



Geodezyjny i geotechniczny monitoring obiektów inżynierskich w ujęciu dynamicznym

# Wykrywanie słabych punktów

Krzysztof Karsznia<sup>1</sup>

## Wstęp

We współczesnym świecie kluczowe znaczenie przypisuje się informacji. Dostarczona z należytą wiarygodnością i w odpowiednim czasie jest podstawą do podejmowania decyzji. Te z kolei determinują przebieg wydarzeń, posiadają więc realną wartość finansową (jak np. trafna inwestycja) lub trudną do wycenienia wartość społeczną (np. ostrzeżenie przed katastrofą). Dostarczenie cennych informacji zależy jednak od wielu czynników. Przede wszystkim należy zadbać o odpowiednie pozyskanie danych oraz o ich umiejętne przetworzenie. Od dokładności danych zależy bowiem jakość budowanego modelu otaczającej nas rzeczywistości. Dokładny model umożliwi wiarygodne opracowanie pozyskanych danych przy zastosowaniu metod numerycznych i algorytmów, co z kolei przekłada się na wykonanie trafnego wniosku i podjęcie odpowiednich decyzji.

Procesy decyzyjne są istotą monitorowania obiektów topograficznych i inżynierskich. To właśnie dzięki trafnym decyzjom możemy uniknąć wielu niebezpieczeństw, katastrof budowlanych, strat materialnych czy innych szkód, wynikających z dynamiki naszego otoczenia. Oprócz skali globalnej (ruchy płyt kontynentalnych, ruchy masowe na większą skalę) mamy do czynienia z wydarzeniami lokalnymi, jak powstawanie osuwisk, deformacji terenów oraz przemieszczeń obiektów budowlanych. Uszkodzenia infrastruktury powstałe na skutek dynamicznej struktury świata dezorganizują życie i powodują powstawanie wielu zagrożeń. Drgania konstrukcji budowlanej, przekraczające dopuszczalny zakres, mogą stać się przyczyną uszkodzenia obiektu. Trzeba zatem w umiejętny sposób dobrać sensory (metrologiczne, fotograficzne itp.), pozyskujące informacje na określony temat oraz zdefiniować ich listę zadań.

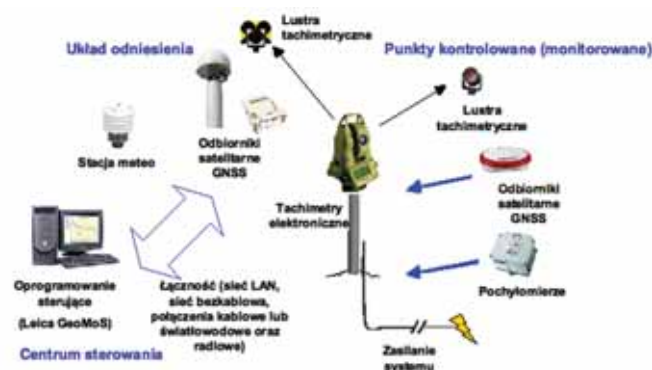
Zgodnie z klasyczną definicją, całokształtem procesów pozyskiwania, wizualizacji, opracowania i analizy danych przestrzennych o obiekcie zajmuje się geomatyka. Wykorzystanie geomatyki w procesie ciągłego zbierania informacji o obiektach inżynierskich nazywamy monitoringiem. W odróżnieniu od klasycznego pomiaru kontrolnego, określającego położenie oraz oceniającego stan przedmiotu badania w danym momencie, wprowadzenie monitoringu daje możliwość oceny dynamiki zachodzących zjawisk oraz identyfikację procesów będących ich skutkiem. Dzięki temu zapewniona jest pełna kontrola obiektu z możliwością prowadzenia analiz czy też modelowania zjawisk. Na świecie spotykamy wiele zastosowań systemów monitoringu inżynierskiego, które różnią się charakterystyką prowadzonych prac oraz specyfiką badanych obiektów. Praktyczną realizację każdego systemu poprzedza szereg prac studialnych oraz ekspertyz, w wyniku których opracowuje się indywidualną koncepcję wdrożenia. Działający system monitoringu inżynierskiego jest zatem efektem współpracy wielu ekspertów oraz ich interdyscyplinarnego działania.

