

Geoinformacja jako metoda ochrony przed geozagrożeniami

**pod redakcją
dr. inż. Krzysztofa Karszni i dr. inż. Konrada Podawcy**

Warszawa 2014

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2014

Recenzent monografii: prof. dr hab. Jerzy Wysocki

*Szczególne podziękowanie firmie Leica Geosystems Polska
za finansowe wsparcie prezentowanej monografii*

fotografia na okładce ze zbiorów Leica Geosystems Polska

ISBN 978-83-7583-599-1

Wydawnictwo SGGW

ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

tel. 22 593 55 20 (-22; -25 – sprzedaż), fax 22 593 55 21

e-mail: wydawnictwo@sggw.pl

www.wydawnictwosggw.pl

Druk: POLIMAX s.c., ul. Nowoursynowska 161 L, 02-787 Warszawa

Spis treści

Przedmowa	5
Rozdział I. Geoinformacja a bezpieczeństwo obiektów infrastruktury technicznej – podejście interdyscyplinarne	7
Rozdział II. Sieci geodezyjne dla potrzeb monitorowania obiektów inżynierskich i zjawisk naturalnych – wczoraj i dziś	22
Rozdział III. Modelowanie przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skanera laserowego	42
Rozdział IV. Geodezyjne monitorowanie elementów obiektów budowlanych na przykładzie pomiaru ugięcia belki żelbetowej	64
Rozdział V. Zintegrowany system geodezyjnego monitorowania osuwisk jako element infrastruktury zapewnienia bezpieczeństwa	83
Rozdział VI. Analiza zapisów miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego pod kątem ochrony Skarpy Warszawskiej przed geozagrożeniami	96
Rozdział VII. Ocena efektów prac modernizacyjnych zbiornika w Leźnicy Wielkiej na rzece Gnidzie	118
Rozdział VIII. Ocena parcia na obudowę głębokiego wykopu na przykładzie stacji metra C14 Stadion	137



Przedmowa

Tematyka niniejszej monografii dotyczy istotnej tak z naukowego, jak i z praktycznego punktu widzenia – problematyki monitorowania zagrożeń obiektów inżynierskich wywołanych przez bezpośrednie działanie człowieka, jak również wywołanych zjawiskami naturalnymi. Głównym celem badawczym, który przyświecał autorom tego opracowania było przygotowanie podstaw metodycznych przydatnych podczas projektowania systemów monitoringu –głównie geodezyjnego, aczkolwiek współpracującego również z innymi systemami zarządzania ryzykiem. W badaniu właściwości konstrukcji budowlanych czy też w prawidłowym zdiagnozowaniu niebezpieczeństw powodowanych oddziaływaniem zjawisk naturalnych, bardzo ważne staje się właściwe rozpoznanie pojawiających się trendów zmian, głównie przemieszczeń punktów lub grup punktów kontrolowanych.

Projektowanie systemów monitoringu geodezyjnego wymaga zatem przeprowadzenia rzetelnych prac studialnych oraz precyzyjnego zdefiniowania funkcjonalności takiego systemu. Szczególną rolę odgrywa tutaj prawidłowe zidentyfikowanie zaistniałego przemieszczenia oraz „nauczenie” systemu żądanej przez nas reakcji. Zagrożenie i katastrofy nie następują bowiem zniemacka lecz są konsekwencją zmian zachodzących w czasie. Problem w tym, jak w sposób najbardziej wiarygodny wychwycić rozpoczynający się trend, który jest oznaką potencjalnego zagrożenia. Jak dotąd, interpretacja taka prowadzona jest bezpośrednio przez specjalistów, którzy częstokroć bazują na swoich wcześniejszych doświadczeniach z różnych dziedzin inżynierskich. Takie informacje geodezyjne są niezmiernie ważne dla inżynierów budownictwa projektujących obiekty budowlane czy planistów przestrzennych określających zasady zagospodarowania zagrożonych terenów.

Tematyka monitoringu geodezyjnego, geotechnicznego oraz pochodzącego z innych branż, poruszana jest w wielu publikacjach oraz stanowi przedmiot licznych opracowań publikowanych w kraju i na świecie. Brakuje jednak kompleksowych, interdyscyplinarnych studiów dotyczących metodyki projektowania oraz interpretowania wyników dostarczanych przez systemy monitorujące, w szczególności automatyczne. Nie ma również wystarczająco jednolitych i jednoznacznych przepisów określających warunki stosowania zintegrowanych systemów monitoringu.

Wszystkie wspomniane zagadnienia były przedmiotem rozważań i dyskusji, które miały miejsce w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Wydarzeniem inicjującym debatę nad możliwością podjęcia wspólnych, interdyscyplinarnych badań nad monitoringiem stało się ogólnopolskie seminarium zorganizowane przez Katedrę Inżynierii Budowlanej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego oraz Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej w dniu 23 października 2013 r. Podczas spotkania w Centrum Wodnym SGGW,

kilkadziesiąt osób z różnych branż debatowało nad problemami integracji geodanych, doboru technologii pomiarowej, budowania modeli obiektów, sposobu wizualizacji wyników pomiarów, a przede wszystkim ich wykorzystania w celach prawidłowego planowania i zabezpieczenia przyszłego zagospodarowania przestrzennego. Kontynuacją tychże rozważań było również seminarium Katedry Inżynierii Budowlanej SGGW z 2 grudnia 2013 r. (aspekty kartograficzne i problematyka wizualizacji – sesja z udziałem pracowników naukowych Zakładu Kartografii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego) oraz drugie ogólnopolskie seminarium zorganizowane na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w dniu 5 lutego 2014.

Wszystkie rozdziały niniejszej monografii prezentują tematykę interdyscyplinarnego podejścia wykorzystania geoinformacji w aspektach geozagrożeń. Ich treść stanowi przyczynek do dalszych wspólnych działań specjalistów wywodzących się z pokrewnych dyscyplin naukowych, których zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa i sprawności funkcjonowania miast, gmin i całego kraju.

Dr inż. Krzysztof Karsznia
Dr inż. Konrad Podawca
Katedra Inżynierii Budowlanej
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW
Warszawa, wrzesień 2014

Krzysztof Karsznia

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

e-mail: krzysztof_karsznia@sggw.pl

Geoinformacja a bezpieczeństwo obiektów infrastruktury technicznej – podejście interdyscyplinarne

Wstęp

Mówiąc o bezpieczeństwie infrastruktury technicznej, mamy na myśli bardzo wiele czynników oraz przypadków. Zarządzanie infrastrukturą oraz kontrola jej sprawności stanowią kluczowy element bezpieczeństwa państwa. Rozpatrując tę tematykę wielowymiarowo, wspomnieć należy również o innych aspektach, jak choćby o bezpieczeństwie danych, normalizacji czy standaryzacji. Są to niezwykle obszerne zagadnienia będące przedmiotem badań prowadzonych przez specjalistów z dziedzin informatyki, cybernetyki, robotyki czy automatyki oraz wielu innych nauk pokrewnych. Istnieje jednakże pewien czynnik spajający wszystkie powyższe działania. Umożliwia on sprawne nimi zarządzanie oraz należyłą koordynację wszystkich tych „wymiarów”. Stanowi on niewątpliwie wyzwanie współczesnego rozumienia bezpieczeństwa infrastruktury. To informacja uzupełniona swoją przestrzenną reprezentacją – lub też używając innego terminu – geoinformacja.

Od jakości geoinformacji zależą wszystkie aspekty życia współczesnego człowieka z racji tej, iż niemalże każda cecha posiada swoje umiejscowienie w czasie i przestrzeni. Bez należytej informacji przestrzennej trudno jest wyobrazić sobie bezpieczeństwo infrastruktury technicznej. Kluczowym zagadnieniem wydaje się zatem odpowiednie przedstawianie oraz modelowanie zjawisk powodujących jej niszczenie lub oddziałujących na jej stabilność. W efekcie jako użytkownicy zdobywamy odpowiednie

informacje o zachowaniu się obiektów wraz z ich interpretacją graficzno-przestrzenną.

Informacja przestrzenna zgromadzona w zasobach – bazach danych – stanowi główny element zarządzania strategicznego i kryzysowego [Kaczmarek 2010]. Bardzo istotnym elementem jest choćby należyta koordynacja pracy służb zajmujących się zapewnianiem bezpieczeństwa ludzi oraz mienia w sytuacjach zagrożenia czynnikami naturalnymi (klęski żywiołowe) lub w aspektach należytego zarządzania infrastrukturą. W świetle tym wspomnieć należy o analizach przestrzennych znajdujących zastosowanie w pracach planistycznych, podczas optymalizacji sieci przesyłowych, a także w modelowaniu zjawisk zachodzących w zakresie badanego obszaru. Wspomniane aspekty znajdują również zastosowanie podczas zarządzania kryzysowego, a bez ich udziału trudno wyobrazić sobie należyte funkcjonowanie różnych służb publicznych.

Geoinformacja a infrastruktura techniczna

Rozwijając temat roli geoinformacji w zapewnieniu bezpieczeństwa warto przyjrzeć się choćby technicznym aspektom wytwarzania energii, które – bez wątpienia – są przedmiotem zainteresowania całego społeczeństwa. W przypadku strategicznych obiektów takich jak kopalnie odkrywkowe oraz związane z nimi elektrownie, istnieje realna potrzeba wykorzystania technik pozyskiwania i interpretacji danych przestrzennych dla celów zarządzania ryzykiem (bezpieczeństwo stanu obiektów, monitorowanie i kontrola urobku surowców mineralnych, badania osuwisk i deformacji terenu) jak również optymalizowania procesów logistycznych czy biznesowych. To właśnie systemy geoinformacyjne działające w odniesieniu do baz danych, wspomagane pracą nowoczesnych urządzeń i technik pomiarowych jak choćby skaning laserowy, fotogrametria czy teledetekcja umożliwiają pełną kontrolę i zarządzanie pracą przedsiębiorstw wydobywczych lub produkujących energię. Duże znaczenie przypisać należy służbom geodezyjnym, a w szczególności działom zajmującym się bezpośrednio geodezyjnym monitoringiem przemieszczeń i odkształceń. To właśnie monitoring jako dynamicznie rozwijająca się technologia geodezji inżynierskiej bądź zapobiega awariom i katastrofom, bądź też pozwala zareagować odpowiednim służbom wcześniej, zanim zachodzące zjawisko zagrazi stabilności badanego obiektu.

Integracja technologii pozyskiwania, przetwarzania i analizowania danych przestrzennych stanowi trzon współczesnej geomatyki. Oprócz części informatycznej, lub też geoinformatycznej, dużego znaczenia nabiera instrumentarium pomiarowe. Przez ostatnich kilkanaście lat uległo ono daleko posuniętej optymalizacji i miniaturyzacji. Współczesne urządzenia pomiarowe wyposażone są już standardowo w wysoko wydajne procesory umożliwiające efektywne prowadzenie zaawansowanych prac pomiarowych. Znacznie wzrosła także wydajność samych pomiarów. Dziś, pozyskiwanie danych przestrzennych z częstotliwością tysięcy lub dziesiątków tysięcy punktów na sekundę nie jest niczym nadzwyczajnym. W praktyce, swoją silną obecność zaznaczyła szczególnie technologia skanowania laserowego 3D, pomiary satelitarne GNSS czy precyzyjne tachimetry - wielofunkcyjne stacje skanujące [Karsznia 2014]. Pojawiły się także inne czujniki wspomagające proces badania geometrii obiektów, jak choćby pochyłomierze precyzyjne, zwane niekiedy libellami elektronicznymi.

Nowoczesne instrumentarium wymaga zaawansowanych systemów informatycznych, wielość danych wymusza bowiem ich odpowiednie przetwarzanie. Dzięki dużym mocom obliczeniowym komputerów, możliwe jest prowadzenie zaawansowanych analiz niemalże w czasie rzeczywistym. Na znaczeniu zyskują tzw. „systemy ekspertowe” bazujące na rozwiązaniach sztucznej inteligencji (Artificial Intelligence) [Frenkel, Hommel, Rudolf 2005]. Optymalnym rozwiązaniem w monitorowaniu przemieszczeń i deformacji konstrukcji budowlanych jest zatem spójny i zintegrowany system - dostosowany do rzeczywistych warunków panujących na badanym obiekcie oraz „uczący się”. Takie podejście pozwala optymalizować procesy rozpoznawania zjawisk oraz powiadamiania użytkowników o potencjalnych niebezpieczeństwach. Uzupełniana na bieżąco „baza wiedzy” umożliwia prawidłowe identyfikowanie właściwości geometrycznych badanych konstrukcji oraz porównywanie uzyskanych wyników z modelami teoretycznymi.

Integracja danych przestrzennych oraz innych atrybutów, przykładowo adresów, w odniesieniu także do innych informacji uzupełniających stanowią istotny element prowadzenia ewidencji gruntów i budynków, a także zasobów rolnych, przemysłowych czy

infrastrukturalnych. Gospodarowanie własnością obywateli w takim ujęciu zaliczane jest przez współczesnych ekonomistów do kluczowych elementów zapewnienia wzrostu tak w ujęciu mikro jak i makroekonomicznym. Wymieniają oni również należyte ewidencjonowanie własności jako jeden z głównych czynników zapewnienia bezpieczeństwa obywateli oraz wyzwolenia w ludziach chęci identyfikowania się z miejscem zamieszkania. Wynika stąd potrzeba budowy infrastruktury informacji przestrzennej państwa oraz zapewnienia aktualności zgromadzonych danych. Wychodząc naprzeciw tym oczekiwaniom, Unia Europejska uchwaliła dyrektywę o nazwie INSPIRE mówiącą o konieczności budowy i utrzymania informacji przestrzennej tak w Polsce jak również we wszystkich krajach naszego kontynentu. Podsumowując, nie tylko sam zestaw danych i informacji, ale umiejętne nimi zarządzanie (przy zaangażowaniu specjalistów różnych dziedzin życia) stanowi jedno z głównych wyzwań współczesnego świata.

Standaryzacja danych przestrzennych

Analizując różne aspekty i wyzwania bezpieczeństwa, nie sposób pominąć kwestii ochrony infrastruktury technicznej przed działaniem różnych zjawisk, także tych wywoływanych przez ludzką działalność. Na szczególną uwagę zasługują tereny osuwiskowe oraz zagrożone deformacjami i przemieszczeniami powierzchniowymi. Czynniki te stanowią istotne zagrożenie dla znajdujących się w takich miejscach obiektów mieszkalnych oraz przemysłowych. Prognozowanie takich zjawisk, choć niekiedy bardzo trudne, stanowi niewątpliwie bardzo ważne wyzwanie stawiane służbom i specjalistom wykorzystującym dane geodezyjne, geologiczne czy geotechniczne. Niezwykle pomocna okazuje się w takich zadaniach nowoczesna technologia pomiarowa oraz rozwijane metody analiz numerycznych z uwzględnianiem danych o tzw. wysokim (wartości mierzalne) oraz niskim poziomie strukturyzacji (głównie informacje opisowe). Budowa i rozwój takich zintegrowanych modeli danych stanowi coraz częściej przedmiot badań prowadzonych tak w Polsce, jak i w wiodących ośrodkach naukowych całego świata. W problematykę jakości i aktualności geodanych wpisuje się zatem ich standaryzacja i normalizacja. Oprócz przepisów prawa, ich spójności i przejrzystości, ważną rolę pełnią standardy oraz normy, branżowe jak również znane i zalecane do powszechnego stosowania. Kluczowego znaczenia nabierają zatem prace nad

kształtowaniem odpowiednich aktów prawnych (Sejm i Senat) oraz rola Polskiego Komitetu Normalizacyjnego wraz z różnymi organizacjami o charakterze doradczymi i badawczym (instytuty, stowarzyszenia czy komitety branżowe). Aktualność przepisów oraz ich nadążanie za postępującym w szybkim tempie rozwojem nauki i techniki należałoby również ująć w aspekcie efektywności, bezpieczeństwa i sprawności infrastruktury technicznej, a w rezultacie całej gospodarki. Niewątpliwie, istotnym czynnikiem jest tutaj ocena stanu obiektów inżynierskich takich jak zapory wodne, mosty, drogi i linie kolejowe, budynki i budowle, linie energetyczne czy sieci uzbrojenia terenu. Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom z zakresu geodezyjnego monitorowania przemieszczeń i odkształceń, jak również w wyniku współpracy specjalistów oraz różnych służb technicznych, możliwe jest prowadzenie takiej oceny w sposób coraz bardziej efektywny i wiarygodny. Ujmując temat szerzej, można tutaj wspomnieć zarówno o monitoringu geodezyjnym jak i szeroko rozumianym monitoringu środowiskowym. Systemy takie stanowią istotny element kompleksowego zarządzania ryzykiem czy wręcz odgrywają jedną z głównych ról w zarządzaniu kryzysowym.

Niezawodność pomiarów

Aspekt wiarygodności i niezawodności technologicznej dotyczy w szczególności instrumentarium pomiarowego. Od jakości danych pozyskiwanych przez te urządzenia zależeć będzie jakość uzyskanego modelu zjawisk oraz poprawność podejmowanych na jego podstawie decyzji. Dane przestrzenne mogą być rejestrowane w sposób aktywny lub pasywny. Metody aktywne wykorzystują w swoim założeniu zalety emisji sygnałów elektromagnetycznych lub wiązek laserowych w celu określenia kształtu i właściwości badanego obiektu. Wymienić można tutaj wszelkie odmiany skaningu laserowego, pomiary odległości czy wykorzystanie radarów lub sond. Metody pasywne bazują na działaniu urządzeń rejestrujących wiązki świetlne lub inne widma promieniowania trafiające do układu odczytowego po odbiciu wiązek od różnych przedmiotów. Kolejną grupą instrumentów stosowanych podczas oceny stanu technicznego obiektów są czujniki (sensory) badające wielkości fizyczne jak opór czy natężenie pola

elektromagnetycznego, natężenie światła, oddziaływanie sił lub charakterystykę pól.

Pozycjonowanie punktów na powierzchni Ziemi oraz nawigacja stanowią niewątpliwie ciekawe zagadnienia tak w zakresie zastosowań cywilnych jak i wojskowych. Oprócz globalnych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS) – z ang. *Global Navigation Satellite Systems* – należy wspomnieć również o systemach inercyjnych, systemach wykorzystujących czujniki pozycjonowania wewnątrz obiektów (z ang. „indoor positioning”), urządzenia symulujące nadawanie sygnałów satelitarnych w celu umożliwienia wyznaczania pozycji w miejscach, do których nie docierają sygnały z przestrzeni kosmicznej - tzw. „pseudolity” czy też pozycjonowanie z wykorzystaniem sygnałów telefonii komórkowej lub innych źródeł emisji fal elektromagnetycznych [Blankenbach, Norrdine, Hellmers 2014]. Technologie te pozwalają nie tylko w sposób wiarygodny określić położenie obserwatora w przestrzeni, ale również dostarczają bieżących danych, które praktycznie w czasie rzeczywistym uzupełniają i aktualizują istniejące bazy tematyczne.

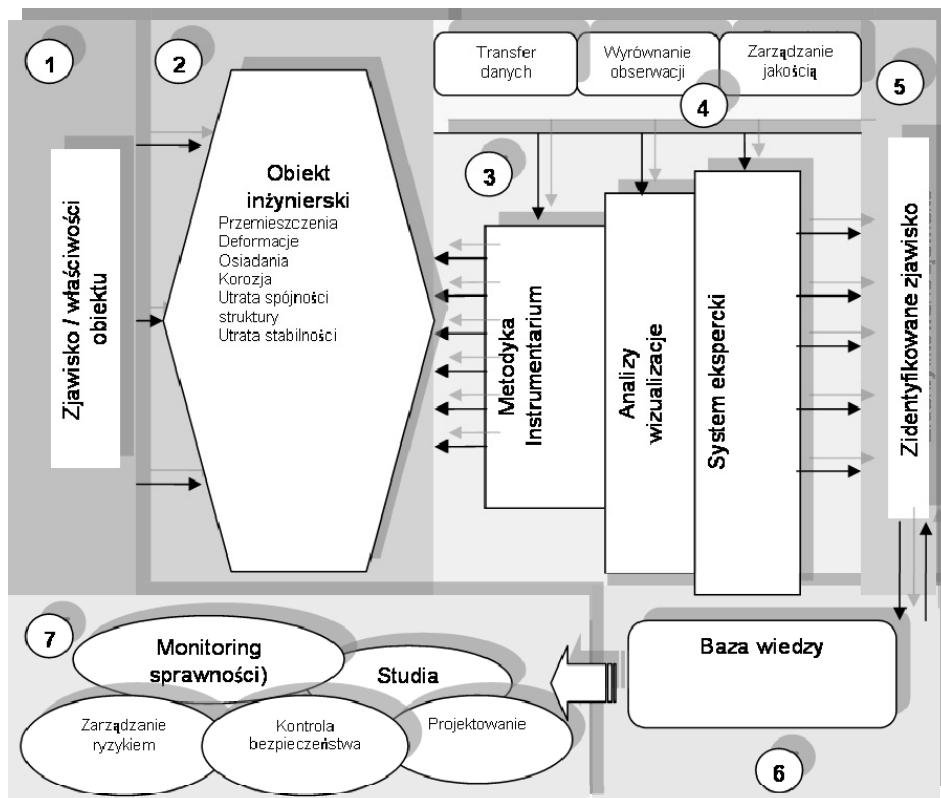
Bezpieczeństwo oraz sprawność działania infrastruktury technicznej zależy w dużej mierze od jakości i aktualności baz danych przestrzennych. Oprócz informacji na temat stabilności czy aktualnego stanu danego obiektu inżynierskiego dostarczają one bowiem bardzo cennej informacji na temat granic własności, rodzaju i zasięgu występujących zjawisk przyrodniczych oraz innych czynników warunkujących trwałość przedmiotu badań. Analiza tych danych pozwala na określanie zależności przestrzennych między różnymi obiektami wraz z podaniem atrybutów i informacji dodatkowych. Przy tej okazji, należy niewątpliwie wspomnieć o wymaganiach odnośnie poziomu szczegółowości oraz dokładności.

Technologia telekomunikacyjna daje współczesnym ludziom możliwość korzystania z rozmaitych serwisów informacyjnych wykorzystujących mapy czy zdjęcia satelitarne, jak również sensu stricto odwołujących się do danych przestrzennych Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego. Przy tej okazji, celowe jest zasygnalizowanie problematyki bezpieczeństwa infrastruktury teleinformatycznej, dzięki której użytkownicy mogą z takich zdalnych bądź nawet mobilnych serwisów korzystać. Dodać należy, iż zarówno jakość jak

i stopień aktualności danych przestrzennych (zwanymi także geodanymi) znajdują swoje odzwierciedlenie w poziomie rozwoju gospodarki, a w wielu aspektach decydują o jej konkurencyjności (prawidłowe i sprawne planowanie, analizy przestrzenne dotyczące zasięgu rynków, badania geomarketingowe itd.) [Herter, Muehlbauer 2008]. Szczególnego znaczenia nabiera aspekt dokładności i niezawodności pozycjonowania punktów oraz różnorodność usług, dzięki którym użytkownicy mogą wykorzystywać infrastrukturę danych przestrzennych w niespotykanym dotychczas zakresie. Obiecująco wygląda kwestia projektu budowy europejskiego systemu pozycjonowania satelitarnego GALILEO. Pozostając pod cywilną kontrolą Unii Europejskiej, będzie on współpracował również z pozostałymi systemami GNSS co niewątpliwie otworzy przed specjalistami, a także zwykłymi użytkownikami geodanych szereg nowych i ciekawych możliwości. Interesującym wydaje się fakt wykorzystania sygnałów wszystkich dostępnych systemów satelitarnych w funkcjonowaniu krajowej Aktywnej Sieci Geodezyjnej – projektu stosunkowo nowego, działającego w Polsce od kilku lat i bardzo ważnego w aspekcie badania stabilności infrastruktury technicznej.

Propozycja budowy inteligentnego systemu geoinformacyjnego

Pozyskiwanie, przetwarzanie oraz analizowanie danych przestrzennych możliwe jest dzięki działaniu systemów geoinformacyjnych integrujących wspomniane wcześniej rozwiązania oraz technologie. Po studiach literatury przedmiotu, bazując na wieloletnich doświadczeniach praktycznych, autor stwierdza, iż pomimo obecnie istniejących, niekiedy bardzo zaawansowanych rozwiązań w świecie geodezji i geoinformacji, istnieje pewien obszar rozwoju, który w bardzo dużej mierze przyczyniłby się do wzrostu jakości zarządzania infrastrukturą techniczną. Mowa o inteligentnych systemach monitorowania obiektów inżynierskich [Heine 2008] efektywnie wspomagających człowieka w podejmowaniu decyzji, a niekiedy wyřęczających go we wnioskowaniu i reagowaniu na zachodzące zjawiska. Propozycja budowy takiego systemu przedstawiona została schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat proponowanego systemu geoinformacyjnego do badania obiektów inżynierskich (opracowanie własne)

Zdaniem autora, ocena stanu badanego obiektu wiąże się bezpośrednio z prawidłowym rozpoznaniem jego właściwości oraz zjawisk wywołujących jego określone zachowanie (1). Dzięki zgromadzonym parametrom (3-4) bazy wiedzy (6), można ocenić rodzaj zagrożenia (5) oraz na bieżąco aktualizować system geoinformacyjny. Co więcej, liczba czynników warunkujących stan bezpieczeństwa takiej struktury w pełni usprawiedliwia budowę systemu bazodanowego wykorzystującego właściwości sztucznej inteligencji [Pietraszek 2013]. W dziedzinie geoinformacji oraz geodezji inżynierskiej opublikowano jak dotąd wiele ciekawych propozycji z tego

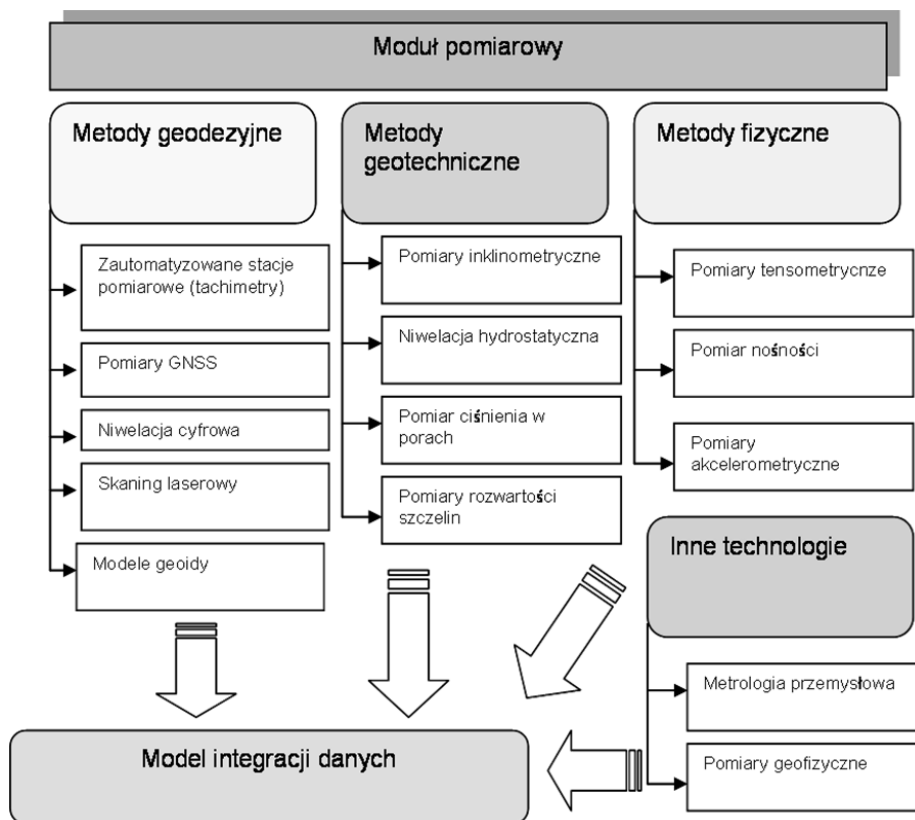
zakresu. Na szczególną uwagę zasługują rozwiązania [Heine 2008] bazujące na zasadach logiki rozmytej (z ang. „Fuzzy logic”) oraz sieci neuronowych. Modelowanie danych przestrzennych dokonywane jest przy zastosowaniu różnych środowisk programistycznych, między innymi takich jak Matlab® [Trauth 2006].

Obiekty inżynierskie podlegające działaniu różnych zjawisk cechuje zmiana ich stanu, której przyczynami są pojawiające się przemieszczenia, osiadania, utrata spójności czy stabilności konstrukcji oraz korozja (2). Ich dynamika oraz ranga zagrożeń, które wywołują stanowią bez wątpienia podstawę do wdrożeń zintegrowanych systemów monitoringu w miejsce dotychczasowo stosowanych pomiarów okresowych [Karsznia 2011]. Oprócz funkcji ostrzegawczych, proponowany system stanowi również źródło informacji dla dalszych prac projektowych i studialnych (7).

Zgodnie z definicją monitoringu profesora Witakowskiego [Poradniki nr 443/2009], zagrożenie należy najpierw rozpoznać by następnie na tej podstawie odpowiednio dobrać technologię pozyskiwania danych. Oprócz metodyki mamy więc do czynienia z instrumentarium – tak geodezyjnym (badającym zależności geometryczne między obserwowanymi punktami), jak i wykorzystującym cechy fizyczne takie jak siły, naprężenia, przewodnictwo elektryczne itp. W skład zaproponowanego zintegrowanego systemu geoinformacyjnego wejdą różne metody pozyskiwania danych przestrzennych oraz cech fizycznych badanego obiektu. Zastosowanie znajdą zatem wszelkie zalety automatyki przemysłowej [Committee on ... 2000] z technologiami transmisji bezprzewodowej, metodami zabezpieczeń transmisji oraz tzw. „pracą w chmurze” włącznie.

Dane o obiekcie pozyskane zostaną przy użyciu różnych technologii, które wymieniono na rysunku 2. Do metod geodezyjnych, stanowiących domenę szeroko rozumianej geomatyki zaliczyć możemy zautomatyzowane pomiary tachimetryczne, pomiary satelitarne GNSS, niwelację cyfrową oraz metody fotogrametryczne i teledetekcyjne. Inną grupę stanowią badania geotechniczne, znane i stosowane w świecie budownictwa. Ponadto, warto wymienić również metody fizyczne takie jak pomiary tensometrami, z wykorzystaniem wag czy przyspieszoniomierzy (akcelerometrów). Coraz częściej stosowana jest także metrologia przemysłowa pozwalająca

pozyskiwać dane z dokładnościami submilimetrowymi. Systemy metrologiczne stanowią ważny element pracy tak wysoko wyspecjalizowanych przedsiębiorstw przemysłowych (fabryki zbrojeniowe, huty, stocznie czy montownie pojazdów) jak również – w coraz większym stopniu – firm zajmujących się geodezją inżynierską. Wiele uwagi poświęca się również pracy geofizyków, a efekty ich badań stanowią pozycję wyjściową dla dalszych analiz wraz z geodezyjnymi pomiarami deformacji terenów (ciągi niwelacyjne, pomiary GNSS).

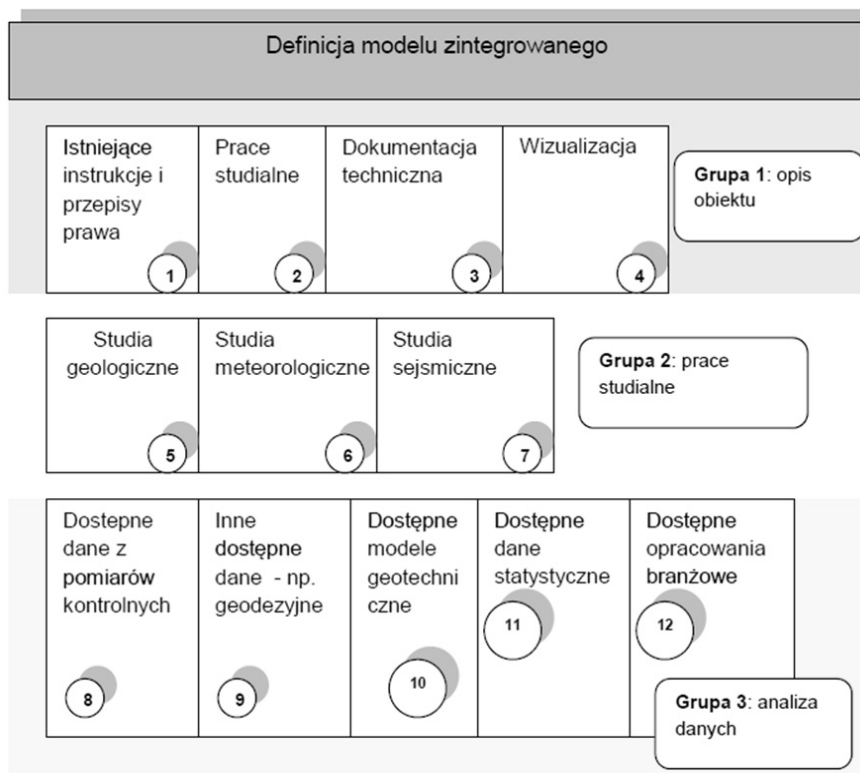


Rys. 2. Schemat modułu pomiarowego projektowanego systemu geoinformacyjnego (opracowanie własne)

Wizualizacja wyników pomiarów jest bardzo istotnym elementem wniosku. Niestety, niejednokrotnie ta część jest zaniedbywana pod względem jakości oraz prawidłowości zasad prezentacji graficznej. W zakresie nauk o Ziemi, umiejętny dobór metod wizualizacji pozostaje jak

dotąd w szczególności domeną kartografów. Zdaniem autora, taki stan rzeczy powinien znaleźć swoje odzwierciedlenie także w innych naukach inżynierskich. Umiejętne wykorzystanie zalet map tematycznych pozwala dokonywać prawidłowej oceny wykrytych zjawisk oraz w znacznym stopniu wpływa na walor estetyczny budowanego raportu.

Wyniki pomiarów wraz z ich wstępnymi analizami wchodzi w skład modelu zintegrowanego, którego składowe autor proponuje rozpatrzeć w trzech grupach tematycznych (rys. 3).

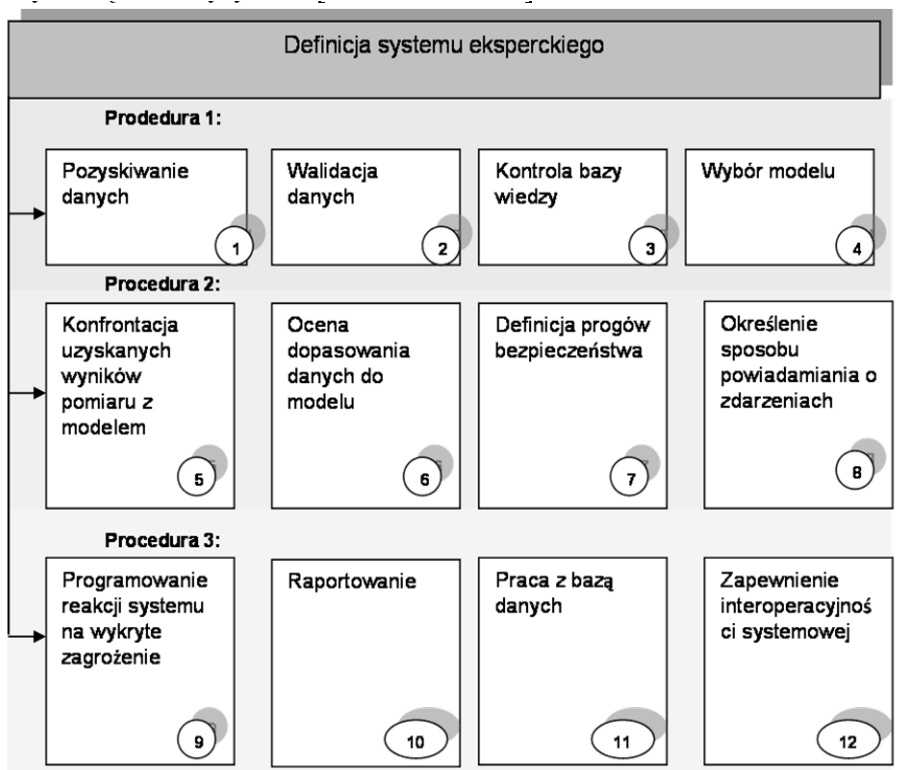


Rys. 3. Schemat budowy modelu integracyjnego (opracowanie własne)

Do pierwszej grupy materiałów (1-4) na bazie, których powstaje zintegrowany model obiektu („opis obiektu”), autor proponuje zaliczyć tzw. „dane wejściowe” (z ang. „input data”) dokumentujące stan obecny przedmiotu badań. W drugim etapie uzupełniania modelu, autor proponuje przeprowadzenie dogłębnych studiów popartych pomiarami, analizami oraz

ekspertyzami (5-7). Na bazie zgromadzonego zasobu informacji, możliwe będzie dokonanie oceny jakości i dokładności budowanego modelu oraz skonfrontowanie go z wynikami innych opracowań oraz doświadczeń specjalistów rozwijających systemy branżowe (np. geologiczne, geotechniczne, hydrotechniczne czy cybernetyczno-robotyczne) (8-12).

Powstały w wyniku projektowania informatycznego system ekspercki (rys. 4) pozwoli w sposób zautomatyzowany przeprowadzić wnioskowanie oraz – w zależności od zaprogramowanych reakcji – powiadomić użytkownika lub zasilić wynikiem przetwarzania danych inny podsystem – np. bezpieczeństwa czy zarządzania ryzykiem [Kaczmarek 2010].



Rys. 4. Schemat proponowanego systemu eksperckiego (opracowanie własne)

Systemy eksperckie wykorzystują bardzo często zalety sztucznej inteligencji [Pietraszek 2013]. Metody z zakresu AI (z ang. „Artificial Intelligence”) ułatwiają bowiem automatyczne wnioskowanie oraz, poniekąd, podejmowanie przez system geoinformacyjny decyzji w zastępstwie

człowieka. Trzeba przy tym zaznaczyć, iż skuteczność podejmowania takich decyzji zależy od zasobów bazy wiedzy oraz od algorytmów „uczących” system odpowiednich reakcji. Dziedzina ta rozwija się ostatnimi czasy niezwykle dynamicznie. Spowodowane jest to faktem nieustannie zwiększających się mocy obliczeniowych komputerów, a także coraz pojemniejszych nośników danych. W nadchodzących latach należy z całą pewnością oczekiwać dalszego dynamicznego rozwoju informatyki, a co za tym idzie, coraz szerszego zastosowania sztucznej inteligencji we wspomaganiu eksperckim.

Zaproponowany przez autora model systemu eksperckiego dla potrzeb identyfikacji zjawisk powodujących utratę stabilności obiektów inżynierskich składa się z trzech głównych ścieżek postępowania (procedur). Realizacja procedury 1 umożliwia identyfikację źródeł danych, pozyskanie danych oraz dokonanie wstępnej ich analizy (1-4). Procedura 2 pozwala stwierdzić, w jakim stopniu dane te przystają do aktualnego stanu wiedzy dotyczącego przedmiotu opracowania (5-8). W kolejnym etapie umożliwia natomiast identyfikację poziomu zagrożeń oraz ich kwantyfikację (9-12). Realizacja procedury 3 daje możliwość komunikacji systemu z użytkownikiem, a także archiwizacji i dalszego wykorzystania zgromadzonych danych.

Podsumowanie

Budowa systemów geoinformacyjnych oznacza dziś ciągłą pracę z bazami danych wraz z doskonaleniem interfejsów użytkownika. Interakcja człowieka z urządzeniem staje się dzięki temu coraz bardziej płynna i intuicyjna. W efekcie wzrastają możliwości rozpoznawania i identyfikowania zjawisk i procesów zachodzących na Ziemi. Ponieważ infrastruktura techniczna, jako jeden z najważniejszych elementów egzystencji człowieka podlega szczególnej ochronie oraz stanowi jeden z kluczowych elementów kształtowania środowiska, istnieje coraz większe zapotrzebowanie na systemowe ujęcie aspektu jej bezpieczeństwa oraz trwałości. Rozwój informatyki umożliwia wdrażanie systemów geoinformacyjnych, które w coraz doskonalszym stopniu wspomagają człowieka w zarządzaniu tą infrastrukturą. Wielość aspektów technologicznych z nią związanych przemawia za stosowaniem systemów bazujących na sztucznej inteligencji.

Metody te bowiem pozwalają, w sposób uporządkowany oraz z zachowaniem procedur standaryzacyjnych i jakościowych, efektywnie zarządzać wielkimi zestawami danych. Algorytmy uczące, które współdziałają z bazami danych stanowią zatem trzon systemów eksperckich. Należy przypuszczać, iż na bazie takich systemów organizowane będzie wkrótce funkcjonowanie współczesnych społeczeństw.

