

# MOŻLIWOŚCI ROZPOZNANIA ZAGROŻENIA OSUWISKOWEGO NA PODSTAWIE OBSERWACJI ZMIAN CIŚNIENIA POROWEGO W OŚRODKU GEOLOGICZNYM

---

Jacek Stanisz

mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Wybickiego 7, 31-261 Kraków, jacek.stanis@poczta.onet.pl

---

*Streszczenie. Pomiar ciśnienia porowego jest pomocny w rozpoznaniu położenia strefy osłabienia, a jego zmiany mogą wskazywać na powstanie powierzchni poślizgu w ośrodkach zagrożonych ruchami masowymi. W przedstawionych w pracy przykładach badań pokazano, że pomiary ciśnienia porowego pozwoliły określić strefę jego wzrostu, a tym samym strefę spadku naprężeń efektywnych i rozwoju powierzchni poślizgu. W trakcie niszczenia pierwotnej struktury ośrodka następował widoczny wzrost wartości ciśnienia porowego, a następnie jego spadek tuż po zakończeniu tego procesu. Zmiany są widoczne zwłaszcza po okresach intensywnych opadów i są związane z przepuszczalnością ośrodka gruntowego. W pracy omówiono również podstawowe zasady działania czujnika pomiaru ciśnienia porowego bazującego na przetworniku strunowym.*

**Słowa kluczowe:** osuwiska, ciśnienie porowe

## 1. Wprowadzenie

Problem stateczności zboczy (lub skarp) oraz rozwoju osuwisk stanowi jedno z trudniejszych zagadnień w geologii inżynierskiej i geotechnice. W trakcie prowadzenia robót geologicznych i inżynierskich istotne jest dobre rozpoznanie ośrodka geologicznego. Ważnym aspektem tych prac jest określenie położenia stref osłabienia.

Powstanie osuwiska poprzedzone jest przekroczeniem naprężeń, które powodują lokalne ścięcia i rozrywania z rozciąganiem. Prowadzi to do zaburzenia lokalnych stanów równowagi ośrodka geologicznego. W takim przypadku, maleje skokowo wytrzymałość podłoża, co prowadzi do narastania deformacji i propagacji strefy plastycznej. Powstają szczeliny, które ułatwiają wnikanie wód opadowych w ośrodek. W miejscach przekroczenia wytrzymałości na ścinanie rozwijają się strefy osłabienia. Związane są one ze zmianami wilgotności, spękaniami i innymi defektami [9].

W zawodnionym ośrodku geologicznym występują oddziaływania statyczne: hydrostatyczne ciśnienie wody oraz wypór hydrostatyczny. W warunkach gradien-

tu hydraulicznego pojawiają się siły wywołujące ciśnienie sphywowe. To ciśnienie (siła objętościowa) bezpośrednio oddziałuje na szkielet gruntowy pokonując opór tarcia powierzchniowego. W ośrodku geologicznym o izotropowej strukturze, ciśnienie to działa zawsze w kierunku stycznym do linii przepływu [4].

W warunkach wystąpienia opadów atmosferycznych, woda wnikając w przepuszczalny ośrodek geologiczny wywiera na niego ciśnienie sphywowe. Wpływa ono na spadek naprężenia efektywnego, wynikającego z obciążenia grawitacyjnego szkieletu gruntowego. W konsekwencji prowadzi to do zmniejszenia oporu tarcia między cząsteczkami ośrodka, zwiększenie sił zsuwających, zwłaszcza w strefach osłabienia oraz wzrostu wartości dewiatora naprężenia w stanie początkowym rozwoju powierzchni poślizgu. W rezultacie następuje zniszczenie pierwotnej struktury ośrodka i powstanie powierzchni poślizgu zdolnej do przemieszczenia większych fragmentów ośrodka [8]. Proces ten narusza stateczność zboczy i skarp powodując ruchy masowe. Pomiar ciśnienia wody w porach ośrodka jest pomocny w rozpoznaniu położenia strefy osłabienia, a jego zmiany mogą wskazywać na tworzenie się powierzchni poślizgu [7].