## Dynamiczny monitoring obiektów inżynierskich

Obsługa geodezyjna obiektów inżynierskich polega na określaniu zależności geometrycznych będących efektem różnych zjawisk. Pomiar kontrolny wykonany co pewien czas pozwala ocenić położenie obiektu względem jego modelu, np. projektu budowlanego. Daje również pogląd na zachowanie się obserwo-

wanej konstrukcji w czasie. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wiele procesów przebiega w sposób nieregularny, a dynamika poszczególnych elementów konstrukcyjnych charakteryzuje się różną częstotliwością (np. drgania, wibracje). Również podczas prac realizacyjnych nie możemy zakładać liniowości zachodzących procesów mających wpływ na zachowanie się konstrukcji (działanie wiatru, temperatur, zmiana stosunków wodnych gruntu, oddziaływanie innych obiektów). W celu pozyskania wiernej informacji, oddającej prawdziwy charakter zjawiska, coraz szersze zastosowanie znajdują rozwiązania z zakresu integracji pomiarów geodezyjnych oraz uzupełnienie ich wynikami pomiarów geotechnicznych czy geofizycznych. To co do niedawna było jeszcze przedmiotem rozważań czysto akademickich, dziś staje się standardową praktyką znajdującą zastosowanie w wielu miejscach na świecie. Pozyskiwanie danych geometrycznych i geotechnicznych sensorami o różnej precyzji pomiaru, częstotliwości czy technice daje możliwość pełnego określenia dynamiki badanej konstrukcji inżynierskiej oraz rozpoznanie zjawiska powodującego takie a nie inne jej zachowanie. Prace takie wymagają wykonania wielu serii pomiarów zautomatyzowanych oraz szeregu obliczeń i analiz prowadzonych w czasie rzeczywistym.

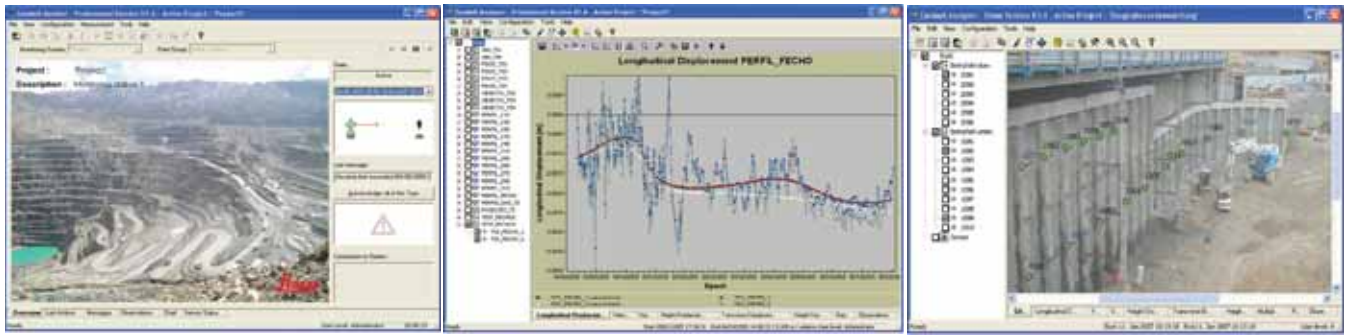
Przykładem takiego kompleksowego rozwiązania stosowanego w badaniu stanu wielu obiektów inżynierskich oraz topograficznych jest system kontrolno-pomiarowy GeoMoS firmy Leica Geosystems. Czynnikiem odróżniającym wspomniany system od innych, podobnych rozwiązań jest zapewnienie pełnej integracji pomiarów geodezyjnych (klasyczny pomiar kątowno-liniowy, satelitarny GPS+GLONASS+GALILEO=GNSS, niwelacyjny) z innymi, jak np. pomiar prędkości wiatru, wielkości dylatacji, odczyt z piezometrów czy z pochylomierzy. Ważnym elementem jest także pomiar rejestrowany na stacji meteorologicznej (temperatura, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza), dzięki któremu w sposób automatyczny wyznaczany jest współczynnik refrakcji – zjawiska wpływającego na wyniki pomiarów geodezyjnych. Schemat działania monitoringu inżynierskiego Leica Geosystems przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólny schemat budowy systemu monitoringu inżynierskiego na przykładzie Leica GeoMoS