Wyzwania bezpieczeństwa w kontekście geoinformacji dotyczą wielu wymiarów i aspektów, począwszy od jakości życia ludzi, poprzez funkcjonowanie służb państwowych, a skończywszy na zapewnieniu rozwoju i efektywności gospodarki czy utrzymaniu odpowiedniego poziomu infrastruktury. Kwestie te nabierają szczególnego znaczenia w dobie dynamicznego rozwoju technologii, elektroniki, informatyki i łączności. Nowoczesne technologie niosą ze sobą także problemy bezpieczeństwa i ochrony danych, co bezsprzecznie należy brać pod uwagę w procesie ich wykorzystywania. Istotnego znaczenia nabiera, więc harmonizacja przepisów prawa oraz standardów i norm branżowych tak, by w swojej treści przewidywały różne możliwe sytuacje oraz wynikające z nich konsekwencje. Poruszone zagadnienia wiążą się zatem w sposób bezpośredni z problematyką bezpieczeństwa, zarządzania ryzykiem oraz jakością. Przyczyniają się także do zapewnienia odpowiedniego poziomu życia obywateli, którzy korzystając z nowoczesnych technologii budują społeczeństwo informacyjne.

Literatura

- [1] Blankenbach J., Norrdine A., Hellmers H., 2014: Magnetic Indoor Local Positioning System – ein robustes 3D-Positionierungssystem für Innenraumumgebungen, Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Zürich, Wichmann, Berlin – Offenbach, s. 185-196
- [2] Committee on automated monitoring of dams and their foundations, 2000: Automated dam monitoring systems, Bulletin 118, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris
- [3] Frenkel M., Hommel U., Rudolf M., 2005): Risk management – challenge and opportunity, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- [4] Heine K., 2008: Fuzzy Technology and ANN for Analysis of deformation processes, Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy, First International Workshop (AIEG 2008) Vienna, Austria, December 2008, Proceedings, s. 9-24
- [5] Herter M., Muehlbauer K-H., 2008: Handbuch Geomarketing, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- [6] Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, 2009: Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych, System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 443/2009
- [7] Kaczmarek T.T., 2010: Zarządzanie ryzykiem, ujęcie interdyscyplinarne, Wydawnictwo Difin SA, Warszawa
- [8] Karsznia K., 2011: Geodezyjny monitoring obiektów mostowych, Mosty nr 6/2011, s. 36-43
- [9] Karsznia K., 2014: Współczesna technologia skanowania laserowego 3D w monitorowaniu przemieszczeń i deformacji obiektów mostowych, Mosty nr 1/2014, s. 24-27
- [10] Pietraszek J., 2013: Wspomaganie planowania i analizy doświadczeń z zastosowaniem elementów sztucznej inteligencji, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków
- [11] Trauth M.H., 2006: MATLAB® Recipes for Earth Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Elżbieta Protaziuk

Politechnika Warszawska

Wydział Geodezji i Kartografii

e-mail: elka_protaziuk@poczta.onet.pl

Sieci geodezyjne dla potrzeb monitorowania obiektów inżynierskich i zjawisk naturalnych – wczoraj i dziś

Wstęp

Pomiary krótko- i długookresowych przemieszczeń i deformacji zarówno obiektów inżynierskich jak i zjawisk naturalnych stały się jednym z podstawowych zagadnień współczesnej geodezji inżynierskiej. Jest to stosunkowo młoda dziedzina geodezji, gdyż po raz pierwszy pomiary tego typu zostały przeprowadzone w Szwajcarii w latach 20-tych XX wieku. Konieczność prowadzenia i udoskonalania tego typu pomiarów wynika z coraz większej potrzeby kontroli i badania zarówno obiektów inżynierskich jak i zjawisk zachodzących na powierzchni terenu naturalnego czy też sztucznie przetworzonego. Projektowanie, realizacja oraz eksploatacja coraz większych, śmielszych, ale i bardziej oszczędnych w konstrukcji obiektów, zwłaszcza w gęstej zabudowie, postawiła znacznie większe wymagania w zakresie kontroli tych obiektów oraz ich wpływu na otoczenie w warunkach eksploatacyjnych. Szereg czynników i wpływów występujących w warunkach terenowych, a trudnych do przewidzenia na etapie projektowania, może powodować zmiany w kształcie i położeniu obiektu czy jego elementów, powodując obniżenie stateczności jego konstrukcji. Zmiany w geometrii i położeniu elementów konstrukcyjnych obiektu stanowią niebezpieczeństwo dla stabilności budowli i terenów do nich przyległych. Informacja o zmianie geometrii i położenia obiektu lub jego otoczenia stanowi podstawę do oceny i przeciwdziałania niekorzystnym zjawiskom i zapobiegania katastrofom zarówno w trakcie realizacji, jak i eksploatacji. Wzrasta również zapotrzebowanie na monitorowanie zjawisk naturalnych przejawiających się w ruchach skorupy ziemskiej nie tylko

w skali globalnej (ruchy płyt kontynentalnych, ruchy masowe na większą skalę), ale i lokalnej (np. osuwiska, zapadliska, deformacje terenu) oraz przewidywanie na ich podstawie zagrożeń. Konieczność wykonywania pomiarów przemieszczeń i monitorowania obiektów, jak również powierzchni terenu wynika, więc z realnych wymogów bezpieczeństwa ludzi i budowli. Informacja o zmianach położenia i dynamice w naszym otoczenia pozwala na zapobieganie wielu stratom materialnych, niebezpieczeństwom czy katastrofom budowlanym.

Zadanie pomiarowe polegające na wyznaczaniu odkształceń i przemieszczeń obiektów czy zjawisk, reprezentowanych poprzez informację o wielkości i kierunkach zmian położenia obserwowanych punktów, jest złożonym procesem obejmującym: prace projektowe, zakładanie stanowisk obserwacyjnych (pomiarowych i sygnalizacyjnych), wykonywanie pomiarów, obliczenie przemieszczeń wraz z oceną ich dokładności. Na każdym z tych etapów coraz bardziej kładzie się nacisk na współpracę z innymi branżami i specjalistami. Zadanie wyznaczania przemieszczeń staje się zadaniem interdyscyplinarnym, gdyż tylko takie podejście do badanych obiektów i zjawisk daje możliwość kompleksowego zbadania problemu. Samo wyznaczanie przemieszczeń powierzchni terenu lub obiektów technicznych może być realizowane zarówno metodami geodezyjnymi, typu: sieci trygonometryczne, sieci liniowe, sieci kątowno-liniowe - płaskie i przestrzenne, kątowne wcięcia w przód, wstecz, niwelacja geometryczna, trygonometryczna, metody biegunowe, poligonowe, metody stałej prostej, rzutowania, techniki satelitarne, naziemny skaning laserowy, naziemna interferometria radarowa; jak i niegeodezyjnymi, wykorzystującymi specjalistyczny sprzęt pomiarowy taki jak: szczelinomierze (dystansometry), pochylomierze, klinometry, inklinometry, wahadła, ekstensometry, piknometry, pomiary inercyjne i inne. Metody niegeodezyjne dostarczają zasadniczo informacji o deformacjach względnych, natomiast metodami geodezyjnymi można określić zarówno deformacje względne jak i bezwzględne, określone w stosunku do zewnętrznego układu odniesienia, można też przejść z wielkości względnych do bezwzględnych i odwrotnie. Najlepsze efekty daje oczywiście połączenie różnych metod i zintegrowanie pracy wielu systemów, jednak uniwersalny charakter metod geodezyjnych nadaje im wiodącą rangę w wyznaczaniu przemieszczeń. Pomiary geodezyjne są szkieletem i podstawą do budowania konstrukcji pomiarowych

i systemów monitorowania. Wraz z udoskonalaniem istniejących lub wprowadzaniem nowych technologii pomiarowych i obliczeniowych standardy i metodyka wykonywania pomiarów oraz obliczeń są przedmiotem ciągłej ewolucji. Ewolucja ta spowodowana jest coraz większym zapotrzebowaniem gospodarki i wymogami bezpieczeństwa, ale wiąże się też ściśle z postępowaniem technologicznym w zakresie technologii pomiarowych i obliczeniowych.

Specyfika pomiarów przemieszczeń

Problematyka wyznaczania przemieszczeń, a w szczególności monitoring obiektów jest specyficznym zadaniem wśród pomiarów geodezyjnych. Jak już wspomniano od wyników tych pomiarów zależy bezpieczeństwo obiektów i bezpieczeństwo ludzi, stąd wyznaczone wielkości muszą się odznaczać się przede wszystkim następującymi cechami:

1. poprawnością – zgodnością z rzeczywistymi zmianami położenia punktów obserwowanych w granicach wpływu błędów przypadkowych,
2. minimalną dokładnością, uzasadnioną potrzebami,
3. aktualnością – tzn. że czas od momentu rozpoczęcia pomiarów do przekazania wyników musi być jak najkrótszy [Lazzarini 1997].

Nieprzypadkowo poprawność została umieszczona na pierwszym miejscu, bo o ile dwie pozostałe cechy są zmienne i wymagania co do nich mogą zależeć od charakteru i stopnia skomplikowania obiektu, to zgodność wyniku z rzeczywistością jest zawsze najistotniejszym wymaganiem, lecz również najtrudniejszym do weryfikacji. Stąd współczesny trend w wykonywaniu pomiarów i obliczeń to dążenie by obok wymogów dokładnościowych, stawiać wymóg wiarygodności i związanej z tym niezawodności pomiarów.

Pomiary przemieszczeń (w stosunku do zadań geodezji ogólnej) charakteryzują specyficznie:

- 1) wymogi dokładnościowe:
 - wyższe niż w geodezji ogólnej wymagania dokładnościowe pomiarów, obliczeń i opracowań,
 - zróżnicowane i specyficzne wymagania dokładnościowe, sformułowane zasadniczo nie poprzez dokładność położenia punktów, ale definiowane poprzez badanie specjalnych cech geometrycznych obiektu

(wymiary, kształt) lub stan budowli w danym momencie (przemieszczenia i odkształcenia), jak też dokładność względem otoczenia,

- wymagana stała w czasie i przestrzeni dokładność.
- 2) wymogi niezawodnościowe:
- konieczność efektywnego wykrywania i eliminacji z obserwacji błędów grubych,
- 3) środowisko obserwacyjne:
- zmienne i wymagające środowisko pomiarowe (plac budowy, tunele, hale fabryczne, wyrobiska),
 - ograniczenia widoczności poprzez obiekty znajdujące się w polu działań inżynierskich, zarówno te będące przedmiotem prac jak i obce (budynki, budowle, roślinność),
 - zmienna morfologia terenu, zbocza, strome skarpy, doliny i ich południkowy kierunek,
 - zakłócenia pomiarowe, pyły, drgania, emisja sygnału radiowego przez urządzenia elektroniczne,
 - często brak możliwości zrealizowania stanowisk pomiarowych na obiekcie,
- 4) konieczność wykonywania pomiarów okresowych czy ciągłych,
- 5) potrzeba automatyzacji pomiarów i obliczeń.

Sieć pomiarowa jako podstawowe narzędzie realizacji wymagań

Wymagania dotyczące kontroli obiektów i terenów do nich przyległych w fazie realizacji i eksploatacji określone są każdorazowo przez specjalistów branżowych, ale zasadniczo dotyczą wyznaczenia przemieszczeń i odkształceń konkretnych punktów, z ustaloną dokładnością i w określonym reżimie czasowym (odniesione do warunków projektowych lub do momentu przyjętego jako moment początkowy). Mogą to być pomiary krótkookresowe czy długookresowe, a w skrajnych przypadkach quasi-ciągłe czy ciągłe. Wyznaczenie poprawnych przemieszczeń i odkształceń kontrolowanych punktów obiektów czy powierzchni, niezbędne w celu ustalenia położenia, kształtu, statyki i dynamiki obiektu, stanowi podstawę do oceny prawidłowości pracy konstrukcji, istotności odstępstw od ustalanych warunków bezpieczeństwa ludzi oraz budowli, analizy istniejących zagrożeń, zarządzania ryzykiem oraz opracowania zabezpieczeń zapobiegających

katastrofom. Na ogół wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń dotyczy określenia zmian położenia punktów obiektu względem siebie, dla większości przypadków jednak wyniki te winny być odniesione do zewnętrznego układu odniesienia, stałego dla całego okresu wykonywania pomiarów. Często jest to zadanie utrudnione, gdy strefa wpływu obiektu wybiega daleko poza strefę obiektu w przestrzeń jego otoczenia. Jak już wspomniano, uniwersalnym narzędziem pozwalającym na realizację różnorodnych wymagań, co do wyznaczania zmiany położenia punktów są pomiary geodezyjne, realizowane w szczególności poprzez sieci pomiarowe. Pozwalają one określić zależności nie tylko w przestrzeni obiektu, ale również powiązać przestrzeń obiektu z przestrzenią otoczenia, zewnętrznym układem odniesienia.

Sieć pomiarowa jako podstawowe narzędzie realizacji zadań pomiarowych musi być dostosowana do wymagań postawionych pomiarom kontrolnym, a w szczególności zapewnić:

- dostosowanie struktury i technologii do rodzaju obiektu,
- spełnienie wymagań dokładnościowych,
- spełnienie wymagań niezawodności,
- spełnienie kryteriów dostępności czasowej,
- właściwe warunki ekonomiczne.

O ile co do zadań jak i znaczenia geodezyjnych sieci pomiarowych w wyznaczaniu przemieszczeń, zarówno w przeszłości jak i obecnie, nie można mieć żadnych wątpliwości, o tyle: konstrukcja, metodyka zakładania, techniki pomiarów i obliczeń - podlegały i nadal podlegają ciągłej ewolucji w czasie, nie tylko ze względu na wzrastające wymagania co do bezpieczeństwa konstrukcji, ale też ze względu na rozwój technologii pomiarowych i obliczeniowych. Gwałtowny postęp technologiczny pozwala rozwiązywać wiele istniejących od dawna problemów pomiarowych, ale powoduje też pojawianie się wielu nowych problemów i zagadnień wymagających zbadania.

Ewolucja sieci pomiarowych

Sieci pomiarowe, niezależnie od przyjmowanych różnorodnych konstrukcji i układów, tworzone są najczęściej przez odpowiednio rozmieszczone i najczęściej utrwalone znakami punkty, wyznaczone określoną techniką geodezyjną w przyjętym układzie odniesień przestrzennych.

Ewolucja tych sieci, związana z nowymi zdobyczami technologicznymi, przebiega w różnych kierunkach, poprzez:

- podnoszenie funkcjonalności istniejących sieci, przy ustalonych już kryteriach dokładnościowych i parametrach geometrycznych, poprzez obniżenie kosztów ich zakładania i wykorzystywania,
- poprawianie parametrów dokładnościowych i niezawodnościowych istniejących sieci, poprzez wykorzystanie przy ich pomiarach i opracowaniu udoskonalonych technologii pomiarowych i obliczeniowych,
- opracowanie całkowicie nowych rozwiązań pozwalających na realizację rozpatrywanych sieci w sposób oryginalny, opartych zazwyczaj na całkowicie odmiennej technologii pomiarowej (np. pomiary satelitarne).

Struktura stosowanych na przestrzeni lat sieci wynikała z charakteru i dokładności dostępnych technologii pomiarowych – pierwsze konstrukcje sieci wiązały się z wykonywaniem pomiarów kątowych, a wraz z upowszechnianiem się innych pomiarów dokonywała się sukcesywna modernizacja tych struktur.

Pomiary kątowe

Elementami obserwowanymi są kierunki i kąty poziome, jedynie dla skali wykonywanych jest kilka pomiarów liniowych. Stosowane konstrukcje to najczęściej sieci trygonometryczne pełne i niepełne, sieci powierzchniowe, uzupełnione pomiarami niwelacji precyzyjnej.

Najbardziej klasyczne - sieci trygonometryczne pełne i niepełne to sieci, w których elementami mierzonymi są kierunki między punktami odniesienia, a punktami kontrolowanymi mierzone ze stanowisk obserwacyjnych. Sieci pełne – zakładane były na terenach o dużej przejrzystości, na potrzeby wieloletnich precyzyjnych obserwacji obiektów wymagających dużej dokładności pomiarów, narażonych na duże i zmienne

obciążenie, których awaria mogłaby spowodować utratę życia ludzkiego bądź duże straty materialne. Sieci niepełne – zakładano na terenach o małej przejrzystości, dla obiektów o mniejszej klasie bezpieczeństwa. Sieci te nie posiadają wszystkich grup punktów lub powiązań między nimi. Zastosowane w praktyce rozwiązania przestrzenne bywają często rozwiązaniami pośrednimi pomiędzy siecią pełną, a niepełną.

Pomiary kątowno-liniowe

Wraz z postępem konstrukcji dalmierzy elektrooptycznych w drugiej połowie XX w., dokładność i szybkość wykonywania pomiarów odległości zaczęła być porównywalna z dokładnością pomiarów kątowych. Stosowane konstrukcje to początkowo najczęściej sieci trygonometryczne uzupełnione pomiarami odległości, później powierzchniowe sieci kątowno-liniowe lub rzadziej liniowe płaskie uzupełnione sieciami niwelacji precyzyjnej, lub sieci przestrzenne.

Sieci przestrzenne to konstrukcje geometryczne, w których elementami pomiarowymi są: kąty poziome, kąty zenitalne i odległości przestrzenne. Mają one zastosowanie w terenach trudnodostępnych, gdzie niemożliwe lub bardzo utrudnione jest wykonywanie geometrycznej niwelacji precyzyjnej. Sieci te umożliwiają jednoczesne określenie przemieszczeń poziomych i pionowych w przybliżeniu z jednakową dokładnością (na obecnym stanie techniki od kilku do kilkunastu milimetrów przy długościach boków do kilku kilometrów).

Zalety pomiarów kątowno-liniowych (zwanymi klasycznymi):

- najwyższa dokładność pomiarów,
- szybkie, tanie i powszechne.

Ograniczenia:

- konieczność widoczności między punktami,
- problem z uzyskaniem niezawodności na granicach sieci,
- problem nawiązania przy braku położonych blisko punktów odniesienia,
- dla niektórych zadań (np. rozciągniętych powierzchniowo) spada ich ekonomiczność.

Pomiary satelitarne

Upowszechnienie pomiarów satelitarnych wprowadziło rewolucję w pomiarach geodezyjnych, początkowo w zadaniach geodezji wyższej, później również w geodezji inżynierskiej i pomiarach przemieszczeń. Prawdziwy przełom w zakresie wykorzystania GPS-u do precyzyjnych pomiarów nastąpił w wyniku zastosowania nowych metod obserwacyjnych: pomiarów fazowych (w miejsce mniej dokładnych pomiarów pseudoodległości) oraz różnicowych technik obliczeniowych, koniecznych do wyeliminowania dużej części błędów.

Zalety pomiarów satelitarnych:

- nie wymagają wzajemnej widoczności obserwowanych punktów,
- znacznie niższa zależność dokładności od długości wektora - możliwość lokalizacji punktów odniesienia dla obiektu poza strefą oddziaływania obiektu bez znacznego spadku dokładności,
- pomiar satelitarne na stanowisku może trwać bardzo krótko (pomiar statyczny dla punktów o znaczeniu lokalnym trwa około 45-60 minut, pomiar technologią szybką statyczną - 15-20 minut, zaś technologią "stop and go" tylko 1-2 minuty); dla niektórych prac geodezyjnych można stosować pomiary w czasie rzeczywistym (real time kinematic) dające wyniki natychmiast w terenie,
- możliwe pomiary w warunkach słabej widoczności, pomiary GPS są w zasadzie niezależne od warunków meteorologicznych na stanowiskach obserwacyjnych,
- w wielu przypadkach technologie pomiarów satelitarnych są o wiele bardziej ekonomiczne i często dużo mniej czasochłonne niż pomiary klasyczne.

Ograniczenia pomiarów satelitarnych:

- zasadniczo niższa dokładność niż pomiarów klasycznych,
- tłumienie sygnału poprzez środowisko - trudności z odkrytym horyzontem 10-15°, pomiar GPS w przypadku niekorzystnej ekspozycji na sygnały satelitarne musi być wydłużony, a czasem może być wręcz niemożliwy do wykonania,
- należy unikać zakryć horyzontu oraz przeszkód terenowych mogących powodować odbicia sygnałów satelitarnych, w szczególności: budowli,

- drzew, krzewów, samochodów, z tego też powodu wiele punktów obiektu (np. na ścianie) nie może być obserwowanych tą techniką,
- zależność dokładności i niezawodności od geometrii pozycjonowania, czyli rozmieszczenia satelitów w chwili pomiaru:
 - niższa dokładność wyznaczenia wysokości (2-3-krotnie gorsza w porównaniu do współrzędnych horyzontalnych ze względu na umiejscowienie wszystkich sygnałów pomiarowych 10-15° nad horyzontem),
 - niższa dokładność współrzędnej północnej (na obszarach o średnich i wysokich szerokościach geograficznych $>45^\circ$, w których znajduje się i Polska, powstaje na północy dziura obserwacyjna, która nie jest korzystna dla dokładności wyznaczenia współrzędnej N),
 - zmiany dokładności w czasie (w zależności od aktualnie widocznej konstelacji może się ona zmieniać znacząco w trakcie doby, satelity GPS dokonują dwóch obiegów wokół Ziemi w ciągu jednej doby, co powoduje, że każdego dnia w określonym momencie czasu pojawia się taka sama konfiguracja satelitów GPS; pomiary wykonywane w tej samej porze dnia obarczone są zatem tym samym błędem konfiguracji geometrycznej konstelacji satelitów GPS),
 - zwiększony problem wielodrożności sygnału ze względu na odbicia mogące pojawić się w otoczeniu obiektów,
 - możliwe przypadkowe lub celowe zakłócenia sygnału, punkty pomiarowe nie powinny być projektowane w bezpośrednim sąsiedztwie aktywnych elementów infrastruktury technicznej emitujących fale elektromagnetyczne, w szczególności: nadajników radiowych, linii energetycznych, trakcji kolejowej lub tramwajowej,
 - inne systemy GLONASS i GALILEO zasadniczo mają te same systemowe ograniczenia.

Zestawienie zalet i wad technologii satelitarnych świadczy o ich niewątpliwiej przydatności w pomiarach przemieszczeń, jednak w wielu zastosowaniach pomiary te mają pewne ograniczenia i nie mogą stanowić jedyne i samodzielne źródło informacji pozycyjnej.

Jak można zauważyć problem dokładności pomiarów satelitarnych pojawił się zarówno po stronie zalet jak i wad technologii. Wynika to

z dynamiki geometrycznej satelitarne układu obserwacyjnego oraz zależności dokładności tych pomiarów od wykorzystanej procedury i czasu wykonywania pomiarów (metoda statyczna, szybka statyczna, kinematyczna, RTK), odległości między wyznaczanymi punktami. Wyższą dokładność pomiarów satelitarnych w stosunku do pomiarów klasycznych uzyskamy dla długich wektorów obserwowanych statycznie, w długich sesjach obserwacyjnych, przy zmiennej geometrii satelitów. Natomiast dla pomiarów krótkookresowych, dynamicznych, dla mniejszych odległości wyższość mają nadal pomiary klasyczne.

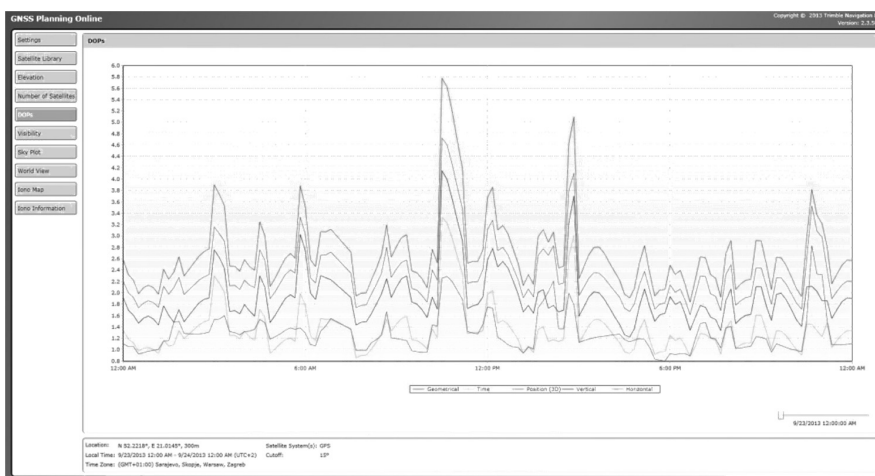
W pomiarach GPS jakość geometrycznej konstelacji satelitów charakteryzuje współczynnik zwany Dilution of Precision (DOP). Jego wartość można policzyć na podstawie macierzy współczynników układu równań obserwacyjnych. Analiza struktury macierzy kofaktorów ujawnia charakterystykę propagacji błędów, która może być wykorzystana do przewidywania możliwej do uzyskania dokładności i planowania pomiarów.

Na podstawie elementów głównej przekątnej z macierzy kofaktorów wyznacza się poszczególne współczynniki DOP :

- NDOP, EDOP, VDOP dla wyznaczenia współrzędnych
- TDOP – dla wyznaczenia czasu.
- PDOP – dla wyznaczenia współrzędnych przestrzennych (3D),

W praktyce przyjmuje się, że jeśli PDOP wynosi 1-3, to warunki do obserwacji są bardzo dobre, gdy 4-5 – dobre, gdy 6 – słabe (ale dostateczne), natomiast nie należy wykonywać obserwacji, gdy PDOP przekroczy 6.

Poniższy rysunek przedstawia wykres współczynnika DOP w dniu 23.10.2013 dla Warszawy, sporządzony w programie GNSS Planning Online (www.trimble.com)



Rys. 1. Zmienność współczynników DOP w ciągu doby

Jak widać w ciągu doby pojawiają się znaczne wahania współczynników, a co za tym idzie różnice w uzyskiwanej dokładności. Współczynnik PDOP waha się z zakresie od 1,5 do 5. W przypadku pomiarów długookresowych wartości te uśrednią się, natomiast w pomiarach dynamicznych czy przy wymaganiach ciągłego monitorowania zmienność uzyskiwanej dokładności sprawia, że mimo niewątpliwych zalet pomiarów satelitarne nie mogą stanowić samodzielnego systemu pomiarowego. Należy również zauważyć, że przedstawiona powyżej sytuacja dotyczy odkrytego horyzontu, ograniczonego wyłącznie 15° maską odcinania. Pojawienie się dodatkowych przeszkód terenowych może tę sytuację znacznie pogorszyć.

Pomiary w ramach systemu ASG-EUPOS

ASG-EUPOS to wielofunkcyjny system precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego na obszarze Polski, składający się ze stacji referencyjnych sklasyfikowanych jako punkty podstawowej osnowy geodezyjnej, równomiernie rozłożonych na obszarze Polski, o średniej odległości pomiędzy stacjami ok. 70 km. Serwis ASG-EUPOS ma za zadanie udostępnianie dla użytkowników różnicowych poprawek w czasie rzeczywistym (serwisy NAWGEO, NAWGIS, KODGIS) i/lub udostępnianie danych obserwacyjnych i wykonywanie obliczeń w trybie post-processing'u (odpowiednio serwisy: POZGEO D i POZGEO).

ASG-EUPOS dostarcza różnych danych i wyników o różnej dokładności w zależności od serwisu:

- POZGEO – serwis automatycznych obliczeń w trybie post-processing'u wykonanych metodą statyczną, z deklarowanym błędem średnim wyznaczenia współrzędnych - 0.01 m dla odbiornika L1/L2 i nie większym niż 0.1 m dla odbiornika L1,
- POZGEO D – to serwis pobierania obserwacji satelitarnych GNSS w formacie RINEX z wybranych przez użytkownika stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS,
- NAWGEO – serwis czasu rzeczywistego, udostępniający poprawki RTK, umożliwiając wyznaczenie współrzędnych płaskich z błędem średnim nie większym niż 0.03 m oraz wysokości z błędem średnim nie większym niż 0.05 m przy wykorzystaniu odbiornika L1/L2 RTK,
- KODGIS – serwis czasu rzeczywistego, udostępniający poprawki DGNS, umożliwiając wyznaczenie współrzędnych z błędem średnim nie większym niż 0.25 m przy korzystaniu z odbiornika L1/L2 oraz nie większym niż 1.5 m przy wykorzystaniu odbiornika tylko z L1,
- NAWGIS – serwis czasu rzeczywistego, udostępniający poprawki DGNS, umożliwiając wyznaczenie współrzędnych z błędem średnim nie większym niż 3.0 m przy wykorzystaniu odbiornika jedno-częstotliwościowego L1. Odnośnik.

W pomiarach geodezyjnych zastosowanie mają 3 pierwsze serwisy.

Zalety pomiarów w systemie ASG-EUPOS:

- pomiary satelitarne z użyciem systemu stają się bardziej ekonomiczne, i umożliwiają potaniecie satelitarnych pomiarów geodezyjnych, użytkownikowi potrzebny jest tylko jeden o "polowy" odbiornik, dodatkowo nie musi posiadać specjalistycznego oprogramowania oraz personelu do opracowani pomiarów,
- brak konieczności ustawiania odbiornika na punkcie stałym (referencyjnym), wykorzystanie pomiarów ze stacji jako odbiornika referencyjnego jest przydatne przy wyznaczaniu przemieszczeń w sytuacji, gdy w sąsiedztwie obiektu brak stabilnych punktów odniesienia (np. tereny górnicze czy rozległe osuwiska),
- zapewniają „automatyczne” nawiązanie do państwowego układu.

Ograniczenia systemu:

- zasadniczą wadą takiego rozwiązania może być zbyt duża odległość obiektu pomiarowego do punktów referencyjnych, wyznaczone wektory GPS mogą być obciążone znacznymi błędami, zarówno w sensie długości wektora jak i jego orientacji w przestrzeni,
- dość częste awarie systemowe na różnych stacjach (na stronie ASG-EUPOS „Bieżące aktualności dotyczące pracy systemu ASG-EUPOS” można zauważyć niemal codzienne przerwy w działaniu niektórych stacji z powodu awarii czy modernizacji),
- tylko niektóre ze stacji współpracują z systemem GLONASS,
- obliczenia sieci muszą być przeprowadzone na elipsoidzie ze względu na znaczne odległości od stacji referencyjnych,
- wszystkie braki pomiarów satelitarnych wymienione powyżej dotyczą również tych pomiarów.

Pseudosatelitarne naziemne systemy pozycjonowania

Jako jedno z rozwiązań problemu słabej geometrii pomiarów satelitarnych, pojawiła się koncepcja pseudosatelitów - naziemnych nadajników sygnału satelitarnego. Początkowe badania nad technologią były bardzo obiecujące, również w zakresie monitorowania przemieszczeń [Barnes i in. 2002] jednak z czasem okazało się, że z ich stosowaniem związane są spore problemy wynikające z przede wszystkim z założenia, że mają nadawać sygnał o częstotliwości satelitarnej, która dostosowana jest do pomiaru satelita-odbiornik, nie sprawcza się natomiast w przestrzeni naziemnej.

Finalnie badania nad satelitami zostały podsumowane wnioskami [Barnes, Rizos i in. 2003]:

- konieczne są zmiany w strukturze sygnału,
- problem z brakiem synchronizacji czasu,
- problem legalności nadawania sygnału satelitarnego.

Postanowiono, więc odejść od pierwotnej idei nadawania sygnału o częstotliwościach satelitarnych oraz wprowadzono obok nadawania sygnału również możliwość jego odbierania, co umożliwiło synchronizację urządzeń między sobą. Oczywiście, aby sygnał o innej częstotliwości mógł być

śledzony, potrzeba innych odbiorników, lecz i tak niewiele z dostępnych na runku urządzeń miało możliwość śledzenia sygnału pseudosatelitów. Powstał, więc system oparty na sieci naziemnych nadodbiorników, które pokrywają wybrany obszar sygnałem o strukturze sygnału satelitarnego, który może być wykorzystany do pozycjonowania zarówno w połączeniu z GPS, jak i niezależnie (gdy śledzone są 4 lub więcej sygnałów).

Podstawowe własności:

- działanie na innych niż GPS częstotliwościach, dobranych tak, by minimalizować problemy wielodrożności, zakłócenia itp.,
- prawie wszystkie funkcje (moc wyjściowa, sposób pulsacji, wybór kodu PRN, dane wyjściowe i lokalizacja) są pod kontrolą użytkownika,
- sygnał jest znacznie mocniejszy niż sygnał GPS (możliwe pozycjonowanie wewnątrz budynków),
- z punktu widzenia teorii wyznaczania pozycji, pozycjonowanie za pomocą nadodbiorników różni się niewiele od pozycjonowania za pomocą GPS.

Możliwości systemu w kontekście wspomaganie systemu GPS:

- zastosowanie naziemnych, odpowiednio umiejscowionych nadodbiorników sygnału poprawia słabą geometrię satelitów GPS i dostępność sygnałów pomiarowych poprzez zwiększenie ilości źródeł sygnału oraz wzmacnianie geometrii wyznaczania pozycji,
- położenie nadodbiorników może być przeanalizowane i zaprojektowane tak, aby dostarczone dodatkowe obserwacje znacząco poprawiły geometrię pozycjonowania oraz spójność wyników,
- umożliwia rozszerzanie obszaru i czasu obserwacji przy satelitarnym wyznaczaniu pozycji.

Ograniczenia:

- technologia nie jest jeszcze powszechnie dostępna, jednak jako uniwersalna metoda wspomaganie pomiarów satelitarnych zdaje się mieć szerokie zastosowania w przyszłości wszędzie tam, gdzie sam pomiar satelitarny nie jest dostateczny lub wręcz możliwy,
- nie ma obecnie jednoznacznych standardów i oprogramowania dotyczącego opracowania obserwacji, redukcji itd.

W poprzednich latach przez autora [Protaziuk 2009] przeprowadzony został szereg wstępnych analiz dokładności pomiarów satelitarnych wspomaganych dodatkowymi naziemnymi źródłami sygnału, które wykazują obniżenie średnich współczynników DOP i jak również zmniejszenie ich zmienności, istotne zwłaszcza w przypadku istnienia ograniczeń w widoczności satelitów.

Sieć hybrydowa jako współczesna sieć pomiarowa

Współczesna sieć do pomiaru przemieszczeń powinna zapewniać:

- dostosowanie konstrukcji i technologii do charakteru obiektu i jego otoczenia, zapewniające odpowiednią lokalizację i stabilizację stanowisk pomiarowych,
- spełnienie wymagań dokładnościowych w zakresie wymagań wewnątrz obiektu jak i powiązania z otoczeniem,
- możliwość odniesienia do stabilnego układu odniesienia,
- wysoką niezawodność układu obserwacyjnego, zapewniającą efektywne wykrywanie błędów grubych,
- właściwe warunki ekonomiczne,
- spełnienie kryteriów dostępności czasowej, w tym zastosowanie odpowiedniej rozdzielczości czasowej i uwzględnienie rozciągłości czasowej pomiarów.

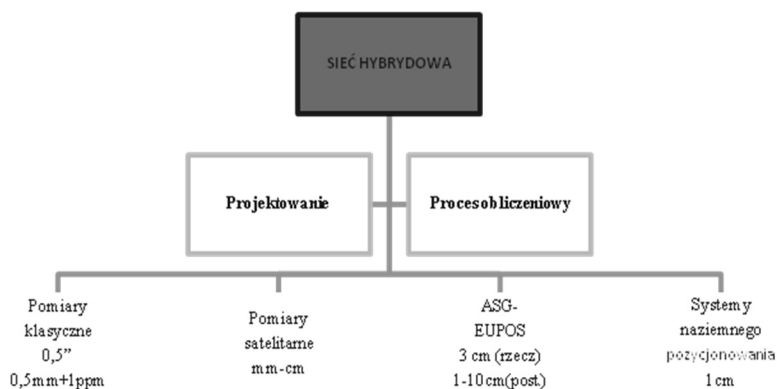
Nie ulega wątpliwości, że większość wymienionych powyżej wymagań nie jest nowością i również historyczne konstrukcje pomiarowe musiały te wymagania spełniać. Dziś jednak ze względu na dużo bardziej złożoną strukturę sieci i różnorodność stosowanych technologii, a co za tym idzie danych obserwacyjnych, każde z tych wymagań musi być szczegółowo przeanalizowane tak, aby uzyskać optymalne rozwiązanie i jak najlepiej wykorzystać atuty każdej z technologii w konkretnym zastosowaniu.

Pojęcie współczesnej sieci pomiarowej staje się coraz szersze, bardziej kompleksowe i obejmuje:

- geometrię sieci (lokalizacja i stabilizacja punktów oraz ich połączenie obserwacjami),
- technologie pomiarowe (rodzaje pomiarów, sesje pomiarowe, sprzęt),

- sposób opracowania wyników pomiarów (modele matematyczne, redukcje, układ odniesienia),
- kryteria kontroli i oceny uzyskiwanej dokładności i niezawodności.

Tak rozumiana sieć hybrydowa, do obsługi zadań o coraz wyższych i specyficznych wymaganiach, integrująca nowoczesne metody pomiarowe umożliwia istotne podniesienie poziomu dokładności i niezawodności pomiarów.



Rys.2. Schemat współczesnej sieci hybrydowej

O ile dotychczas wzrost funkcjonalności sieci odbywał się głównie poprzez zwiększanie możliwej do osiągnięcia dokładności obserwacji, to obecnie wydaje się, że granica dokładności została osiągnięta i dalsze udoskonalanie sprzętu pomiarowego będzie miało znaczenie przede wszystkim marketingowe. Największe wyzwania i możliwości wzrostu dokładności i niezawodności dla współczesnych sieci tkwią w zastosowaniu odpowiednich procedur i algorytmów projektowania oraz opracowywania wyników, uwzględniających charakter pozyskiwanych obserwacji. W czasach kiedy pomiary i procedura obliczeniowa były o wiele bardziej czasochłonne i wymagające znacznych nakładów pracy, ich wykonywanie było bardziej świadome. Dziś, kiedy zarówno pozyskiwanie danych jak i proces obliczeniowy są znacznie tańsze, prostsze, szybsze i często automatyczne, mamy do czynienia z posiadaniem ogromnej ilości danych z różnych źródeł, o różnym charakterze, lecz ich opracowanie często odbywa się bez odpowiedniej świadomości. Tak więc mimo, że udoskonalone i nowe technologie pomiarowe oraz rozwój technik obliczeniowych zapewniają

coraz wyższe dokładności i niezawodności pomiarów to pojawia się konieczność coraz bardziej starannego podejścia do planowania pomiarów i opracowywania ich wyników.

Problematyka projektowania sieci pomiarowych do wyznaczania przemieszczeń bądź monitorowania obiektu jest bardzo złożonym tematem. Poniżej przedstawiono pokrótce etapy procesu projektowania.

1. Analiza danych wejściowych:
 - dane o obiekcie (zakres powierzchniowy, dyskretyzacja obiektu, lokalizacja innych sensorów),
 - dane o terenie (stan zainwestowania, ukształtowanie, szata roślinna, dane geologiczne),
 - wymagania dotyczące zakresu wymaganych pomiarów (cel, wymagania dokładnościowe, wymagania czasowe i ekonomiczne),
 - w odniesieniu do pomiarów satelitarnych, dane o dostępnych stacjach referencyjnych, o przesłonięciach sygnału, położeniu satelitów,
 - możliwość dowiązania do osnowy państwowej.
2. Decyzja co do zasadniczych elementów sieci: kształt, dobór technologii, sposobu nawiązania,
3. Skonstruowanie struktury sieci (w oparciu o wywiad terenowy):
 - punkty sieci (lokalizacja, sposób stabilizacji),
 - elementy geometryczne (kąty, kierunki, odległości, różnice wysokości, wektory satelitarne),
4. Założenia sprzętowe, technologiczne, dokładnościowe: dokonanie wyboru i ustalenie optymalnej technologii, procedur i konstrukcji geometrycznych możliwych do zastosowania.
5. Założenia co do sposobu opracowania wyników pomiarów.
6. Kontrola prawidłowości proponowanej sieci pod kątem spełniania wymagań (dokładnościowych, niezawodnościowych, ekonomicznych i innych).

Oczywiście dla niektórych mniej wymagających czy bardziej typowych zastosowań niektóre z etapów mogą być znacznie uproszczone, niemniej jednak pierwszy i ostatni punkt dotyczące analizy zadania i kontroli prawidłowości zaprojektowanej sieci są niezbędnym elementem w każdym przypadku.

Podobnie proces obliczeniowy sieci hybrydowej jest dość złożony, lecz również niektóre z etapów i procedur obliczeniowych w mniej wymagających zastosowaniach mogą zostać pominięte. Proces obliczeniowy powinien zawierać poniższe kroki.