## 2. Metody pomiaru zmian ciśnienia porowego

Czujniki dostępne na rynku składają się z dwóch podstawowych części: elementu pomiarowego ciśnienia porowego oraz filtra. Powszechnie stosowane są następujące elementy pomiarowe: z przetwornikiem strunowym (ang. *vibrating-wire sensors*), tensometryczne (ang. *resistance strain gauges*), pojemnościowe (ang. *capacitive pressure sensors*) oraz półprzewodniki (ang. *semiconductors*) (Torstensson i Schellingerhout, 1999).

W pracy omówiono rozwiązania bazujące na przetworniku strunowym, ze względu na jego najbardziej rozpowszechnione zastosowanie.

W czujnik z przetwornikiem strunowym wbudowana jest czuła membrana ze stali nierdzewnej. Podłączona do niej struna odchyła się, gdy ciśnienie wody (po wypełnieniu filtra) oddziałuje na membranę. Odkształcenie membrany jest mierzone jako zmiana napięcia i częstotliwości drgań struny. Częstotliwość, z jaką drga struna jest wprost proporcjonalna do ciśnienia, jakie jest wywierane na membranę. Częstotliwość drgań struny jest opisana wzorem [5]:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Eg\varepsilon}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

$f$  - częstotliwość drgań struny [ $s^{-1}$  lub Hz],

$L$  - długość struny [m],

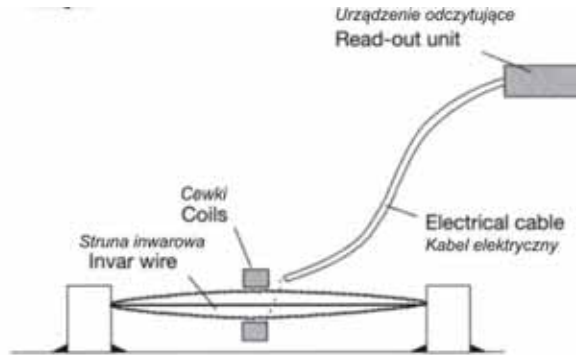
$E$  - moduł Younga dla materiału, z którego struna została wykonana [GPa],

$g$  - przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],

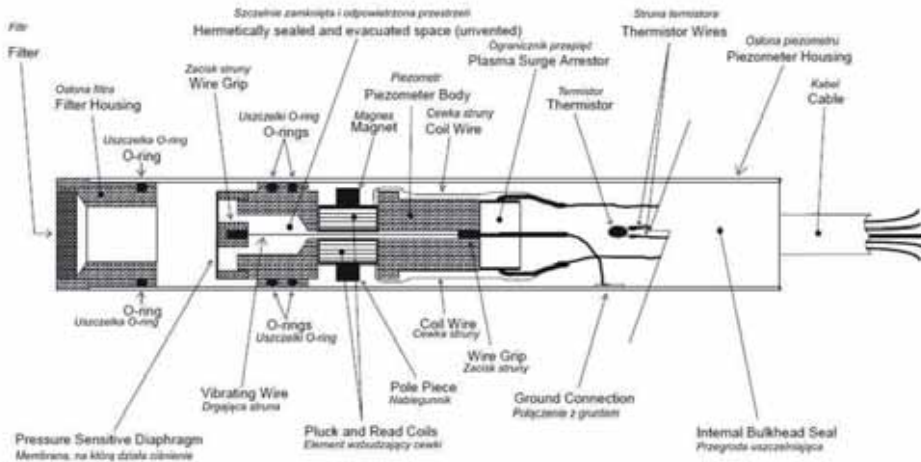
$\varepsilon$  - odkształcenie struny,

$\rho$  - gęstość objętościowa struny [ $Gg/m^3$ ].

W pobliżu struny umieszczone są dwie cewki, jedna z magnesem, druga z nabiegunkiem wyznaczającym kierunek i rozkład linii sił pola magnetycznego. W trakcie pracy czujnika, impuls o zmiennej, skokowej częstotliwości wysyłany jest do cewek, co powoduje, że struna drga zgodnie z częstotliwością rezonansową. Po zakończeniu fazy wzbudzenia, struna nadal drga przekazując sygnał do cewki, w której elektryczny przetwornik zamienia go na sinusoidalny sygnał elektryczny. Sygnał ten przekazywany jest za pośrednictwem przewodu elektrycznego do urządzenia odczytującego, gdzie po uwzględnieniu współczynnika kalibracji jest wyświetlany i przetwarzany na określoną jednostkę techniczną. Częstotliwość sygnału odpowiada liczbie impulsów, która jest niezależna od amplitudy drgań. Uproszczony schemat czujnika strunowego przedstawiono na rys. 1, a na rys. 2 pokazano schemat jego budowy. Umieszczona w urządzeniu membrana jest chroniona przez filtr, który zapobiega wnikaniu cząstek stałych większych niż 50 mikronów [5].