System musi zostać przede wszystkim odpowiednio skonfigurowany, skalibrowany i zaprogramowany do wykonywania określonych sekwencji pomiarowych. Sygnał pochodzący z danego urządzenia, czyli wynik pomiaru punktu kontrolowanego ma zostać odpowiednio zinterpretowany i przygotowany do dal-

<sup>1</sup> Dr inż.; Leica Geosystems Sp. z o.o., Warszawa.



Rys. 2. Widok okien dialogowych modułów aplikacji Geodetic Monitoring System – GeoMoS

szej analizy. Instrumenty muszą mierzyć zgodnie z ustalonym porządkiem – czy to poszczególne punkty kontrolowane, czy też całe profile składające się z wielu punktów. Jest to bardzo ważne w procesie interpretacji wyników. Interfejs graficzny przemawia do użytkownika bardziej, niż tylko zestaw okien dialogowych i linii komend, program posiada zatem funkcję wizualnej prezentacji wyników pracy. Oprogramowanie GeoMoS (rys. 2) umożliwia pełne opracowanie danych pomiarowych, przyjmowanie wyników opracowania danych satelitarnych GPS/GNSS, budowanie wykresów przemieszczeń i odkształceń, prezentację trendów i korelacji między wynikami pomiarów pochodzących z różnych źródeł oraz informowanie użytkownika o występujących zdarzeniach. Wspomniane wykresy obrazujące dynamikę obiektu prezentowane są w różnych formach – wizualizacji przemieszczeń pionowych, poziomych, względem osi lokalnego układu odniesienia, a także zaobserwowanych różnic wysokości punktów kontrolowanych. Dzięki funkcji umożliwiającej wczytanie podkładu rastrowego lub mapy bitowej badanego obiektu, operator systemu uzyskuje łatwy wgląd do jego punktów charakterystycznych.

### Zastosowania praktyczne

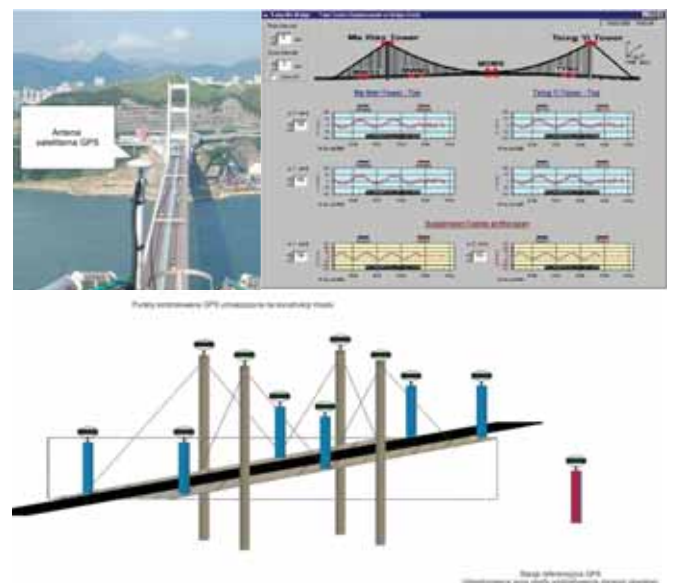
Na świecie możemy spotkać wiele zastosowań systemów zintegrowanego monitoringu inżynierskiego (sam koncern Leica Geosystems wdrożył już ponad 350 tego typu instalacji). W wielu przypadkach, podejście klasyczne bazujące na pomiarze okresowym oraz punktowym nie jest wystarczające (dotyczy to szczególnie wysokich budynków, głębokich wykopów, skarp czy osuwisk). Mówiąc o monitoringu, można by pokusić się o pewne szczegółowe usystematyzowanie jego zastosowań. Permanentnym obserwacjom geodezyjnym i geotechnicznym podlegają więc budowle inżynierskie, jak: mosty, obiekty hydrotechniczne, hale przemysłowe czy tunele. Przykładowo, nowoczesne konstrukcje mostów przenoszą ogromne obciążenia pracując zależnie od natężenia ruchu pojazdów, wpływu czynników atmosferycznych i meteorologicznych. Niezbędny więc staje się ciągły monitoring drgań i przemieszczeń konstrukcji, prowadzony np. za pomocą zintegrowanej pracy odbiorników GPS/GNSS oraz sieci precyzyjnych pochylomierzy. Na podstawie doświadczeń zgromadzonych przez specjalistów firmy Leica Geosystems (projekty z Francji, Hongkongu, Chin czy Japonii) można potwierdzić dużą efektywność oraz precyzję takich prac. Dynamika konstrukcji wiszących o rozpiętości nawet powyżej 2 km obserwowana jest przez 24 godziny na dobę z milimetrową wręcz dokładnością. Praktyczny przykład geometrycznego monitoringu mostu zobrazowano na rysunku 3.

