Jana z Dukli (ryc. 19 – patrz str. 1239) oraz w Tarnawie Dolnej w Beskidzie Średnim.

Tab. 1. Kontrola prac stabilizujących osuwiska
Table 1. Control of landslide stabilization works

Lp. No.	Osuwisko <i>Landslide</i>	Objętość [mln m ³] <i>Volume</i> [million m ³]	Głębokość <i>Depth</i> [m]	Rok stabilizacji <i>Year of</i> <i>stabilization</i>	Przemieszczenie przed stabilizacją <i>Displacement</i> <i>before</i> <i>stabilization</i> [mm]	Przemieszczenie podczas stabilizacji <i>Displacement</i> <i>during</i> <i>stabilization</i> [mm]	Przemieszczenie po stabilizacji <i>Displacement</i> <i>after</i> <i>stabilization</i> [mm]	Liczba pomiarów / czas monitoringu <i>No of measure /</i> <i>monitoring</i> <i>period</i>
1	Sękowa	0,40	2,7–5,1	2007	2,0	61,0	5,0	55 2006–20015
2	Szymbark	2,20	1,3–15,0	2009	138,0	19,0	13,0–30,0 490 (400 m od drogi/from the road)	55 2006–20015
3	Sitnica	0,10	1,2–5,0	2008	2,0	2,0	5,0	35 2007–2015
4	Strzeszyn	0,31	1,4–6,0	2008	0,1	1,0	4,5 (rejon drogi/road area) 3000 (pod drogą/ under the road) 2010–2015	32 2007–2015
5	Tarnawa Dolna	0,90	10,0–15,0	2007	6,9	2,6	5,6–15,0	51 2006–2015
6	Strachocina	0,60	10,0–16,0	2011	60,0	20,0	2,0–3,0	32 2008–2015
8	Dukla kaplica św. Jana <i>St. John chapel</i>	0,30	10,0–12,0	2006	brak pomiarów <i>no data</i>	brak pomiarów <i>no data</i>	2,0–7,0	51 2006–2015

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metody badań zagrożeń osuwiskowych oraz możliwości wykorzystania monitoringu przy projektowaniu prac stabilizacyjnych. Wyniki standardowego monitoringu inklinometrycznego i warunków wodnych były analizowane w 26 standardowych punktach pomiarowych i 3 stacje on-line (+ stacja meteo) w polskich Karpatach. Badania te zostały wykorzystane w celu przygotowania 19 dokumentacji geologiczno-inżynierskich, opracowania sześciu projektów stabilizacji osuwisk i kontroli ośmiu prac zabezpieczających. Pomiary monitoringowe wykonywano przez okres ponad dziewięciu lat od początku 2006 r. Do chwili obecnej zrealizowano do 32–55 serii pomiarów w standardowej sieci monitoringu i ponad 60 000 pomiarów on-line. Zastosowane metody pomiarów i modelowania okazały się przydatne w określeniu stopnia aktywności osuwisk, zaprojektowaniu i kontroli ich stabilizacji. Głównymi czynnikami aktywującymi ruchy masowe były opady atmosferyczne i zmiany ciśnienia porowego wód gruntowych w zakresie 15–65 kPa. Zaobserwowane w latach 2006–2013 przemieszczenia wglębne do głębokości 11,5–16,0 m osiągnęły wielkość 22–34 mm, a wartości ciśnienia porowego – 48–65 kPa. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane w analizach stateczności metodami LEM i FEM dla skarp przed i po stabilizacji. W maju 2010 r., po rekordowo wysokich opadach atmosferycznych, przemieszczenia w niektórych obszarach wzrosły do ponad 11 cm w ciągu 1 dnia. Metody stabilizacji były w pełni skuteczne na osuwisku w Sękowej, Sitnicy, Tarnawie Dolnej, Dukli i Strachocinie. W ciągu czterech lat od czasu stabilizacji zaobserwowano tam przemieszczenia wielkości tylko ±kilku milimetrów. Na dużym i niebezpiecznym osuwisku w Szymbarku wykonane prace częściowo stabilizujące osuwisko ograniczyły zakres przemieszczeń. Jednak jest to zbyt krótki czas, żeby w pełni potwierdzić ich skuteczność, co szczególnie uwidoczniło się w maju 2010 r. Na osuwisku w Strzeszynie wykonane prace stabilizacyjne zmniejszyły zagrożenie dla drogi, ale po opadach z maja 2010 r. uruchomiła się dolna część osuwiska. Wyniki badań pokazują, że duże osuwiska fliszowe były trudne do unieruchomienia i projekty ich zabezpieczenia powinny być wykonywane z jak najdokładniejszym uwzględnieniem lokalnych warunków geologiczno-inżynierskich oraz odpowiednio długiego okresu wyprzedzającego monitoringu. Jest to szczególnie istotne ze względu na ogromne koszty prac zabezpieczających. Różnorodne metody monitoringu i modelowania przed etapem przeciwdziałania mogą przynieść bardziej wiarygodne rozpoznanie możliwości stabilizacji rejonów osuwiskowych i dostarczyć informacje o potencjalnych zagrożeniach. Ze względu na bardzo znaczące koszty prac zabezpieczających bardzo ważna jest także ich kontrola, poprzez pomiary monitoringowe w trakcie ich wykonywania oraz w odpowiednio długim czasie po ich ukończeniu, co nie jest powszechną praktyką w naszym kraju. Może to pozwolić na odpowiednie reagowanie na powstające często w trakcie prac stabilizacyjnych zagrożenia, wyegzekwowanie od wykonawców prac budowlanych właściwego ich wykonania, bądź w uzasadnionych przypadkach poprawy lub modyfikacji i skutkować bardziej efektywnym wykorzystaniem środków finansowych przeznaczonych na te