1. Wybór wspólnej przestrzeni matematycznej:
 - wszystkie obserwacje pochodzące z ich naturalnych przestrzeni pomiarowych (np. płaszczyzna dla pomiarów klasycznych, WGS 84 dla pomiarów GPS) należy sprowadzić do tej samej przestrzeni matematycznej, w której może być skonstruowany model wyrównawczy sieci hybrydowej,
 - dwa podstawowe warianty to: trójwymiarowy układ współrzędnych geodezyjnych – elipsoidalnych lub płaski układ współrzędnych odwzorowawczych.
2. Kontrola wstępna danych obserwacyjnych - wyrównanie swobodne poszczególnych sieci obserwacyjnych, które pozwala na:
 - sprawdzenie spójności obserwacji, wykrycie ewentualnych błędów grubych,
 - przyjęcie właściwych założeń dokładnościowych pomiarów,
 - wyznaczanie współrzędnych przybliżonych i danych do redukcji.
3. Zredukowanie obserwacji do wybranej przestrzeni:
 - ujednoczenie zbiorów obserwacji (długości, kątów poziomych, różnic wysokości oraz wektorów GPS, pseudoodległości bądź wektorów „naziemnych”) - sprowadzenie ich poprzez odpowiednie redukcje do wybranej przestrzeni matematycznej.
4. Estymacja parametrów modelu (jedno lub dwuetapowa – 2+1D lub 3D) przy odpowiednio zdefiniowanym układzie odniesienia.
5. Ewentualne transformacje do pożądanego układu.
6. Ocena dokładnościowa uzyskanych wyników.

Podsumowanie

Udoskonalanie istniejących oraz wprowadzenie nowych geodezyjnych technologii pomiarowych, a także rozwój komputerowych metod przetwarzania danych obserwacyjnych i opracowania wyników spowodowały istotną ewolucję sieci do pomiaru przemieszczeń, tak pod względem dokładności wykonywania pomiarów, jak i pod względem ich planowania i obliczeń. Stosunkowo proste i tanie pozyskiwanie obserwacji o wysokich

dokładnościach pozwoliło na znaczne zwiększanie dokładności pomiarów, uzyskiwanie znacznie lepszych warunków nawiązania sieci, optymalizację kształtu sieci, ekonomiczną realizację procesu pomiaru. Owocuje to uzyskaniem nowej jakości we współczesnych sieciach hybrydowych, jednocześnie jednak stanowi wyzwanie dla świadomego i planowego podejścia do prawidłowej integracji różnorodnych danych obserwacyjnych.

Łączenie obserwacji z różnych technologii obserwacyjnych staje się dziś typowym zadaniem przy pomiarach przemieszczeń, przy czym ostateczny efekt jakościowy coraz bardziej zależy od zastosowania właściwych procedur:

- projektowania struktury sieci spełniającej kryteria dokładnościowe, niezawodnościowe i ekonomiczne,
- opracowania wyników i przyjęcia prawidłowych modeli wyrównawczych.

Nieprecyzyjne podejście do tych procedur może skutkować (mimo posiadania obserwacji o wysokiej dokładności) uzyskaniem końcowych wyników obarczonych błędami systematycznymi. Błędy te co gorsza mogą mieścić się w granicznych kryteriach dokładnościowych i pozostać niezauważone, lecz mimo to będą obniżać poprawność (wiarygodność) wyników i prowadzić mogą do zafałszowania obrazu rzeczywistości.

Literatura

- [1] Barnes J., Wang J., Rizos C., Tsujii T., 2002: The performance of a pseudolite-based positioning system for deformation monitoring, 2nd Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural Applications, Berlin, Germany, 21-24 May 2002;
- [2] Barnes J., Rizos C., Wang J., Small D., Voigt G., Gambale N., 2003: Locata: the positioning technology of the future? 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, Australia, 22-25 July, CD-ROM;
- [3] Góral W., Szewczak J., 2004: Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych pomiarach deformacji, Kraków;

-
- [4] Lazzarini T. i in., 1977: Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia. PPWK, Warszawa;
 - [5] Protaziuk E., 2009: Ground support of satellite system. Reports on Geodesy No. 2 (87);
 - [6] Prószyński W., Kwaśniak M., 2006: Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Pojęcia i elementy metodyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa;
 - [7] www.asgeupos.pl.

Zbigniew Muszyński¹, Wojciech Milczarek²

Politechnika Wrocławska

¹ Zakład Budownictwa Wodnego i Geodezji, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki

² Zakład Geodezji i Geoinformatyki, Instytut Górnictwa

e-mail: zbigniew.muszynski@pwr.wroc.pl, wojciech.milczarek@pwr.wroc.pl

Modelowanie przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skanera laserowego

Wstęp

Pomiary przemieszczeń pionowych od dawna stanowią jedno z podstawowych zadań geodezji inżynierskiej. Przemieszczenia pionowe wyznacza się dla takich obiektów jak: zapory wodne, mosty, wiadukty, estakady, budynki znajdujące się w sąsiedztwie głębokich wykopów, fundamenty kominów przemysłowych, chłodni kominowych, zbiorników, itp. Specyfika tych prac wymaga zazwyczaj wyznaczenia przemieszczeń pionowych kontrolowanego obiektu z dokładnością co najmniej dziesiątych części milimetra. Aby sprostać tym wymaganiom, jako podstawową technikę pomiarową, wykorzystuje się precyzyjną niwelację geometryczną. Choć na przestrzeni ostatnich lat coraz częściej optyczne niwelatory precyzyjne są zastępowane kodowymi niwelatorami precyzyjnymi (wygodniejszymi w obsłudze i pozbawionymi możliwości popełnienia błędu przy odczycie z łąty i przy zapisie obserwacji do dziennika), to jednak podstawowe zasady pomiaru pozostają takie same. Dodatkowo klasyczne, geodezyjne pomiary przemieszczeń pionowych stanowią często odniesienie dla uzupełniających pomiarów względnych (z użyciem pochyłomierzy precyzyjnych, czujników zegarowych, itp.), nierzadko wykonywanych z dokładnością o rząd wyższą niż dokładność możliwa do uzyskania z niwelacji precyzyjnej.

Postęp technologiczny w zakresie geodezyjnych instrumentów pomiarowych oraz naturalna potrzeba integracji danych pozyskiwanych różnymi metodami skłania do zastanowienia nad możliwościami wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do wyznaczania przemieszczeń pionowych. W literaturze naukowej można znaleźć publikacje, których autorzy podejmowali podobne zagadnienia. Przydatność naziemnego skaningu laserowego do wyznaczania przemieszczeń badano na mostach i wiaduktach w czasie próbnych obciążeń [np. Zogg, Ingensand 2008, Schäfer i in. 2004] porównując uzyskane wyniki z wynikami tradycyjnych pomiarów: niwelacji precyzyjnej i precyzyjnej tachimetrii elektronicznej. Jako obiekty badawcze często wybierano zapory wodne, gdzie badano przydatność naziemnego skaningu laserowego do wykrywania zmian geometrii betonowej konstrukcji [np.: Alba i in. 2006, Adamek i in. 2012]. Monitoring poziomych przemieszczeń obiektów zlokalizowanych w sąsiedztwie głębokich wykopów z dodatkowym wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego opisano m. in. w pracy [Zaczek-Peplińska i in. 2013]. Wspomniano tam również o trudnościach z wykorzystaniem skaningu laserowego do wyznaczania przemieszczeń pionowych, wynikających z niewystarczającej dokładności pomiaru skanerem.

Niniejsza publikacja podejmuje temat wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do pomiarów przemieszczeń pionowych w sytuacji, gdy kilkumilimetrowa dokładność wyznaczenia wartości przemieszczeń jest wystarczająca. Sytuacja taka może dotyczyć powierzchniowych obiektów inżynierskich, które nie posiadają stabilizowanych trwale reperów kontrolowanych. Przykładem takiego obiektu może być podbudowa pasa startowego lotniska, dla którego wyniki badania przemieszczeń pionowych prezentowane są w dalszej części pracy.

Naziemny skaningu laserowy w kontekście wyznaczania przemieszczeń

Tradycyjne pomiary przemieszczeń zazwyczaj rozdzielają wyznaczanie przemieszczeń pionowych od wyznaczania przemieszczeń poziomych. Spowodowane jest to zróżnicowaną dokładnością konieczną do osiągnięcia przy tych pomiarach (wyższą w przypadku przemieszczeń pionowych), co w naturalny sposób narzuca stosowanie różnych technik i instrumentów pomiarowych. Jak wcześniej wspomniano podstawową

technologią do badania przemieszczeń pionowych jest precyzyjna niwelacja geometryczna. W przypadku badania przemieszczeń poziomych dominują precyzyjne pomiary tachimetryczne sieci kąto-liniowych. Nieco rzadziej stosowane są różnego typu techniki aliniometryczne, które polegają na wyznaczaniu przemieszczeń poziomych obiektu kontrolowanego względem stałej pionowej płaszczyzny odniesienia.

Rozwój technologii pomiarowych prowadzi klasyczne badanie przemieszczeń w kierunku tzw. monitoringu strukturalnego. Nazwą tą określa się nowoczesny system łączący różne technologie pomiarów geodezyjnych (bezwzględnych) z technikami względnych pomiarów przemieszczeń oraz wszelkiego rodzaju sensorami rejestrującymi zachowanie kontrolowanego obiektu. Monitoring strukturalny pozwala na automatyczną rejestrację stanu obiektu wykonywaną cyklicznie w ustalonych interwałach czasowych. Zebrane dane pomiarowe są gromadzone, korygowane ze względu na warunki środowiskowe pomiaru i odpowiednio przeliczane. Uzyskane wartości przemieszczeń są porównywane z wartościami dopuszczalnymi, wizualizowane i przesyłane zdalnie do odpowiednich służb nadzorujących. System zapewnia całodobową kontrolę stanu monitorowanego obiektu w czasie rzeczywistym z możliwością automatycznej sygnalizacji stanów alarmowych. Podstawowy składnik systemu stanowią precyzyjne zmotoryzowane tachimetry elektroniczne, które wyposażone są w funkcję automatycznego rozpoznawania celu sygnalizowanego pryzmatem geodezyjnym. Funkcja ta polega na skanowaniu obszaru wokół pryzmatu, na analizie siły odbitego sygnału i automatycznym nacelowaniu lunety (za pomocą serwowatorów) na punkt najsilniejszego odbicia (centrum pryzmatu), po czym następuje wykonanie właściwego pomiaru. Tachimetry umieszcza się zazwyczaj na trwale stabilizowanych punktach odniesienia, w specjalnych, przeszklonych kontenerach wyposażonych w klimatyzację i źródło zasilania. Kontenery te zabezpieczają instrument przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi i umożliwiają jego nieprzerwaną pracę [Karsznia 2008]. Aby zapewnić kontrolę stałości stanowiska tachimetru, wykonuje się cykliczne obserwacje kąto-liniowe do pozostałych punktów odniesienia. Drugi składnik systemu monitoringu strukturalnego stanowią odbiorniki satelitarne GNSS pracujące w różnych trybach: statycznym lub RTK (kinematycznym w czasie rzeczywistym). Odbiorniki pracujące w trybie statycznym umieszcza się na punktach

odniesienia w celu kontroli stałości ich położenia. Punkty te mogą być jednocześnie wyposażone w przyrządy geodezyjne i wówczas umożliwiają nawiązania kierunkowe stanowisk tachimetrycznych [Karsznia i in. 2010]. Jeżeli nie jest możliwe zachowanie stałości stanowisk tachimetrycznych, integruje się je z odbiornikami GNSS, aby rejestrować ich położenie [Van Cranenbroeck, Brown 2004]. Odbiorniki pracujące w trybie RTK montuje się również na kluczowych punktach kontrolowanych, gdzie umożliwiają rejestrację dynamicznych zmian obiektu nawet z interwałem poniżej sekundy [Wan Aziz i in. 2005]. Dopelnieniem urządzeń pomiarowych stosowanych w monitoringu są wszelkiego rodzaju czujniki i sensory rejestrujące istotne dla obiektu zjawiska, np. inklinometry, precyzyjne pochyłomierze elektroniczne, piezometry, stacje meteorologiczne rejestrujące temperaturę, wilgotność i ciśnienie atmosferyczne, itp. Do działania systemu konieczne są również urządzenia i oprogramowanie zapewniające niezakłócone przesyłanie danych, ich gromadzenie, przetwarzanie, analizowanie i wizualizację.

Wszystkie wymienione powyżej geodezyjne metody pomiaru przemieszczeń mają jedną wspólną cechę, wymagają istnienia zbioru punktów kontrolowanych, trwale stabilizowanych i na stałe związanych z badanym obiektem inżynierskim. Wykryte zmiany położenia punktów kontrolowanych w czasie (w oparciu o punkty odniesienia zidentyfikowane jako stałe) świadczą o przemieszczeniach badanego obiektu lub jego części. W praktyce niejednokrotnie zachodzi potrzeba badania przemieszczeń obiektów budowlanych, które nie posiadają punktów kontrolowanych, albo nie można ich tam stabilizować (np. ze względu na ochronę konserwatorską budowli). Istotnym aspektem doboru odpowiedniej technologii badania przemieszczeń jest również spodziewana dynamika zmian budowli, jej wrażliwość na zmienne warunki atmosferyczne oraz długość okresu dostępności obiektu do wykonania pomiarów. W przypadku konstrukcji budowlanej wrażliwej na zmienne warunki atmosferyczne albo wykazującej dużą dynamikę zmian kształtu w trakcie jej eksploatacji, wykonanie tradycyjnego pomiaru przemieszczeń kilkudziesięciu punktów kontrolowanych może być znacznie utrudnione. W takich sytuacjach bardzo pomocne jest włączenie do planowanego zakresu pomiarów geodezyjnych technologii naziemnego skaningu laserowego.

Naziemny skaning laserowy umożliwia szybki pomiar niesygnalizowanych punktów, opisujących mierzony obiekt. Szybkość pomiaru może dochodzić do miliona punktów mierzonych w ciągu jednej sekundy. Naziemny skaner laserowy wyposażony jest w pryzmat wirujący w płaszczyźnie pionowej, który nieustannie wysyła impulsowo wiązkę laserową. Wiązka ta odbijając się od otaczających obiektów umożliwia bezreflektorowy pomiar odległości. Jednocześnie alidada skanera obraca się w płaszczyźnie poziomej o zadany skok kątowy. Dla każdego wysłanego impulsu laserowego mierzony jest kąt pionowy i poziomy, odległość od skanera do miejsca odbicia sygnału oraz intensywność powracającego sygnału laserowego. Obserwacje te przeliczane są na współrzędne prostokątne x,y,z w lokalnym układzie stanowiska skanera i razem z danymi o intensywności odbicia rejestrowane są w pamięci wewnętrznej instrumentu. Dodatkowo skanery wyposażone są w wysokorozdzielcze aparaty cyfrowe z automatycznym ogniskowaniem, które wykonują zdjęcia skanowanych obiektów, co pozwala na archiwizację stanu obiektu, jak również na tworzenie realistycznych wizualizacji. Uzyskane ze skanera dane pomiarowe (tzw. chmury punktów) umożliwiają zbudowanie w pełni metrycznego, trójwymiarowego modelu mierzonego obiektu. Gęstość pomierzonych punktów reprezentujących geometrię obiektu można dowolnie definiować, tworząc w skrajnych przypadkach nieregularne siatki o wielkości oczek poniżej jednego milimetra. W przypadku dużych obiektów zachodzi konieczność wykonania pomiaru skanerem z kilku stanowisk, a następnie łączenia chmur punktów w oparciu o punkty wiążące, sygnalizowane specjalnymi tarczami.

Rozpatrując możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do badania przemieszczeń należy zwrócić uwagę na zalety i wady tej technologii pomiarowej. Niewątpliwą zaletą skaningu jest szybkość wykonywania pomiaru i ogromna ilość pomierzonych punktów. Zamiast mierzonych tradycyjnie kilku lub kilkudziesięciu punktów kontrolowanych, możemy w krótkim czasie pomierzyć cały obiekt z dowolną gęstością rozmieszczenia punktów, zależną jedynie od dynamiki zmian geometrii obiektu, okresu czasu, kiedy obiekt jest dostępny do wykonania pomiaru oraz od potrzeb, dla których pomiar jest wykonywany. Możemy zbadać zachowanie obiektu w miejscach nieobjętych klasycznym pomiarem (np. pomiędzy punktami kontrolowanymi). Ważnym aspektem jest również

możliwość wykonania pomiaru „bezdotykowo”, z pewnej odległości, bez konieczności wchodzenia osób wykonujących pomiar na obiekt. Istotnym ograniczeniem powszechnego zastosowania skaningu jest wciąż jeszcze niewystarczająca do wszystkich celów (choć ciągle wzrastająca) dokładność tej technologii pomiarowej. W zależności od modelu skanera, błąd średni przestrzennego położenia pojedynczego pomierzonego punktu, znajdującego się w odległości do 50 m od instrumentu, wynosi kilka milimetrów i rośnie ze wzrostem odległości. Zasięg pracy skanera jest ograniczony do kilkuset metrów i zmienia się w zależności od stanu i rodzaju materiału, z którego wykonany jest obiekt pomiarowy (zależy m.in. od koloru, chropowatości, wilgotności, itp.). Aby uzyskać możliwie najwyższą dokładność pomiaru, punkty wiążące stanowiska skanera (a w miarę możliwości także same stanowiska skanera) powinny być pomierzone precyzyjnie tachimetrami i dowiązane do punktów odniesienia.

W dalszej części publikacji opisano technologię wyznaczania przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego w sytuacji, gdy:

- nie ma możliwości stabilizacji punktów kontrolowanych na obiekcie,
- czas trwania pomiaru okresowego nie może przekraczać kilkunastu minut,
- dokładność wyznaczenia przemieszczeń pionowych w granicach kilku milimetrów jest wystarczająca.

W przypadku skaningu laserowego rozmieszczenie punktów pomiarowych na obiekcie spełnia wymóg żądanej gęstości, ale nie jest identyczne w każdym pomiarze okresowym. Z tego powodu nie można bezpośrednio porównywać wysokości poszczególnych punktów z dwóch epok pomiarowych, ze względu na ich nieco odmienne usytuowanie na obiekcie. Zachodzi tutaj potrzeba modelowania powierzchni obiektu otrzymanej z każdego pomiaru okresowego, a następnie porównania tych modeli w celu uzyskania żądanych wartości przemieszczeń. Proponowane poniżej rozwiązanie wykorzystuje wybrane algorytmy budowy numerycznych modeli terenu oraz narzędzia algebry mapy wbudowane w systemy informacji geograficznej (GIS).

Metody modelowania powierzchni wykorzystywane przy tworzeniu numerycznych modeli terenu (NMT)

NMT stanowi numeryczną reprezentację powierzchni terenu utworzoną przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów interpolacyjnych na wybranym zbiorze punktów o znanych współrzędnych w przyjętym układzie. Zbiór danych (punktów) wykorzystywanych przy opracowaniu NMT może być pozyskany m.in. z opracowania zdjęć lotniczych (metody fotogrametryczne), na podstawie bezpośrednich pomiarów geodezyjnych, lotniczego lub naziemnego skaningu laserowego oraz na podstawie istniejących map (metody kartograficzne). Wyróżniamy dwa podstawowe typy numerycznych modeli terenu: TIN oraz GRID.

Siatka TIN to zbiór punktów pozyskany bezpośrednio z pomiarów, który charakteryzuje się nieregularnym przestrzennym rozmieszczeniem. Wykorzystując te punkty buduje się siatkę trójkątów, najczęściej za pomocą algorytmu triangulacji Delanuy'a. Triangulacja tą metodą zakłada, że powstałe trójkąty powinny być w przybliżeniu trójkątami równobocznymi, w których najdłuższy bok powinien być możliwie najkrótszym oraz trójkąt powinien charakteryzować się możliwie najmniejszą wysokością (Osada 2002).

Siatka GRID tworzy regularną siatkę kwadratów, która stanowi przykład tzw. siatki wtórnej. Wartości w punktach węzłowych są wyinterpolowane z danych pomiarowych. Model GRID powinien być uzupełniony m.in. o dane w postaci linii nieciągłości, punktów charakterystycznych oraz granic wyłączeń obszarów poziomych. Najczęściej stosowanymi metodami interpolacyjnymi wykorzystywanymi przy opracowywaniu siatki GRID są: metoda najbliższego sąsiada, metoda odwrotnych odległości oraz tzw. kriging.

Metoda najbliższego sąsiada (NS) - z założenia jest prosta i polega na przypisaniu wysokości w danym punkcie od istniejącego (znanego) punktu, znajdującego się najbliżej punktu wyznaczanego. Jest ona stosowana przy regularnie rozmieszczonych zbiorach punktów i z racji swoich ograniczeń umożliwia opracowanie uproszczonych modeli powierzchni.

Metoda odwrotnych odległości (IDW) – w tej metodzie wyznaczana wartość wysokości w danym punkcie określana jest na podstawie liniowo ważonej kombinacji zbioru punktów, gdzie największy wpływ na wyznaczenie wysokości w danym punkcie mają te punkty zbioru, które są zlokalizowane najbliżej. Przyjmowane w metodzie wagi są wyrażone jako odwrotność p -tej potęgi odległości pomiędzy punktem wyznaczanym, a punktem z otoczenia brany do obliczeń [Osada 2002]:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

gdzie: z – wyznaczana wysokość w danym punkcie, d_i – odległość między i -tym punktem brany do obliczeń ($i = 1 \dots n$), a punktem, w którym jest wyznaczana wysokość, z_i – wysokość w i -tym punkcie brany do obliczeń, p – wykładnik potęgi (parametr metody), im większa przyjmowana wartość p , tym mniejszy wpływ na interpolowaną wysokość mają punkty bardziej oddalone od punktu wyznaczanego.

Kriging (K) - stanowi grupę metod estymacji geostatystycznych umożliwiających otrzymanie nieobciążonych liniowych oszacowań wartości w zbiorze (punktów lub bloków) analizowanej zmiennej zregionalizowanej [Namysłowska-Wilczyńska 2006]. Najczęściej stosowanymi estymatorami w obrębie tej grupy metod są: kriging zwyczajny oraz kriging prosty.

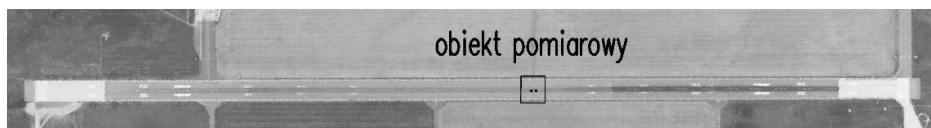
Wyznaczanie przemieszczeń pionowych na podstawie wejściowego i kontrolnego modelu powierzchni badanego obiektu

Do porównywania modeli powierzchni obiektu powstałych z tzw. chmur punktów doskonale nadają się narzędzia algebry mapy. Narzędzia te, stosowane powszechnie w systemach informacji geograficznej (GIS), pozwalają na przekształcenie danych przestrzennych zapisanych w postaci rastrowej. Wprowadzając do procesu dwa rastry wejściowe otrzymujemy w wyniku przekształcenia nowy raster, który cechuje się inną treścią, wynikającą ze znanej i ustalonej relacji zachodzącej między rastrami wejściowymi. W obszarze algebry mapy typowymi działaniami na rastrach są

m. in.: dodawanie, odejmowanie (zastosowane poniżej), mnożenie, dzielenie, poszukiwanie minimum lub maksimum itp.

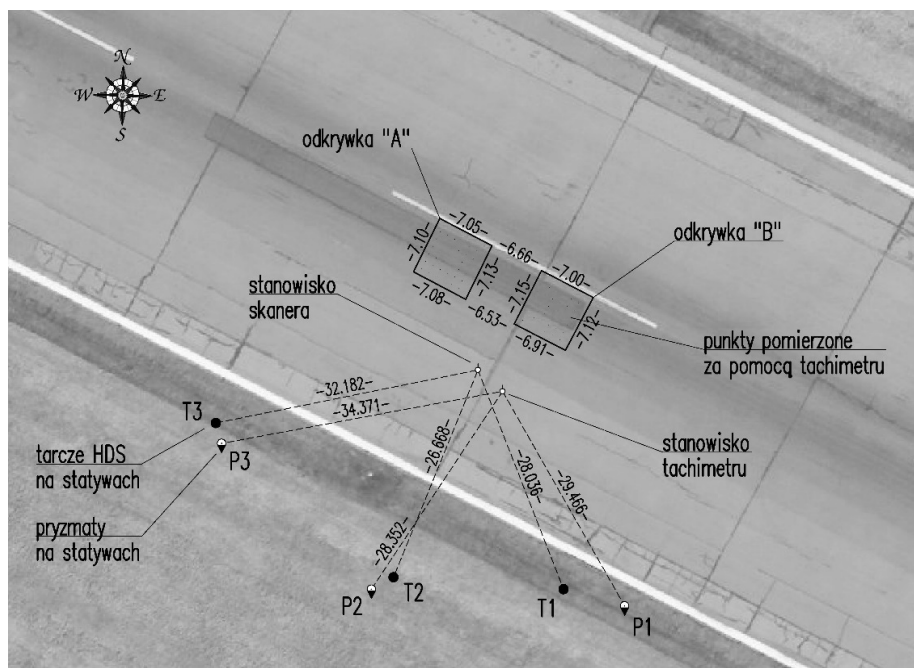
Obiekt badawczy

Proponowaną w niniejszej publikacji technologię wyznaczania przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego przebadano na rzeczywistym obiekcie terenowym. Był nim fragment pasa startowego jednego z lotnisk w Polsce. Wykonywane na tym lotnisku wcześniejsze prace budowlane, prowadzone metodą przeciskową, spowodowały w dwóch miejscach wypłukanie gruntu poniżej podbudowy pasa startowego (rys. 1). Prowadziło to do narastania lokalnych nierówności (obniżeń) płyty pasa startowego i mogło w dłuższej perspektywie zagrozić bezpieczeństwu ruchu lotniczego. Z tego powodu zapadła decyzja o remoncie pasa startowego w zagrożonych miejscach. Prace remontowe dotyczyły dwóch czworokątnych obszarów położonych w pobliżu osi pasa, oddalonych od siebie średnio o 6,6 m. Obszary te oznaczono na rysunku 2. jako odkrywka „A” i odkrywka „B”. Pierwsza z nich miała powierzchnię zdjętego asfaltu $50,3 \text{ m}^2$, druga – powierzchnię $49,6 \text{ m}^2$.



Rys. 1. Lokalizacja obiektu pomiarowego na podkładzie ortofotomapy

Całość prac remontowych pasa startowego musiała rozpocząć się i zakończyć w okresie kilkugodzinnej nocnej przerwy pomiędzy lądowaniami samolotów. Wymagało to dużego pośpiechu w realizacji prac budowlanych i ograniczało do minimum czas przeznaczony na wykonanie pomiarów geodezyjnych. Dodatkową trudnością było wykonywanie pomiarów w nocy (przy sztucznym oświetleniu) oraz konieczność zatrzymywania niektórych maszyn budowlanych, których praca powodowała silne drgania podłoża, zakłócające pracę instrumentów geodezyjnych.



Rys. 2. Lokalizacja odkrywek i stanowisk pomiarowych na podkładzie ortofotomapy

Zakres prac geodezyjnych obejmował kontrolę przemieszczeń pionowych podbudowy pasa startowego (niezależnie w odkrywce „A” oraz „B”) pomiędzy dwoma etapami prac remontowych. Pierwszy pomiar geodezyjny (wyjściowy) miał być wykonany zaraz po odsłonięciu (poprzez sfrezowanie wierzchniej warstwy asfaltowej) betonowej podbudowy pasa startowego. Drugi pomiar geodezyjny (kontrolny) należało wykonać po czynnościach zagęszczających podbudowę betonową oraz znajdujący się pod nią grunt. Czynności te polegały na rozkruszeniu betonu kolejno w obu odkrywkach za pomocą młota hydraulicznego zamontowanego na koparkoładownicy, a następnie na zagęszczeniu podłoża za pomocą samojezdnego, przegubowego, stalowego, gładkiego walca wibracyjnego. Kontrola przemieszczeń pionowych miała być wykonana dla kilkudziesięciu niestabilizowanych punktów, tworzących w przybliżeniu regularną siatkę kwadratów wewnątrz obu odkrywek.

Pomiary terenowe

Ze względu na specyfikę obiektu i wspomniane powyżej ograniczenia czasowe zdecydowano się na zastosowanie technologii skaningu laserowego. Do momentu rozpoczęcia pomiarów nie było jednak wiadomo, jakich wartości osiadań należy się spodziewać. W przypadku pojedynczych milimetrów dokładność skaningu laserowego mogłaby okazać się niewystarczająca. Z tego powodu postanowiono dodatkowo wykonać pomiary przemieszczeń pionowych metodami tradycyjnymi: precyzyjną tachimetrią oraz niwelacją geometryczną. Pojawiła się zatem okazja przebadania w warunkach terenowych przydatności naziemnego skaningu laserowego do wyznaczania przemieszczeń pionowych i skonfrontowania uzyskanych ze skaningu wyników z wynikami pomiarów tradycyjnych.

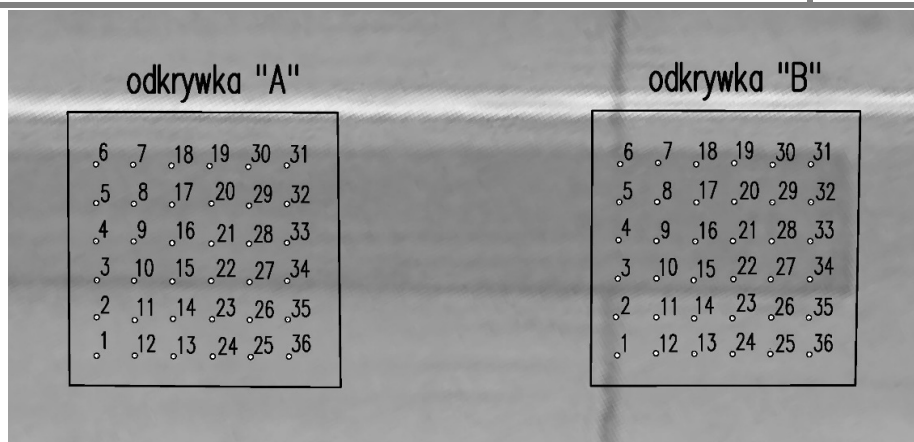
Pomiar niwelacyjny wykonano kodowym niwelatorem Leica Sprinter 250M o dokładności 1,0 mm/km podwójnej niwelacji. Niestety ze względu na ograniczenia czasowe pomiar niwelacyjny udało się wykonać tylko dla pomiaru wyjściowego. Pomiar tachimetryczny przeprowadzono za pomocą zmotoryzowanego, zdalnie sterowanego tachimetru elektronicznego, wyposażonego w funkcję śledzenia pryzmatu zamontowanego na tyczce pomiarowej. Tyczkę zaopatrzono w specjalną „stopkę” o średnicy 5 cm, odpowiednią do tego rodzaju podłoża. Zasada pomiaru polegała na określeniu położenia kontrolowanych punktów metodą biegunową z jednoczesnym trygonometrycznym pomiarem wysokości. Wykorzystany tachimetr Trimble S3 umożliwiał pomiar kątów poziomych i pionowych z dokładnością 2” (6^{cc}) oraz pomiar odległości do pryzmatu w trybie standardowym dalmierza z dokładnością $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$. Naziemny skaningu laserowy wykonano za pomocą skanera Leica ScanStation C10, który umożliwiał określenie przestrzennego położenia pojedynczego punktu chmury z dokładnością $\pm 6 \text{ mm}$. Dokładność modelowania powierzchni na podstawie pomierzonej chmury punktów wg danych producenta skanera wynosi $\pm 2 \text{ mm}$.

Przebieg geodezyjnych prac terenowych był następujący:

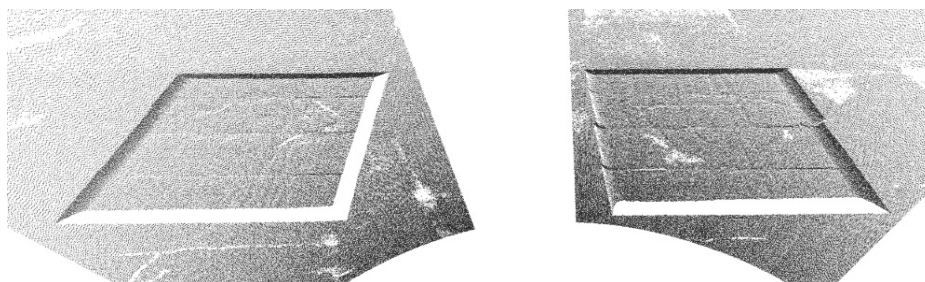
- Przygotowano stanowiska niwelatora, tachimetru i skanera. Założono tymczasową sieć punktów odniesienia dla kontroli stałości położenia stanowisk instrumentów, gdyż instrumenty znajdowały się w strefie

drgań wywoływanych przez maszyny budowlane. Sieć punktów odniesienia tworzyły dwa tymczasowe repery (dla pomiarów niwelatorem), trzy statywy zaopatrzone w pryzmaty (dla pomiarów tachimetrem) oraz niezależne trzy statywy zaopatrzone w tarcze HDS (dla pomiarów skanerem). Repery i statywy usytuowane były poza płytą pasa startowego w odległości ok. 30 m od stanowisk instrumentów (rys. 2).

- Zamarkowano farbą punkty kontrolowane na dnie odsłoniętej betonowej podbudowy pasa startowego (dla pomiarów tachimetrycznych i niwelacyjnych) w oparciu o zewnętrzne krawędzie odkrywki. Punkty narożnikowe (oznaczone numerami 1 w obu odkrywkach) były oddalone od boków odkrywek o 0,75 m. Pozostałe punkty kontrolowane tworzyły regularną siatkę o boku 1 m, której krawędzie były równoległe do krawędzi odkrywki. Lokalizację punktów i przyjętą numerację przedstawia rysunek 3.
- Wykonano nawiązanie stanowiska skanera do punktów odniesienia oraz przeprowadzono pomiar odkrywek przy założonej gęstości skanowania około 25 mm. Przykładowy widok pozyskanej chmury punktów zamieszczono na rysunku 4.
- Wykonano nawiązanie stanowiska tachimetru do punktów odniesienia oraz wykonano pomiar punktów kontrolowanych (po 36 punktów w każdej z odkrywek).
- Po zagęszczeniu betonowej podbudowy pasa startowego odtworzono położenie punktów kontrolowanych (powtórne markowanie farbą w oparciu o krawędzie odkrywek, konieczne dla pomiaru tachimetrycznego). Ze względu na pokruszenie betonu i występujące w niektórych miejscach głębokie szczeliny, niektóre punkty kontrolowane musiały być o kilka centymetrów przesunięte w poziomie, aby uzyskać reprezentatywną wysokość mierzonego podłoża.



Rys. 3. Rozmieszczenie i numeracja punktów kontrolowanych na podkładzie ortofotomapy



Rys. 4. Widok chmury punktów pozyskanych z pomiaru wyjściowego naziemnym skanerem laserowym

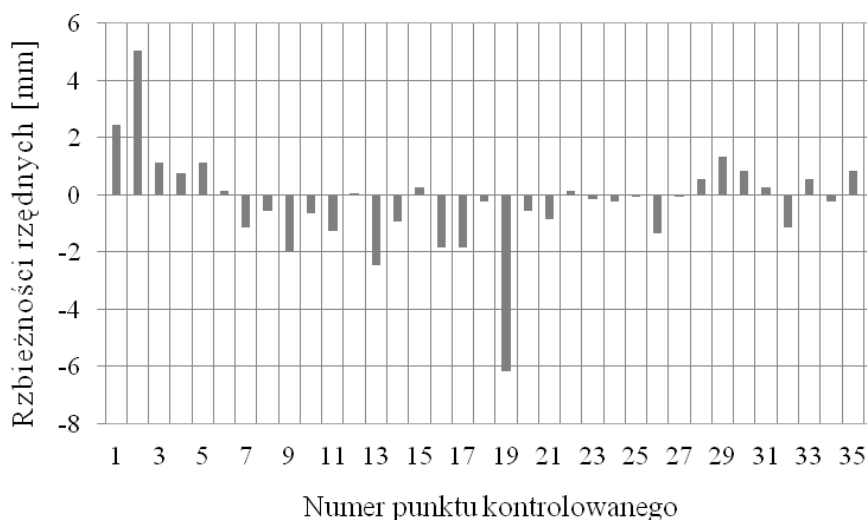
- Powtórnie wykonano nawiązanie stanowiska skanera laserowego do punktów odniesienia oraz wykonano skanowanie obu odkrywek (pomiar kontrolny).
- Powtórnie wykonano nawiązanie stanowiska tachimetru do punktów odniesienia oraz wykonano pomiar kontrolny punktów kontrolowanych w obu odkrywkach.

Wyniki prac badawczych

Poniżej zaprezentowano wyniki uzyskane z pomiarów odkrywki „B”, gdzie wystąpiły największe przemieszczenia pionowe. Pozyskane dane tachimetryczne i dane ze skanera opracowano poprzez skontrolowanie

stałości stanowisk instrumentów pomiędzy pomiarem wyjściowym, a pomiarem kontrolnym. Dla danych z tachimetru obliczono współrzędne punktów kontrolowanych z obu pomiarów okresowych, a następnie obliczono przemieszczenia pionowe z dokładnością $\pm 0,001$ m. Dodatkowo porównano rzędne z pomiaru wyjściowego otrzymane z tachimetrii i niwelacji geometrycznej. Uzyskane rozbieżności (rzędna z tachimetrii minus rzędna z niwelacji) przedstawiono na wykresie 1. Dla ponad 60% punktów kontrolowanych różnice nie przekraczają ± 1 mm, dla kolejnych 33% - nie przekraczają $\pm 2,5$ mm. Jedynie dwa punkty (nr 2 i 19) mają różnice na poziomie $+5$ i -6 mm. Należy przypuszczać, że spowodowane jest to niedokładnym odtworzeniem ustawienia tyczki lub łąty na markowanym farbą punkcie kontrolowanym.

Wykres 1. Rozbieżności pomiędzy rzędnymi punktów kontrolowanych uzyskanymi z tachimetrii i niwelacji (dla pomiaru wyjściowego)



Pozyskaną ze skanera tzw. chmurę punktów odfiltrowano, odrzucając otoczenie odkrywek. Pozostawiono dwie grupy punktów (każda licząca około 49 tysięcy punktów), reprezentujące kształt dna odkrywki „B” z pomiaru wyjściowego i z pomiaru kontrolnego. Obie grupy punktów zamodelowano wspomnianymi wcześniej metodami:

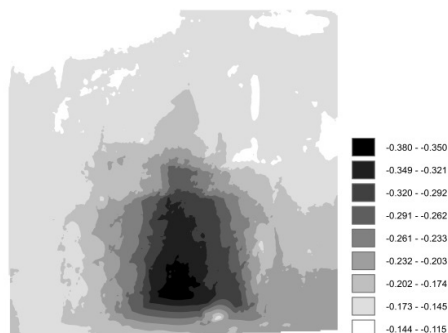
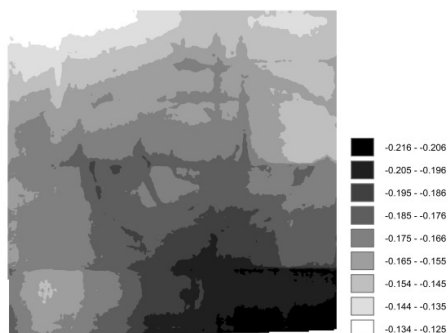
- najbliższego sąsiada (NS) - przyjmując rozmiar oczka 24,7 mm,

- odwrotnych odległości (IDW) - dla tego samego rozmiaru oczka, przy wykładniku potęgi $p=2$ wzór (1) oraz dla zbioru 25 punktów branych do obliczeń,
- krigingu (K) - zwykłego, z identycznym jak powyżej rozmiarem oczka.

Wyniki modelowania powierzchni dna odkrywki „B”, na podstawie zbioru punktów otrzymanych z pomiaru wyjściowego skanerem prezentują rysunki 5a, 5c, 5e. Analogiczne wyniki dla modelowania zbioru punktów otrzymanych z pomiaru kontrolnego skanerem pokazują rysunki 5b, 5d i 5f. Wykorzystując narzędzia tzw. algebry mapy obliczono w programie ArcGIS mapę różnic, odejmując (osobno dla każdej z użytych metod) model rastrowy powierzchni dna odkrywki „B” uzyskany na podstawie pomiaru wyjściowego, od analogicznego modelu rastrowego pozyskanego z pomiaru kontrolnego. Uzyskano w ten sposób trzy modele powierzchni przemieszczeń, które w formie graficznej (jako cieniowane mapy wartości przemieszczeń wyrażonych w metrach) prezentują rysunki 6, 7 i 8. Aby zweryfikować dokładność powyższych modeli przemieszczeń, porównano wyznaczoną z modelu wartość przemieszczenia z wartością przemieszczenia obliczonego z pomiarów tachimetrycznych. Weryfikację wykonano dla wszystkich 36 punktów kontrolowanych pomierzonych tachimetrem. Uzyskane odchyłki przedstawiono na rysunku 9. w następujący sposób: powyżej symbolu krzyżyka (oznaczającego punkt kontrolowany) podano wartość przemieszczenia [m] uzyskaną z tachimetrii, natomiast z pozostałych stron symbolu podano odchyłki [m] pomiędzy wartościami przemieszczeń z tachimetrii, a wartościami przemieszczeń z poszczególnych testowanych metod modelowania, zgodnie z zasadą: po lewej stronie – z krigingu (K), poniżej – z metody najbliższego sąsiada (NS), natomiast po prawej stronie – z metody odwrotnych odległości (IDW).