Dzięki możliwości zastosowania sensoryki innej niż geodezyjna oraz włączenia jej do instalacji, uzyskujemy w pełni zintegrowany model dynamiczny obiektu, który możemy poddać dalszym opracowaniom. W trakcie interpretacji wyników, stosując np. metodę elementów skończonych, powstaje model, którego rozwiązanie umożliwi identyfikację elementów krytycznych oraz opisanie zjawisk, z którymi mamy do czynienia w trakcie eksploatacji przeprawy – występowanie nienaturalnych obciążeń związanych z ruchem pojazdów czy wibracji wywołanych silnym wiatrem. System dynamicznego monito-

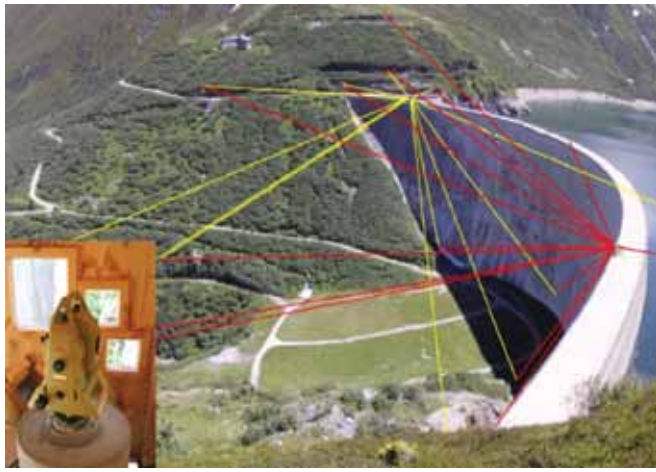
ringu umożliwia zidentyfikowanie uszkodzeń lub kumulacji czynników niszczących konstrukcję mostu, oszacowanie zdolności obciążeniowej, pozwala także na dokonanie weryfikacji i walidacji założeń konstrukcyjnych oraz dostarcza informacje dla celów napraw, utrzymania i inspekcji obiektu.

Osuwiska terenu powodują ogromne straty materialne, a także uszkodzenia nawierzchni dróg i linii kolejowych. Wdrożenie systemu monitoringu dla tych obszarów odgrywa zatem kluczową rolę w zarządzaniu ryzykiem, dostarczając także szczegółowych informacji dotyczących deformacji terenów przyległych. W tym miejscu przytoczyć można przykładowe instalacje w Niemczech (kopalnia odkrywkowa Hambach, Rheinbraun), w Czechach (kopalnia odkrywkowa eskoslovenské Armády, Most) oraz na licznych podobnych obiektach Afryki, Azji, Ameryki Północnej czy Południowej. Ciekawe rozwiązania monitoringu prowadzone są także na zboczach Wulkanu Stromboli i w Cortenova (Włochy), gdzie badane są procesy charakterystyczne dla aktywnych stref tektonicznych naszego kontynentu.