działania. Wdrożenie nowych technik monitoringu w czasie rzeczywistym umożliwi ciągłą obserwację zachowania osuwisk i wczesnego ostrzegania. Tego typu urządzenia są jednak celowe jedynie w miejscach o szczególnym znaczeniu, np. ważne obiekty infrastruktury, drogi publiczne, obiekty hydrotechniczne itp. Nowy system wczesnego ostrzegania on-line w Beskidzie Niskim jest pierwszym tego typu w Polsce i został przetestowany w strefie drogi powiatowej w rejonie osuwiskowym. Wyniki monitoringu on-line wskazują, że opady atmosferyczne i gwałtowne zmiany ciśnienia porowego mają decydujące znaczenie dla zmniejszenia wytrzymałości gruntów fliszowych na ścinanie i aktywację procesów osuwiskowych. W wyniku przeprowadzonych prac zdefiniowano warunki, w których może nastąpić aktywacja osuwiska i wdrożono system wczesnego ostrzegania. Prezentowana praca dostarczyła, w wybranych lokalizacjach, lokalnym samorządom i administracji drogowej informacji dotyczących zagrożeń dla dróg publicznych i infrastruktury. Możliwości a także sposoby stabilizacji osuwisk zależą od szeregu złożonych czynników geologiczno-inżynierskich oraz wpływu czynników zewnętrznych. W interpretacji ich mogą pomóc odpowiednio dobrane pomiary monitoringowe, które także umożliwiają kontrolę skuteczności zazwyczaj kosztowych i złożonych prac zabezpieczających. Więcej informacji dotyczących metod badań i monitoringu osuwisk można znaleźć w wydanej przez autora artykułu monografii (Bednarczyk, 2012a).

Autor pragnie podziękować Europejskiej Agencji Rozwoju Regionalnego za finansowanie projektu UE „Innowacyjna Gospodarka” dzięki czemu możliwe było zbudowanie i przetestowanie pierwszego w Polsce automatycznego systemu wczesnego ostrzegania przed zagrożeniem osuwiskowym on-line. Szczególne podziękowania kieruję do dr. Wojciecha Rączkowskiego z Oddziału Karpackiego PIG-PIB, dr. Eugeniusza Gila oraz dr. Witolda Bochenka ze stacji badawczej PAN w Szymbarku za pomoc i cenne wskazówki przy realizacji prac badawczych.