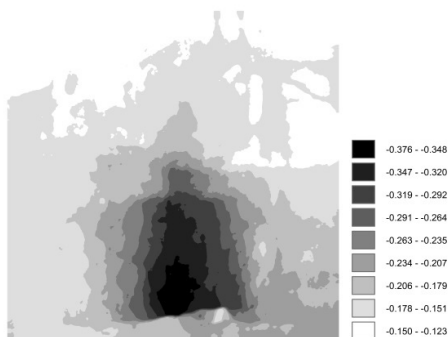
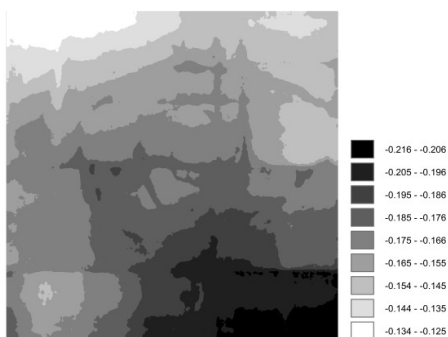
Pomiar wyjściowy

Pomiar kontrolny



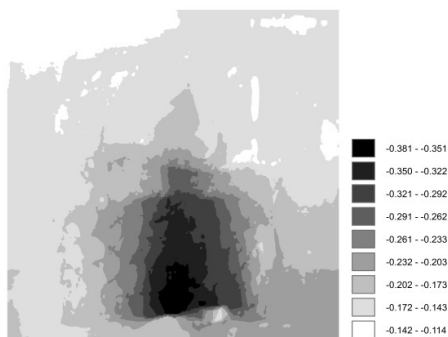
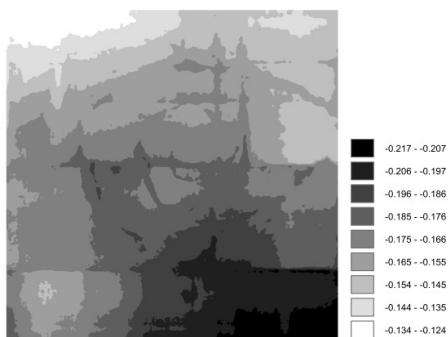
a) metoda najbliższego sąsiada

b) metoda najbliższego sąsiada



c) metoda odwrotnych odległości

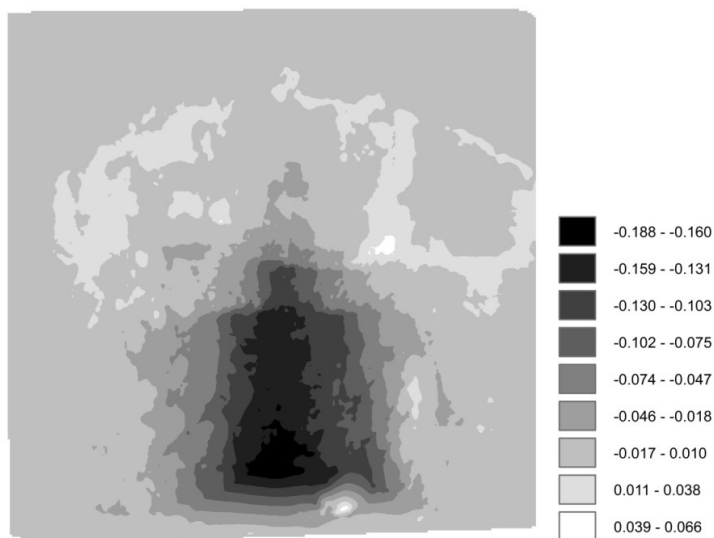
d) metoda odwrotnych odległości



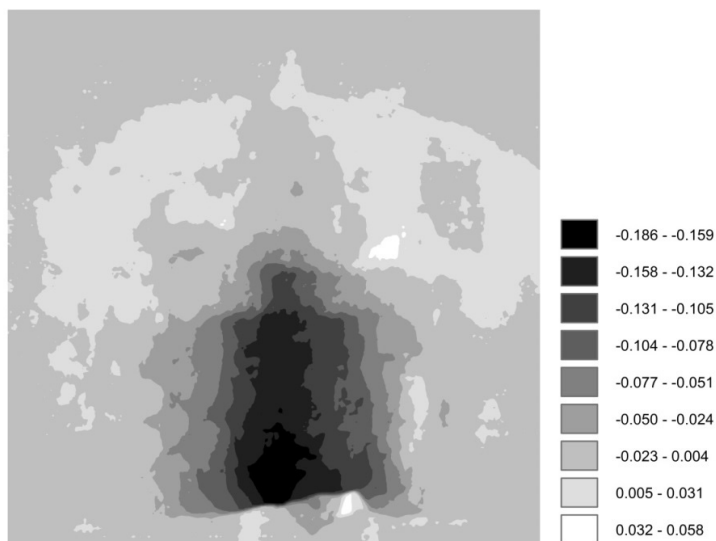
e) metoda krigingu

f) metoda krigingu

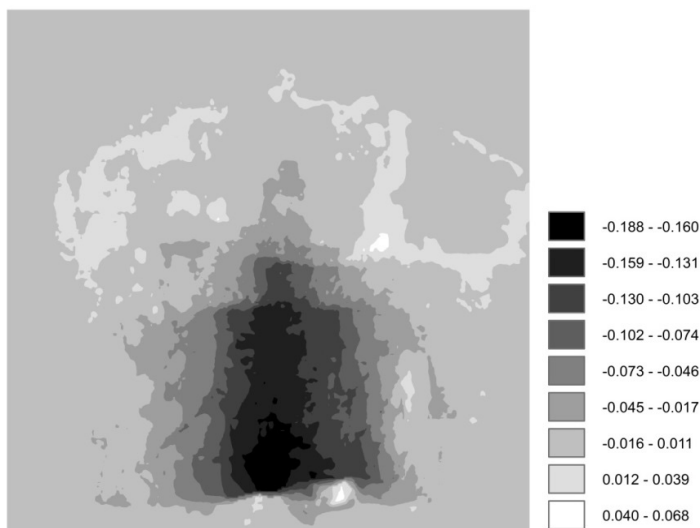
Rys. 5. Wyniki modelowania dna odkrywki trzema metodami dla dwóch pomiarów okresowych



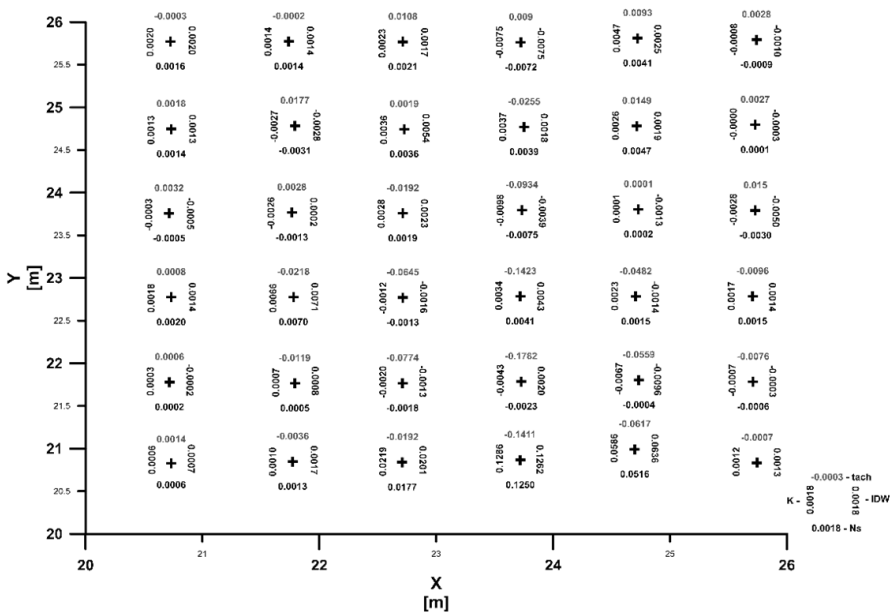
Rys. 6. Model powierzchni przemieszczeń [m] dna odkrywki uzyskany z metody najbliższego sąsiada (NS)



Rys. 7. Model powierzchni przemieszczeń [m] dna odkrywki uzyskany z metody odwrotnych odległości (IDW)

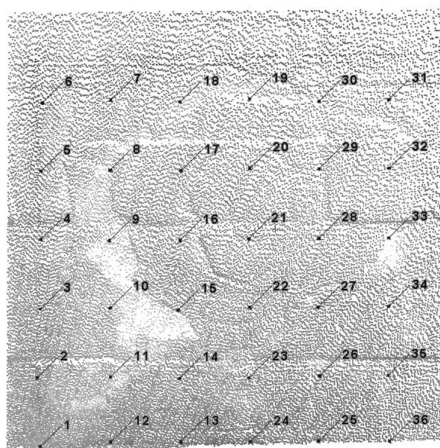


Rys. 8. Model powierzchni przemieszczeń [m] dna odkrywki uzyskany z metody kriginu (K)

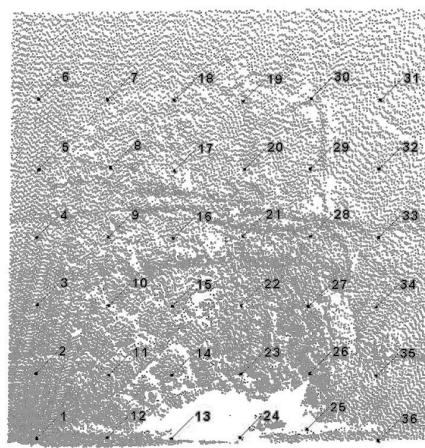


Rys. 9. Zestawienie przemieszczeń pionowych otrzymanych z tachimetrii oraz odchyłek pomiędzy wartościami przemieszczeń z tachimetrii, a wartościami przemieszczeń z poszczególnych metod modelowania

Analizując wartości odchyłek zestawionych na rysunku 9 można stwierdzić, że dla 22 punktów kontrolowanych (co stanowi 61,1% wszystkich punktów kontrolowanych) odchyłki te mieszczą się w granicach dokładności ich wyznaczenia, oszacowanej na poziomie ± 3 mm. Dla kolejnych trzech punktów kontrolowanych (8,3% wszystkich punktów kontrolowanych) odchyłki mieszczą się w granicach ± 7 mm i są podobnej wielkości, niezależnie od użytej metody modelowania. Zgodność ta jest zachowana także dla kolejnych trzech punktów kontrolowanych (8,3% zbioru), dla których wartości odchyłek istotnie rosną: od średnio +20 mm dla punktu nr 13, poprzez średnio +58 mm dla punktu nr 25, do średnio +127 mm dla punktu nr 24. Duże wartości odchyłek w tych punktach nie są przypadkowe, lecz wynikają z niedoskonałości danych ze skaningu użytych do modelowania. Wymienione trzy punkty kontrolowane znajdowały się bowiem na skraju obszaru objętego skanowaniem w trakcie pomiaru wyjściowego (rys. 10a), oraz w sąsiedztwie obszaru nie objętego skanowaniem („dziury” powstałej wskutek zasłonięcia) w trakcie pomiaru kontrolnego (rys. 10b).



a) pomiar wyjściowy



b) pomiar kontrolny

Rys. 10. Niejednorodny rozkład punktów pomiarowych pozyskanych ze skanera z widocznymi obszarami pustymi

W pozostałych ośmiu punktach kontrolowanych (22,3% zbioru) wartości odchyłek były stosunkowo nieduże, ale różniły się w zależności od użytej metody modelowania. Dla sześciu punktów z tej grupy, maksymalne

odchyłki nie przekraczały ± 6 mm, przy wzajemnych różnicach w wartości odchyłek dochodzących do 3 mm. Dla pozostałych dwóch punktów z tej grupy (nr 21 i nr 26) maksymalne odchyłki nie przekraczały -10 mm, przy wzajemnych różnicach w wartościach odchyłek dochodzących do 6 mm dla punktu nr 21 oraz osiągających 9 mm dla punktu nr 26 (który znajdował się w sąsiedztwie „dziury” w chmurze punktów pozyskanych skanerem w trakcie pomiaru kontrolnego).

Podsumowanie

Pomiary pionowych przemieszczeń obiektów inżynierskich z reguły wymagają określenia rzędnych reperów kontrolowanych w poszczególnych epokach pomiarowych z dokładnością dziesiątych części milimetra. W takim przypadku podstawową technologią pomiarową jest bez wątpienia niwelacja precyzyjna, gwarantująca otrzymanie wyników z założoną dokładnością. Wadą tego rozwiązania jest długi czas trwania pomiaru, ograniczona ilość reperów kontrolowanych oraz trudności przy wykonywaniu pomiaru w sytuacji, gdy repery kontrolowane są zamontowane na różnych wysokościach w trudno dostępnych miejscach badanego obiektu.

W przypadku wyznaczania pionowych przemieszczeń obiektów inżynierskich, dla których dokładność rzędu kilku milimetrów jest zadowalająca, alternatywą pomiarową w stosunku do niwelacji precyzyjnej jest tachimetria oraz ciągle rozwijająca się technologia naziemnego skaningu laserowego. Zwłaszcza dotyczy to sytuacji, gdy występują niekorzystne warunki pomiaru, np.: ograniczenie czasu trwania pomiaru do kilkunastu minut oraz brak możliwości stabilizacji punktów kontrolowanych na obiekcie. Tachimetria precyzyjna umożliwia otrzymanie dokładniejszych wyników niż naziemny skaningu laserowy. Wadą tachimetrii jest jednak ograniczona ilość mierzonych punktów, gdy w tym samym czasie ze skanera możemy otrzymać ich miliony.

Pozyskane chmury punktów mogą być przedmiotem dalszych opracowań, takich jak tworzenie ciągłych, rastrowych modeli powierzchni z zastosowaniem odpowiednich algorytmów interpolacyjnych. Aby efekty interpolacji były poprawne poza odpowiednim doбором metod interpolacyjnych i parametrów sterujących tymi metodami, ważne jest pozyskanie odpowiednich danych pomiarowych. W przypadku naziemnego

skaningu laserowego należy zadbać o to, aby pozyskana chmura punktów była jednorodna, nie miała obszarów pustych i na ile to możliwe pokrywała większy obszar niż przeznaczony do późniejszej interpolacji. W przeciwnym wypadku mogą wystąpić zniekształcenia modelowanej powierzchni oraz tzw. efekt krawędzi, polegający na błędnych wynikach interpolacji w obszarach przygranicznych. W przypadku jednorodnych i odpowiednio gęstych zbiorów punktów pomiarowych różne testowane metody interpolacji dają zbliżone do siebie wyniki.

Porównanie dwóch rastrowych modeli powierzchni analizowanego obiektu, zarejestrowanych w różnych epokach czasowych, umożliwia otrzymanie modelu powierzchni przemieszczeń pionowych. Model ten jest ciągły i pokazuje wartość przemieszczeń pionowych w dowolnym punkcie badanej konstrukcji, w odróżnieniu od wyników pomiarów klasycznych, ograniczających się do dyskretnego opisu przemieszczeń w kilkudziesięciu punktach kontrolowanych.

Efektywnym narzędziem przetwarzania chmur punktów otrzymanych z naziemnego skaningu laserowego są programy GIS-owe, które oprócz wbudowanych algorytmów interpolacyjnych oraz narzędzi tzw. algebry mapy mają szerokie możliwości wizualizacji wyników przeprowadzanych analiz.

Literatura:

- [1] Adamek A., Zaczek-Peplińska J., Gergont K., 2012: Analysis of Possibilities to Utilise Results of Laser Scanning in Technical Inspection of Water Dams. FIG Working Week 2012, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, May 6-10, 2012. Rome, Italy;
- [2] Alba M., Fregonese L., Prandi F., Scaioni, M., Valgoi P., 2006: Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', ISPRS Archives – Vol. XXXVI Part 5, September 25-27, 2006. Dresden, Germany;
- [3] Karsznia K., 2008: Geodezyjny i geotechniczny monitoring obiektów inżynierskich w ujęciu dynamicznym. Wykrywanie słabych punktów. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne <http://www.nbi.com.pl/assets/>

- NBI, pdf/2008/4_19_2008/pdf/23_wykrywanie_slabych_punktow.pdf, 15.10.2013;
- [4] Karsznia K., Czarnecki L., Stawowy L., 2010: System ciągłego monitoringu przemieszczeń i deformacji wyrobisk górniczych w PGE KWB Bełchatów S.A. Aspekt funkcjonalny i dokładnościowy. *Górnictwo i Geoinżynieria* 34 (4): 279-288;
- [5] Namysłowska-Wilczyńska B., 2006: *Geostatystyka – teoria i zastosowania*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław;
- [6] Osada E., 2002: *Geodezja. Podręcznik elektroniczny w Mathcadzie 2001i*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław;
- [7] Schäfer T., Weber T., Kyrinovič P., Zámečniková M., 2004: Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, November 11-13, 2004. Bratislava, Slovakia;
- [8] Van Cranenbroeck J., Brown N., 2004: Networking Motorized Total Stations and GPS Receivers for Deformation Measurements. FIG Working Week May 22-27, 2004. Athens, Greece;
- [9] Wan Aziz W.A., Zulkarnaini M.A., Shu K.K., 2005: The Deformation Study of High Building Using RTK-GPS: A First Experience in Malaysia. FIG Working Week 2005 and GSDI-8, April 16-21, 2005. Cairo, Egypt;
- [10] Zaczek-Peplińska J., Pasik M., Popielski P., 2013: Geodezyjny monitoring obiektów w rejonie oddziaływania budowy tuneli i głębokich wykopów –doświadczenia i wnioski. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 12 (2): 17-31;
- [11] Zogg H.-M., Ingensand H., 2008. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring - load tests on the Felsenau viaduct (CH). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5, Beijing, s. 555-561.

Izabela Wilczyńska, Robert Świerzko, Kazimierz Ćmielewski

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

e-mail: izabela.wilczynska@igig.up.wroc.pl, robert.swierzko@up.wroc.pl,
kazimierz.cmielewski@igig.up.wroc.pl

Bartłomiej Ćmielewski

Politechnika Wrocławska

e-mail: bartlomiej.cmielewski@pwr.wroc.pl

**Geodezyjne monitorowanie elementów obiektów budowlanych
na przykładzie pomiaru ugięcia belki żelbetowej**

Wstęp

Przedsiębiorstwa związane z branżą geodezyjną oraz wykonawcy robót geodezyjnych podejmują się nowych wyzwań związanych z monitoringiem obiektów i budowli. Sprawują zarówno kontrolę nad obiektami nowo wznoszonymi, jak i już użytkowanymi (np. budowle inżynierskie, które wymagają stałej lub okresowej kontroli) oraz ich otoczeniem, na które mogą wywierać wpływ inne obiekty czy czynniki atmosferyczne [Bryś i inni 2007a]. Aby sprostać współczesnym wymaganiom zawartych w przepisach technicznych konieczna jest możliwość określania z wysoką dokładnością przemieszczeń i odkształceń elementów obiektów budowlanych. Wyznaczenie tych parametrów z milimetrową dokładnością ma duże znaczenie w odniesieniu do weryfikacji rzeczywistego zachowania monitorowanych elementów budowlanych w stosunku do obowiązujących norm oraz ich teoretycznego projektu / modelu. Analizy danych pozyskanych przez geodetów dokonują eksperci budowlani, którzy sporządzają opinie techniczne oraz ekspertyzy celem wyznaczenia odchyłek wymiarów wraz z oceną błędów, dla poznania charakteru czynników wywołujących

odkształcenia obiektu, co przyczynia się do wzrostu bezpieczeństwa oraz efektywności użytkowania.

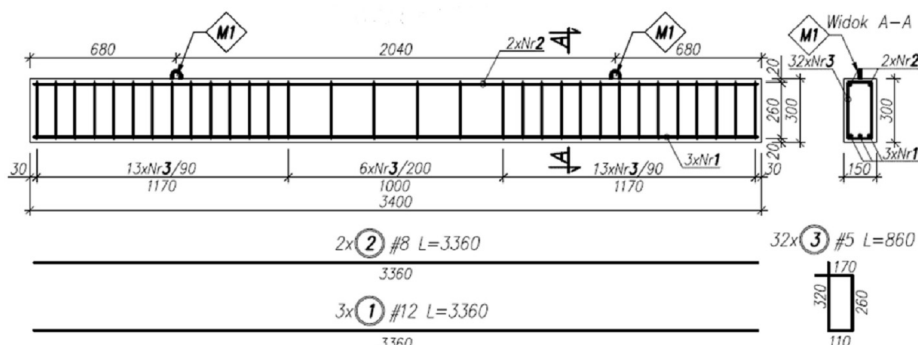
Konstrukcje żelbetowe są ustrojami betonowymi celowo wzmocnionymi prętami zbrojeniowymi przenoszącymi naprężenia rozciągające. Każda konstrukcja budowlana, a więc i żelbetowa, powinna spełniać wymagania niezawodności, takie jak: przenoszenie oddziaływań, wykazanie odpowiedniej trwałości, zachowanie sztywności. Przemieszczenia i odkształcenia ustrojów konstrukcyjnych następują w wyniku oddziaływań. Podstawową cechą opisującą stan belkowego elementu budowlanego jest strzałka ugięcia, przez którą należy rozumieć wektor maksymalnego przemieszczenia powstającego wskutek przyłożonego obciążenia. Ugięcie belkowych elementów konstrukcyjnych podlega kontroli oraz jest uwzględniane w ramach weryfikacji stanu granicznego użytkowalności (SGU). Nadmierne ugięcia mogą prowadzić do awarii konstrukcji, nawet niewielkie mogą prowadzić do utraty zdolności eksploatacyjnych konstrukcji lub przyczynić się do uszkodzenia elementów przylegających do konstrukcji [Bryś i in. 2007b].

Tradycyjny geodezyjny monitoring elementów obiektów budowlanych polega na pomiarze kątów i odległości, przewyższeń oraz pochyłości obiektu. Są to pomiary punktowe, okresowe, a podstawową ich wadą jest konieczność wizury między instrumentem a elementem, a nawet bezpośredniego kontaktu. Wydaje się to być niewystarczające ze względu na okresowość informacji opisujących stan poszczególnych elementów obiektu. Kolejną przeszkodą implementacji całodobowego monitoringu są koszty związane z instalacją oraz eksploatacją aparatury. Dlatego poszukuje się alternatywnych rozwiązań mogących wspomóc klasyczne metody pomiarowe [Kowalski K. 2007].

W pracy tej przedstawiono zastosowanie różnorodnych metod pomiarów dla pozyskania informacji o przemieszczeniach i zmianach kształtu elementu budowlanego –żelbetowej belki konstrukcyjnej. Przeprowadzono pomiary klasyczne oraz autorskie rozwiązania mające na celu wsparcie standardowych technik, jak i obniżenie kosztów związanych z instalacją i użytkowaniem monitoringu geodezyjnego obiektu.

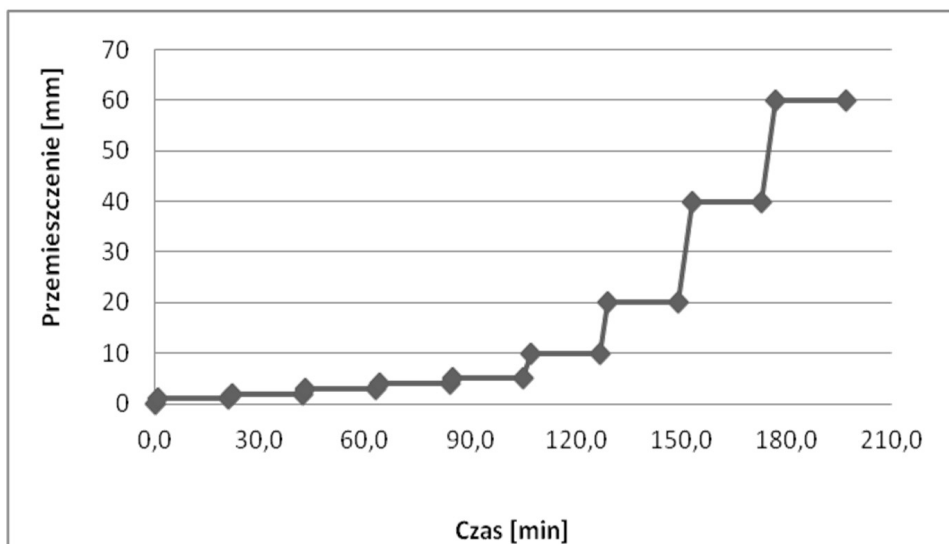
Badania laboratoryjne

Badania zostały zrealizowane w Laboratorium Technologii Materiałów i Konstrukcji Budowlanych w Instytucie Budownictwa na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu. Podczas prac laboratoryjnych analizowano stan geometryczny zginanej belki żelbetowej przedstawionej na rysunku 1. Badaniu poddano belkę żelbetową swobodnie podpartą o długości 3,4 m, zbrojeniu głównym 3 ϕ 12 oraz o stałym przekroju 0,150 x 0,300 m. Podpory umieszczono w odległości 3,00 m. Pomiary wykonano przy użyciu klasycznych metod, takich jak: niwelacja precyzyjna (Leica DNA03), skaningu laserowego (Leica ScanStation C10), pomiary pochyłomierzem Nivel210 oraz pomiary oparte o autorskie rozwiązania. Wykorzystano również czujniki przemieszczeń liniowych PTX, które uznano za najbardziej wiarygodną metodę pomiaru ze względu na ich ciągły pomiar w tym samym punkcie oraz wysoką dokładność.

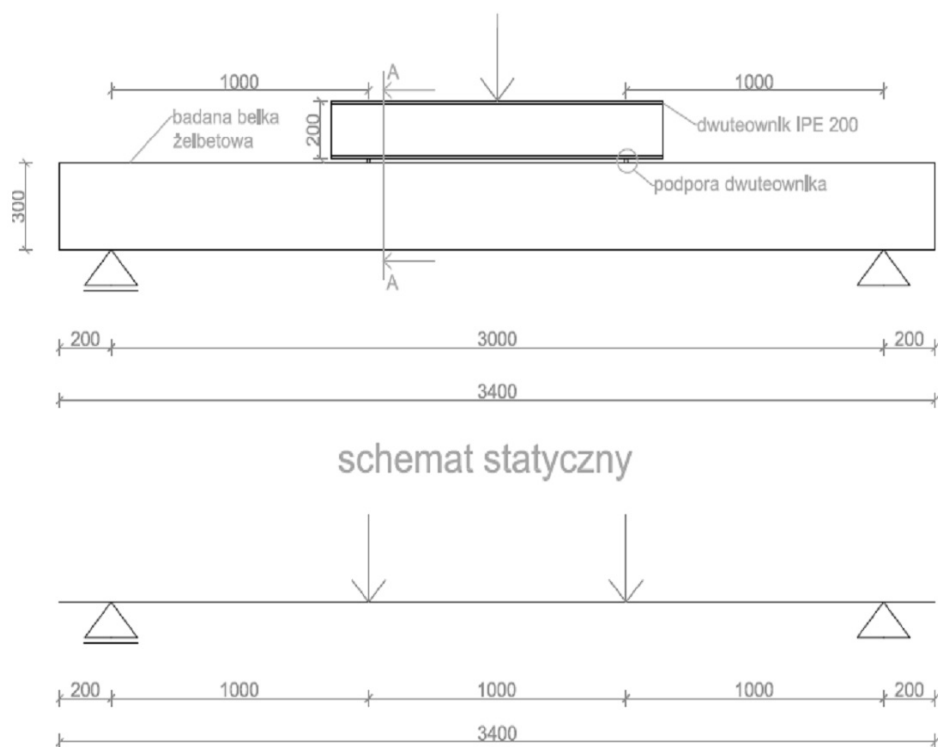


Rys. 1. Belka żelbetowa - geometria i zbrojenie

Obciążenie zadane zostało tak, aby w poszczególnych fazach pomiarowych belka miała stałe ugięcie. Pierwszy pomiar był pomiarem wyjściowym przed obciążeniem, oznaczony jako „0”. Kolejne pomiary były do 1mm, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 40, 60 mm. Przyrost siły następował w tempie 1mm/1minutę do 5mm, następnie z prędkością 2,5 mm/1minutę do 10 mm oraz z prędkością 5mm/1minutę do 60mm. Rysunek 2 przedstawia wykres założonych zmian przemieszczenia belki w punkcie środkowym w czasie. Odciążenie wykonano z prędkością 30 mm/1minutę. Normowe graniczne ugięcie belki stropów o długości $l_{eff} < 6,0$ m wynosi $a_{lim} = l_{eff}/200$ zatem w naszym przypadku jest to $a_{lim} = 3000 \text{ mm}/200 = 15 \text{ mm}$. Przyjęty schemat statyczny przedstawia rysunek 3.



Rys. 2. Cykl obciążania belki żelbetowej



Rys. 3. Przyjęty schemat statyczny badanej belki żelbetowej

Obliczenia teoretyczne

Przy znanych wymiarach przekroju poprzecznego 300 x 150 mm, znanej klasie betonu określonej metodą sklerometryczną oraz układzie, przekroju i gatunku stali zbrojenia rozciąganego A_{s1} oraz ściskanego A_{s2} A_{IIIIN} możliwe jest określenie nośności przekroju żelbetowego na zginanie [Łapko A. 2000, Ostrowska-Maciejewska J. 2007]. W tym celu wymagane jest uprzednie wyznaczenie względnego zasięgu efektywnej strefy ściskanej ξ_{ef} . Z równania równowagi wypadkowych sił poziomych na oś podłużną elementu otrzymujemy:

$$\xi_{ef} db \cdot n f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{cs} - A_{s1} \cdot f_{yd} = 0 \quad (1)$$

Zatem względny zasięg efektywnej strefy ściskanej można obliczyć po przekształceniu wzoru:

$$\xi_{ef} = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} - A_{s2} \cdot \sigma_{cs}}{b \cdot n f_{cd}} \quad (2)$$

Moment rysujący

$$M_{cr} = \sigma_{ct} \cdot W_{ct} = \frac{bh^2}{6} \quad (3)$$

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{3} = \frac{P \cdot L}{6} \quad (4)$$

Siła rysująca

$$\frac{P \cdot L}{6} = f_{ctm} \cdot \frac{bh^2}{6} \quad (5)$$

$$P = f_{ctm} \cdot \frac{bh^2}{L} \quad (6)$$

$$f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa} \quad (7)$$

Beton, z którego wykonano belkę został określony przez firmę wykonującą element konstrukcyjny jako beton klasy B-25. Wartość siły rysującej powinna zatem wynosić dla niego:

$$P = 2,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,15 \cdot 0,3^2}{3} = 9,9 [\text{kN}] \quad (8)$$

Wykonano jednak badania młotkiem Schmitda w celu określenia rzeczywistej klasy betonu.

$$\bar{L} = 50 \quad (9)$$

$$f_{cm} = 57 \text{ MPa} \quad (10)$$

Co odpowiada betonowi B-50

$$f_{cm} = 3,5 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$P = 15,75 \text{ kN} \quad (12)$$

Jest to wartość siły obciążającej, dla której powinny pojawić się rysy na tym elemencie konstrukcyjnym. Zatem gdy obciążenie jest niższe niż 15.75kN, należy traktować element jak w pierwszej fazie.

W niezarysowanym elemencie zginanym w teorii linowej sprężystości (faza I) strzałkę ugięcia elementu wyznacza się na podstawie krzywizny $1/r$, którą można obliczyć z uproszczonego równania osi odkształconej elementu. Jeżeli w elemencie zginanym moment zginający nie przekracza momentu rysującego M_{cr} , czyli spełniony jest warunek: $M_{Ed} \leq M_{cr}$, to strzałkę ugięcia pod obciążeniem krótkotrwałym można obliczyć ze wzoru 13 ugięcie elementów niezarysowanych:

$$a = \alpha_k \cdot \frac{M_{Ed} \cdot l_{eff}^2}{B_I} \quad (13)$$

l_{eff} – rozpiętość efektywna elementu,

α_k – współczynnik wyrażający wpływ rodzaju obciążenia i warunków brzegowych w elemencie,

B_I – sztywność przekroju elementu w fazie I odpowiadająca momentowi obliczeniowemu M_{Ed} .

$$\alpha_k = \frac{1}{8} - \frac{\lambda^2}{6} = 0,106481[-] \quad \lambda = \frac{1}{3} \quad (14)$$

$$M_{Ed} = \frac{PL}{6} \quad (15)$$

$$l_{eff} = 3,0[m] \quad (16)$$

$$B_I = E_{cm} \cdot I_I \quad (17)$$

E_{cm} – średni moduł sprężystości betonu,

I_I – moment bezwładności przekroju w fazie I.

Moment bezwładności obliczono zgodnie z twierdzeniem Steinera

$$I_I = \frac{1}{12} b \cdot h^3 + b \cdot h \left(x_1 - \frac{h}{2} \right) + \alpha_e \cdot A_{s2} (x_1 - a_2)^2 + \alpha_e \cdot A_{s1} (d - x_1)^2 \quad (18)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200}{35} = 5,71[-] \quad (19)$$

$$x_I = \frac{0,5 \cdot b \cdot h^2 + \alpha_e (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot a_2)}{b \cdot h + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2})} = 0,1535[m] \quad (20)$$

$$A_{s1} = 3,39 \text{ cm}^2 = 3,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (21)$$

$$A_{s2} = 1,01 \text{ cm}^2 = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$a_2 = 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m} \text{ (otulina)}$$

$$d = 274 \text{ mm} = 0,274 \text{ m} \text{ (wysokość użyteczna przekroju)}$$

$$I_I = 5,24 \cdot 10^{-4} [\text{m}^4] \quad (22)$$

$$B_I = E_{cm} \cdot I_I = 18687,26 [\text{kPa} \cdot \text{m}^4] \quad (23)$$

Dla obciążeń długotrwałych należy wykorzystać efektywny moduł sprężystości (z uwzględnieniem pęłzania betonu). Należy wówczas ponad to uwzględnić wpływ skurczu betonu na krzywiznę elementu żelbetowego. Gdy wartość obciążenia przekroczy 15.75kN mamy do czynienia z pojawieniem się rys w elemencie konstrukcyjnym. Wówczas przekroje zarysowane znajdują się w fazie II. W takim przypadku sztywność podlega zmianom na

długości elementu, a zmiany te mogą być znaczne nawet w sąsiednich przekrojach.

Równanie sumy momentów statycznych obliczonych względem osi obojętnej x_{II} przekroju:

$$\frac{bx_{II}^2}{2} + \alpha_e \rho_2 bd(x_{II} - a_2) - \alpha_e \rho_1 bd(d - x_{II}) = 0 \quad (24)$$

Gdzie:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{bd} = 0,008248 ;$$

$$\rho_2 = \frac{A_{s2}}{bd} = 0,002457 ;$$

$$x_{II} = d \left(\sqrt{\alpha_e^2 (\rho_1 + \rho_2)^2 + 2\alpha_e \left(\rho_1 + \frac{a_2}{d} \rho_2 \right)} - \alpha_e (\rho_1 + \rho_2) \right) \quad (25)$$

Na podstawie wyznaczonego położenia osi obojętnej obliczono moment bezwładności w analizowanym przekroju zarysowanym:

$$I_{II} = \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot \rho_1 \cdot b \cdot d (d - x_{II})^2 + \alpha_e \cdot \rho_2 \cdot b \cdot d (x_{II} - a_2)^2 \quad (26)$$

$$I_{II} = 9,899 \cdot 10^{-5} m^4 \quad (27)$$

Po wyznaczeniu momentu bezwładności można obliczyć maksymalne naprężenia w betonie w strefie ściskanej oraz w zbrojeniu rozciągającym. Naprężenia w skrajnym ściskanym włóknie betonu

$$\sigma_c = \frac{M}{I_{II}} \cdot x_{II} \quad (28)$$

Naprężenia w zbrojeniu rozciągającym

$$\sigma_s = \alpha_e \frac{M}{I_{II}} (d - x_{II}) \quad (29)$$

$\beta_1 = 1,0$ (pręty żebrowane)

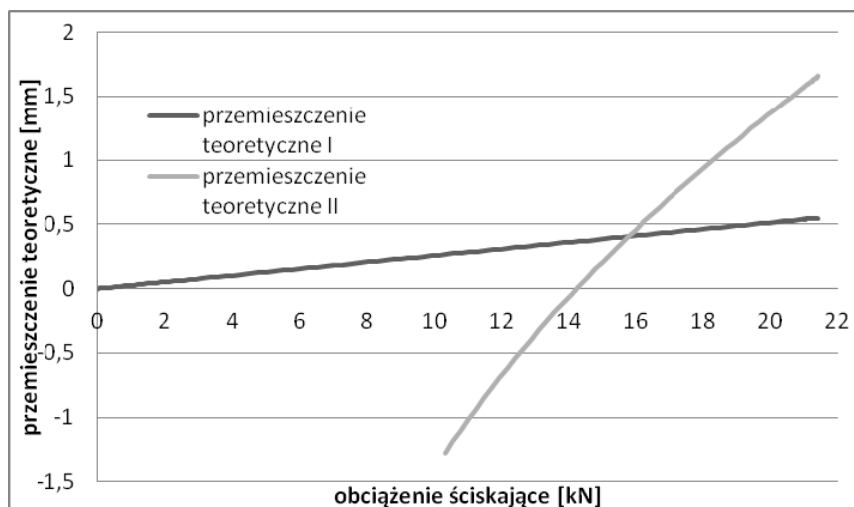
$\beta_2 = 1,0$ (obciążenie krótkotrwałe)

$$B_0 = \frac{E_{cm} \cdot I_{II}}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{II}}{I_I}\right)} \quad (30)$$

M_{Ed} – moment zginający wywołany obciążeniem krótkotrwałym.

$$a = \alpha_k \cdot \frac{M_{Ed} \cdot l_{eff}^2}{B_0} \quad (31)$$

Wzór ten obowiązuje do przekroczenia naprężeń w betonie i stali. Zobrazowanie powyższych obliczeń przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wartość przemieszczenia teoretycznego w zależności od przyłożonej siły

Prace doświadczalne

Niwelacja precyzyjna DNA03

Niwelacja precyzyjna wykonana została przy pomocy niwelatora kodowego DNA03 oraz przy użyciu krótkiej łąty inwarowej kodowej. Do belki od spodu zostały przyklejone żywicą epoksydową bolce (rysunek 5), do których przykładana była łąta. Pięć punktów kontrolowanych zostało umieszczonych równomiernie na belce. Wyniki niwelacji zostały zestawione w tabeli 1. Jak można zauważyć, punkt znajdujący się w połowie belki uległ największym przemieszczeniom.