Takie obiekty, jak duże zbiorniki wodne (rys. 4) czy zapory odgrywają niewątpliwie kluczową rolę podczas zaopatrzenia w wodę oraz w produkcji energii elektrycznej. Aby zapewnić bezpieczeństwo ludzi i mienia, stałym obserwacjom poddawane są przemieszczenia wywoływane zmieniającym się poziomem wody w zbiorniku. Badana jest także stabilność obiektu hydrotechnicznego oraz aktywność sejsmiczna otaczającego terenu. Zastosowanie efektywnego systemu monitoringu umożliwia wczesne zlokalizowanie niepokojących zjawisk oraz określenie potencjalnych zagrożeń. Wczesne wykrycie „słabych punktów” struktury obiektu pozwala na szybkie dokonanie stosownych napraw, co uchroni przed wieloma niebezpieczeństwami.



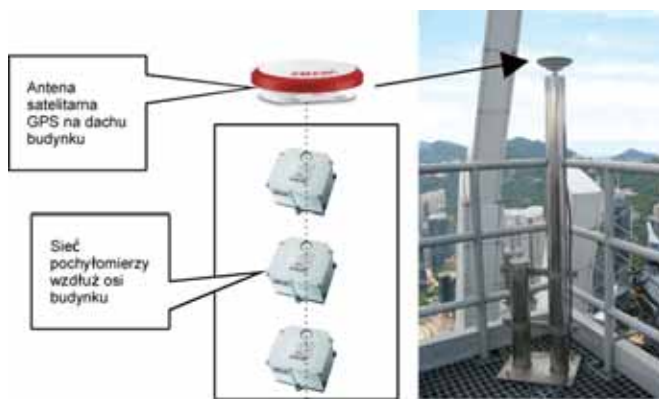
Rys. 3. Przykład instalacji systemu monitoringu konstrukcji mostu – schemat rozmieszczenia punktów wraz z przykładem analiz prowadzonych w czasie rzeczywistym; źródło: Leica Geosystems AG



Rys. 4 Przykład instalacji dynamicznego systemu monitoringu zapory wodnej (stałe stanowisko tachymetryczne wykonujące ciągły pomiar sieci kątowno-liniowej); źródło: Leica Geosystems AG

Systemy monitoringu przemieszczeń i odkształceń GeoMoS mają spory wkład w procesach sterowania pracami tunelowymi oraz w określaniu deformacji terenów przyległych. Ciągły monitoring tuneli dostarcza bowiem niezbędnych informacji na temat warunków naprężenia górotworu. Wdrożenie na podobnych obiektach instalacji monitorujących przemieszczenia oznacza wzrost bezpieczeństwa zarówno samej budowy, jak i dla okolicznych osiedli i wszelkiej infrastruktury. Jako przykład podać można szwajcarski tunel Vereina oraz przebudowywany autostradowy węzeł Zurychu.

Do nowoczesnych rozwiązań należy również coraz częściej stosowany monitoring powykonawczy w postaci zamontowanej na stałe anteny satelitarnej na zrealizowanym obiekcie, której sygnał przetworzony w stacji odbiorczej informuje nas w sposób ciągły o zachowaniu się obiektu. Pozwala to w powiązaniu z czujnikami temperatury, na ocenę zachowania się obiektu z uwzględnieniem parametrów nasłonecznienia, parcia wiatru itp. (rys. 5). Eliminacja wpływów warunków zewnętrznych umożliwia jednoznaczną ocenę zachowania się konstrukcji samego obiektu. Ma to szczególne znaczenie w ekstremalnych warunkach eksploatacji, spowodowanych szczególnymi zdarzeniami pogodowymi (wiatry o szczególnym nasileniu i kierunku).



Rys. 5. Schemat monitoringu powykonawczego wysokiego budynku; źródło: Leica Geosystems AG

Idea dynamicznego monitoringu inżynierskiego spotyka się także w Polsce z bardzo dużym zainteresowaniem. Beneficjentami proponowanych rozwiązań geodezyjnych i geotechnicznych są coraz częściej inne branże, np. stoczniowcy, mostowcy czy... konserwatorzy zabytków. Ochrona cennej zabudowy historycznej oraz stabilność gruntów na terenach miejskich nabiera znaczenia wręcz kluczowego. Z polskich większych projektów w dziedzinie monitorowania obiektów inżynierskich należy wymienić systemy instalowane przez firmę Leica



Rys. 6 Schemat realizacji monitoringu mostu na przykładzie podzielonogórskich Cigacic; źródło: Leica Geosystems Sp. z o.o.