Rys. 1. Uproszczony schemat czujnika strunowego  
Źródło: {5}

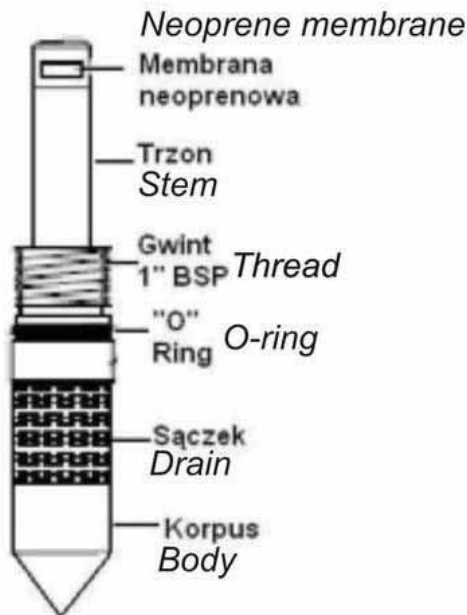


Rys. 2. Schemat budowy czujnika strunowego  
Źródło: {5}

Do wskazania wartości ciśnienia porowego wystarcza już stosunkowo niewielka ilość wody w gruncie. Czujnik umożliwia pomiar temperatury w celu korekty wskazań. Taka konstrukcja pozwala na zwiększenie czułości czujnika do 0,025% zakresu pomiarowego. Na ogólną dokładność pomiaru wpływa nieliniowość rozkładu wartości ciśnienia porowego, histereza oraz inne efekty. Po uwzględnieniu tych czynników rzeczywista dokładność wynosi ok. 0,1 - 0,2% zakresu [5].

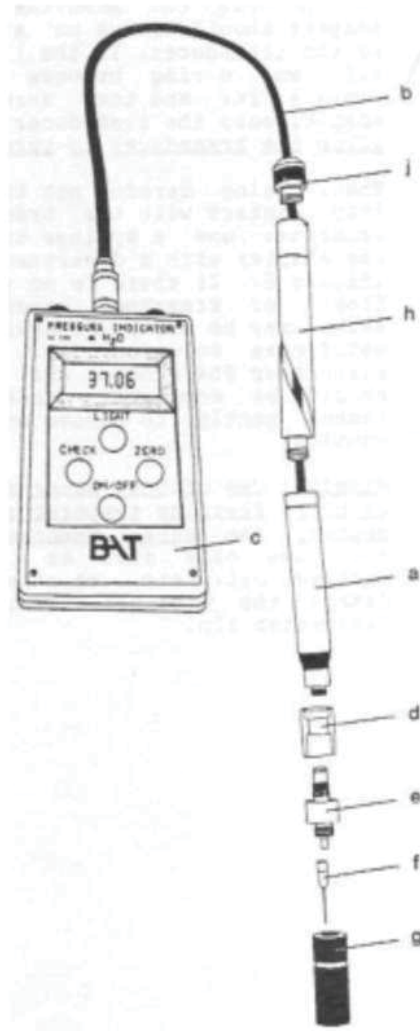
Wyniki pomiarów są bardzo dokładne, lecz czas reakcji czujników zależy od przepuszczalności gruntów. Czujniki działają długo oraz są odporne na zawilgocenie przewodów. Rozwiązania sprzętowe umożliwiają gromadzenie dużej ilości danych i tworzenie automatycznych systemów pomiarowych. Istotną wadą jest wrażliwość na przepięcia spowodowane przez wyładowania atmosferyczne. Postęp w dziedzinie elektroniki pozwolił jednak na opracowanie systemów przeciwprzepięciowych.