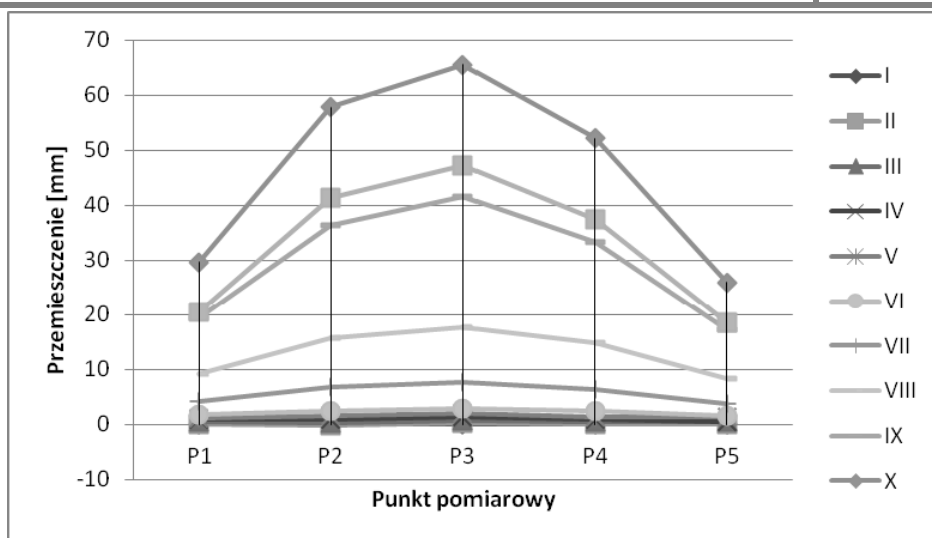
Graficzną interpretację uzyskanych wyników przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Punkt pomiarowy, niwelator precyzyjny DNA 03 wraz z krótką łąką kodową

Tabela 1. Wyniki niwelacji precyzyjnej dla pięciu punktów kontrolowanych – przemieszczenie punktów kontrolnych

	Przemieszczenie [mm]					
	P1	P2	P3	P4	P5	
Cykl pomiarowy	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	-0.01	-0.10	0.30	0.01	0.00
	III	0.40	0.24	0.73	0.44	0.53
	IV	0.85	0.99	1.27	0.98	0.57
	V	1.10	1.60	2.06	1.44	1.25
	VI	1.68	2.49	2.94	2.46	1.46
	VII	4.10	6.68	7.74	6.39	3.72
	VIII	9.25	15.65	17.69	14.72	8.23
	IX	19.33	36.43	41.63	33.37	17.19
	X	29.62	57.81	65.55	52.18	25.97
	XI	20.45	41.31	47.31	37.37	18.56



Rys. 6. Krzywa łańcuchowa przedstawiająca ugięcie belki dla poszczególnych cykli obciążenia

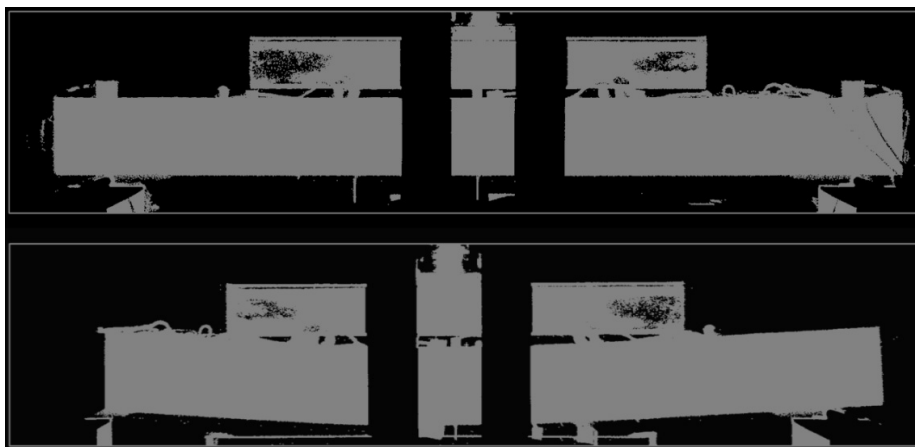
Skanywanie laserowe

Metoda skanowania laserowego pozwala na określenie zjawiska w ujęciu zarówno punktowym jak i powierzchniowym. Dokładności uzyskiwane przez tę metodę są wystarczające do określenia zachodzących zjawisk deformacji [Ćmielewski B. 2009, Van Genechten B. 2009]. Do badań wykorzystano impulsowy skaner laserowy Leica ScanStation C10. Stanowisko badawcze wraz z ustawieniem instrumentu przedstawiono na rysunku 7. Takie ustawienie skanera nie zapewniało optymalnego uzyskania informacji o obiekcie. Podczas przeprowadzonych analiz zebranego materiału stwierdzono, że optymalne ustawienie skanera powinno się znajdować prostopadle do badanego obiektu na wysokości pozwalającej na inwentaryzację dwóch krawędzi, pod kątem nie ostrzejszym niż 45°.



Rys. 7. Stanowisko badawcze z pozycją skanera laserowego

Na rysunku 6 można zauważyć tarcze HDS pozwalające na pomiar punktowy zjawiska. Natomiast chmura punktów i powstały na jej podstawie model pozwala na analizy powierzchniowe zachodzących deformacji. Takie zestawienie poszczególnych modeli pozwala na określenie zmian zachodzących nie tylko wzdłuż elementu, ale także w profilu poprzecznym. Szczególną uwagę należy zwrócić uwagę na zmiany zachodzące w profilu poprzecznym w miejscu największego ugięcia elementu. Na rysunku 8 przedstawiono pogłądowe zestawienie wyników pomiarów z dwóch stanów.



Rys. 8. Chmura punktów przedstawiająca badany obiekt (góra – stan wyjściowy, dół – stan maksymalnego obciążenia)

Pochyłomierz Leica Nivel 210

Urządzenie to służy do pomiaru wychylenia osi instrumentu od linii pionu, a więc jego kierunku w osiach X, Y i wartości. Pomiaru dokonuje bazując na rozwiązaniach optoelektronicznych, równocześnie ze wskazaniem i kompensacją temperatury. Pochyłomierze Nivel210 wykorzystywane są przede wszystkim na dużych budowach, takich jak zapory, wysokościowe obiekty inżynierskie czy mosty, jak również do kontroli stanowisk tachymetrycznych, stacji referencyjnych GNSS. Przyrząd ten może podać informacje o wychyleniach i kierunku ruchów o rozdzielczości 0.01 mrad (1mm/100m). Może współpracować z oprogramowaniem do monitoringu dzięki wyposażeniu w port RS232/485. Dane pozyskiwane są w czasie rzeczywistym o rozdzielczości od 1sek dzięki czemu może on znaleźć zastosowanie w systemie ostrzegania przed zagrożeniami.

Podczas badania stanu geometrycznego belkowych elementów konstrukcyjnych ważne jest określenie przemieszczeń obiektu. Reprezentacyjną wartością przemieszczeń takich elementów jest strzałka ugięcia, którą określa wektor maksymalnego przemieszczenia. Nivel (rysunek 9) nie podaje nam bezpośrednio informacji o wartości ugięcia, jednak na podstawie obliczeń, przy odpowiednich założeniach brzegowych można obliczyć wartość tego parametru. Niemniej jednak nie otrzymamy wówczas informacji o przemieszczeniu całego elementu, a jedynie o jego odkształceniu.



Rys. 9. Pochyłomierze umieszczone na belkowym elemencie konstrukcyjnym podczas badań laboratoryjnych

Zakres kątowy urządzenia pozwolił na kontrolę badanego obiektu tylko w początkowych fazach obciążania.

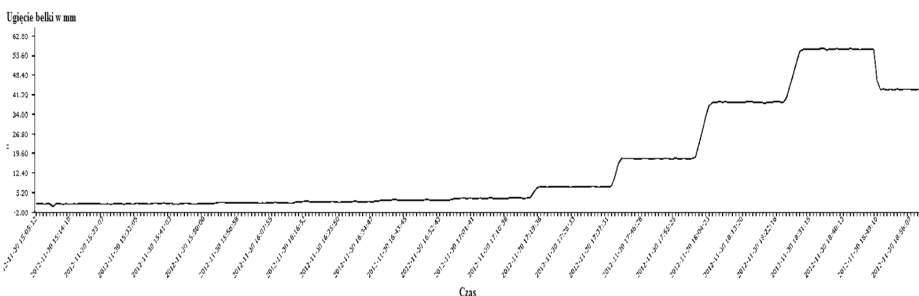
Technologia MEMS

Technologia MEMS jest coraz bardziej popularna ze względu na aspekt finansowy oraz miniaturyzację urządzeń. Do najbardziej popularnych zaliczyć można akcelerometry, żyroskopy, magnetometry, mikrofony, czujniki wibracji, itd. W badaniach doświadczalnych na belce skupiono się na wykorzystaniu jednego urządzenia – akcelerometru. Podczas spoczynku kiedy nie ma oddziaływań dynamicznych wskazania akcelerometru pozwalają na pomiar siły grawitacji. Wykorzystując urządzenia trzy osiowe można obliczyć kąty pochylenia (32), przechylenia (33) oraz odchylenia od linii pionu [Ćmielewski B. 2011].

$$\rho = \arctan\left(\frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{pz}^2 + G_{py}^2}}\right) \quad (32)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2}}{G_{pz}}\right) \quad (33)$$

Opracowano moduł pomiarowy wykorzystujący jeden z popularniejszych i tanich akcelerometrów cyfrowych. Przeprowadzono serie kalibracji i testów dokładnościowych, które pozwoliły uzyskać dokładności pomiarowe 0.3mm/m. Dane były pozyskiwane w czasie rzeczywistym z częstotliwością 1Hz, graficzna reprezentacja wyników pomiaru została przedstawiona na rysunku 10.



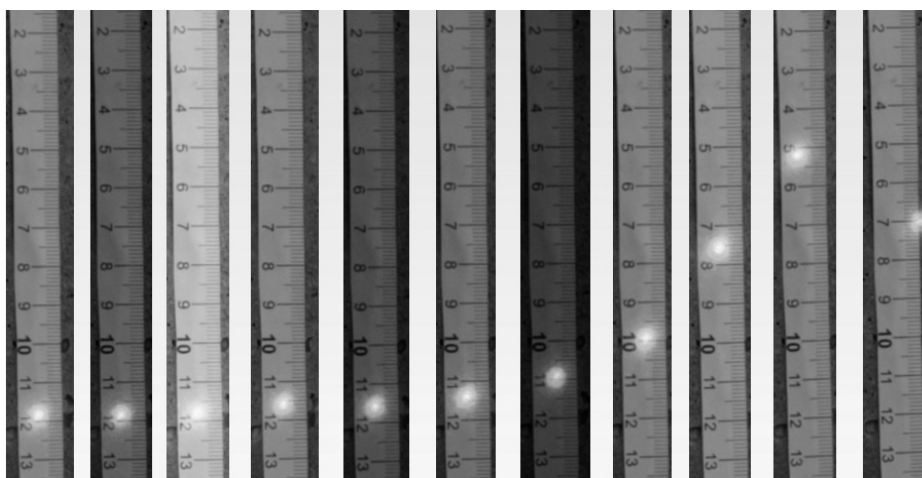
Rys. 10. Wyniki pomiarów z wykorzystaniem technologii MEMS

Wykorzystanie diody laserowej z przymiarem liniowym

Kolejną autorską metodą pomiarową było wykorzystanie diody laserowej oraz przymiaru liniowego. Wykonanie serii zdjęć w trakcie badań pozwoliło na śledzenie zachodzących zmian. Poprzez obliczenie środka energetycznego plamki na tle przymiaru liniowego określono położenie w każdym z cyklów. Zestawienie ujęć poszczególnych cykli przedstawiono na rysunku 11 oraz w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów za pomocą diody laserowej i przymiaru w poszczególnych cyklach pomiarowych

Cykl pomiarowy	Odczyty z przymiaru [cm]	Przemieszczenie [mm]
I	11,85	0,0
II	11,80	0,5
III	11,75	1,0
IV	11,65	2,0
V	11,60	2,5
VI	11,48	3,7
VII	10,95	9,0
VIII	9,95	19,0
IX	7,60	42,5
X	5,20	66,5
XI	7,05	48,0



Rysunek 11. Zestawienie ujęć poszczególnych cykli pomiarowych

Podsumowanie

Ugięcie elementu żelbetowego jest funkcją wielu parametrów wpływających na odkształcenia i naprężenia w betonie i stali zbrojeniowej, zależnych od poziomu obciążenia, właściwości materiału i zarysowania. Porównania poszczególnych metod dokonano na podstawie zależności obciążenie - przemieszczenie (tabela 3).

Metody przedstawione w artykule nie wyczerpują sposobów kontroli geometrycznej elementu konstrukcyjnego. Zestawienie opisanych metod pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących czasochłonności, dostępu pomiaru jak i kosztowności instalacji oraz użytkowania systemu opartego o te techniki.

Niwelacja precyzyjna wymaga niewielkiej ingerencji w element konstrukcyjny – instalacja jednoznacznych punktów. Z uwagi na ułożenie belek stropowych na znacznej wysokości nie zawsze jest możliwa do wykonania.

Metoda laserowa nie wymaga ingerencji w obiekt, jednak niezbędna jest wizura pomiędzy diodą laserową a pryzmatem oraz wykonywanie zdjęć.

Skanowanie laserowe jest czasochłonne – inwentaryzacja belki to czas około 10 minut z rozdzielczością 1cm x 1cm, można by usprawnić proces wykorzystując skanery fázowe jednak należy mieć na uwadze, że najlepsze wyniki osiągnane są przy pomiarach z tego samego miejsca obserwacyjnego. Możliwość zastosowania pochyłomierzy oraz technologii MEMS eliminuje podstawowe wady metod tradycyjnych (przesłonięcia na osi celowej, brak dostępu do miejsc pomiarowych z uwagi na powiązania konstrukcyjne obiektu itp.), niemniej jednak są to pomiary względne.

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów poszczególnych metod

Faza obciążenia			PRZEMIESZCZENIE [mm]						
Cykl pomiarowy	Przemieszczenie [mm]	Obciążenie [kN]	Obliczeniowe	PTX	DNA03	Skaner laserowy	Nível	Płamka lasera	MEMS
I	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
II	1	1.5	0.06	0.07	0.30	0.11	0.56	0.50	0.13
III	2	10.8	0.46	0.55	0.73	0.83	1.05	1.00	0.41
IV	3	20.0	0.83	1.05	1.27	1.56	1.60	2.00	1.21
V	4	24.8	1.07	1.75	2.06	2.00	2.32	2.50	1.94
VI	5	27.9	1.21	2.63	2.94	3.01	3.29	3.70	2.83
VII	10	50.4	2.12	7.03	7.74	7.44	6.77	9.00	6.87
VIII	20	90.6	3.78	16.18	17.69	17.67	-	19.00	18.23
IX	40	99.2	4.12	38.36	41.63	41.52	-	42.50	40.70
X	60	103.0	4.13	60.42	65.55	65.08	-	66.50	61.40
XI	-	0.0		43.92	47.31	46.90	-	48.00	46.35

Wszystkie metody wykazują zbliżoną tendencję pomiarową. Proponowanym rozwiązaniem problemu monitorowania belek żelbetowych jest zastosowanie pochyłomierzy – urządzeń MEMS oraz prostych metod wykorzystujących diody laserowe, jako uzupełnienie pomiarów geodezyjnych. Z uwagi na możliwość ciągłej pracy i rejestracji danych pochyłomierzy zarówno komercyjnych jak i opracowanej koncepcji, celowe jest przeprowadzanie filtracji i analiz wyników pomiarów w czasie pseudo rzeczywistym. Aby osoba interpretujący wyniki mogła stwierdzić znaczną nieprawidłowość, lub gdy parametry osiągną podane przez eksperta wartości dopuszczalne, wówczas należy zastosować się do zasad bezpieczeństwa. W przypadku gdy zagrożenie nie jest duże, zalecane są pomiary kontrolne w odpowiednich interwałach czasu, natomiast przy wysokim zagrożeniu należy rozważyć wyłączenie obiektu z eksploatacji celem uniknięcia

katastrofy budowlanej oraz wykonania kompleksowych pomiarów geodezyjnych.

Podziękowania

Realizacja badań przedstawionych w niniejszej publikacji znalazła częściowo sfinansowana ze środków na lata 2012-2015 Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego, Wydział Gospodarki, w ramach realizacji projektu systemowego pn. „GRANT PLUS” (Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki, Działanie 8.2 Transfer Wiedzy, Poddziałania 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji).

Literatura

- [1] Bryś H., Ćmielewski K., Kowalski K., 2007a: Interwencyjny monitoring deformacji dźwigara przekrycia dachowego telemetrycznym systemem pomiarowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, Gliwice;
- [2] Bryś H., Ćmielewski K., Kowalski K., 2007b: Monitoring geodezyjny ugięcia dźwigara przekrycia dachowego hali – koncepcja, rozwiązanie konstrukcyjne i pomiary testowe systemu pomiarowego, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna "Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej", Warszawa-Białobrzegi, 30-31 marca 2007;
- [3] Ćmielewski B., Kontny B., Ćmielewski K. 2011: Use of MEMS technology in mass wasting research, Reports on Geodesy, Vol. 1 No. 90, Warszawa 2011, pp. 85-92;
- [4] Ćmielewski B., Mąkowski K., 2009: Porównanie geodezyjnych metod klasycznych oraz technologii HDS do określenia odkształceń kratowej konstrukcji masztu, Wiadomości Konserwatorskie 26 (2009), str. 718-726, ISSN 0860-2395;
- [5] Kowalski K., Konstrukcje systemów pomiarowych do kontroli ugięć dźwigarów przekryć dachowych hal wielkogabarytowych, PRZEGLĄD GEODEZYJNY 2007/12;
- [6] Łapko A., Projektowanie konstrukcji żelbetowych, 2000. ISBN 83-213-4170-5;

-
- [7] Ostrowska-Maciejewska J., 2007: Podstawy i zastosowania rachunku tensorowego, prace IPPT, ITRF reports;
- [8] Van Genechten B., Schueremans L., 2009: Laserscanning for heritage documentation, *Wiadomości Konserwatorskie* 26 (2009), str. 727-737, ISSN 0860-2395.

Krzysztof Karsznia

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

e-mail: krzysztof_karsznia@sggw.pl

Adrianna Tarnowska

Politechnika Warszawska

Wydział Geodezji i Kartografii

e-mail: a.tarnowska@gik.pw.edu.pl

Zintegrowany system geodezyjnego monitorowania osuwisk jako element infrastruktury zapewnienia bezpieczeństwa

Wstęp

Poczucie bezpieczeństwa należy do najbardziej podstawowych ludzkich potrzeb. Mówiąc o bezpieczeństwie, mamy na myśli bardzo wiele czynników oraz przypadków, które rozpatrywane łącznie świadczą o jego wielowymiarowości. Nieco inaczej bowiem postrzegamy problematykę bezpieczeństwa międzynarodowego, publicznego, energetycznego, bezpieczeństwa państwa, czy też danych. Każde ze wspomnianych zagadnień jest w pewnym sensie odrębnym wymiarem składającym się z charakterystycznych dla niego cech. Przykładowo, bezpieczeństwo międzynarodowe zależy między innymi od jakości współpracy poszczególnych krajów, rozwoju wzajemnego zaufania, kształtowania powiązań gospodarczych czy budowania świadomości obywateli w odniesieniu do historii, kultury, ekonomii i innych dziedzin życia. Można również rozpatrywać bezpieczeństwo energetyczne, którego zapewnienie zależy między innymi od odpowiedniego poziomu inwestycji poczynionych w procesy wytwarzania energii oraz w drogi jej przesyłu. Pojawia się w tym miejscu także problem dywersyfikacji źródeł jej pochodzenia i wytwarzania, a także długofalowej polityki związanej z omawianą tematyką. Mówiąc

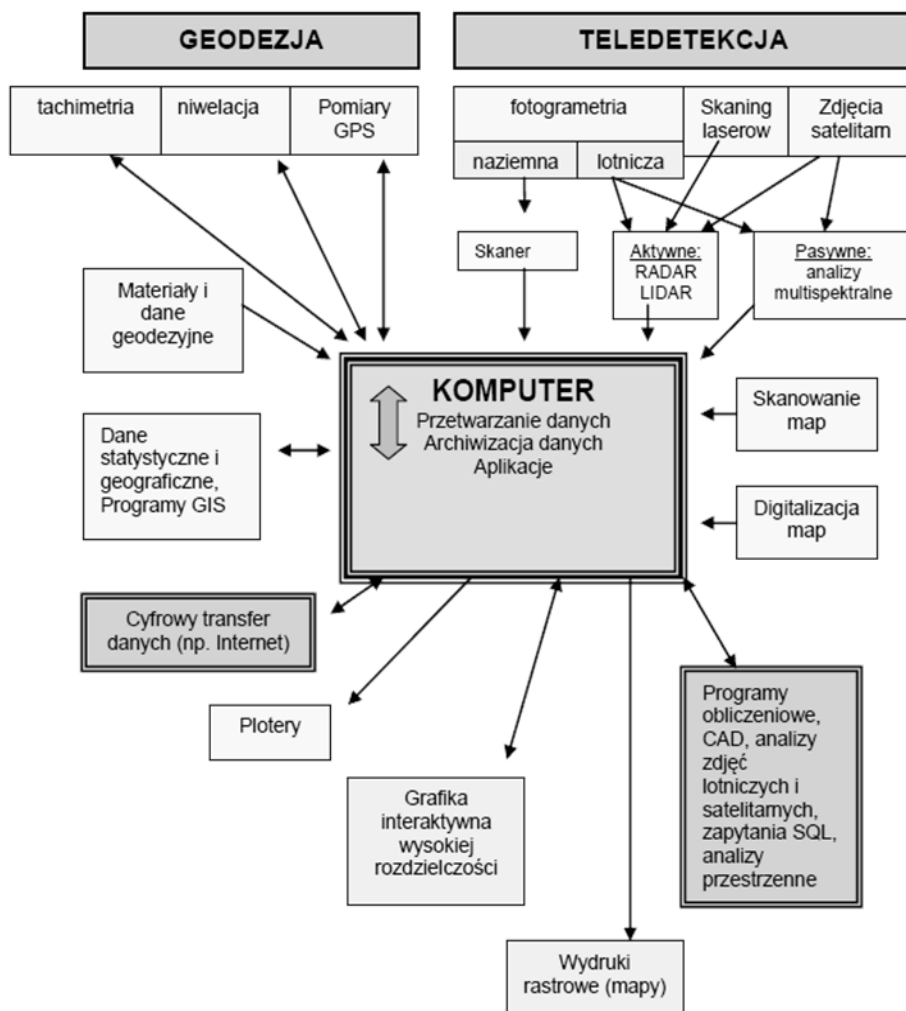
o bezpieczeństwie, można się odnieść do takich zagadnień jak globalizacja, zmiany demograficzne czy funkcjonowanie służb państwa. Są to niewątpliwie ważne tematy, które z racji zmieniających się uwarunkowań życia ludzi we współczesnym świecie, nigdy nie tracą swojej aktualności. Patrząc natomiast od strony technologii oraz procesów kształtowania systemów bezpieczeństwa, wspomnieć należy o zagadnieniach zabezpieczeń sieci komputerowych, infrastruktury łączności, a także tzw. „cyberprzestrzeni” – obszaru funkcjonowania współczesnego świata wykorzystującego potęgę sieci teleinformatycznych.

Jednym z takich kluczowych „wymiarów” jest informacja przestrzenna, która funkcjonując w świecie teleinformatyki i nowoczesnych technologii nazywana jest często geoinformacją. To od jej jakości zależą prawie wszystkie aspekty życia współczesnego człowieka. Dzieje się tak dlatego, iż niemalże każda cecha, każde zjawisko lub obiekt posiadają swoje umiejscowienie w czasie i przestrzeni. Bez należytej informacji przestrzennej trudno jest wyobrazić sobie bezpieczeństwo państwa, przemysłu jak i obywateli. Przykładowo, odpowiednio przedstawione sieci dróg, linii przesyłowych energii czy właściwie przeprowadzone analizy efektywności transportu, zasięgu zjawisk mają niebagatelny wpływ na efektywność funkcjonowania służb państwowych oraz gospodarki. Stanowią także główny element składowy zarządzania strategicznego i kryzysowego. Bardzo istotnym elementem jest choćby należyta koordynacja pracy służb zajmujących się zapewnianiem bezpieczeństwa ludzi oraz mienia w sytuacjach zagrożenia czynnikami naturalnymi (klęski żywiołowe, osuwiska) lub w aspektach należytego zarządzania infrastrukturą kraju.

Geomatyka

Systemy geoinformacyjne działające w odniesieniu do baz danych, wspomagane pracą nowoczesnych urządzeń i technik pomiarowych jak choćby skaning laserowy, fotogrametria czy teledetekcja satelitarna noszą często miano geomatyki [Przewłocki 2010], której schematyczne ujęcie przedstawia rysunek 1. Duże znaczenie przypisać można także geodezyjnemu monitoringowi przemieszczeń i deformacji [Karsznia 2011], którego działanie bądź zapobiega awariom i katastrofom, bądź też pozwala

zareagować odpowiednim służbom wcześniej, zanim zachodzące zjawisko zagrazi stabilności badanego obiektu.

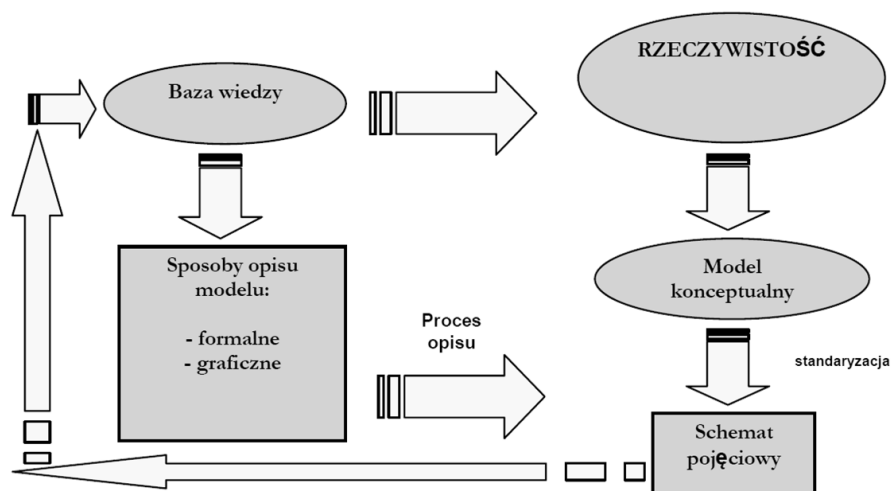


Rys. 1 Schematyczne ujęcie geomatyki [Karsznia 2011]

Analizując różne aspekty i wyzwania bezpieczeństwa, nie sposób pominąć kwestii ochrony infrastruktury technicznej przed działaniem różnych zjawisk, a w szczególności osuwisk. Osuwiska stanowią duże zagrożenie dla obiektów mieszkalnych oraz przemysłowych, stanowią także istotny problem dla gospodarki. Prognozowanie takich zjawisk, choć niekiedy bardzo trudne, stanowi niewątpliwie bardzo ważne wyzwanie stawiane służbom

i specjalistom wykorzystującym dane geodezyjne, geologiczne czy geotechniczne. Niezwykle pomocna okazuje się w takich zadaniach nowoczesna technologia pomiarowa oraz rozwijane metody analiz numerycznych, włącznie z probabilistyką oraz uwzględnianiem danych o tzw. wysokim (wartości mierzalne) oraz niskim poziomie strukturyzacji (głównie informacje opisowe) [Karsznia 2010].

W problematykę jakości i aktualności geodanych wpisuje się niewątpliwie ich standaryzacja i normalizacja. Głównym zadaniem obu tych dziedzin nauki i techniki jest usprawnienie procesu pozyskiwania danych o obiektach (tzw. *geodanych*) oraz umożliwienie właściwego opisu rzeczywistości w sensie jej modelowania (tzw. *modelowanie konceptualne*) [8]. Istotną rolę pełni tutaj uzupełnianie tzw. „bazy wiedzy”, czyli rekurencyjny proces rozpoznawania badanego obiektu lub zjawiska, co w sposób schematyczny przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Schemat procesu modelowania zjawisk (na podstawie [Norma PN-EN ISO 19101:2005], oprac. K.Karsznia)

Aktualność przepisów prawa, norm oraz standardów wraz ze stopniem ich spójności z aktualnym poziomem wiedzy należy ująć w aspekcie efektywności, bezpieczeństwa i sprawności funkcjonowania systemów geoinformacyjnych znajdujących zastosowanie choćby w monitorowaniu

przemieszczeń i deformacji wyrobisk górniczych [Karsznia, Czarnecki, Skalski 2010].

Niewątpliwie, istotnym czynnikiem jest tutaj ocena wpływu czynników zagrażających (np. osuwisk) na stan obiektów inżynierskich takich jak obiekty hydrotechniczne, mosty, drogi i linie kolejowe, linie energetyczne czy sieci uzbrojenia terenu. Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom z zakresu geodezyjnego monitorowania przemieszczeń i deformacji, jak również w wyniku współpracy specjalistów różnych służb technicznych, możliwe jest prowadzenie takiej oceny w sposób coraz bardziej efektywny i wiarygodny. Ponownie, dużego znaczenia nabiera kwestia kształtowania przepisów prawa oraz zaleceń branżowych dotyczących między innymi konieczności prowadzenia badań kontrolnych lub – co daje o wiele lepsze rezultaty – wdrażanie zintegrowanych technologii pomiarowych. Można tutaj wspomnieć zarówno o monitoringu geodezyjnym jak i szeroko rozumianym monitoringu środowiskowym. Systemy takie stanowią istotny element zarządzania jakością [Karsznia 2010], kompleksowego zarządzania ryzykiem [Kaczmarek 2010] czy wręcz odgrywają jedną z głównych ról w zarządzaniu kryzysowym [www.pgi.gov.pl].

Geodezja zintegrowana w badaniu zjawisk naturalnych

W zadaniach współczesnej geodezji inżynierskiej, których istotą jest określenie kształtu, a także stanu badanego obiektu, jego statyki i dynamiki, coraz częściej stosuje się kombinację różnych metod pomiarowych oraz zintegrowaną pracę wielu sensorów [Wolski 2006]. Na jakość prowadzonych w ten sposób pomiarów wpływ mają działania różnych specjalistów – z dziedziny geodezji, geotechniki, informatyki czy telekomunikacji. Zarówno dane przestrzenne dotyczące geometrii badanego obiektu jak też informacje odnośnie zachodzących w nim procesów zasilają bazę danych umożliwiając ich przetwarzanie i wizualizację. Analiza danych oraz podejmowanie na jej podstawie dalszych decyzji jest domeną systemu eksperckiego. Jeżeli dodatkowo system taki wyposażony jest w moduł powiadamiania użytkowników o występujących zagrożeniach, mówimy o systemie monitoringu [Witakowski 2007]. W zależności od wielkości wdrożenia systemu monitoringu, mówimy o podejściu globalnym (duże obszary, dla których należy brać pod uwagę uwarunkowania geodezyjne związane

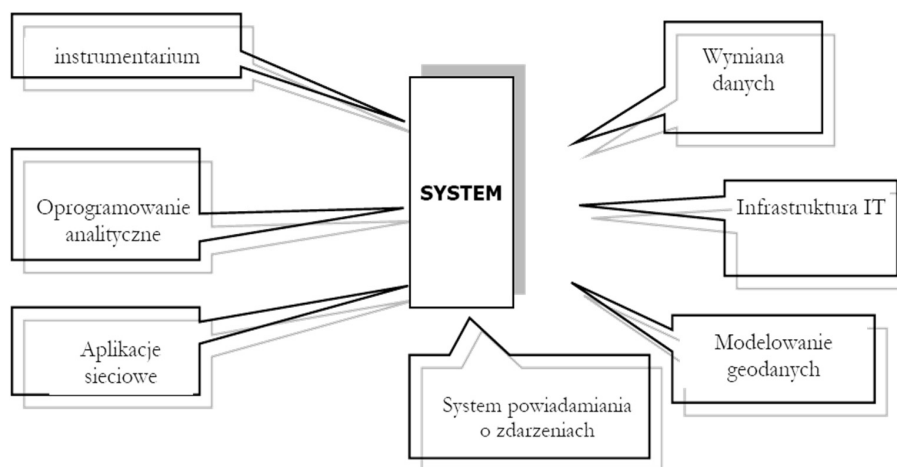
z krzywizną Ziemi, państwowym systemem odniesień przestrzennych itp.) lub inżynierskim – działającym podczas realizacji procesu budowlanego (na ogół pojedyncze obiekty inżynierskie takie jak konstrukcje budowlane, zapory wodne czy mosty) [Karsznia 2010]. Dodać należy, że współczesne podejście do zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji obiektów budowlanych uwzględnia prawie wyłącznie stosowanie monitoringu zdalnego (tzw. *remote monitoring* - *RM*) [Witakowski 2007]. Oznacza to konieczność interdyscyplinarnego zaangażowania specjalistów tak z dziedziny geodezji czy budownictwa jak również teleinformatyki czy elektroniki.

Ponieważ monitoring geodezyjny jest działalnością polegającą na wykrywaniu zagrożeń, niezbędne jest wcześniejsze ustalenie rodzaju obserwowanego zjawiska bądź obiektu oraz dostosowanie doń projektowanego systemu. Niezbędne jest również prawidłowe dobranie narzędzia eksperckiego (aplikacji komputerowej) oraz określenie sposobu powiadamiania o zaistniałym zagrożeniu (np. w formie alarmu, komunikatów sms, wiadomości elektronicznej e-mail czy uruchomieniu innej aplikacji umożliwiającej podjęcie przez odpowiednie służby kroków zaradczych) [Karsznia 2007]. Szczęólnego znaczenia nabiera zatem zagadnienie integracji różnych technik pomiaru geodezyjnego oraz wspomnianej już interoperacyjności systemowej.

Systemy monitoringu inżynierskiego a problematyka deformacji terenów i osuwisk

Monitoring inżynierski znajduje szerokie zastosowanie w zapewnieniu bezpieczeństwa terenów zagrożonych deformacjami i osuwiskami. W pracy [Karsznia, Czarnecki, Skalski 2010], autorzy zaprezentowali działanie takiego zintegrowanego systemu monitoringu w zapewnieniu bezpieczeństwa prowadzenia robót górniczych na terenie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów. Obiekt ten, z racji intensywnej eksploatacji wydobycia surowca energetycznego jakim jest węgiel brunatny, w sposób szczególny narażony jest na niebezpieczeństwo występowania osuwisk, co z kolei stanowi zagrożenie dla pracujących w odkrywcę ludzi i maszyn górniczych. W celu przeciwdziałania skutkom takich zjawisk, zintegrowany system monitoringu geodezyjnego prowadzi w trybie ciągłym obserwacje punktów kontrolowanych, dokonuje obliczeń i analiz by

w rezultacie powiadomić użytkowników o pojawieniu się najmniejszego nawet trendu pojawiającego się osuwiska. Na rysunku 3 przedstawiono ogólny schemat działania zintegrowanego systemu monitoringu geodezyjnego.



Rys. 3 Schemat funkcjonowania systemu monitoringu inżynierskiego (oprac. K. Karsznia)

Dodać należy, iż obecna szybkość procesorów komputerowych, jak również nowoczesne rozwiązania w zakresie transmisji danych dają możliwość opracowania wyników pomiarów w czasie rzeczywistym.

Zagrożenia osuwiskowe

Powierzchniowe ruchy masowe to jedno z najbardziej rozpowszechnionych zjawisk, których skutkiem są katastrofy przyrodnicze. Występują one we wszystkich warunkach klimatu, a uzależnione są od nachylenia zbocza, warunków klimatycznych, hydrografii oraz cech budowy wewnętrznej zbocza (rodzaju skał, ich układu, ilości zwietrzliny i występowania wody w skałach). Dominującymi formami powstałymi w wyniku tych ruchów są osuwiska. Zgodnie z informacjami podanymi przez Państwowy Instytut Geologiczny [www.pgi.gov.pl], rokrocznie powodują one wiele strat materialnych oraz stanowią zagrożenie dla ludzi oraz mienia. Problem ten dotyczy terenów górskich, obszarów położonych wzdłuż dolin rzecznych jak również linii wybrzeża. Można więc stwierdzić, że osuwiska stanowią problem na skalę ogólnokrajową. W związku z tym, należy

podejmować działania mające na celu ocenę ich rozmiarów, dynamiki ich zmian, a także – na podstawie pozyskanych szczegółowych danych charakteryzujących te groźne zjawiska, dokonanie stosownej predykcji możliwych zdarzeń z nimi związanych.

By właściwie rozwiązać problem z dziedziny osuwisk, konieczna jest znajomość warunków, w jakich zjawisko to zachodzi oraz uwzględnienie wszystkich czynników, mających wpływ na jego genezę i rozwój. Ważne, by każde osuwisko traktowane było indywidualnie, mając na uwadze zespół różnorodnych warunków charakterystycznych dla jego przebiegu. Sposoby przeciwdziałania osuwiskom łączą się ściśle z przyczynami ich powstawania. Kleczkowski wymienia niektóre sposoby przeciwdziałania osuwiskom [Kleczkowski 1955]:

- właściwe użytkowanie powierzchni i niedopuszczanie w obszarach osuwiskowych do działania dodatkowych czynników mogących mieć wpływ na ich powstanie,
- uwzględnienie działalności wody, zwłaszcza wywołującej zmiany własności skał,
- wzmacnianie zboczy zbiorników wód stojących, a dla zabezpieczenie przed erozją wgłębną - budowę jazów i stopni w poprzek brzegu rzeki,
- mechaniczne wzmacnianie zboczy przez budowę ścian i murów, bicie pali etc.,
- podejmowanie czynności mających na celu poprawę mechanicznej własności skał.

Obok osuwisk naturalnych, występują jednak także osuwiska powstające w sztucznych wykopach przy budowie dróg, linii kolejowych i w kopalniach odkrywkowych. Niezależnie od występowania, powodują nierzadko poważne zniszczenia budowlane, straty w drzewostanie, w rolnictwie, na liniach komunikacyjnych, a także mogą zagrażać zbiornikom wodnym i innym inwestycjom. Prawie każda budowla, szczególnie o charakterze liniowym (droga, linia kolejowa, linia wysokiego napięcia) zagrożona jest bezpośrednio lub pośrednio osuwiskami. Konieczne jest uwzględnianie tego faktu w czasie planowania, prowadzenia jak i po zakończeniu realizacji inwestycji. Problem ten dotyczy także regulacji rzek, budowy zbiorników wodnych oraz uruchamiania i utrzymania kopalń

odkrywkowych. Reasumując, osuwiska na obszarze Polski stanowią bardzo duże zagrożenie dla życia i mienia człowieka.

W 2006 r. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy pełniący funkcję państwowej służby geologicznej, na zlecenie Ministra Środowiska, rozpoczął realizację projektu System Osłony Przeciwsuwiskowej (SOPO), którego podstawowym celem jest rozpoznanie, udokumentowanie i zaznaczenie na mapie w skali 1: 10 000 wszystkich osuwisk oraz terenów potencjalnie zagrożonych ruchami masowymi w Polsce oraz założenie systemu monitoringu wglębnego i powierzchniowego na 100 wybranych osuwiskach [www.pgi.gov.pl]. Bazę danych SOPO tworzą zasoby graficzne Mapy Osuwisk i Terenów Zagrożonych (dokumentacja kartograficzno-geologiczna osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi, które stanowią lub mogą stanowić w bliskiej przyszłości - w okresie do 50 lat - zagrożenie dla działalności i egzystencji człowieka) oraz zasoby atrybutowe (charakterystyka osuwisk). Integralną częścią projektu jest zatem monitoring, który oparty jest na wybranych metodach powierzchniowych i wglębnych, w tym bazujących na pomiarach geodezyjnych. Dobór odpowiedniej technologii pomiarowej uzależniony jest od wielkości i typu osuwiska oraz stopnia zagrożenia czy szczególności wymaganego rozpoznania, a zakres i częstotliwość prowadzonych obserwacji we wszystkich fazach określa się indywidualnie dla każdego osuwiska. Jak zapisano w rozporządzeniu [Rozporządzenie 2007], *monitoring powierzchniowy wykonywany jest metodami geodezji klasycznej lub metodą statyczną przy użyciu aparatury GPS i prowadzony na podstawie zastabilizowanej siatki punktów pomiarowych w obrębie osuwiska (liczbę i lokalizację punktów pomiarowych tworzących siatkę określa projekt prac geologicznych indywidualnie dla każdego monitorowanego obiektu). Punkty pomiarowe powinny być zlokalizowane w obszarach o największej aktywności osuwiska i jednocześnie spełniać warunek trwałości posadowienia, umożliwiającego wielokrotny pomiar. Punkt pomiaru dla monitoringu powierzchniowego powinien być tak zlokalizowany, aby umożliwiał pomiar współrzędnych X, Y, Z metodami określonymi w projekcie. Pomiaru powinny być wykonane co najmniej trzy razy w roku, a wyniki pomiarów przedstawia się tabelarycznie z podaniem współrzędnych X, Y, Z. Podobnie pomiary GPS powinny być wykonane co najmniej trzy razy w ciągu roku, a opracowanie końcowe musi zawierać*

tabelaryczne zestawienie wyników dla każdej sesji pomiarowej oraz wykaz współrzędnych punktów nawiązania wraz z precyzyjnym określeniem układu.

Zgodnie z informacjami zawartymi w [www.pgi.gov.pl], wśród nowoczesnych metod geoinformacyjnych pozwalających mierzyć deformacje na całej powierzchni osuwiska wymienić należy: metody skaningu laserowego, naziemnego i lotniczego, GNSS oraz metody interferometryczne, wykorzystujące satelitarne zobrazowania radarowe. Ponadto, opracowania branżowe i naukowe – np. [Karsznia, Czarnecki, Skalski 2010, Wolski 2006], niejednokrotnie zalecają również stosowanie metod pomiaru zautomatyzowanego oraz ciągłego (lub quasi-ciągłego).

W wielu przypadkach, zależnych głównie od wielkości obserwowanego obiektu oraz dynamiki zachodzących na nim zmian geometrycznych, stosowanie ciągłego monitoringu metrologicznego daje najbardziej wiarygodny obraz faktycznie zachodzących procesów geologicznych. Tak skonstruowany system monitoringu, wyposażony w moduł analityczny (oceniający zachodzące zjawisko pod kątem osiągnięcia rozmiarów krytycznych) pozwala również wysłać ostrzeżenie o wykrytym niebezpieczeństwie jak również wychwycić trend zachodzących zmian zanim przerodzą się one w sytuacje krytyczne (w skrajnych przypadkach – katastrofy geotechniczne czy budowlane).