Geosystems dla największych potentatów przemysłowych – KGHM Polska Miedź SA oraz KWB „Bełchatów”. Na uwagę zasługuje także pierwszy w Polsce dynamiczny monitoring przeprawy mostowej w lubuskiej miejscowości Cigacic (projekt we współpracy z Uniwersytetem Zielonogórskim), którego schemat realizacji przedstawia rysunek 6.

#### Podsumowanie

Sprawne funkcjonowanie państwa w dużej mierze zależy od stanu mostów, zapór wodnych, tuneli, estakad, kopalń i budynków, czyli od jakości infrastruktury. Prawidłowe jej funkcjonowanie znajduje się w gestii odpowiednich służb – specjalistów z dziedziny geodezji, geotechniki, hydrotechniki czy wszechobecnej informatyki. Komfort życia oraz bezpieczeństwo mienia zależą od wiarygodności i zaufania do ludzi, których praca i wiedza ustrzec ma przed skutkami nieoczekiwanych wydarzeń czy wręcz katastrof.

Wdrożenie systemu monitoringu strukturalnego w znacznym stopniu ogranicza możliwość występowania wszelkich zagrożeń związanych z obiektem. Dzięki stałemu pozyskiwaniu oraz analizowaniu danych przestrzennych jesteśmy w stanie zrozumieć oraz przewidzieć procesy powodujące występowanie przemieszczeń i odkształceń. Zminimalizowane jest również zagrożenie integralności oraz bezpieczeństwa monitorowanych obiektów. Dzięki zaletom ciągłego monitoringu inżynierskiego, do minimum ograniczone zostają wszelkie niebezpieczeństwa jeszcze przed przystąpieniem do realizacji projektu, a także w trakcie jego trwania oraz po zakończeniu prac (monitoring powykonawczy – szczególnie istotny w trakcie eksploatacji np. wysokich budynków wznoszonych wręcz masowo w ostatnim czasie). Wszelkie zagrożenia zostaną bowiem rozpoznawane zanim przerodzą się w sytuacje krytyczne. Dzięki metodom geostatystycznym oraz numerycznym jesteśmy w stanie prowadzić analizy oraz przewidywać zachowanie się obiektów na podstawie danych zbieranych okresowo. Dotychczasowe problemy pojawiały się głównie w przypadku wystąpienia nagłych, nieprzewidzianych czynników, których wychwycenie bez prowadzenia pomiaru ciągłego było wręcz niemożliwe. Klasykny pomiar kontrolny realizuje bowiem tylko statyczny model obiektu. Uchwycenie rzeczywistości wiąże się natomiast z dynamiką, ponieważ taką strukturę ma otaczający nas świat.

Ożywienie gospodarcze, które obserwujemy w ostatnim czasie, przekłada się na realizację wielu inwestycji inżynierskich. Wspomnieć można więc nie tylko o konieczności budowy dróg i autostrad, mostów czy fabryk. Szybki wzrost oznacza także większe zużycie energii, co przekłada się na konieczność budowy elektrowni oraz wykorzystywania źródeł odnawialnych. Istnieje także konieczność budowy zbiorników retencyjnych, zapór, tworzenia nowych miejsc eksploatacji minerałów itp.

Nowoczesne metody pozyskiwania danych przestrzennych oraz integracji wyników pomiarów staje się kluczowym zadaniem specjalistów z różnych branż inżynierskich, począwszy od geodezji po geotechnikę, od hydrotechniki po mechanikę, od informatyki po transport. Ważne jest więc, by wyjść poza utarte schematy działania, które w coraz mniejszym stopniu przystają do dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości.