Przetwornik strunowy może być wykorzystany w sondach typu BAT stosowanych głównie do poboru prób wód gruntowych oraz testów przepuszczalności, szczególnie w gruntach drobnoziarnistych i słabo przepuszczalnych (iły, gliny pylaste itp.). Czas pomiaru jest stosunkowo krótki, zwłaszcza przy niewielkich przepływach wody. Pomiar odbywa się w końcówce filtra sondy (rys. 3), który wypełniony jest odpowietrzoną wodą [6]. Elementy systemu do pomiaru ciśnienia porowego wraz z przetwornikiem ciśnienia przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Schemat filtra w sondzie BAT

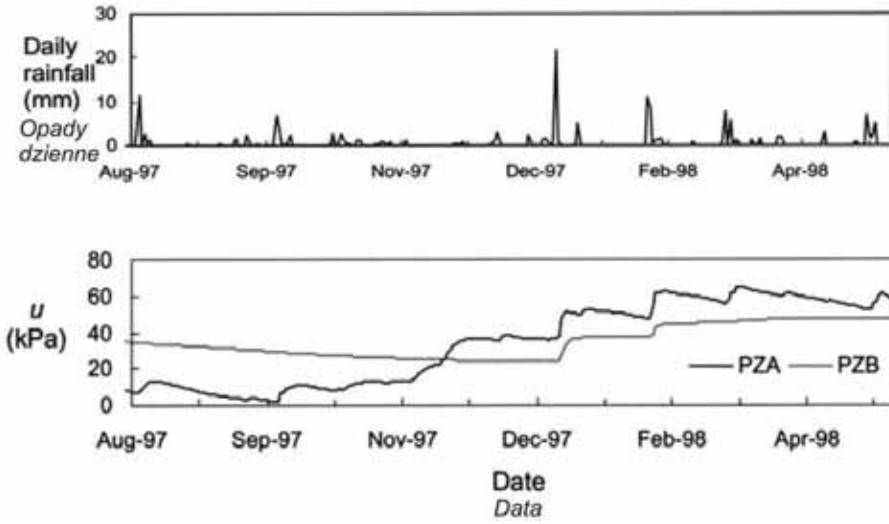
Źródło: {2}



Rys. 4. Elementy systemu do pomiaru ciśnienia porowego za pomocą sondy BAT. Oznaczenia: a-pretwornik ciśnienia, b- przewód elektryczny pretwornika, c- przyrząd pomiarowy, d- przezroczysty łącznik pretwornika, e- łącznik trans-portowy, f- igła jednostronna (SE), g- tuleja prowadząca, h- obciążniki, j- pokrywa blokująca przewód  
Źródło: {2}

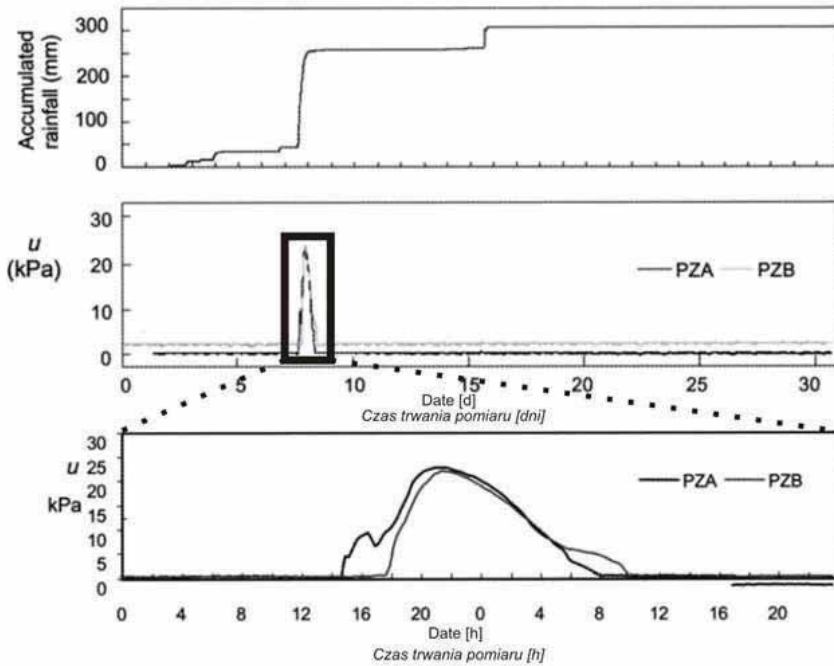
### 3. Przykłady badania związku zmian ciśnienia porowego od opadów atmosferycznych oraz przemieszczeń w obrębie ośrodka geologicznego