Uzupełnienie działań prewencyjnych

Podsumowując powyższe rozważania, autorzy niniejszej publikacji proponują usystematyzowanie procesu pozyskiwania, przetwarzania i analizowania danych przestrzennych dla potrzeb monitorowania osuwisk. Schemat takiego procesu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4 Schemat systemowego ujęcia badanego obiektu inżynierskiego – np. osuwiska (oprac. własne autorów)

Badany obiekt znajduje się w punkcie centralnym, a każdy z bloków zadaniowych posiada jednakową istotność w procesie prowadzonego w ten sposób monitoringu. Podejście takie wymaga zatem wykonania gruntownego rozpoznania obiektu (studia uwarunkowań geologicznych i geotechnicznych, panujące tam warunki meteorologiczne), odpowiedniego doboru technologii (w zależności jakie wartości będą pozyskiwane w celu zasilenia bazy danych), przyjęcia optymalnego modelu kinematycznego (określenie wartości krytycznych, tolerancji oraz poziomu ufności), a także skonfigurowania bazy danych. Przy tej okazji, wspomnieć należy także o konieczności zachowania procedur standaryzacyjnych czy problematyce zapewnienia jakości. Elementy te są bowiem niezwykle ważne z pozycji zapewnienia bezpieczeństwa i wiarygodności prowadzonych prac.

Podsumowanie

Podsumowując, wyzwania współczesnego bezpieczeństwa dotyczą wielu wymiarów i aspektów, począwszy od jakości życia ludzi, poprzez funkcjonowanie służb państwowych, a skończywszy na zapewnieniu rozwoju

i efektywności gospodarki czy utrzymaniu odpowiedniego poziomu infrastruktury. Kwestie te nabierają szczególnego znaczenia w dobie dynamicznego rozwoju technologii, elektroniki, informatyki i łączności. Poruszone problemy, w sposób szczególny dotyczą także kwestii bezpieczeństwa oraz zarządzania ryzykiem na obszarach osuwiskowych czy narażonych na deformacje i przemieszczenia. Wdrażanie zintegrowanych systemów monitoringu inżynierskiego (geodezyjnego, budowlanego i geotechnicznego), szczególnie w wersji zdalnej daje możliwość prawidłowego rozpoznania tychże zjawisk oraz podjęcia decyzji zaradczych zanim pojawiające się drobne trendy wywołają trudne do opanowania konsekwencje. Obserwując dynamiczny rozwój technologii jak również tendencje konstruowania przepisów prawnych i norm branżowych, należy spodziewać się dalszego zintensyfikowania prac nad rozwojem opisanych systemów oraz coraz szerszego ich stosowania w praktyce inżynierskiej.

Literatura:

- [1] Karsznia K., 2011: Monitoring obiektów inżynierskich i zarządzanie jakością w geomatyce, System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, Bezprzewodowe zarządzanie procesem budowlanym, Wydawnictwa AGH Kraków, str. 82-95;
- [2] Karsznia K., Czarnecki L., Skalski Z., 2010: System ciągłego monitoringu deformacji odkrywkowych wyrobisk górniczych a bezpieczeństwo prowadzenia robót górniczych, Przegląd Górniczy 10/2010, Nr 10 (1055), Tom 66(CVI), październik 2010, str. 167-171;
- [3] Karsznia K., 2010: Zastosowania geodezji zintegrowanej w monitoringu strukturalnym i zarządzaniu jakością, Współczesne osiągnięcia nauki geodezyjnej i produkcji, Zbiór prac naukowych Towarzystwa Geodezyjnego, Wydanie II (20). Wydawnictwo Politechniki Lwowskiej, Lwów, 2010. str. 95-101;
- [4] 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;
- [5] Kaczmarek T.T., 2010: Zarządzanie ryzykiem – Ujęcie interdyscyplinarne, Wydawnictwo Difin SA, Warszawa;
- [6] Kleczkowski A., 1955: Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa;

-
- [7] Materiały internetowe Państwowego Instytutu Geologicznego: <http://www.pgi.gov.pl/pl/osuwiska-uslugi-geologiczne/2005-sopo-osuwiska-pod-kontrolp.html> (System Osłony Przeciwosuwiskowej SOPO);
 - [8] Norma PN-EN ISO 19101:2005, Informacja geograficzna - Model tworzenia norm, ISBN 83-251-1711-7;
 - [9] Przewłocki S., 2010: Geomatyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa;
 - [10] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi, Dz.U.07.121.840;
 - [11] Witakowski P., 2007: zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej;
 - [12] Wolski B., 2006: Monitoring metrologiczny obiektów geotechnicznych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Agata Pawłat-Zawrzykraj, Konrad Podawca

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

e-mail: agata_pawlat_zawrzykraj@sggw.pl, konrad_podawca@sggw.pl

Analiza zapisów miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego pod kątem ochrony Skarpy Warszawskiej przed geozagrożeniami

Wstęp

Geozagrożenia zaczynają odgrywać coraz większe znaczenie w planowaniu przestrzennym, głównie ze względu na konsekwencje i potencjalne zniszczenia, jakie niosą za sobą. Najczęściej wymienianymi geozagrożeniami są: osuwiska, powodzie i podtopienia, naturalne i antropogeniczne skażenia terenu, erozje skalne, wstrząsy sejsmiczne i ich następstwa.

Geozagrożenia na terenie Skarpy Warszawskiej to głównie osuwiska i podtopienia. Osuwiska są spowodowane głównie następującymi czynnikami: zawodnieniem skarpy (spływ wód opadowych, erozja, nawadnianie skarpy), obecnością gruntów antropogenicznych, nieodpowiednią zabudową korony skarpy oraz podcinaniem skarpy czy usuwaniem roślinności [Różyński 2013].

Sprawy zagrożeń osuwiskami w zagospodarowaniu przestrzennym stają się aktualnym tematem rozważań geologów, geodetów, urbanistów i planistów [Szafarczyk 2011, Grabowski i in. 2008]. Dowodem tego jest wiele spotkań poświęconych tej tematyce, m.in. seminarium pt. Problematyka zagrożenia osuwiskami w planowaniu przestrzennym, które odbyło się w dniu 29 maja 2012 r. w Krakowie, a organizowane przez Południową Okręgową Izbę Urbanistów czy konferencja pt. Geobezpieczeństwo i gospodarka wodna na terenie dzielnicy Wilanów w ramach XI

Międzynarodowych Targów Geologicznych w dniach 8-9 maja 2013 r. w Państwowym Instytucie Geologicznym w Warszawie.

Połączenie planowania przestrzennego i zagrożeń osuwiskami jest bardzo ważne również z prakseologicznego punktu widzenia ze względu na opracowywany System Osłony Przeciwosuwiskowej o znaczeniu ogólnopaństwowym. Wyniki projektu mają pomóc w zarządzaniu ryzykiem osuwiskowym, czyli w ograniczeniu w znacznym stopniu szkód i zniszczeń wywołanych rozwojem osuwisk poprzez zaniechanie budownictwa drogowego i mieszkaniowego w obrębie aktywnych i okresowo aktywnych osuwisk. Jest to obecnie jeden z najważniejszych projektów geologicznych realizowanych w Ministerstwie Środowiska, którego wyniki powinny mieć odzwierciedlenie w zapisach miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego [Różycka 2013, Grabowski i in. 2008].

Geozagrożenia w prawodawstwie polskim

Za najważniejszy zapis prawny dotyczący osuwisk, z punktu widzenia rzeczywistego zagrożenia należy uznać nadanie osuwiskom charakteru katastrofy naturalnej, dla zapobiegania lub usuwania, której celowym może stać się ogłoszenie stanu klęski żywiołowej, zgodnie z *Ustawą z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie klęski żywiołowej* [Dz. U. 2002 Nr 62 poz. 558].

W kontekście środowiskowym należy uwzględnić zapisy z *Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo Ochrony Środowiska* [Dz. U. 2001, Nr 62, poz. 627] podające definicję ruchów masowych ziemi, oraz nakładające na starostę obowiązek rejestracji terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi oraz terenów, na których występują te ruchy.

Potencjalnie najbardziej skutecznym narzędziem przeciwdziałania geozagrożeniom jest planowanie przestrzenne, dla którego podstawę prawną dotyczącą zakresu opracowań planistycznych, jak również aspektów proceduralnych stanowi *Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym* [Dz. U. z 2003 r. Nr 80 poz. 717 z póź. zm.]. Można stwierdzić, że już zapis Art.1 pkt. 2. mówiący o uwzględnianiu w planowaniu przestrzennym wymagań ochrony zdrowia oraz bezpieczeństwa ludzi i mienia może być interpretowany jako przeciwdziałanie m.in. geozagrożeniom.

W przypadku planowania na poziomie gminy w Art.10. pkt.1 powyższej ustawy, mówiącym o zasadach sporządzania studium,

powiedziane jest, że w „studium uwzględnia się uwarunkowania wynikające w szczególności z m.in. występowania obszarów naturalnych zagrożeń geologicznych”, a w pkt. 2, że w „studium określa się w szczególności obszary narażone na niebezpieczeństwo powodzi i osuwania się mas ziemnych”. Podobne zapisy możemy znaleźć odnośnie miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, w którym obowiązkowo, według Art. 15 pkt. 2, należy wyznaczyć „granice i sposoby zagospodarowania terenów lub obiektów podlegających ochronie, ustalonych na podstawie odrębnych przepisów, w tym terenów górniczych, a także obszarów szczególnego zagrożenia powodzią oraz obszarów osuwania się mas ziemnych”. Zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie wymaganego zakresu projektu miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego [Dz. U. 2003, Nr 164, Poz. 1587 Par. 4] ustalenia dotyczące zasad ochrony środowiska, przyrody i krajobrazu kulturowego powinny zawierać nakazy, zakazy, dopuszczenia i ograniczenia w zagospodarowaniu terenu. Należy podkreślić, że wójt, burmistrz albo prezydent miasta, tak w przypadku studium, jak i miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, jest zobowiązany uzyskać opinię od właściwych organów administracji geologicznej, w tym w zakresie terenów zagrożonych osuwaniem się mas ziemnych [Dz. U. z 2003 r. Nr 80 poz. 717 Art. 11, Art. 17]. W związku z tym, że większość wyznaczonych w studium terenów zagrożonych osuwaniem się mas ziemnych (osuwisk) powinna być wyłączona spod jakiegokolwiek działalności gospodarczej, a zwłaszcza lokalizowania na ich obszarze zabudowy mieszkaniowej – bardzo ważne są zapisy mówiące o zmianach przeznaczenia terenów oraz o odszkodowaniach za poniesione rzeczywiście szkody i roszczeniach, o które w stosunku do gminy mogą się starać właściciele terenów błędnie zaplanowanych w aspekcie geozagrożeń.

Cel i zakres badań

Celem badań była analiza zapisów miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego pod kątem prawidłowego zagospodarowania terenów Skarpy Warszawskiej oraz obszarów bezpośrednio z nią sąsiadujących.

Zakres tematyczny badań obejmował sprawdzenie wytycznych przestrzenno-inwestycyjnych w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa krajobrazowo-przyrodniczego Skarpy Warszawskiej z jednoczesnym

bezpieczeństwem istniejących i projektowanych terenów i obiektów w zasięgu oddziaływania skarpy w postaci:

- **zakazów** - lokalizacji nowych obiektów kubaturowych, lokalizacji sieci uzbrojenia podziemnego, wykonywania inwestycji (wykopów) liniowych równoległych do skarpy, prowadzenia przewodów wodociągowych, prowadzenia przedsięwzięć technicznych, gospodarczych i inwestycyjnych niekorzystnie wpływających na stosunki wodne lub zagrażających stabilności skarpy, przekształcania rzeźby terenu, za wyjątkiem prac związanych z zabezpieczeniem przeciwsuwiskowym, wprowadzania ogrodzeń, lokalizacji zbiorników wodnych, odprowadzania wód deszczowych w sposób zorganizowany na teren stoku;
- **nakazów** - podłączenia obiektów kubaturowych do kanalizacji deszczowej, prowadzenie przewodów wodociągowych w technologiach dających gwarancję szczelności, ochrony roślinności (z możliwością uzupełnienia o nowe nasadzenia), wykonywania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla wszystkich przedsięwzięć inwestycyjnych, stosowania rozwiązań technicznych zapewniających stabilność zboczy, zachowania powiązań widokowych;
- **dopuszczenia** - lokalizowania nowej zabudowy bądź wymiany budynku istniejącego jedynie w sytuacji uzyskania przez inwestora pozytywnej opinii geotechnicznej wykonanej pod kątem wpływu inwestycji na stateczność Skarpy, tj. zawierającej prognozę stateczności zboczy z uwzględnieniem lokalizacji inwestycji, wykonywania wykopów liniowych równoległych do korony Skarpy uzależnione od uzyskania przez inwestora pozytywnej opinii geotechnicznej wykonanej pod kątem wpływu inwestycji na stateczność Skarpy, tj. zawierającej prognozę stateczności zboczy z uwzględnieniem lokalizacji inwestycji, dopuszczenie adaptacji istniejącej zabudowy z możliwością remontów i modernizacji;
- **zaleceń** - lokalizowania nowych obiektów w siedliskach poza strefą ochronną, stosowania rozwiązań technicznych zapewniających stabilność zboczy.

Zakres terytorialny badań obejmował wszystkie obowiązujące miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego (Tabela 1., stan na koniec 2013 r.) w obszarze zagrożonym ruchami masowymi i osuwiskami, wynikającymi z przebiegu Skarpy Warszawskiej.

Ze względu na rozkład przestrzenny obszarów objętych ustaleniami planów miejscowych oraz zmienny charakter samej Skarpy wydzielono trzy obszary badań: południowy, centralny i północny (Rys. 1)

Tabela 1. Wykaz miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego objętych analizą (zgodne z rys. 2-4) -opr. Autora

NR mpzp	OBSZAR/DZIELNICA	NR UCHWAŁY
1.	rejon ulicy Potułkały/ Wilanów	Uchwała Nr 887 Rady Gminy Warszawa-Wilanów z dn. 26 września 2002 r.
2.	dawna wieś Kabaty, rejon ul. Nowoursynowskiej/ Ursynów	Uchwała Nr 165 Rady Gminy Warszawa-Ursynów z dn. 16 listopada 1999 r.
3.	rejon ulicy Pałacowej w części zachodniej/Wilanów	Uchwała Nr LXXVIII/1993/2006 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 9 lutego 2006 r.
4.	dawna wieś Wolica/ Ursynów	Uchwała nr 520 Rady Gminy Warszawa-Ursynów z dn. 12 maja 1998 r.
5.	rejonu Wilanowa Zachodniego cz.I/ Wilanów (fragment)	Uchwała Nr 405 Rady Gminy Warszawa-Wilanów z dn. 18 stycznia 2001 r.
6.	rejonu Wilanowa Zachodniego część II/ Wilanów (fragment)	Uchwała Nr LXXVII/2421/2006 Rady miasta stołecznego Warszawy z dn. 22 czerwca 2006 r.
7.	rejon ul. Nowoursynowskiej/ Ursynów	Uchwała Nr XXVIII/595/2011 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 1 grudnia 2011 r.
8.	rejon św. Katarzyny - część I/ Ursynów	Uchwała Nr LI/1500/2013 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 7 marca 2013 r.
9.	rejon pod Skoczną – część I/ Mokotów	Uchwała Nr XLII/1299/2008 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 23 października 2008 r.
10.	rejon Dworca Południowego/ Mokotów	Uchwała Nr LXXVII/2422/2006 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 22 czerwca 2006r.
11.	rejon skrzyżowania ul. Puławskiej z ciągiem ulic Raclawicka-Dolna - część I./ Mokotów	Uchwała Nr LXXXII/2739/2006 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 10 października 2006 r.
12.	rejon Starego Mokotowa/ Mokotów	Uchwała Nr LXX/2187/2010 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 14 stycznia 2010r.
13.	część terenu Żoliborza Historycznego/ Żoliborz	Uchwała Nr LXXXII/2738/2006 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 10 października 2006 r.
14.	teren „Żoliborza Dziennikarskiego”/ Żoliborz	Uchwała Nr XXVI/504/2011 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 20 października 2011 r.
15.	obszar otoczenia ul. Juliusza Słowackiego/ Żoliborz	Uchwała Nr 2067/LXXXIII/2002 Rady Gminy Warszawa-Centrum z dn. 10 października 2002r.

16.	Marymont – Marymont I – część I	Uchwała Nr LXVII/2081/2009 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dn. 26 listopada 2009
17.	teren "Węzła Północnego" - część I/ Bielany	Uchwała Nr 431/II/01 Rady Gminy Warszawa-Bielany z dn. 19 stycznia 2001 r.
18.	osiedle Młociny -część IIb między ulicami Woycickiego, Pułkową, Pasymską, Encyklopedyczną, Michaliny, granicą Huty / Bielany	Uchwała Nr 585/XVIII/01 Rady Gminy Warszawa - Bielany z dn. 7 grudnia 2001 r.



Rys. 1. Podział terenów powiązanych ze Skarpą Warszawską na trzy obszary objęte analizą: A-południowy, B-centralny, C-północny (opr. autora)

Skarpa Warszawska jako obszar geozagrożeń

Skarpa Warszawska jest krawędzią czwartorzędowej równiny polodowcowej podciętej od wschodu przez Wisłę, wyniesioną do 18 m nad poziom tarasu nadzalewowego. Linia Skarpy urozmaicona jest licznymi wcięciami erozyjnymi, mającymi charakter prostych lub zakrzywionych rozcięć wązowozowych oraz dolinek erozyjnych, czasami z niewielkimi strumieniami. Skarpa jest jedynym elementem Równiny Mazowieckiej, który pozwala uwypuklić jej walory widokowe. Ze Skarpy utrzymuje się ciągle jeszcze atrakcyjny widok na dolinę Wisły.

Skarpa Warszawska oraz sąsiadujące z nią sześć wąwozów o długości 150 do 300 m obok skarpy i okolicznych lasów stanowią wyjątkowo malowniczy element krajobrazu. Niestety, są one obecnie narażone na niewłaściwe zagospodarowanie, czego wyrazem jest rozwój zabudowy (często o dużej intensywności) w bliskim sąsiedztwie oraz na koronie skarpy, jak również lokalizacja infrastruktury drogowej przecinającej skarpe głębokimi wąwozami potęgując erozję wgłębną. Degradacja skarpy widoczna jest też w rejonach występowania źródeł oraz w miejscach wycieku nieszczelnej sieci wodno-kanalizacyjnej. Największą aktywność procesów osuwiskowych stwierdzono na kilku odcinkach:

- mokotowskim (rejon Arkadii, stadionu Warszawianka, ul. Chocimskiej, Belwederu i Łazienek – z rozwijającym się osuwiskiem);
- Trasy Łazienkowskiej i ul. Myśliwieckiej – z czynnym osuwiskiem, Muzeum Wojska Polskiego, od ul. Tamka do ul. Sanguszki i od Mostu Gdańskiego do ul. Krasieńskiego [Opracowanie ekofizjograficzne do studium 2006];
- ursynowskim z wąwozami (m.in. osuwisko przy ul. Kokosowej, które uaktywniło się po majowych opadach 2010 r., a w jego wyniku uszkodził się 1 budynek oraz zamknięto ul. Orszady; osuwisko przy ul. Gąsek w wyniku rozmycia erozyjnego [Różyński 2013].

Ochrona skarpy w polityce przestrzennej miasta

Walory kulturowe, krajobrazowe oraz przyrodnicze Skarpy Warszawskiej są przedmiotem badań i analiz. [Wolski i in. 1996, Pluta 2008, Sokołowska i in. 2013] W wielu opracowaniach można znaleźć wskazania do ochrony skarpy, np. propozycje:

- stworzenia wzdłuż skarpy linearnego systemu rekreacyjnego, połączonego z innymi terenami otwartymi miasta;
- odsunięcie zabudowy, co najmniej 50 m od krawędzi Skarpy, z koniecznością utworzenia pasa ochronnego i przejściowego między terenami zabudowanymi a otwartymi, z powiązaniem go z projektowaną zielenią osiedlową;
- utrzymanie zielonego korytarza szerokości 100-200 m wzdłuż Skarpy z ekstensywnymi formami zagospodarowania. [Wolski i in. 1996]

Wyrazem dążenia do zachowania różnorodnych walorów skarpy Warszawskiej jest stworzenie możliwie spójnej formy jej ochrony w skali

całego miasta. Podstawowym dokumentem, w którym sformułowano zasady ochrony, kształtowania i zagospodarowania Skarpy Warszawskiej jest Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy [Studium 2006, 2010]. Zgodnie ze Studium na terenach występowania ruchów masowych ziemi oraz na terenach zagrożonych ruchami masowymi wskazuje się obszary:

- bezpośredniej ochrony stoku, obejmujący zbocza Skarpy Warszawskiej na całej jej długości wraz z terenami położonymi w odległości 30 m od korony i 20 m od dolnej krawędzi stoku;
- pośredniej ochrony stoku, obejmujący tereny położone w pasie o minimalnej szerokości 100 m od korony Skarpy Warszawskiej i 50 m od jej dolnej krawędzi, dla których ustala się obowiązek wykonywania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla wszystkich przedsięwzięć inwestycyjnych, zawierającej m.in. ocenę stabilności skarpy oraz wpływu projektowanej inwestycji na jej stabilność, określającej warunki geotechniczne posadowienia obiektów budowlanych, sposoby przeciwdziałania procesom osuwiskowym i preferowane zabezpieczenia techniczne chroniące przed ich uruchomieniem, a przede wszystkim obowiązek wyznaczenia w mpzp.

Pod względem środowiskowym zakazuje się odprowadzania na zbocza skarpy wód opadowych i roztopowych ujętych w system kanalizacyjny oraz nakłada obowiązek zachowania, pielęgnacji i uzupełniania roślinności ograniczającej erozję zboczy oraz utrzymującej ich stabilność.

W obszarze bezpośredniej ochrony stoku ponadto ustala się zakaz lokalizowania nowych obiektów budowlanych, nadbudowy i rozbudowy obiektów istniejących za wyjątkiem inwestycji celu publicznego w zakresie układu drogowo-ulicznego i infrastruktury inżynierskiej określonych w Studium oraz zakaz grodzienia.

Analiza obiektów badań

W obecnie obowiązującym systemie planowania przestrzennego w Polsce plany miejscowe są najbardziej skutecznym narzędziem prowadzenia racjonalnej i zrównoważonej gospodarki przestrzennej. Analiza przestrzennego rozmieszczenia obszarów objętych obowiązującymi miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego położonych w zasięgu Skarpy Warszawskiej lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie

potwierdza dotychczasową tendencję do większej aktywności planistycznej na peryferiach Warszawy, a niewielkiej w centrum. Większość analizowanych planów jest zlokalizowana w południowej części Warszawy, głównie w dzielnicach Ursynów i Wilanów (plany nr 1-8 – Rys. 2.), kilka w dzielnicy Mokotów (plany nr 9-12, Rys. 3.), pozostałe w północnej części miasta, w gminach Żoliborz i Bielany (plany nr 13-18, Rys. 4.). U podstaw takiego zróżnicowania w lokalizacji obszarów planistycznych leży sama struktura przestrzenna Warszawy. Dzielnice Wilanów i Ursynów, dla których skarpa niezbyt fortunnie stanowi granicę administracyjną, od kilkunastu lat przeżywają bardzo intensywny rozwój społeczno-gospodarczy, przede wszystkim dzięki pozyskiwaniu nowych obszarów inwestycyjnych lub miejscami w wyniku intensyfikacji zagospodarowania już istniejącego [Bartoszczuk 2012]. Skarpa Warszawska dość długo zachowywała swój naturalny charakter, jednak rosnące zainteresowanie terenami budowlanymi w tym rejonie spowodowało wzrost zagrożenie dla stabilności skarpy i tym samym konieczność doprecyzowania zasad jej zagospodarowania.

Obszar Mokotowa, Żoliborza, oraz część Bielany to stare, mocno zainwestowane dzielnice, częściowo objęte ochroną kulturową, gdzie plany mają za zadanie uporządkowanie istniejącej tkanki miejskiej, w tym uzupełnienie zabudowy. Skarpa Warszawska, wyraźnie wpisana w fizjonomię tej części miasta, jest mocno przekształcona i zabudowana, tym samym w jeszcze bardziej wymaga ochrony.

W centralnie położonych dzielnicach Warszawy, opracowywanie miejscowych planów napotyka na wiele problemów natury formalnej, w tym własnościowej. W dzielnicy Śródmieście w graniach Skarpy, dla której jest ona bardzo ważnym elementem kształtującym przestrzeń miejską, nie ma na dzień dzisiejszy żadnych obowiązujących planów.

Analiza zasad zagospodarowania w miejscowych planach dotyczących Skarpy Warszawskiej wskazuje na tendencję do formułowania zapisów:

- w podziale na ochronę w dwóch strefach: ochrony bezpośredniej i ochrony pośredniej,
- z wydzieleniem dwóch-trzech stref o zróżnicowanych zasadach zagospodarowania;
- jednakowych dla całej skarpy i obszaru z nią związanego.

W pierwszym przypadku - strefa ochrony bezpośredniej - obejmuje przede wszystkim sam stok Skarpy z niewielkim pasem terenu wzdłuż korony i dolnej krawędzi stoku. Granice tej strefy są ustalone zwykle tylko na

rysunku planu, rzadziej precyzyjnie zapisane również w uchwale (np. plan nr 8 – strefa ochrony bezpośredniej obejmuje stok Skarpy na całej jej długości wraz z terenami położonymi w odległości 30 m od korony i 20 m od dolnej krawędzi stoku). Taka forma ochrony skarpy jest stosowana we wszystkich planach w obszarze południowym oraz w dwóch planach części centralnej (plany 9 i 10). Jest to dość czytelny podział, pozwalający uzyskać ciągłość przestrzenną terenów w ramach strefy ochrony bezpośredniej, które powinny zachować charakter jak najbardziej naturalny, jako obszary biologicznie czynne, stanowiące element systemu przyrodniczego miasta, przeznaczone na tereny zieleni. Miejscami Skarpa objęta jest również ochroną rezerwatową. Na kilku działkach zlokalizowana jest zabudowa zagrodowa. Zasady zagospodarowania w omawianej strefie zwykle obejmują:

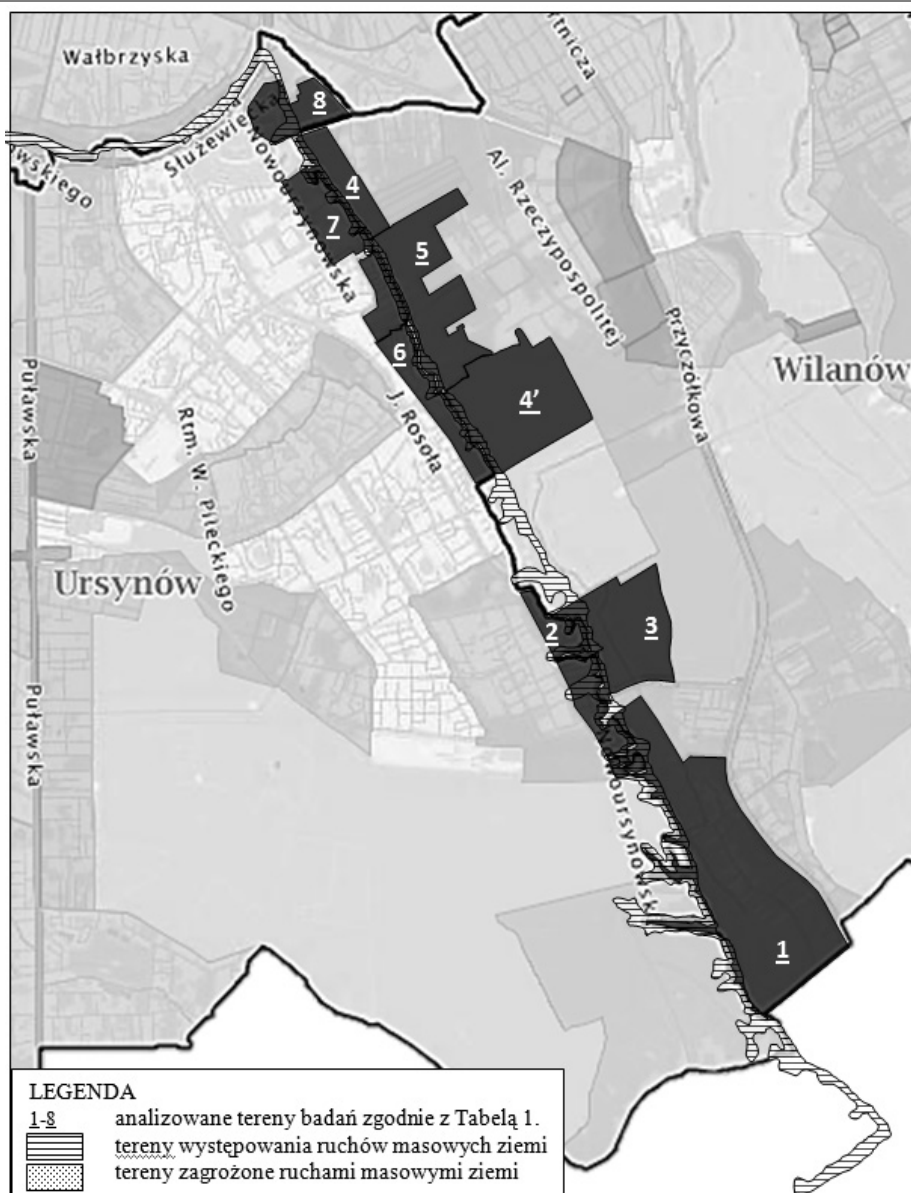
- wykluczenie działalności inwestycyjnej, z wyjątkiem inwestycji celu publicznego, w tym przede wszystkim infrastruktury drogowej;
- na działkach zabudowy zagrodowych – dopuszcza się adaptację istniejącej zabudowy z możliwością remontów i modernizacji (po uzyskaniu pozytywnej opinii geotechnicznej), z zaleceniem stopniowej likwidacji obiektów o charakterze gospodarczym zlokalizowanych w wąwozach;
- ochronę istniejącej roślinności i ewentualne dosadzenia (znaczenie przyrodnicze i stabilizujące rzeźbę skarpy),
- zakaz przekształcania rzeźby,
- zakazy dotyczące odprowadzania wód deszczowych na teren Skarpy oraz lokalizowania przewodów wodociągowych.

Wyżej wymienione zasady zagospodarowania Skarpy będą niewątpliwie skutecznym narzędziem prowadzenia gospodarki przestrzennej na tym obszarze. Jednak dotyczą one bardzo ograniczonego terenu.

W strefie ochrony pośredniej w południowej i centralnej części Warszawy nie ma już tak czytelnego podziału funkcjonalnego. Zachowały się niewielkie enklawy terenów zieleni, ale przeważają obszary zabudowy mieszkaniowej (najczęściej jednorodzinnej w formie szeregowej) i mieszkaniowej z usługami. Mimo że w planach mowa o zabudowie ekstensywnej, to łatwo zauważyć presję inwestycyjną (szczególnie wzdłuż korony Skarpy w dzielnicach Ursynów i Mokotów) potencjalnie negatywnie oddziałującą na stabilność Skarpy oraz jej walory przyrodnicze i krajobrazowe. W większości są to obiekty już istniejące – w takim wypadku plan reguluje jedynie ewentualne przebudowy, dobudowy, czy nadbudowy

i takie działania, zgodnie z wszystkimi planami, muszą uzyskać pozytywną opinię geotechniczną. W lokalizowaniu nowych obiektów, poza oceną geotechniczną, istotnym narzędziem ochrony skarpy jest linia nieprzekraczalnej zabudowy. W przypadku obszarów oddziałujących pośrednio na teren Skarpy pozytywny jest już sam fakt uchwalenia dla nich miejscowych planów, doprecyzowujących zasady zagospodarowania, a tym samym dające narzędzie koordynacji i kontroli dla działań, które mogą oddziaływać negatywnie na stan Skarpy.

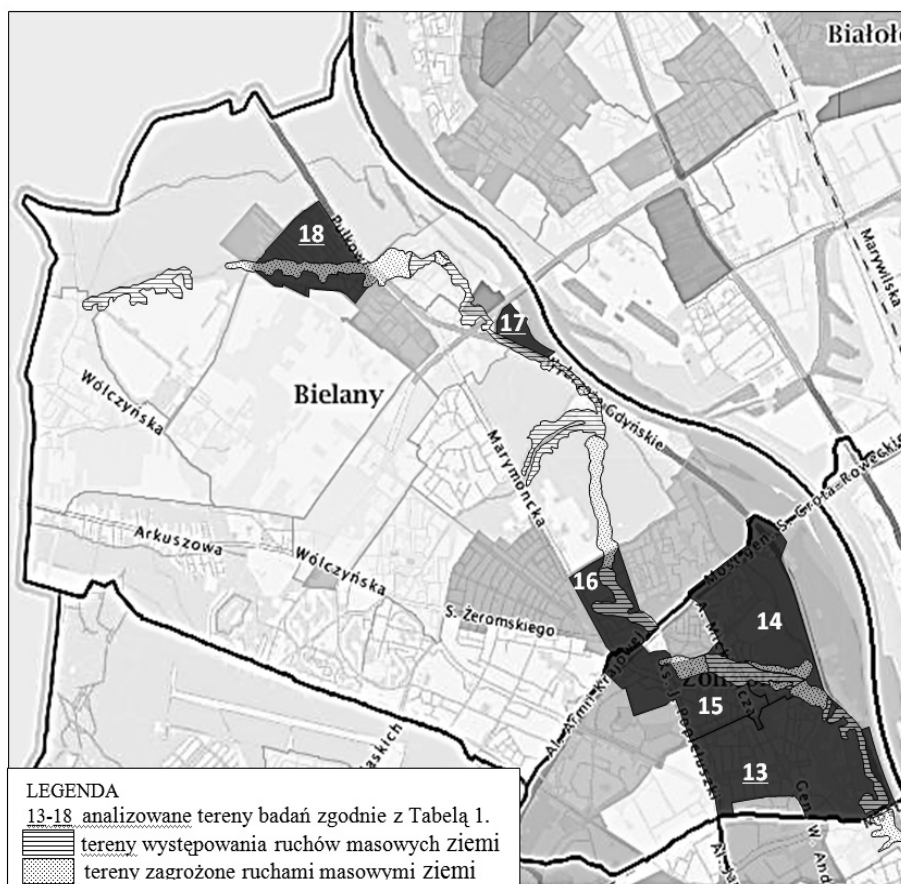
Skarpa Warszawska i tereny z nią związane położone w północnej części miasta są objęte obowiązującymi planami jedynie na fragmentach. Mają one, jak to już było wyżej wspomniane, swoją specyfikę i odmienny charakter. Silnie zainwestowane, z rozwiniętą zabudową mieszkaniową i usługową, z której część jest objęta ochroną konserwatora zabytków, pocięte infrastrukturą drogową. Trudno tutaj mówić o naturalnym charakterze skarpy i wspólnej w planach koncepcji jej ochrony. Widać to w przypadku planów nr 13-16, które dotyczą obszarów ze sobą sąsiadujących, na których sama Skarpa widoczna jest już tylko we fragmentach. W takich przypadkach strefa ochrony Skarpy często obejmuje znaczny obszar z nią sąsiadujący. Głównymi narzędziami ochrony w analizowanych w tej części opracowaniach jest wprowadzenie obowiązku uzyskania pozytywnej opinii geotechnicznej pod kątem wpływu inwestycji na stateczność Skarpy. Dotyczy to wszelkich obiektów kubaturowych, jak też infrastruktury. W strefach obejmujących samą Skarpę w większości przypadków uwzględniono dodatkowo również zakazy dotyczące negatywnie oddziałujących na jej stateczność wód opadowych oraz przesiąków z nieszczelnej sieci wodociągowej (zakazy) oraz nakazy ochrony istniejącej roślinności.



Rys. 2. Lokalizacja obiektów badań na tle zagrożeń osuwiskowych na odcinku południowym Skarpy Warszawskiej (obszar A na Rys. 1) -opr. autora



Rys. 3. Lokalizacja obiektów badań na tle zagrożeń osuwiskowych na odcinku centralnym Skarpy Warszawskiej (obszar B na Rys. 1) -opr. autora



Rys. 4. Lokalizacja obiektów badań na tle zagrożeń osuwiskowych na odcinku północnym Skarpy Warszawskiej (obszar C na Rys. 1) -opr. Autora

Tabela 2. Analiza zapisów w mpzp dotyczących ochrony skarpy przez geozagrożeniami

NR mpzp	Ogólne zasady ochrony Skarpy		Szczegółowe zasady ochrony skarpy dotyczące warunków geotechnicznych*		Uwagi
	II		III		
I	Objęto ochroną skarpy oraz pas terenu o szer. 100 m na wschód od podnóża skarpy wyznaczonej granicą lasu. Skarpa pozostaje w użytkowaniu leśnym bez prawa do zabudowy.		1, 6, 12		IV Plan zakłada ochronę terenów Skarpy, jako obiektu o cennych walorach krajobrazowych i przyrodniczych oraz tworzącej ponadlokalny ciąg przyrodniczy
2	Podział na dwie strefy ochrony geotechnicznej skarpy - zasięg ustalony na rysunku planu	Ochrony bezpośredniej	Dla terenów niezainwestowanych – 1, 3, 4, 8 ; Dla terenów istniejących siedlisk rolniczych i działek istniejącej zabudowy – 8,10, 11,14, 16, 17	Dla terenów niezainwestowanych – 1, 3, 4, 8 ; Dla terenów istniejących siedlisk rolniczych i działek istniejącej zabudowy – 8,10, 11,14, 16, 17	Plan zawiera wnioski do Zarządu Gminy Warszawa - Wilanów dotyczące wspólnych działań na rzecz ochrony Skarpy, w tym poprzez: ochronę istniejącej roślinności i wprowadzania nowych nasadzeń, utrzymanie terenów podskarpowych jako otwartych ter. zielonych z wykluczeniem zabudowy, likwidację zabudowy w wąwozach.
		Ochrony pośredniej	10, 11, 14, 15, 16		
3	Podział na dwie strefy ochrony geotechnicznej skarpy - zasięg ustalony na rysunku planu	Ochrony bezpośredniej -tereny użytkowane jako zielen publiczna ZP	1 (zakaz budowy i przebudowy, nie dotyczy inwestycji celu publicznego), 3, 5, 6, 7, 9, 12, 13	1 (zakaz budowy i przebudowy, nie dotyczy inwestycji celu publicznego), 3, 5, 9, 12, 13	Utrzymanie terenu skarpy oraz obszaru przyległego do podnóża skarpy jako biologicznie czynnych.
		Ochrony pośredniej -tereny użytkowane jako zielen Z			
4	Podział na dwie strefy ochrony geotechnicznej skarpy - zasięg ustalony na rysunku planu	Ochrony bezpośredniej	Dla terenów niezainwestowanych: 1, 3, 4, 8; Dla terenów zainwestowanych (przyległych do ul. Kokosowej): 8, 10, 11, 15, 16	10, 12, 14, 15, 16	W północnej części obszaru objętego ochroną bezpośrednią - istniejąca zabudowa zagrodowa MR wraz z zabudową mieszkaniową z usługami MU – presja zabudowy, potencjalnie i istniejące zagrożenie osuwiskami.
		Ochrony pośredniej			

Tabela 2. –cd

I	II	III	IV
5	<p>Skarpa oraz pas terenu stanowiącego podskarpie zostały objęte ochroną rezerwatową</p> <p>Rezerwat „Skarpa Ursynowska” – w północnej części</p> <p>Rezerwat „Las Natoliński” – w południowej części</p>	<p>tereny otwarte w strefie ochrony środowiska przyrodniczego miasta (utrzymanie i ochrona ter. biologicznie czynnych zwłaszcza wód i roślinności łąkowej, zadrzewień i zakrzewień)</p>	<p>Plan jest bardziej czytelny w zestawieniu z planem dla Wilanowa zachodniego cz. II. Stanowią one wzajemne przestrzenne dopełnienie. Obejmują teren skarpy oraz podskarpia.</p>
6	<p>Teren Skarpy oraz obszar podskarpia znajduje się w większości w granicach otuliny rezerwatu „Skarpa Ursynowska”</p>	<p>Brakuje ściśle określonych zasad zagospodarowania dotyczących ochrony geotechnicznej Skarpy.</p> <p>12</p>	<p>Budowa kościoła przy ul. Orszady budzi kontrowersje pod względem wpływu inwestycji na skarpe.</p>
7	<p>Na terenach występowania ruchów masowych ziemi oraz na ter. zagrożonych ruchami masowymi ustalono podział na dwie strefy - zasięg ustalony na rysunku planu</p>	<p>1, 7, 9, 12</p>	<p>Strefa obejmuje teren wzdłuż korony Skarpy, zagospodarowany jako teren zieleni ZP (obszar biologicznie czynny o dużych walorach krajobrazowych). Zachowanie ciągłości przestrzennej i przyrodniczej na terenie Skarpy i u jej podnoża (poza obszarem objętym planem).</p> <p>Strefa obejmuje: w płn. części tereny SGW (UN-ter. nauki), w środkowej MN i MW z dużą pow. biol. czynną, małą intensywnością zabudowy, w pld.- zabudowa jednorodzinna szeregowa MN na dużych działkach.</p>

Tabela 2. –cd

I	II	III	IV
8	Ustalono dwie strefy ochrony stoku Skarpy Warszawskiej oraz tereny zagrożone osuwaniem się mas ziemnych	Bezpośredniej ochrony Skarpy (obejmująca stok Skarpy na całej jej długości wraz z terenami położonymi w odległości 30 m od korony i 20 m od dolnej krawędzi stoku, wg rysunku planu)	Precyzyjnie ustalone zasady wyznaczania zasięgu stref ochronnych skarpy. Wschodnia granica istniejącego ementarza stanowu miejscowe zagrożone dla stabilności skarpy
9	Ustalono dwie strefy ochrony stoku Skarpy Warszawskiej -zasięg ustalony na rysunku planu	Pośredniej ochrony Skarpy (obejmująca rejonu położone w pasie o min. szerokości 100 m od korony Skarpy i 50 m od jej dolnej krawędzi)	Dla niezabudowanego rejonu stoku Skarpy położonego w ter. 5 ZP: 6, 7, 12 Dla niezabudowanego rejonu stoku Skarpy, częściowo położonego w liniach rozgraniczających ul. Arbużowej: 1, 6 (dopuszczone inwestycji celu publicznego w zakresie infrastruktury technicznej i drogowej), 12 Dla rejonu stoku Skarpy z istniejącą zabudową mieszkaniową (11MN, 12MN, 13MN): 1, 6 (dopuszczone inwestycji celu publicznego w zakresie infrastruktury tech. i drogowej), 9, 12
10	Plan wprowadza dwie strefy ochrony Skarpy	Bezpośredniej ochrony Skarpy Pośredniej ochrony Skarpy	Obejmująca tereny skarpy i fragment na jej koronie, przeznaczone pod tereny zieleni ZP, oraz usług kultury i zieleni urządzonej UK/ZP w pobliżu skoczni: 1, 9, 7, 12, 13, 18 Obejmująca tereny podskarpia, przeznaczone pod zabudowę mieszkaniową ekstensywną MNE: 9, 12, 13, 18
	Plan wprowadza dwie strefy ochrony Skarpy	Ochrony bezpośredniej (26 m od korony skarpy) obejmujące głównie tereny zieleni rekreacyjnej ZR Ochrony pośredniej (pas 26-52 m od korony skarpy) – ter. ZR, miejscami ter. MW, U	Czytelnie określony zasięg wszystkich stref zagrożone w tekście jak i na rysunku planu
	oraz strefę nadzoru konserwatora przyrody	o szer. 50 m, licząc od korony Skarpy	

Tabela 2. –cd

I	II	III	IV
11	Teren objęty szczególną ochroną Skarp - obejmuje tereny zieleni przecięte ul. Noworacławicką, aleja spacerowa na skarpcie	6, 12, 14 (dotyczy stoku skarpy lub obszaru w odległości 50 m od jej głównej krawędzi), 20	Duży nacisk na zachowanie powiązań widokowych
12	Trzy strefy ochrony skarpy – oznaczone na rysunku planu Pośredniej ochrony stoku; Bezpośredniej ochrony stoku; Obszarów, które znajdują się w rejestrze terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi.	3, 5, 9, 12, 14 3, 5, 6, 7, 9, 12, 14	
13	Strefa ochrony przyrodniczej skarp i fosy	Ochrona rzeźby skarpy z uwzględnieniem: 4, 9, 8, 12, 13	Istotnym obiektem wpisanym w przebieg Skarpy jest Fort Siergiej objęty ochroną konserwatorską
14	Strefa ochrony krajobrazu kulturowego - obszaru Skarpy Warszawskiej	6, 12, 20	Nacisk na ochronę walorów przyrodniczych i kulturowych Skarpy
15	Strefa niezbędnej ochrony przyrodniczej Skarpy Warszawskiej Niezależnie od ochrony skarpy, wyznaczono obszary z trudnymi warunkami posadawienia	4, 6, 8, 9, 12, 13 13	Plan obejmuje część Żoliborza, częściowo objęty ochroną konserwatorską. Teren silnie zainwestowany, skarpa nie ma ciągłości przestrzennej, a co za tym idzie strefa ochronna obejmuje niewielkie obszary.
16	Ochrona skarpy obejmuje trzy strefy Strefa ochronna Skarpy Warszawskiej (cały teren działania planu) Obszar ochrony stoku Skarpy Warszawskiej Ochrony bezpośredniej Skarpy Warszawskiej (obszar położony w zasięgu 5,0 m od terenów wykluczeń budowlanych zaznaczonych na rysunku planu)	5 3, 12, 13, 19 1, 6, 7	Teren silnie przekształcony, zainwestowany, przeważa zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna ekstensywna z usługami.