#### Literatura

1. Brown N. i współautorzy (2006): Monitoring of open pit mines using combined GNSS Satellite Receivers and Robotic Total Stations, artykuł branżowy Leica Geosystems AG, [www.leica-geosystems.com/downloads](http://www.leica-geosystems.com/downloads).
2. James H. (2006): Automatic deformation monitoring, The American Surveyor, March/April 2006.
3. Cavanagh J. (1999): Geomatics, New Jersey.
4. Góral W., Szewczyk J. (2004): Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych pomiarach deformacji, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
5. Karsznia K.(2007): Nic nie jest statyczne, czyli system strukturalnego monitoringu przemieszczeń i odkształceń Leica GeoMoS, Geodeta – Magazyn Geoinformacyjny Nr 9 (148), wrzesień 2007, s. 54–58.
6. Karsznia K., Portasiak K.(2007): Koncepcja zintegrowanego monitoringu strukturalnego na przykładzie systemu kontrolno-pomiarowego Leica GeoMoS, artykuł konferencyjny XX. Jubileuszowej Jesiennej Szkoły Geodezji im. Jacka Rejmana „Współczesne metody pozyskiwania i modelowania geodanych”, Polanica Zdrój 16-18 września 2007, wersja elektroniczna dostępna na stronie <http://www.geo.ar.wroc.pl>.
7. Van Cranenbroeck J., Brown N. (2004): Networking motorized total stations and GPS receivers for deformation measurements, artykuł konferencyjny, FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 2004.
8. Wolski B. (2006): Monitoring metrologiczny obiektów geotechnicznych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.

SEJS.com

## NOWOCZESNE URZĄDZENIA DO PRZEŚWIETLANIA GRUNTU I KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

Oferujemy pełny asortyment georadarów firmy IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A

Detector DUO - znacznie więcej niż lokalizator

RIS S - mapy 3D infrastruktury podziemnej

RIS MF - wsparcie dla wierceń horizontalnych

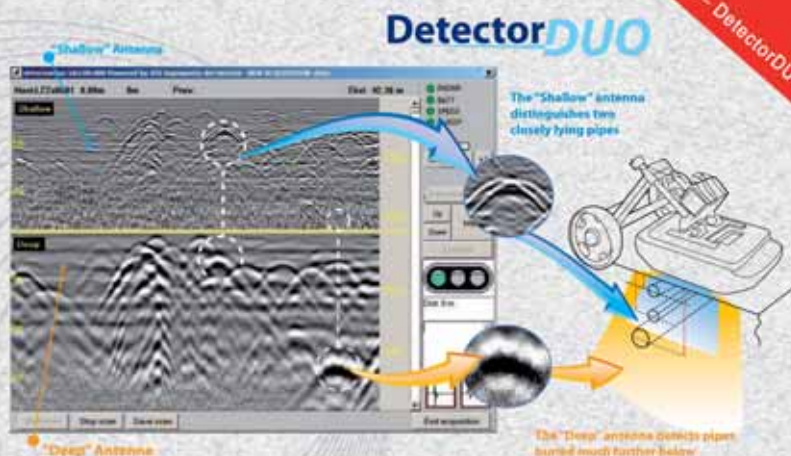
ALADDIN - prześwietlenie konstrukcji betonowych

Dystrybutor w Polsce:

Sejscom S.C. ul. Sapiehy 19, 31-644 Kraków

Biuro handlowe: os. Złotej Jesieni 6 pok. 59, 31-826 Kraków

tel.: 012 642 86 70, fax: 012 642 86 71, tel. kom. 0 694 197 440, e-mail: [info@georadary.pl](mailto:info@georadary.pl)



[www.georadary.pl](http://www.georadary.pl)



Rok założenia 1990



ZAKŁAD INŻYNIERSKI  
**GEOREM**  
Sp. z o.o.  
[www.georem.pl](http://www.georem.pl)

**SPECJALIZUJEMY SIĘ W WYKONAWSTWIE ROBÓT Z ZAKRESU:**

- oceny geotechnicznej stanu podłoża budowlanego
- kolumn "jet grouting"
- stabilizacji skarp i osuwisk metodami iniekcyjnymi
- palowania i mikropalowania fundamentów budowli
- kotew i gwoździ gruntowych
- likwidacji pustek po eksploatacji górniczej

**POSIADAMY SPECJALISTYCZNY SPRZĘT INKLINOMETRYCZNY DO MONITORINGU GEOTECHNICZNEGO OSUWISK I STATECZNOŚCI SKARP.**



41-100 Sosnowiec, ul. Mikołajczyka 59a, tel./fax 032 266 20 26-27, e-mail: [georem@georem.internetdsl.pl](mailto:georem@georem.internetdsl.pl)