Opisany przez [5] system monitoringu ciśnienia porowego wykorzystuje czujniki z przetwornikiem strunowym. Pomiary wykonywano na dwóch stanowiskach badawczych w glinach i glinach piaszczystych. Czas trwania pomiaru obejmował jeden rok. Wykresy rozkładu opadów atmosferycznych oraz zmian wartości ciśnienia porowego zestawiono na rys. 5 (analiza długoterminowa) i rys. 6 (analiza krótkoterminowa).



Rys. 5. Zmiany wartości ciśnienia porowego (rysunek dolny) w zestawieniu do opadów atmosferycznych w czasie (rysunek górny), na przykładzie dwóch zainstalowanych piezometrów (PZA i PZB). Różnica w reakcji obu piezometrów wynika z różnej przepuszczalności gruntów w otoczeniu piezometru A i B

Źródło: {5}

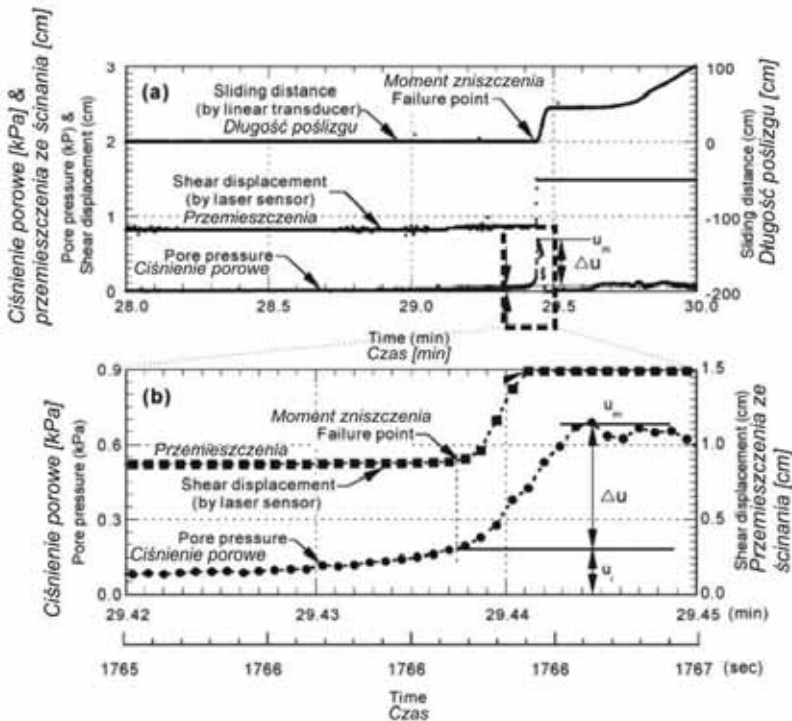


Rys. 6. Zmiany wartości ciśnienia porowego w piezometrze A i B w okresie jednomiesięcznym (wykres środkowy) oraz jednodniowym (wykres dolny) w stosunku do skumulowanej krzywej opadów (wykres górny). Pomiar wykonano w styczniu 1998 roku

Źródło: {5}

Po wystąpieniu opadów deszczu następuje wzrost wartości ciśnienia porowego. Czas reakcji czujników jest uzależniony od ciężaru objętościowego ośrodka oraz wysokości opadów w otoczeniu piezometrów. Po ich zaniku wysoka wartość ciśnienia porowego utrzymuje się przez kilka godzin, po czym następuje jego spadek. Badania tą metodą powinny mieć charakter wskaźnikowy, gdyż w badaniach Ortigao pojawia się niezrozumiały wzrost wartości ciśnienia porowego w okresie od listopada do pierwszej połowy grudnia 1997.