LITERATURA

- AGNELI M., G. PASUTO A. & SILVANO S. 2000 – A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology*, 55: 133–147.
- BEDNARCZYK Z. 2008a – Flysch landslides geotechnical monitoring in Beskidy, The Carpathian Mountains Poland. The 3rd International Conference on Site Characterization, ISSMGE, Taipei, Taiwan, edited by An-Bin Huang & Paul Mayne, Taylor and Francis Group/Balkema, London: 269–274.
- BEDNARCZYK Z. 2008b – Landslide geotechnical monitoring network for mitigation measures in chosen locations inside the SOPO Landslide Counteraction Framework Project Carpathian Mountains, Poland. The First World Landslide Forum, Tokyo, International Consortium of Landslides, UN: 71–75.
- BEDNARCZYK Z. 2009 – Ground Penetrating Radar (GPR) scanning in geological and geotechnical recognition of mountain site. 22 SAGEEP Symposium, Fort Worth, Texas USA, EEGS, US Army Research Office: 731–738.
- BEDNARCZYK Z. 2011 – Pierwszy w Polsce system wczesnego ostrzegania o zagrożeniu osuwiskowym w czasie rzeczywistym na podstawie wybranych lokalizacji w Beskidach. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446 (1): 9–18.
- BEDNARCZYK Z. 2012a – Metody badań i monitoringu osuwisk. Monografia. *Górn. Odkryw.*, s. 213.
- BEDNARCZYK Z. 2012b – Geotechnical modelling and monitoring as a basis for stabilization works at two landslide areas in Polish Carpathians. *Proceedings of 11th International & 2nd North American Symposium on Landslides organized by Canadian Geotechnical Society, Joint Technical Committee on Landslides, Banff, Canada.* – Landslides and Engineered Slopes Balkema, Taylor and Francis: 1419–1425.

- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. 1996 – Landslides Types and Processes. [W:] Turner A.K., Schuster R.L. (red.), Landslides – Investigation and Mitigation, Washington D.C. National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247: 36–75.
- DUNNICLIFF J. 1993 – Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Perform. J. Wiley & Sons.
- GIL E. & DŁUGOSZ M. 2006 – Threshold values of rainfalls triggering selected deep-seated landslides in the Polish Flysch Carpathians. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan., 40: 21–43.
- HUTCHINSON J.N. 1988 – General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings Fifth International Symposium on Landslides (Bonnard C. red.) Rotterdam Balkema: 3–35.
- LARSEN J.O. 2002 – Same aspects of physical weather related slope processes. Thesis submitted to the faculty of Engineering Science and Technology in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Engineering. NTNU Norway.
- MARGIELEWSKI W. 2008 – Wpływ ruchów masowych na współczesną ewolucję rzeźby Karpat fliszowych. [W:] Starkel L., Kostrzewski A., Kotarba A. & Krzemień K. (red.), Współczesne przemiany rzeźby Polski. Stow. Geomorf. Pol., IGiP UJ, IGiPZ PAN, Kraków: 69–80.
- NESCIERUK P. & RĄCZKOWSKI W. 2012 – Monitoring wgłębny osuwisk karpaccich. [W:] Geologia jedna?! II Polski Kongres Geologiczny, Warszawa, 17–19 września 2012 r. Wyd. Geol. UW, PTG, Warszawa. Abstrakty: 63–67.
- RĄCZKOWSKI W. & MROZEK T. 2002 – Activating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20th Century. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan., 36: 91–111.
- SENNESET K. 1998 – Natural and Man-Made Hazards: Landslides, Stability analysis, control, case histories. General Report Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Bull. 34, Trondheim: 1–14.

Praca wpłynęła do redakcji 24.07.2012 r.
Akceptowano do druku 24.04.2015 r.

Metody monitoringu oraz wczesnego ostrzegania on-line o zagrożeniu osuwiskowym na przykładzie badań geologiczno-inżynierskich w Beskidzie Niskim i Średnim (patrz str. 1220)

Landslide monitoring and on-line early warning methods based on geological engineering investigations in the Beskid Niski and Średni Mountains (see p. 1220)



Ryc. 7. Stacja inklinometrów *in-place* i piezometrów on-line
Fig. 7. In-place inclinometer and piezometer on-line station



Ryc. 8. Stacja inklinometrów 3D, czujniki ciągłe, on-line
Fig. 8. Continuous 3D inclinometer on-line station



Ryc. 16. Stabilizacja osuwiska w Sękowej
Fig. 16. Sękowa landslide stabilization



Ryc. 17. Osuwisko w Szymbarku po częściowej stabilizacji
Fig. 17. Szymbark landslide after partial stabilization



Ryc. 18. Stabilizacja osuwiska w Strzeszynie. Wszystkie fot. Z. Bednarczyk
Fig. 18. Strzeszyn landslide stabilization. All photos by Z. Bednarczyk



Ryc. 19. Stabilizacja osuwiska koło kaplicy św. Jana z Dukli
Fig. 19. Stabilization of landslide near St. John of Dukla Chapel