Tabela 2. -cd

I	II	III	IV
17	Strefa wzmoczonego nadzoru Skarpy Warszawskiej Wojewódzkiego Konserwatora Przyrody (50m od górnej i 100 m od dolnej krawędzi skarpy).	Skarpa ma zachować funkcję rekreacyjno-wypoczynkową: I, 5, 10, 12, 13	
18	Strefa ochrony Skarpy Warszawskiej oznaczona na rysunku planu	Dla terenów leżących w zasięgu Skarpy Warszawskiej (obowiązuje na etapie decyzji o warunkach zabudowy każdorazowe uzgadnianie inwestycji z Wojewódzkim Konserwatorem Przyrody i Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków.	Teren silnie przekształcony, zainwestowany, przeważa zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna

***Wyjaśnienie zasad zagospodarowania:**

1. zakaz lokalizacji nowych obiektów kubaturowych;
2. zakaz lokalizacji sieci uzbrojenia podziemnego;
3. zakaz wykonywania inwestycji (wykopów) liniowych równoległych do skarpy;
4. zakaz prowadzenia przewodów wodociagowych;
5. zakaz prowadzenia przedsięwzięć technicznych, gospodarczych i inwestycyjnych niekorzystnie wpływających na stosunki wodne lub zagrażających stabilności skarpy;
6. zakaz przekształcania rzeźby terenu, za wyjątkiem prac związanych z zabezpieczeniem przeciwoślusiskowym,
7. zakaz wprowadzania ogrodzeń;
8. zakaz lokalizacji zbiorników wodnych;
9. zakaz odprowadzania wód deszczowych w sposób zorganizowany na teren stoku;
10. nakaz podłączenia obiektów kubaturowych do kanalizacji deszczowej;
11. nakaz prowadzenia przewodów wodociagowych w technologiach dających gwarancję szczelności;
12. nakaz ochrony roślinności (z możliwością uzupełnienia o nowe nasadzenia).

Podsumowanie

Należy podkreślić, że obowiązek uwzględniania potrzeb w zakresie zapobiegania zagrożeniom związanym z ruchami masowymi ziemi w procesie planowania przestrzennego zaczyna się już na etapie studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gmin. Prawidłowe jego wykonanie, z uwzględnieniem informacji z SOPO oraz zmiany podejścia do geozagrożeń, nie tylko geologów, ale geodetów, urbanistów, planistów i samorządowców przyczyni się do zwiększenia kontroli nad zjawiskami związanymi z ruchami masowymi ziemi. Pozwoli także w przyszłości na ograniczenie skutków ich wystąpienia, aby zmniejszyć nie tylko straty ekonomiczne (bezpośrednie i pośrednie) wywoływane przez osuwiska, lecz przeciwdziałać im już na etapie planowania.

W 2006 r. uchwalono Studium dla Warszawy, w którym uwzględniono na etapie uwarunkowań rozwoju zarówno walory przyrodnicze, krajobrazowe i kulturowe Skarpy Warszawskiej jak też istniejące i potencjalne zagrożenia. W kierunkach rozwoju sformułowano ogólne zasady zagospodarowania i ochrony Skarpy. Mają one charakter wiążący i pełnią rolę koordynacyjną. Wymagają jednak doprecyzowania pod względem przestrzennym oraz uszczegółowienia pod względem merytorycznym, przede wszystkim poprzez plany miejscowe. Analiza dotycząca pokrycia opracowaniami planistycznymi Skarpy i obszarów z nią powiązanych wskazuje na:

- prawie całkowitą ciągłość przestrzenną wzdłuż Skarpy w południowej części miasta,
- znikomą aktywność planistyczną w centralnej części oraz fragmentaryczną w północnej.

Opracowania obejmujące obszary zlokalizowane w dzielnicach Ursynów, Wilanów i Mokotów zawierają dość spójną przestrzennie i merytorycznie koncepcję ochrony skarpy w formie strefy ochrony bezpośredniej i pośredniej. Dla pierwszej z nich uchwalono zwykle duże ograniczenia w użytkowaniu i zagospodarowaniu, zaś w drugiej wprowadzono zapisy, które nie eliminują całkowicie zagrożeń, ale pozwalają w większym stopniu kontrolować zmiany w zagospodarowaniu, potencjalnie oddziałujące na stabilność Skarpy. Analizowane opracowania uwzględniają również rangę przyrodniczą i kulturową Skarpy.

Plany dla obszarów usytuowanych w dzielnicach Żoliborz i Bielany zawierają ograniczenia obejmujące w mniejszym stopniu samą Skarpę (ze względu na duże jej przekształcenie), ale obejmują zakazami i nakazami znaczne obszary w jej pobliżu. Duży nacisk położono też na walory kulturowe Skarpy Warszawskiej.

W skali miasta konieczne jest kontynuowanie procesu uchwalania planów dla obszarów zlokalizowanych na Skarpie Warszawskiej oraz w strefie z nią powiązanej. Pozwoli to przede wszystkim na doprecyzowanie i uszczegółowienie zasad ochrony stosownie do panujących uwarunkowań, a w następstwie - do prowadzenia racjonalnej i zrównoważonej gospodarki przestrzennej nie tylko w skali ponadlokalnej, ale też lokalnej.

Literatura

- [1] Bartoszczuk W., 2012: Ocena lokalizacji obszarów planistycznych w Warszawie. W: Gospodarka przestrzenna w świetle wymagań strategii zrównoważonego rozwoju. PAN i KPZK, s. 266-272;
- [2] Dz. U. 2002 Nr 62 poz. 558. Ustawa z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie kłęski żywiolowej;
- [3] Dz. U. 2001, Nr 62, poz. 627 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo Ochrony Środowiska;
- [4] Dz. U. z 2003 r. Nr 80 poz. 717 z póź. zm. Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym;
- [5] Dz. U. 200, Nr. 164 poz. 1587. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 sierpnia 2003 r. w sprawie wymaganego zakresu projektu miejscowego planu zagospodarowania;
- [6] Ryżyński G., 2013: Geozagrożenia w budownictwie i zagospodarowaniu przestrzennym na wilanowskim odcinku Skarpy Warszawskiej w: Materiały konferencyjne „Geobezpieczeństwo i gospodarka wodna na terenie dzielnicy Wilanów”, PIG, 8-9 maja 2013;
- [7] Szafarczyk A., 2011: Geodezyjne metody monitoringu osuwisk, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Nr 2/2011, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, s. 293–300;
- [8] Grabowski D., Marciniec P., Mrozek T., Nescieruk P., Rączkowski W, Wójcik A, Zimnal Z., 2008: Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa;

- [9] Pluta K., 2008: Zielone osie Mokotowa na obszarze Skarpy Warszawskiej planowanie i zarządzanie, Zarządzanie krajobrazem kulturowym. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego Nr 10 Sosnowiec, s. 114-122;
- [10] Różycka R., 2013: Zagrożenia osuwiskowe a proces planowania przestrzennego na przykładzie gminy Zakliczyn, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Nr 3/I//2013, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, s. 183–193;
- [11] Sokołowska M, Majer K, 2013: Problemy związane z zagospodarowaniem przestrzennym oraz procesem inwestycyjnym na obszarze doliny Wisły i Skarpy Warszawskiej w: Materiały konferencyjne „Geobezpieczeństwo i gospodarka wodna na terenie dzielnicy Wilanów”, PIG, 8-9 maja 2013;
- [12] Wolski P., Cieszewska A., Sieroszevska M., 1996: Funkcjonowanie przyrodnicze Skarpy Ursynowskiej i wskazania do jej ochrony, Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska. Z. 9, s.3-30;
- [13] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy. Załącznik do Uchwały Nr LXXXII/2746/2006 Rady m.st. Warszawy z dnia 10 października 2006. [w:] <http://www.um.warszawa.pl/wydarzenia/studium/index.php>.
- [14] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy. Załącznik do Uchwały Nr XCII/2689/2010 Rady m.st. Warszawy z dnia 7 października 2010 r.;
- [15] Opracowanie ekofizjograficzne do Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy. Biuro Naczelnego Architekta Miasta. Miejska Pracownia Planowania Przestrzennego i Strategii rozwoju. Warszawa 2006.

Monika Gąsowska, Janusz Urbański, Małgorzata Mostowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

e-mail: monika_gasowska@sggw.pl, janusz_urbanski@sggw.pl,

malgorzata_mostowska@sggw.pl

**Ocena efektów prac modernizacyjnych zbiornika w Leźnicy
Wielkiej na rzece Gnidzie**

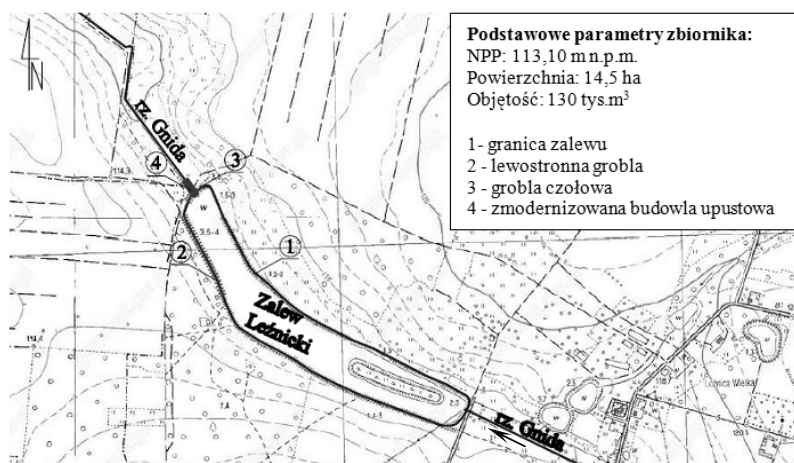
Wstęp

Zasoby wodne na Ziemi są bardzo duże, ale rozmieszczenie ich nie jest równomierne. Od stuleci próbowano magazynować i wykorzystywać wodę budując zbiorniki wodne. Są one podstawowym elementem małej retencji. Zbiorniki zaporowe, tworzone w wyniku przegrodzenia koryta i doliny rzeki budowlą piętrzącą spełniają różne funkcje. Gromadzona w nich woda w okresach jej nadmiaru wykorzystana może być na potrzeby gospodarcze w czasie deficytu. Sztuczne zbiorniki retencyjne zmieniają reżim hydrologiczny rzek umożliwiając sterowanie przepływami i przyczyniają się do zmniejszenia zagrożenia powodziowego. Wykorzystywane są także do celów rekreacyjnych, stanowią ozdobę krajobrazu, oczyszczają wodę pełniąc funkcję biofiltra [Mioduszeński 2006].

Zbiornik wodny oraz towarzyszące mu budowle piętrzące są urządzeniami technicznymi i wymagają zawsze prowadzenia świadomej eksploatacji, przeglądów, konserwacji i napraw [Mioduszeński 1999]. Obiekty te narażone są na uszkodzenia i katastrofy, do których dochodzi głównie w wyniku niedostatecznej znajomości zjawisk przyrodniczych, nierozpoznania właściwości materiałów budowlanych oraz podłoża, błędów technicznych popełnionych na etapie wykonawstwa i nieprawidłowej eksploatacji [Małecki, Pokładek 2010].

W miejscowości Leźnica Wielka, powiat zgierski, województwo łódzkie w 1976 roku w oparciu o uproszczoną dokumentację techniczną

utworzono zbiornik wodny (Rys.1) o powierzchni 14,5 ha i pojemności 130 tys. m³. Zalew Leżnicki powstał w wyniku przegrodzenia koryta i doliny rzeki Gnidy zaporą ziemną, zlokalizowaną w km 3+100. Rzeka Gnida jest prawobrzeżnym dopływem Neru i przepływa przez trzy powiaty: łączycki, zgierski i poddębicki. Jej koryto o długości 14 km jest w przeważającej części uregulowanym kanałem. Powierzchnia zlewni wynosi około 33 km². Gnida odwadnia tereny położone w zachodniej części gminy Parzęczew. Jest rzeką przeprowadzającą małe ilości wody i niestwara zagrożenia powodziowego [Strategia... 2009].



Rys.1. Mapa sytuacyjno-wysokościowa analizowanego zbiornika

Wieloletnia eksploatacja Zalewu Leżnickiego i urządzeń mu towarzyszących doprowadziła do znacznego pogorszenia stanu technicznego budowli piętrzących. W maju 2010 roku na skutek intensywnych opadów deszczu zbiornik w krótkim czasie musiał przyjąć ogromne ilości wody dopływające korytem rzeki Gnidy. W wyniku przejścia wezbrania doszło do przemieszczenia elementów urządzeń upustowej oraz lokalnych rozmyć grobli piętrzących. Dalsza eksploatacja zbiornika w takim stanie nie była możliwa i lokalne władze podjęły decyzję o renowacji obiektu. W 2011 roku odbudowano ziemne budowle piętrzące zbiornika oraz wykonano zmodernizowaną budowlę upustową o konstrukcji żelbetowej, ze spustem dennym i przelewem.

W pracy przedstawiono wnioski z oceny stanu budowli piętrzących zbiornika przed remontem, opisano zakres robót budowlanych wykonanych

w związku z odbudową obiektu oraz scharakteryzowano zmodernizowane budowle piętrzące i urządzenia upustowe. W czasie realizacji robót dokumentowano kolejne etapy odbudowy obiektu analizując na bieżąco projekt budowlany [Wasilewski, Faflik 2009]. Po oddaniu obiektu do eksploatacji w październiku 2011 roku przeprowadzono jego inwentaryzację, oględziny konstrukcji oraz wykonano podstawowe pomiary liniowe i niwelacyjne. W oparciu o wyniki pomiarów terenowych sporządzono charakterystykę przepustowości zmodernizowanych urządzeń upustowych Zalewu Leźnickiego. Dokonano rozpoznania hydraulicznych warunków przeprowadzania wielkich wód przez urządzenia upustowe pod kątem oceny zagrożenia sąsiadujących ze zbiornikiem obszarów lokalnymi podtopieniami.

Stan zbiornika wodnego przed rekonstrukcją

Wieloletnia eksploatacja budowli piętrzących prowadzi do naturalnego starzenia się jej elementów, czego efektem są przemieszczenia, trwałe odkształcenia obiektu oraz deformacje skarp i czaszy zbiornika wodnego. Deformacje oraz przemieszczenia poszczególnych fragmentów zapory spowodowane są przez siły działające na budowlę, ciężar własny i użytkowy, zjawiska atmosferyczne [Bryś 1996]. W trakcie eksploatacji zaporowych zbiorników wodnych występują liczne zagrożenia ich bezpieczeństwa, które mogą być spowodowane przez różne czynniki. Są to między innymi błędy powstałe przy projektowaniu oraz wykonawstwie budowli, nieodpowiednia eksploatacja, zaległości w opracowaniach okresowych ocen stanu technicznego, opóźnione roboty konserwacyjne i remontowe [Hrycak, Baranowski 2007].

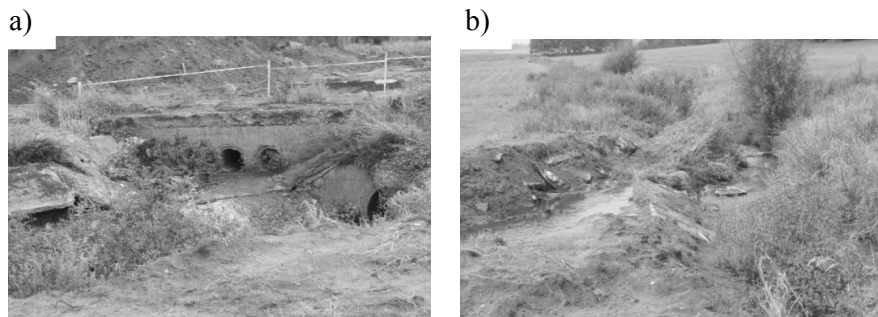
Kilkudziesięcioletnia eksploatacja zbiornika w Leźnicy Wielkiej doprowadziła do pogorszenia się jego stanu technicznego. Początkowo funkcję urządzeń upustowych zbiornika spełniał mniach z zastawką oraz dwa przelewy awaryjne. Żelbetowa konstrukcja mniacha silnie porośnięta mchem i roślinnością trawiastą uległa osłabieniu. Występowały liczne pęknięcia konstrukcji i ubytki betonu. W złym stanie pozostawały również betonowe umocnienia odwodnej skarpy zapory czołowej zbiornika. Płyty betonowe były spękane, a dylatacje rozszczelnione. Stan techniczny obiektu zdecydowanie pogorszył się po przejściu wezbrania w maju 2011 roku (Rys.2). Intensywny przepływ dużych objętości wody spowodował lokalne deformacje ziemnych budowli piętrzących i wypłukania gruntu z podłoża,

czego wynikiem były przemieszczenia betonowych elementów umocnień skarpy odwodnej.



Rys.2. Przejście wezbrania przez Zalew Leżnicki w maju 2011 roku (Świniuch 2010)

Zły stan techniczny elementów betonowych uwidocznił się najbardziej na wypadzie budowli (Rys. 3a). Liczne pęknięcia płyt na dnie i skarpach wypadu porastała roślinność. W wyniku przejścia wezbrania częściowo rozmyty został grunt pod płytami w dolnym stanowisku, uległy one deformacji i przemieszczeniu [Gąsowska, Urbański 2013]. W złym stanie utrzymywane było koryto rzeki Gnidy za wypadem (Rys. 3b). Charakteryzowało się ono silnym porostem gęstą roślinnością trawiastą na skarpach oraz występowaniem pojedynczych krzewów, stanowiących lokalne przeszkody ograniczające przepustowość koryta szczególnie w czasie przejścia wezbrań. Bezpośrednio za wypadem budowli w korycie rzeki znajdowały się części betonowych elementów, głównie płyt stanowiących wcześniej umocnienia dna i skarp, które bezładnie występujące znacznie pogarszały warunki przepływu. Skutkiem tych zaniedbań były poważne podtopienia obszarów sąsiadujących ze zbiornikiem, jakie wystąpiły w czasie przejścia wezbrania w maju 2010 roku.



Rys.3. Widok dolnego stanowiska budowli przed odbudową (a) i koryta rzeki Gnidzy poniżej zbiornika (b) [Gąsowska, Urbański 2013]

Skutkiem przejścia wezbrania były lokalne rozmycia ziemnych konstrukcji budowli piętrzących. Uszkodzone zostały umocnienia odwodnej skarpy lewostronnej grobli zbiornika. Ażurowe płyty betonowe popękały i uległy przemieszczeniu, w wyniku czego doszło do częściowego rozmycia korpusu zapory bocznej.

Zakres prac modernizacyjnych zbiornika

Odbudowa i modernizacja budowli piętrzących zbiornika w Leźnicy Wielkiej miała na celu przywrócenie do stanu funkcjonalności obiektu będącego w złym stanie technicznym oraz naprawienie szkód, jakie wystąpiły w wyniku przejścia wezbrania w 2010 roku. Zbiornik od początku istnienia spełniał przede wszystkim funkcję rekreacyjną. W ostatnich latach eksploatacji przed renowacją zły stan wizualny otoczenia Zalewu odstraszał mieszkańców i gości odwiedzających kąpielisko. Zaistniała sytuacja skłoniła lokalne władze do podjęcia decyzji o odbudowie zbiornika i budowli towarzyszących. Dokonano rozbiórki mnicha pełniącego funkcję spustu zbiornikowego oraz zlikwidowano dotychczasowe przelewy awaryjne z bystrzami zastępując je zmodernizowaną zespoloną budowlą upustową. Wykonano naprawy ziemnych konstrukcji oraz umocnień skarp grobli czołowej i bocznej. Udrożniono i częściowo umocniono koryto rzeki poniżej zbiornika.

Prace budowlane rozpoczęto od udrożnienia koryta rzeki Gnidzy w dolnym stanowisku i wykonania kanału ziemnego po trasie istniejącego bystrza z wylotem do trzech rurociągów o średnicy 0,50m, co umożliwiło przeprowadzanie wód budowlanych. Podczas wykonywania prac, ze względu na zachowanie istniejącego rybostanu nie zrezygnowano całkowicie

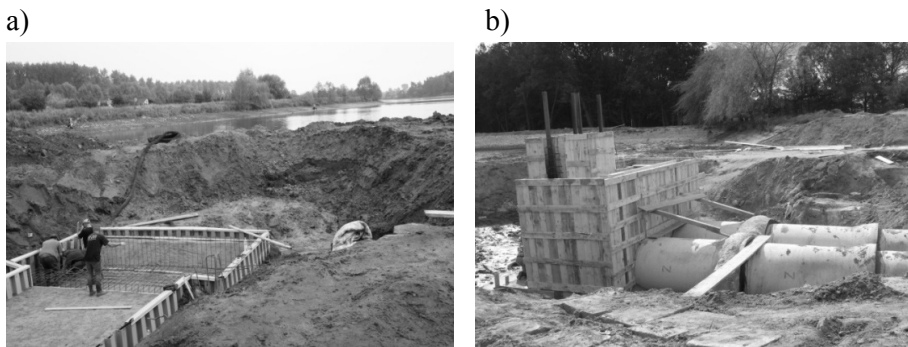
z utrzymywania piętrzenia w obszarze zbiornika, a obniżono zwierciadło wody do rzędnej 111,75 m.n.p.m. W celu zabezpieczenia wykopu fundamentowego przed napływem wody wykonano tymczasową grodzę z odpowiednio zagęszczonego gruntu pochodzącego z wykopów. Wykorzystano także stalową ściankę szczelną o długości 23,0 m, którą wbito na głębokość 4,0 m. Wykop fundamentowy odwadniano wykorzystując istniejący system drenażowy. Po przeprowadzeniu prac rozbiórkowych częściowo zniszczonego mnicza żelbetowego przystąpiono do wykonania konstrukcji budowli upustowej. Na dnie wykopu wykonano warstwę betonu podkładowego C8/10 o grubości 0,20 m, a następnie żelbetową płytę fundamentową o grubości 0,40m z betonu C16/20 (Rys.4a).

Zmodernizowana, zespolona budowla upustowa o konstrukcji żelbetowej, wykonana w postaci przelewu wieżowego ze spustem dennym, składa się z następujących elementów [Wasilewski, Faflik 2009]:

- wieży przelewowej o wysokości 3,20 m,
- dwóch równoległych rurociągów spustowych o długości 22,0 m,
- żelbetowego doku wylotowego ze skrzydłami równoległymi,
- płyty wypadowej o długości 4,0 m.

Upust wykonano w formie żelbetowej wieży o przekroju prostokątnym w planie i wymiarach zewnętrznych 5,10×2,10 m. Grubość ściany zewnętrznej wynosi 0,30 m. Do wykonania budowli wykorzystano mieszankę odpowiadającą klasie betonu B30/37 o stopniu wodoszczelności W8. Górne ograniczenie budowli stanowi przelew o prostokątnym kształcie korony wykonanej na rzędnej odpowiadającej NPP=130,10 m.n.p.m. W czołowej ścianie wieży przelewowej od strony zbiornika wykonano dwa prostokątne otwory o wymiarach 1,00×2,50 m stanowiące wlot do spustu zbiornika. Otwory wyposażono w pionowe prowadnice zamknięć zasuwowych, wykorzystując w tym celu ceowniki walcowane C100. Zamknięcia otworów wlotowych w postaci pojedynczych zasuw podnoszone są i opuszczane za pomocą mechanizmów wyciągowych z napędem ręcznym. Otwory wlotowe do spustu wyposażono także w stalowe kraty osadzone w pionowych prowadnicach z ceowników C65.

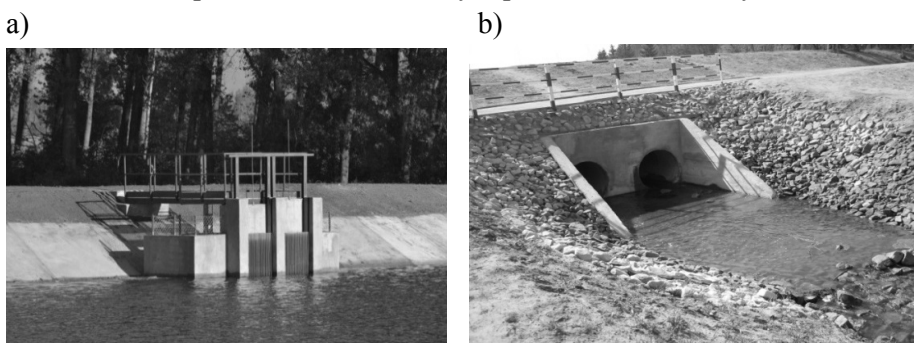
W tylnej ścianie wieży przelewowej umieszczono dwa rurociągi spustowe wykonane z kielichowych rur żelbetowych o średnicy wewnętrznej 1,20 m (Rys.4b). Przewody o długości 22,0 m ułożono ze spadkiem 2,27% na płycie fundamentowej o grubości 0,40 m i szerokości 6,00 m.



Rys.4. Kolejne etapy budowy upustu zbiornikowego: a – układanie zbrojenia wieży przelewowej, b – rurociągi spustowe

W stanowisku dolnym budowli wykonano przyczółek w formie żelbetowego doku, stanowiącego wylot rurociągu do koryta rzeki (Rys.5b). Przyczółek został obramowany trójkątnymi ścianami bocznymi o grubości 0,25 m. Poniżej wylotu rurociągów wykonano płytę wypadową o długości 4,0 m i grubości 0,30 m. W celu ochrony dolnego stanowiska przed rozmyciem dno i skarpy koryta za wypadem na odcinku o długości 6,0m zostały umocnione narzutem kamiennym.

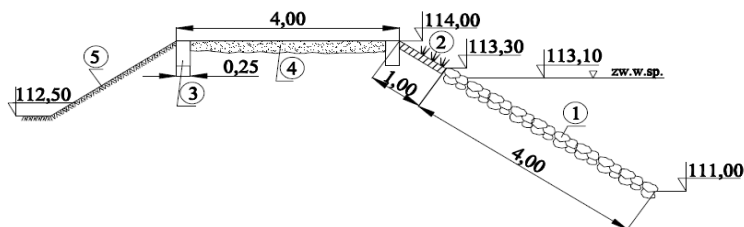
W celu umożliwienia obsługi zamknięć oraz czyszczenia krat wykonano pomost o konstrukcji stalowej. Wykorzystano obramowane i ocynkowane kraty podestowe, które zostały umocowane do belek podporowych z ceowników walcowanych, opartych na ścianach komory wlotowej oraz na betonowym fundamencie. Elementy stalowe zostały zabezpieczone przed korozją chemoodporną emalią epoksydową. Ogólny widok budowli po odbiorze technicznym przedstawiono na Rys.5.



Rys.5. Budowla upustowa po odbiorze technicznym: a – widok od strony zbiornika, b – wylot i stanowisko dolne

Wyniki badań geotechnicznych przeprowadzonych przed odbudową ziemnych konstrukcji piętujących wykazały, że grobla czołowa zbiornika częściowo wykonana była z gruntów słabonośnych. W związku z tym dokonano wymiany gruntu wbudowanego w jej korpus i zgodnie z projektem [Wasilewski, Faflik 2009] zastosowano piaski drobne oraz średnioziarniste. Skarpa odwodna grobli o nachyleniu 1:1,5 została umocniona do rzędnej 113,40 m.n.p.m. szczelnym ekranem utworzonym z płyt żelbetowych o grubości 0,15 m ułożonych na podsypce z pospółki. Tego typu ubezpieczenie skarpy odwodnej zapór ziemnych oceniane jest jako trwałe i skuteczne pod warunkiem zachowania szczelin dylatacyjnych o odpowiedniej szerokości, przy właściwym doborze zbrojenia i klasy betonu [Mazurczyk, Jankowski 2007]. Natomiast ekrany żelbetowe jako zabezpieczenia przeciwfiltracyjne korpusów zapór po kilkudziesięciu latach eksploatacji najczęściej charakteryzują się niedostateczną skutecznością w związku z niedokładnym wykonaniem połączeń elementów uszczelniających, wpływem zjawisk atmosferycznych, zbyt dużymi wymiarami płyt przy niedostatecznym zbrojeniu i nieodpowiedniej jakości betonu [Mazurczyk, Jankowski 2007].

Dokonano także rekonstrukcji lewostronnej grobli bocznej zbiornika. Przekrój poprzeczny przez jej korpus przedstawiono na Rys.6. W pierwszym etapie uformowano nasyp z gruntu pochodzącego z dna zbiornika. Grunt odpowiednio zagęszczano warstwami o grubości 0,20 m do uzyskania wartości wskaźnika $I_D \geq 0,66$, a skarpy uformowano z nachyleniem 1:1,5. Następnie przystąpiono do ich umocnienia. Na skarpie odwodnej od podstawy do rzędnej 113,30 m.n.p.m. wykonano narzut z kamienia łamanego (Rys.7a) ułożony na geowłókninie, a na odpowietrznej zastosowano humusowanie oraz obsiew mieszkanką traw. Po ostatecznym uformowaniu korony grobli dokonano jej umocnienia warstwą pospółki stabilizowanej betonem. Widok na wykonaną groblę przedstawiono na Rys. 7b.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny odbudowanej lewostronnej grobli bocznej: 1 -narzut kamienny na skarpie odwodnej, 2 - humusowanie skarpy z obsiewem mieszanką traw, 3 - betonowy krawężnik, 4 - pospółka stabilizowana betonem, 5 - skarpa odpowietrzna obsiana mieszanką traw

a)



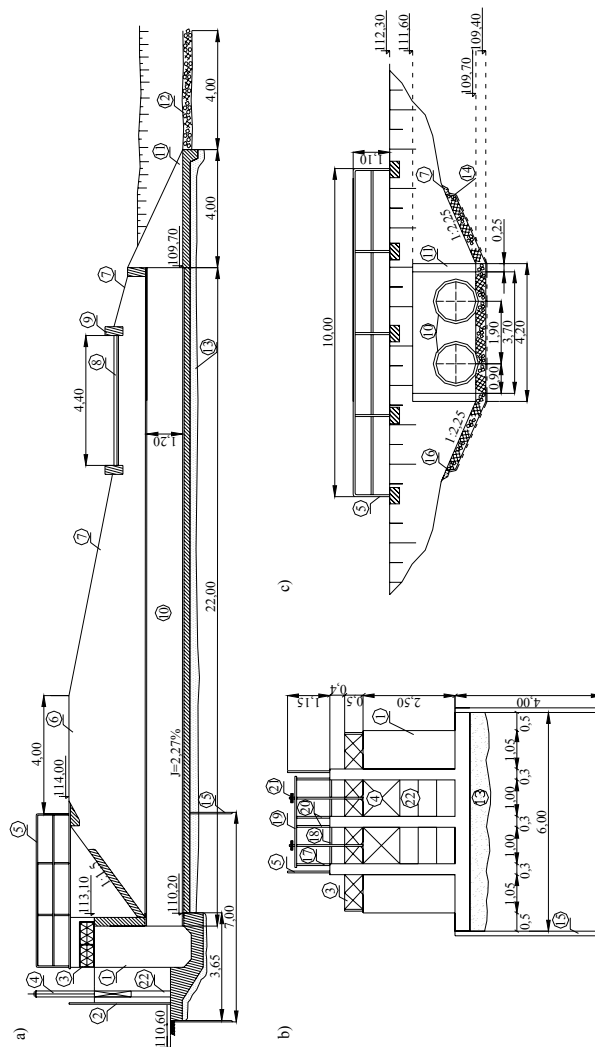
b)



Rys. 7. Lewostronna grobla boczna zbiornika: a – układanie narzutu kamiennego na skarpie odwodnej, b – budowla po odbiorze technicznym

Zakres pomiarów terenowych i obliczeń hydraulicznych

Po oddaniu zbiornika do eksploatacji wykonano prace terenowe na obiekcie obejmujące inwentaryzację odbudowanych grobli pietrzących, oględziny konstrukcji budowli upustowej oraz podstawowe pomiary liniowe i niwelacyjne. W oparciu o projekt budowlano-wykonawczy [Wasilewski, Faflik, 2009] oraz wyniki pomiarów terenowych wykonano schematyczny przekrój podłużny oraz wybrane przekroje poprzeczne zmodernizowanej budowli upustowej i przedstawiono na Rys.8.



Rys. 8. Zmodernizowana budowla upustowej i podstawowe wymiary [m]: a- przekrój podłużny, b-włot, c-stanowisko dolne

- 1 - Upust wieżowy; 2 - Krata; 3 - Siatka ogrodzeniowa; 4 - Zamknięcie zasuwowe;
- 5 - Balustrada; 6 - Korona zapory; 7 - Umocnienia trawiaste; 8 - Nawierzchnia drogowa;
- 9 - Krawężnik betonowy; 10 - Rury żelbetowe; 11 - Przyczołek wylotowy;
- 12 - Płyta wypadowa; 13 - Chudy beton; 14 - Geowłóknina; 15 - Ścianka szczelna;
- 16 - Narzut kamienny; 17 - Słup pod wyciąg z dwóch ceowników; 18 - Kładka robocza;
- 19 - Ceownik; 20 - Prowadnica z ceownika; 21 - Ślimakowe urządzenie wyciągowe;
- 22 - Szandory

W korycie rzeki poniżej budowli upustowej przeprowadzono pomiary niwelacyjne w trzech charakterystycznych przekrojach poprzecznych. W każdym przekroju wykonano obliczenia przepustowości koryta dokonując oceny możliwości przeprowadzenia wód wezbraniowych. Sporządzono charakterystykę przepustowości zmodernizowanych urządzeń upustowych zbiornika, tzn. przelewu wieżowego i spustu. Analizowano hydrauliczne warunki przeprowadzania wielkich wód przez urządzenia upustowe rozpatrując wzajemne oddziaływanie wydatków poszczególnych elementów budowli na siebie. Dokonano oceny zagrożenia wystąpienia lokalnych podtopień obszarów sąsiadujących ze zbiornikiem.

Charakterystyka przepustowości koryta rzeki Gnidzy poniżej budowli

Przepływ wody w korytach cieków wodnych związany jest z oddziaływaniem siły grawitacji. Analiza procesu przepływu w rzekach jest bardzo złożona ze względu na naturalną zmienność przekroju poprzecznego koryt, spadku dna na jego długości oraz natężenia przepływu w korycie na jego długości i w czasie [Kubrak, Nachlik 2003]. Zagadnienia inżynierskie są rozwiązywane przy założeniu niezmienności kształtu i spadku dna koryta. Zakłada się również stałe w czasie natężenie przepływu.

Rzeka Gnida jest ciekim uregulowanym. Układ poziomy jej koryta jest słabo rozwinięty. Przeważają odcinki proste i krótkie łuki o regularnej krzywiznie. W Tabeli 1 podano wielkości przepływów charakterystycznych.

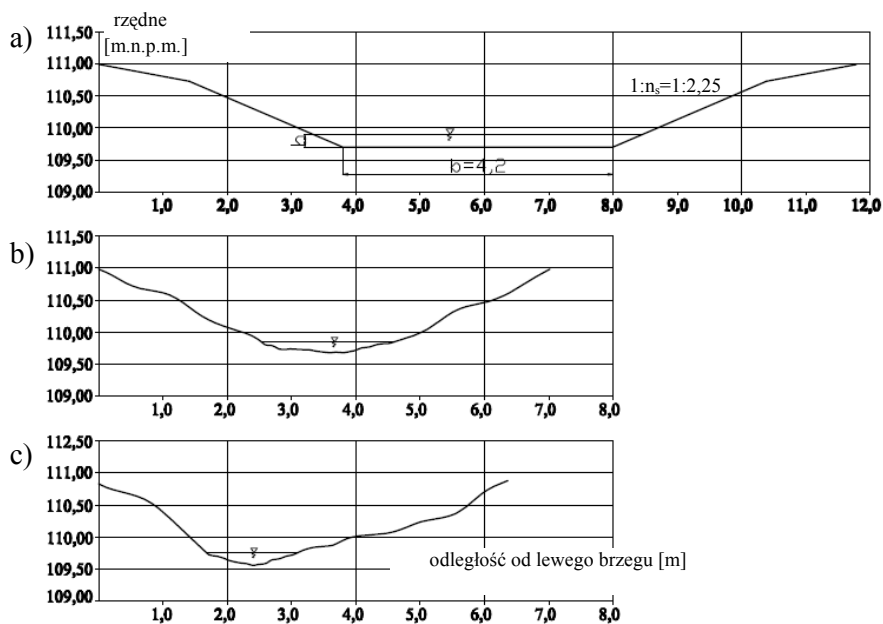
Tabela 1. Przepływy charakterystyczne w rzece Gnidzie [Wasilewski, Faflik 2009]

Lp.	Przepływ charakterystyczny	Wielkość [m ³ /s]
1.	Średni z niskich (SNQ)	0,010
2.	Średni (SSQ)	0,108
3.	Średni z wysokich (SWQ)	1,346
4.	Przepływ jednoprocetowy (Q _{1%})	4,67

W korycie rzeki poniżej budowli wykonano pomiary niwelacyjne w trzech przekrojach poprzecznych zlokalizowanych następująco:

- przekrój nr 1 (km 3+070) na wypadzie budowli,
- przekrój nr 2 (km 3+065) bezpośrednio za płytą wypadową,
- przekrój nr 3 (km 3+032) w naturalnym korycie rzeki.