Wang i Sassa [7] badali wpływ ciśnienia porowego na proces zniszczenia w modelu ośrodka gruntowego zbudowanego z zapyłonego piasku. Analiza wyników (rys. 7) pozwoliła stwierdzić, że przed powstaniem powierzchni wystąpił wyraźny, krótkotrwały wzrost ciśnienia porowego, po którym w krótkim przedziale czasowym obserwowano jeszcze dalsze, niewielkie wzrosty ciśnienia porowego. W bardzo krótkim przedziale czasowym następował dalszy, chwilowy wzrost ciśnienia porowego. Rozwój procesu zniszczenia był wynikiem wzrostu ilości wody na badanym odcinku zbocza. W tym samym interwale czasowym nastąpił wzrost przemieszczeń ze ścinania i długości poślizgu fragmentów ośrodka w trakcie zniszczenia. Później spadek wartości ciśnienia porowego, był spowodowany przemieszczaniem się materiału w dół skarpy.



Rys. 7. Zestawienie wyników z pomiarów ciśnienia porowego i przemieszczeń

W czasie zniszczenia, pokazanym na wykresie przemieszczeń, następuje znaczący wzrost wartości ciśnienia porowego, a następnie jego spadek po uruchomieniu procesu osuwiskowego (wykres a). Zmiany wartości ciśnienia porowego są szczególnie widoczne w krótkim okresie czasu (wykres b)

Źródło: [7]

#### 4. Podsumowanie

Pomiar zmian ciśnienia porowego wspomaga identyfikację położenia powierzchni poślizgu na terenach osuwiskowych. Ze względu na niewielką ilość danych pomiarowych zamieszczonych w literaturze (Ortigao, Wang i Sassa), w chwili obecnej należy traktować je jako wskaźnikowe.

W warunkach przepływu wody w ośrodku zagrożonym procesami osuwiskowymi następuje postęp zniszczenia, najczęściej w strefach osłabienia, co w konsekwencji prowadzi do powstania osuwiska. Na etapie rozwoju zniszczenia ciśnienie porowe wzrasta, a wystąpienie przemieszczenia maleje w wyniku jego rozpraszania. W rezultacie obserwuje się charakterystyczny wykres zmian ciśnienia porowego, co pokazali w swojej pracy Wang i Sassa [7].

Określenie zmian wartości ciśnienia porowego dostarcza dodatkowych informacji o zachowaniu się ośrodka geologicznego. Wyniki pomiarów zmian ciśnienia porowego mogą być wykorzystane w czasoprzestrzennych analizach ryzyka wystąpienia osuwisk.

Dokładność pomiaru ciśnienia porowego ograniczona jest przez porowatość, gęstość objętościową oraz wielkość przepływu wody w ośrodku. Czynniki te w znaczącym stopniu wpływają na czas reakcji czujników. Względnie dokładne wyniki pomiaru ciśnienia porowego uzyskuje się za pomocą czujników strunowych. Są one bardzo dokładne, pracują przez długi okres czasu oraz są stosunkowo tanie. Natomiast ich wadą jest wrażliwość na przepięcia. Ryzyko awarii wskutek wystąpienia wyładowań atmosferycznych można jednak ograniczyć poprzez zastosowanie odpowiedniego systemu przeciwprzepięciowego.

#### Bibliografia

- [1] Bednarczyk Z., Badania geologiczno-inżynierskie karpaccich osuwisk fliuszowych w rejonie Gorlic (Beskid Niski), *Geologos* 11, III sympozjum WPGIwP, Puszczykowo, 2007.
- [2] Instrukcja do próbnika i przepuszczalnościomierza GeoN, 2013.
- [3] Katalog produktów firmy Geokon – VW Piezometer 4500 Series – Manual, 2013.
- [4] Lambe T.W., Whitman R. V., *Mechanika gruntów*. Tom 2, cz. IV i V. Wyd. Arkady, Warszawa, 1978.
- [5] Ortigao J.A.R., *Landslide instrumentation and alarm system*. Rio de Janeiro, 1998.
- [6] Torstensson B.A., Schellingerhout A.J.G., *Ground water monitoring with the BAT-system*, 1999.
- [7] Wang G., Sassa K., Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, Volume 69, Issues 1–2, 2003: 109–125.



- [8] Wiłun, Z., Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010.
- [9] Wysokiński L., Metody prognozowania i zabezpieczania osuwisk. Awarie budowlane - XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje, 24-27 maja 2011r.