Na Rys. 9 przedstawiono pomierzone przekroje poprzeczne koryta rzeki Gnidy, a parametry koryta w tych przekrojach zestawiono w Tabeli 2.



Rys. 9. Przekroje poprzeczne koryta rzeki Gnidy poniżej budowli upustowej:
a - km 3+070, b - km 3+065, c - km 3+032

Tabela 2. Parametry koryta rzeki w przekrojach pomiarowych

Nr przekroju pomiarowego	Km rzeki	Dno	Skarpy	Współczynnik szorstkości [m ^{-1/3} s]
1	3+070	betonowe	narzut kamienny	0,030
2	3+065	ziemne	darnina	0,040
3	3+022	ziemne	gęsta roślinność	0,060

W każdym przekroju wykonano obliczenia przepustowości koryta z zastosowaniem równania (1), uwzględniając wartość średniej prędkości przepływu wyznaczaną ze wzoru Manninga (2):

$$Q = v_{sr} \times F \quad (1)$$

$$v_{sr} = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times J^{1/2} \quad (2)$$

gdzie:

Q – objętościowe natężenie przepływu, [$m^3 s^{-1}$];

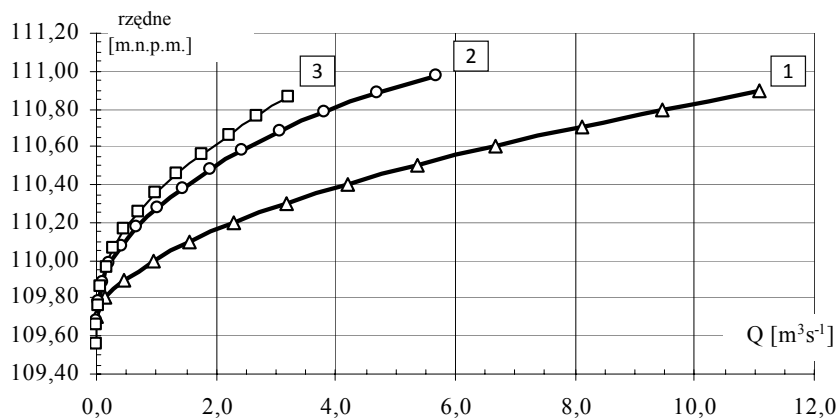
F – pole powierzchni przepływu w poprzecznym przekroju koryta, [m^2];

n – współczynnik szorstkości koryta, [$m^{-1/3} s$];

I – spadek hydrauliczny, [-];

R – promień hydrauliczny jako stosunek powierzchni przepływu wody F do długości obwodu zwilżonego U w poprzecznym przekroju koryta, [m].

W obliczeniach uwzględniono średni spadek zwierciadła wody na analizowanym odcinku koryta, uzyskany w wyniku pomiarów niwelacyjnych i wynoszący 0,3%. Powszechnie stosowane są współczynniki szorstkości do wzoru Manninga, które zostały zestawione przez Ven Te Chowa (1959). Ich wartości zróżnicowano ze względu na rodzaj koryta, sposób umocnienia, stopień wyrównania obwodu zwilżonego, roślinność w korycie [Kasprzak 2003] i podano w Tabeli 2. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci krzywych przepustowości koryta na Rys.10.



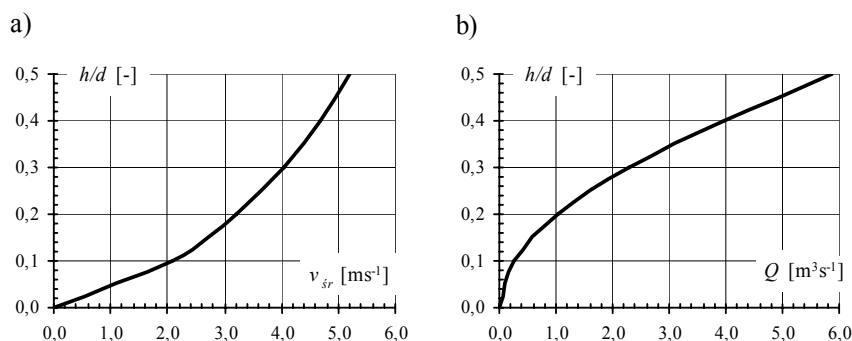
Rys.10. Krzywe przepustowości koryta rzeki Gnidzy w przekrojach pomiarowych:
1 – km 3+070, 2 – km 3+065, 3 – km 3+032

Natężenie przepływu przy napełnieniu brzegowym koryta wynosi:
 $Q_{(1)}=11,1m^3s^{-1}$ w przekroju nr 1, $Q_{(2)}=5,70m^3s^{-1}$ w przekroju nr 2

i $Q_{(3)}=3,22\text{m}^3\text{s}^{-1}$ w przekroju nr 3. Najmniejszą przepustowością charakteryzuje się koryto rzeki w przekroju 3, co związane jest z silnym porostem skarp i występowaniem lokalnych przeszkód na dnie. Do dalszych analiz wydatku urządzeń spustowych zbiornika uwzględniono krzywą przepustowości dolnego stanowiska budowli uzyskaną w przekroju nr 2 wskazując, że naturalne koryto rzeki Gnidy powinno zostać oczyszczone z zarośli i traw na skarpach oraz przeszkód na dnie, czego wynikiem byłby wzrost przepustowości koryta i zmiana przebiegu krzywej nr 3 na Rys.10.

Przepustowość przewodów spustowych

Wykorzystując równania (1) i (2) sporządzono charakterystykę wydatku rurowciągów spustowych zbiornika, wykonanych z rur o średnicy wewnętrznej $d=1,20$ m ułożonych ze spadkiem 2,27%. Zmienność średniej prędkości v_{sr} i natężenia przepływu Q w przewodach w zależności od ich napełnienia h/d przedstawiono na Rys.11. W obliczeniach przyjęto wartość współczynnika szorstkości dla rur betonowych ($n=0,013\text{ m}^{-1/3}\text{s}$) i założono, że wypływ z rurowciągów jest niezatopiony.



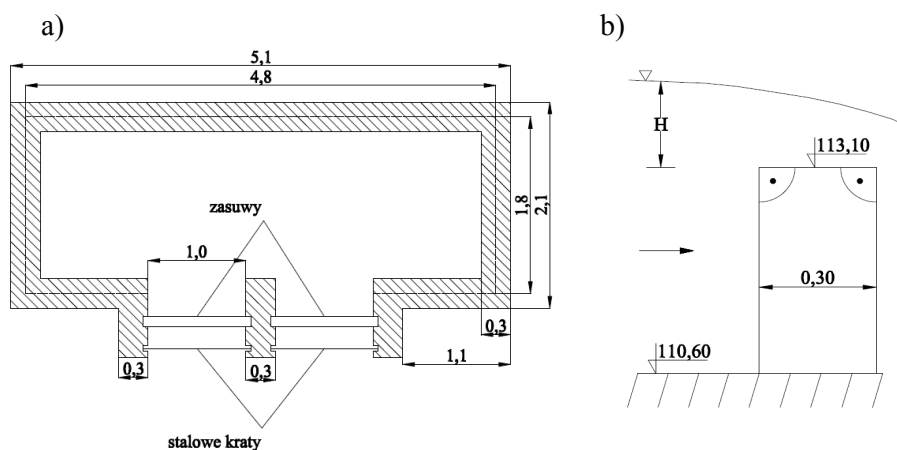
Rys. 11. Średnia prędkość przepływu (a) i charakterystyka wydatku (b) przewodów spustowych zbiornika

Przekrój kołowy pracuje jako hydraulicznie najkorzystniejszy, jeżeli jego napełnienie h jest równe promieniowi okręgu [Dąbkowski i in. 1982]. Obliczenia wykonano rozpatrując zmienność napełnienia przewodów h/d w zakresie od 0 do 0,5. Wyniki obliczeń wykazały, że napełnienie przewodów przy przeprowadzaniu przepływu $Q_{1\%}=4,67\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ wynosi $h/d=0,44$, a średnia prędkość $4,9\text{ ms}^{-1}$ i nie przekracza prędkości dopuszczalnej dla betonu, wynoszącej $5,0\text{ ms}^{-1}$. Rzeczywisty wydatek

rurociągów limitowany będzie jednak przepustowością koryta za wypadem budowli. Rzędna zwierciadła wody w korycie bezpośrednio za wypadem (przekrój nr 2) przy przejściu przepływu miarodajnego $Q_{1\%}=4,67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ wynosi 110,88 m.n.p.m. (Rys.10), natomiast rzędna górnej krawędzi wylotu rurociągów spustu równa jest 110,90m.n.p.m. W tych warunkach wylot może zostać zatopiony i wówczas rurociągi będą pracować pod ciśnieniem. Jest to dopuszczalne w przypadku przewodów spustowych małych budowli, tzn. przy przepływach miarodajnych $Q_m \leq 15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ [Suliga i in. 1986].

Charakterystyka wydatku przelewu wieżowego

Analizowana budowla upustowa przystosowana jest do przeprowadzenia wielkich wód przez przelew wieżowy, wykonany na rzędnej NPP=113,10 m.n.p.m. Zapewnić on powinien bezobsługowy odpływ wody ze zbiornika w zakresie znacznych wahań dopływu. Poziomy przekrój wieży oraz kształt korony przelewu wraz z podstawowymi wymiarami przedstawiono na Rys.12.



Rys.12. Wieża przelewu: a- przekrój poziomy, b- kształt korony przelewu

Wydatek przelewu niezatopionego obliczano w zależności od rzędnej zwierciadła wody spiętrzonej w zbiorniku, a wyniki przedstawiono w postaci wykresu (Rys. 13) . Przyjęto założenie, że przepływ odbywa się tylko przez przelew wieżowy, tzn. otwory wlotowe spustu są zamknięte zasuwami.

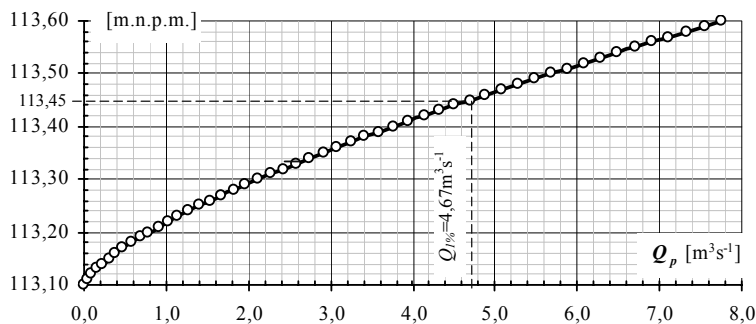
Zgodnie z zaleceniami praktycznymi [Suliga i in. 1986] uwzględniono współczynnik wydatku przelewu o ostrej krawędzi obliczany z równania (3):

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+P} \right) \right] \quad (3)$$

W równaniu (3) H oznacza wzniesienie zwierciadła wody nad koroną przelewu, a P wysokość wieży, obliczaną jako różnicę rzędnej korony przelewu i średniej rzędnej dna zbiornika wokół wieży. Uwzględniono także współczynnik k_2 dla przelewu upustów wieżowych o planie wieloboku [Suliga i in. 1986], obliczany z równania (4):

$$k_2 = 1 - \frac{L_s}{L} \quad (4)$$

W równaniu (4) L jest sumą długości wieloboku (przyjęto $L=2 \times 4,80 + 2 \times 1,80 = 13,20$ m na podstawie wymiarów wieży w osi przelewu), a L_s oznacza długość straconą na skutek zaburzeń na narożach. Dla przelewu prostokątnego w planie długość L_s obliczana jest ze wzoru $L_s = \overline{B_4} H$ [Suliga i in. 1986], a wartość parametru $\overline{B_4}$ uzależniona jest od kąta α utworzonego pomiędzy poszczególnymi ścianami wieloboku (dla $\alpha=90^\circ$ $\overline{B_4}=0,66$).



Rys.13. Krzywa wydatku przelewu wieżowego

Przy zamkniętych otworach wlotowych spustu dennego przepływ miarodajny ($Q_m=Q_{1\%}=4,67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) może być przeprowadzony przez przelew wieżowy przy spiętrzeniu zwierciadła wody w zbiorniku do rzędnej 113,45 m.n.p.m., tzn. na wysokość $H=0,35$ m ponad NPP. Rzędna korony zapory wynosi 114,00 m.n.p.m. Wyniki obliczeń wykazały, że przelew zapewnia bezpieczne warunki odpływu wody ze zbiornika podczas przejścia przepływu miarodajnego.

Podsumowanie i wnioski

Wykonane prace renowacyjne znacznie poprawiły stan techniczny urządzeń upustowych zbiornika, zapory czołowej i lewostronnej grobli bocznej. Dotychczas istniejący żelbetowy mnich i przelewy z bystrzami zastąpiono zespoloną budowlą z przelewem wieżowym i spustem dennym wyposażonym w zamknięcia zasuwowe. Wykonane urządzenia upustowe zapewniają kontrolę przepływu wód na obiekcie. Efektem dokonanej odbudowy obiektu jest znaczna poprawa walorów krajobrazowych zbiornika i jego bezpośredniego otoczenia, co jest istotne szczególnie w związku z rekreacyjną funkcją Zalewu Leźnickiego.

Analiza wyników obserwacji, pomiarów terenowych oraz obliczeń hydraulicznych pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków i zaleceń:

- 1) Koryto rzeki Gnidz na odcinku poniżej budowli upustowej powinno zostać oczyszczone z zarośli na skarpach oraz lokalnych przeszkód na dnie. Efektem tego będzie wzrost przepustowości. Wyniki obliczeń wykazały, że w obecnych warunkach po przekroczeniu przepływu o natężeniu $3,22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ woda wystąpi z koryta i spowoduje zalanie okolicznych terenów poniżej zbiornika.
- 2) Ograniczona przepustowość koryta rzeki za wypadem budowli wpływa na wydatek przewodów spustowych. W przypadku wystąpienia wezbrania odpowiadającego przepływowi $Q_{1\%}=4,67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ wylot rurociągów spustowych zostanie zatopiony.
- 3) Obliczona rzędna zwierciadła wody spiętrzonej w zbiorniku przy przejściu wezbrania odpowiadającego wodzie stuletniej wynosi 113,45 m.n.p.m., a rzędna korony zapory 114,00m.n.p.m. Zatem przelew wieżowy nawet w przypadku całkowitego zamknięcia otworów wlotowych spustu zapewnia bezpieczne warunki przejścia przepływu miarodajnego.
- 4) Podczas dalszej eksploatacji odbudowanych obiektów przestrzegana powinna być instrukcja gospodarowania wodą oraz bezwzględnie respektowane obowiązki wynikające z przepisów ustawy Prawo Budowlane w zakresie zapewnienia odpowiedniego stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu.

Literatura

- [1] Bryś H., 1996: Geodezyjne pomiary odkształceń i przemieszczeń zapór wodnych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków;
- [2] Chow Ven Te., 1959: Open-Channel Hydraulics. McGraw- Hill Book Company;
- [3] Dąbkowski Sz. L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL. Warszawa;
- [4] Gąsowska M., Urbański J., 2013: Odbudowa zbiornika retencyjnego na rzece Gnidzie w Leźnicy Wielkiej. Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 59, Warszawa;
- [5] Hrycak J., Baranowski W., 2007: Bezpieczeństwo małych zbiorników wodnych – zalecenia budowlane i eksploatacyjne. Materiały pod redakcją A. Wity. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór. IMGW, Warszawa;
- [6] Kasprzak K., 2003: Ruch wody-teoretyczne podstawy. IMGW, Warszawa;
- [7] Kubrak J., Nachlik E., 2003: Analiza przepustowości koryt rzecznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa;
- [8] Małecki Z. J., Pokładek R., 2010: Istotne procesy zagrażające bezpieczeństwu zbiorników wodnych. Zeszyty Naukowe – Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska. Nr 2. Instytut Badawczo-Rozwojowy Inżynierii Lądowej i Wodnej „Euroexbud”. Kalisz;
- [9] Mazurczyk A., Jankowski W., 2007: Wpływ przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych na eksploatację zapór ziemnych tworzących zbiorniki retencyjne na terenach równinnych Polski. Materiały pod redakcją A. Wity. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór. IMGW, Warszawa;
- [10] Mioduszewski W., 1999: Ochrona i kształtowanie zasobów wodnych w krajobrazie rolniczym. Wydawnictwo IMUZ, Falenty, Warszawa;
- [11] Mioduszewski W., 2006: Małe zbiorniki wodne. Wydawnictwo IMUZ. Falenty, Warszawa;
- [12] Strategia rozwoju gminy Parzęczew na lata 2009÷2015. Urząd Gminy Parzęczew;

-
- [13] Suliga J., Nalepa W., Zamiela H., 1986: Upusty małych zbiorników wodnych, Część I – Upusty wieżowe, Część III – Spusty. Biblioteczka Projektanta 4/86, Warszawa;
- [14] Świniuch A., 2010: Do rzeczy. Nr8. Fundacja Rozwoju Gmin PRYM. Parzęczew;
- [15] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo Budowlane (tekst jednolity Dz. U. Nr 207/2003, poz. 2016 z późniejszymi zmianami);
- [16] Wasilewski W., Faflik R., 2009: Projekt budowlano – wykonawczy przebudowy urządzeń wodnych na zbiorniku wodnym w m. Leźnica Wielka. Łódź.

Małgorzata Mostowska, Monika Gąsowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

e-mail: malgorzata_mostowska@sggw.pl, monika_gasowska@sggw.pl

Ocena parcia na obudowę głębokiego wykopu na przykładzie stacji metra C14 Stadion

Wstęp

Niniejsza praca przedstawia ocenę parcia na obudowę głębokiego wykopu. Do wykonania obliczeń oraz ich analizy wykorzystano dane dotyczące obiektu stacji C14 Stadion powstającej aktualnie II linii metra w Warszawie. Obliczenia wykonano na podstawie polskiej normy PN-81/B-03020 oraz Eurokodu 7 PN-EN 1997-1.

Potrzebne parametry do obliczeń ustalono na podstawie badań przeprowadzonych przez Konsorcjum GEOTEKO-SGGW-GEOPROJEKT w latach 2003-2004 dotyczących warunków geologicznych, hydrologicznych oraz geotechnicznych obiektu C14 Stadion. Wykorzystano również przekroje opracowane przez Biuro Projektowe Metroprojekt.

Ogólna charakterystyka obiektu

Stacja C14 Stadion II linii metra ma być największą stacją metra w Warszawie, gdyż stanowić będzie połączenia pomiędzy mającą w przyszłości powstać linią IIB metra oraz peronami przystanku PKP Stadion. Ze względu na zespolony charakter obiektu przesiadkowej stacji metra Stadion, przyjęto rozwiązanie obiektu w układzie poziomym przy jednoczesnej akceptacji Metra Warszawskiego.

Na zespolony obiekt składać się będą korpus stacji oraz tory odstawcze, w przestrzeni, których znajdować się będą połączenia torów obu linii z rozjazdami i peronami pasażerskimi. Północna część obiektu mieścić będzie tory, perony i technologię stacji II linii metra, południowa zaś tory,

perony i technologię projektowanej w przyszłości wschodnio-południowej odnogi II linii (IIB). Do czasu uruchomienia linii IIB tory odstawcze i perony tej części obiektu będą obsługiwały eksploatowaną część stacji II linii. W poziomie dolnym obiektu, we wschodniej części planuje się umieścić perony pasażerskie obu stacji, w zachodniej zaś rozjazdy i tory odstawcze. W poziomie górnym nad peronami zlokalizuje się wspólną antresolę pasażerską dla obu obiektów stacyjnych co umożliwi wygodną przesiadkę między II a IIB linią metra. Pozostałą przestrzeń kondygnacji górnej zajmować będą oddzielne dla każdej stacji pomieszczenia technologiczne.

Na obu końcach południowej części stacji zaprojektowano szyby montażowe/demontażowe dla startu lub wydobywania tarcz w przyszłości drążących tunele wschodnio-południowej odnogi linii IIB metra. Ponadto korpus stacji zaprojektowano jako dwukondygnacyjny obiekt podziemny. Długość korpusu wynosi będzie 144,0 m, zaś szerokość w świetle ścian 41,6 m podzielona na cztery nawy rzędami słupów, które będą zróżnicowane: słupy na osi stacji ϕ 140 cm rozszerzone ku górze w postaci żeber, słupy naw bocznych ϕ 70 cm. Rozstaw słupów 6,0 m. Słupy w osi stacji przenikać będą strop zewnętrzny, wyrastać ponad teren, gdzie będą zamknięte świetlikami.

Konstrukcja korpusu żelbetowa, monolityczna w obudowie zewnętrznych ścian szczelinowych grubości 1,0 m. Ściany w fazie realizacji stanowić będą obudowę wykopu, a w fazie docelowej będą ścianami zewnętrznymi korpusu. Zagłębienie ścian szczelinowych poniżej płyty dennej w dostosowaniu do panujących warunków gruntowo-wodnych zróżnicowane od 5,0 m do 15,0 m. Szerokości biegnących obok siebie peronów obu stacji 11,0 m. Pod peronami znajdować się będą kanały wentylacyjne.

Antresola pasażerska zaprojektowana została w postaci przerzuconych nad kondygnacją peronów pasm stropu, między którymi pozostawiono duże otwory umożliwiające wgląd w poziom peronów. Żelbetowa, monolityczna płyta denna korpusu grubości 140 cm osadzona będzie we wnękach ścian szczelinowych. W nawach, przez które przebiegać będą tory II linii, przyjęto w płycie dennej łukowe zagłębienia umożliwiające przesuw tarcz przez korpus. Przyjęto płytę stropu pośredniego nad halą peronową o grubości 60 cm z podłużnymi żebrami nad słupami. W zewnętrznych ścianach szczelinowych płyta stropu będzie oparta we wnękach i połączona

wypuszczonym zbrojeniem. Płyte stropu zewnętrznego przyjęto o grubości 100-140cm z otworami w osi środkowej wyciętymi pomiędzy wiązkami żeber tworzących słupy środkowe. Ze ścianami szczelinowymi strop połączony będzie monolitycznie za pośrednictwem wieńców. W szczytowych ścianach szczelinowych korpusu wokół otworów połączeniowych z tunelami tarczowymi zaprojektowano monolityczne, żelbetowe portale zespalaające konstrukcję korpusu dochodzącymi tunelami obu linii.

Perony obu linii będą równoprawnie skomunikowane ze wspólną antresolą biegami schodów ruchomych, stałych i windami. Kompleksy schodów przebiegać będą w otwartych przestrzeniach między pasmami stropu antresoli. Wyjścia ze stacji pod ulicą Sokolą zlokalizowane będą na szczytach obu antresol, w osi środkowego pasma stropu antresoli oraz w chodniku u podnóża skarpy nasypu kolejowego. Korytarze przejść podziemnych wyposażone będą w biegi schodów stałych i ruchomych oraz windy. Ich konstrukcja będzie monolityczna, żelbetowa.

Część technologiczna obiektu przylegać będzie od strony zachodniej do korpusu stacji i będzie z nim monolitycznie związana. Dwukondygnacyjny obiekt podziemny o zróżnicowanej długości, wzdłuż torów II linii metra będzie mieć długość 131,4 m, a wzdłuż torów linii IIB 257,4 m. Na długości torów odstawczych (tymczasowych dla II linii metra-docelowo fragment tunelu linii IIB) oraz na połączeniu z tunelami drażonymi szlaku II linii konstrukcja trzynawowa o rozstawie słupów na długości 6,0 m. Wysokość dolnej kondygnacji tunelu torów, określona została gabarytem przesuwanej tarczy. Kondygnacja górna nad torowiskami zagospodarowana będzie przez technologię stacji II i IIB linii metra.

Charakterystyka warunków geologicznych, hydrogeologicznych i geotechnicznych

W rozważanym przekroju omawianego obiektu (otwór OW-1) występują utwory zastoiskowe zlodowacenia Warty, wykształcone w postaci glin, glin pylastych, ilów, ilów pylastych, piasków pylastych oraz piasków drobnych oznaczone symbolem Q₁₃. W wierceniu tym wykryto również utwory wytopnieniowe, czyli zwałowe zlodowacenia Warty w postaci glin piaszczystych i piasków gliniastych, utwory rzeczne, korytowe w postaci piasków drobnych, średnich, żwirów i pospółek oraz utwory wezbraniowe (gliny pylaste) z końca zlodowacenia Warty i interglacjału eemskiego

oznaczone odpowiednio symbolami Qg₃ i Qr₃. Nasypy pochodzące z okresu holocenu oznaczono symbolem Qh [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska 2003-2004].

W analizowanym otworze OW-1 stwierdzono występowanie jednej spośród trzech, opisanych wcześniej zespołów, warstwy wodonośnej, którą tworzą osady zastoiskowe (Ql₃) zlodowacenia Warty: piaski średnie o współczynniku filtracji w zakresie 10⁻³-10⁻⁵ m/s, a także piaski drobne i pylaste stanowiące osad słabo przepuszczalny o współczynniku filtracji w zakresie 10⁻⁴-10⁻⁶ m/s [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska ... 2003-2004].

W wierceniu tym zwierciadło napięte wody stabilizowało się na głębokości 3,85m, zaś występowanie swobodnego zwierciadła wody stwierdzono trzykrotnie na głębokościach odpowiednio 3,85 m, 6,80 m i 22,30m [Wolski 2007a].

W otworze OW-1 wyróżniono cztery spośród dwudziestu dziewięciu opisanych powyżej warstw geotechnicznych.

Warstwę geotechniczną IIIQg_{3c} stanowią utwory morenowe zlodowacenia Warty w postaci glin piaszczystych na pograniczu piasków gliniastych w stanie twardoplastycznym o stopniu plastyczności w granicach 0.0-0.2 [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska ... 2003-2004].

Warstwa geotechniczna VIIQl_{3c} czyli utwory zastoiskowe zlodowacenia Warty wykształcone w postaci piasków pylastych, piasków drobnych z przewarstwieniami piasków pylastych w stanie średnio zagęszczonym i zagęszczonym o stopniu zagęszczenia w granicach od 0.6 do 0.7 [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska 2003-2004].

Warstwa geotechniczna VIIIQr_{3b} zaś składa się z utworów rzecznych interglacjału eemskiego wykształconych w postaci piasków średnich i grubych w stanie średnio zagęszczonym o stopniu zagęszczenia od 0.4 do 0.6 [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska ... 2003-2004].

Warstwa geotechniczna XQh-G to utwory rzeczne facji (zespołu wspólnych cech charakterystycznych dla skał utworzonych w różnych warunkach) wezbraniowej: mady wykształcone w postaci piasków gliniastych i glin z zawartością części organicznych w stanie plastycznym o stopniu plastyczności 0,4. W profilu gruntowym na analizowanym obszarze grunty te występują powyżej stropu projektowanej stacji i ich parametry

mechaniczne nie wpływają bezpośrednio na warunki pracy obudowy stacji [Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska ... 2003-2004].

Ściana szczelinowa, w rozważanym przekroju, znajdować się będzie na głębokości największej spośród wszystkich ścian Stacji C14 Stadion ze względów zarówno ekonomicznych, jak i ochrony środowiska.

Na głębokości od 22,3 m do 29,3 m poniżej powierzchni terenu występują grunty niespoiste (piasek pylasty) z przewarstwieniami osadów spoistych (głina pylasta). Grunty niespoiste dobrze przewodzą wodę, ale jej występowanie poniżej ściany szczelinowej spowodowałoby konieczność zastosowania odwodnienia terenu, na którym ma powstać Stacja C14.

Wykonanie robót odwadniających wymaga poniesienia dużych nakładów inwestycyjnych i jest szkodliwe dla roślin występujących na danym obszarze, gdyż muszą one mieć stały dostęp do wody, a wykonanie odwodnienia uniemożliwi im jej pobór.

Jak widać z opisanej powyżej charakterystyki warunków geologicznych, hydrogeologicznych i geotechnicznych budowa Stacji C14 Stadion II linii metra jest skomplikowaną inwestycją i wymagała wykonania bardzo dokładnych obliczeń w celu bezpiecznego wzniesienia obiektu nie zagrażającemu zarówno ludziom jak i przyrodzie.

Cel i zakres obliczeń

Celem wykonania obliczeń parcia gruntu na ścianę szczelinową było sprawdzenie czy właściwie zaprojektowano konstrukcję oporową. Z inżynierskiego punktu widzenia obliczenia takie wykonuje się głównie po to, aby określić klasę betonu, rodzaj i rozstaw zbrojeń itp., które należy wykorzystać do wykonania konstrukcji oporowej. Pierwszym etapem wykonania obliczeń było dobranie parametrów geotechnicznych na podstawie polskiej normy PN-81/B-03020. Następnie wykonano obliczenia na podstawie tej normy, jak i również Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Do obliczeń dołączono także wykresy parcia gruntu i wody na ścianę szczelinową.

Wartości parametrów geotechnicznych dla poszczególnych warstw razem z wydzieleniem genetycznym i geotechnicznym zestawiono w Tabeli 1. Na podstawie przekroju oraz charakterystyki warunków geologicznych, hydrologicznych i geotechnicznych, poszczególnym warstwom występującym w wierceniu OW-1 przypisano symbole, genezę, wiek oraz

stan gruntu. Następnie odczytano wartości potrzebnych do obliczeń parametrów geotechnicznych.

Gliny piaszczyste, zaliczane do glin zwałowych czyli utworów morenowych, pochodzą z okresu zlodowacenia Warty. Występują one w stanie twardoplastycznym. Gliny pylaste oraz gliny pylaste zwięzłe to osady zastoiskowe również pochodzące z okresu zlodowacenia Warty, znajdują się w stanie twardoplastycznym. Piaski pylaste stanowią utwory zastoiskowe zlodowacenia Warty w stanie twardoplastycznym, zaś piaski średnie będące osadami rzecznyymi pochodzą z okresu interglacjału eemskiego i występują w stanie średnio zagęszczonym. Nasypy antropogeniczne pochodzące z epoki holocenu występują w postaci piasku średniego oraz gliny.

Tabela 1. Wartości parametrów geotechnicznych dla Stacji C14 Stadion

Lp.	Nazwa warstwy	Symbol	Gęstość obj. [t/m ³]	Ciężar obj [kN/m ³]	Kąt tarcia [°]	Spójność [kPa]	Miaższość [m]
1.	nasyp niekontrolowany	nN	1,75	17,5	30,0	0	1,2
2.	nasyp niekontrolowany	nN	1,80	18,0	26,0	10	3,3
3.	glina pylasta	G _π	2,15	21,5	18,0	32	0,8
4.	glina pylasta	G _π	2,15	21,5	18,0	32	1,5
5.	piasek średni	P _s	2,00	20,0	33,0	0	2,0
6.	piasek średni	P _s	2,00	20,0	33,0	0	3,3
7.	glina pylasta zwięzła	G _{πz}	2,15	21,5	18,0	32	2,3
8.	glina piaszczysta	G _p	2,20	22,0	23,0	30	2,0
9.	glina pylasta zwięzła	G _{πz}	2,15	21,5	18,0	32	1,6
10.	glina pylasta	G _π	2,15	21,5	18,0	32	4,3
11.	piasek pylasty	P _π	1,95	19,5	31,5	0	0,7
12.	piasek pylasty	P _π	1,95	19,5	31,5	0	4,6
13.	glina pylasta	G _π	2,15	21,5	18,0	32	0,7

Charakterystyka metod obliczeniowych parcia

Według polskiej normy PN-81/B-03020 parcie czynne oraz parcie bierne (odpór) za ścianą oporową obliczona się z następujących wzorów: [PN-B/81-03020]

$$E_a = K_a \cdot [\Sigma(\gamma \cdot z) + q] - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} \quad (1)$$

$$E_p = K_p \cdot [\Sigma(\gamma \cdot z) + q] + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \quad (2)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3)$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (5)$$

Pionowe obciążenie naziomu wyznaczono na podstawie tabel opracowanych przez Biuro Projektowe Metroprojekt w zależności od wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu, rodzaju przemieszczającej się maszyny (ciągnik, tramwaj, samochód) oraz zagłębienia spodu konstrukcji. Ponieważ poniżej głębokości 16 m zastępcze obciążenia naziomu od ruchomych obciążeń drogowych mają zbliżone wartości, dla poszczególnej maszyny przyjęto wartość równą 15 kPa sześciokrotnie, gdyż urządzenia drogowe przemieszczają się będą zarówno w kierunku równoległym jak i prostopadłym do obiektu.

Na podstawie normy PN-81/B-03020 wyznaczono również parcie spoczynkowe, które występuje w gruncie zawsze przy obudowach tuneli w nim zagłębionych. Obliczono je traktując dane warstwy jako grunty normalnie skonsolidowane jak i prekonsolidowane. Dla gruntów normalnie skonsolidowanych przyjęto współczynnik K_o ze wzoru [PN-B/81-03020]:

$$K_o = 1 - \sin \phi \quad (6)$$

zaś dla gruntów prekonsolidowanych współczynnik K_o ma wartość równą 1. Parcie spoczynkowe wyznaczono ze wzoru [PN-B/81-03020]:

$$E_o = \gamma \cdot z \cdot K_o \quad (7)$$

Wyniki obliczeń wykonane na podstawie polskiej normy PN-81/B-03020 zestawiono w Tabeli 2.

Parcie gruntu obliczono również na podstawie Eurokodu 7 PN-EN 1997-1, w którym to opisana metoda uwzględnia:

- tarcie pomiędzy ścianą a gruntem, z czego wynika, iż kierunek siły parcia nie musi być poziomy,
- ściana konstrukcji podpierającej nachylona może być pod dowolnym kątem od 0° do 90° .

Według Eurokodu 7 siły działające na konstrukcję oporową wyznacza się na podstawie tych samych wzorów, które zawarte są w normie PN-81/B-03020, lecz przy uwzględnieniu różnych wartości współczynników częściowych. Współczynników tych nie bierze się pod uwagę przy obliczaniu wartości parć według normy PN-81/B-03020. Poniżej opisano podejścia projektowe, na podstawie których obliczono wartości parcia czynnego oraz biernego działających na ścianę szczelinową według ogólnego schematu [PN-EN 1997-1]:

oddziaływania(A)+parametry gruntu(M)+opór graniczny(R)

Podejście projektowe 1.1

A1+M1+R1

Podejście projektowe 1.2

A2+M2+R1

Podejście projektowe 2

A1+M1+R2

Podejście projektowe 3.1

A1+M2+R3

Podejście projektowe 3.2

A2+M2+R3

Wartości współczynników częściowych od oddziaływań lub od skutków oddziaływań, a także od parametrów gruntu i oporu granicznego zestawiono w tabelach 3, 4, 5. Współczynniki częściowe mają za zadanie zwiększyć wartości parametrów geotechnicznych oraz obciążeń trwałych i zmiennych o określony rząd procentów.

Z Tabeli 3 odczytano wartości współczynników częściowych od trwałych lub od zmiennych oddziaływań niekorzystnych. W przypadku współczynników od parametrów gruntu (Tabela 4) uwzględniono takie

parametry jak kąt wytrzymałości na ścinanie stosowany do wartości $\tan\phi$, spójność efektywną oraz gęstość objętościową. Z tabeli 5 odczytano wartości współczynników częściowych dla oddziaływań charakterystycznych i obliczeniowych w przypadku występowania nośności podłoża.

Przy projektowaniu konstrukcji oporowych oddziaływaniem trwałym jest naprężenie efektywne, zaś zmiennym poziome obciążenie naziomu. Poszczególne współczynniki pomnożono przez wartości parametrów geotechnicznych oraz trwałych i zmiennych oddziaływań zarówno w przypadku wyznaczania parcia czynnego jak i biernego. W ten sposób otrzymano wartości działających sił na ściankę szczelinową obliczone na podstawie różnych podejść projektowych. W celu zwiększenia bezpieczeństwa otrzymane wartości odporu podzielono przez współczynnik nośności podłoża.

Graniczne wartości parcia gruntu działającego na pionową ściankę, wywierane przez grunt o danym ciężarze objętościowym, spójności i równomierne obciążone pionowym naziemem wyznaczono z następujących wzorów [Eurokod 7 PN-EN 1997-1]:

$$E_a = K_a [A \cdot \Sigma(M \cdot \gamma \cdot z) + A \cdot q] - 2 \cdot A \cdot M \cdot c \sqrt{K_a} \quad (8)$$

$$E_p = \frac{K_p [A \cdot \Sigma(M \cdot \gamma \cdot z) + A \cdot q] + 2 \cdot A \cdot M \cdot c \sqrt{K_p}}{R} \quad (9)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (10)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (12)$$

Wartości współczynników czynnego parcia gruntu oraz odporu gruntu w przypadku nachylonej powierzchni naziomu odczytano z wykresów C.1.2 i C.2.2 znajdujących się w Eurokodzie 7 PN-EN 1997-1. Wyniki obliczeń wykonane na podstawie Eurokodu 7 PN-EN 1997-1 zestawiono dla poszczególnych podejść projektowych w tabelach 6, 7, 8, 9, 10 odpowiednio.

Tabela 2. Wartości parcia określone wg normy PN-81/B-03020

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]	K_o [-]	P_o kPa]	K_{oc} [-]	P_{oc} [kPa]
nN (P_s)	0,333	37,0	-	-	0,500	55,5	1,000	111
nN (G)	0,390	30,8	-	-	0,562	62,4	1,000	111
nN (G)	0,390	60,5	-	-	0,562	102	1,000	177
nN (G)/ G_π	0,527	49,9	-	-	0,691	124	1,000	177
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	66,9	-	-	0,691	144	1,000	202
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	66,9	-	-	0,691	144	1,000	202
P_s	0,527	98,9	-	-	0,691	181	1,000	249
P_s	0,294	64,7	-	-	0,456	100	1,000	220
P_s	0,294	90,6	-	-	0,456	129	1,000	260
P_s	0,294	90,6	-	-	0,456	129	1,000	260
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	133	-	-	0,456	177	1,000	326
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	125	-	-	0,691	225	1,000	326
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	151	-	-	0,691	259	1,000	375
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	125	-	-	0,609	229	1,000	375
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	144	2,278	201	0,609	256	1,000	419
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	175	1,891	195	0,691	290	1,000	419
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	193	1,891	340	0,691	314	1,000	454
G_π / P_π	0,527	193	1,891	340	0,691	314	1,000	454
P_π	0,527	241	1,891	515	0,691	377	1,000	546
P_π	0,313	171	3,180	718	0,478	229	1,000	480
P_π	0,313	180	3,180	746	0,478	264	1,000	553
P_π	0,313	180	3,180	746	0,478	271	1,000	560
P_π / G_π	0,313	240	3,180	931	0,478	338	1,000	650
P_π / G_π	0,527	296	1,891	710	0,691	449	1,000	650
G_π	0,527	304	1,891	738	0,691	459	1,000	665

Tabela 3. Współczynniki częściowe od oddziaływań lub od skutków oddziaływań

Oddziaływanie		Symbol	Zestaw	
			A1 [-]	A2 [-]
trwałe	niekorzystne	γ_G	1,35	1,00
	korzystne		1,00	1,00
zmiennie	niekorzystne	γ_Q	1,50	1,30
	korzystne		0,00	0,00

Tabela 4. Współczynniki częściowe od parametrów gruntu

Parametr gruntu	Symbol	Zestaw [-]	
		M1	M2
kąt wytrzymałości na ścinanie *	γ_ϕ	1,00	1,25
spójność efektywna	γ_c	1,00	1,25
wytrzymałość na ścinanie bez odpływu	γ_{cu}	1,00	1,40
wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe	γ_{qu}	1,00	1,40
gęstość objętościowa	γ_γ	1,00	1,40
* współczynnik ten stosuje się do wartości $\text{tg}\phi$			

Tabela 5. Współczynniki częściowe oporu granicznego

Opór	Symbol	Zestaw [-]		
		R1	R2	R3
nośność podłoża	$\gamma_{R,v}$	1,00	1,40	1,00
przesunięcie	$\gamma_{R,h}$	1,00	1,10	1,00

Tabela 6. Wartości parcia określone wg Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Podejście projektowe 1.1

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]
nN (P_s)	0,333	54,4	-	-
nN (G)	0,390	46,8	-	-
nN (G)	0,390	86,9	-	-
nN (G)/ G_π	0,527	74,4	-	-
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	97,5	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	97,5	-	-
P_s	0,527	141	-	-
P_s	0,294	91,0	-	-
P_s	0,294	126	-	-
P_s	0,294	126	-	-
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	184	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	176	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	211	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	174	-	-
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	200	2,278	284
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	243	1,891	276
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	267	1,891	484
G_π / P_π	0,527	267	1,891	484
P_π	0,527	333	1,891	720
P_π	0,313	235	3,180	1012
P_π	0,313	247	3,180	1050
P_π	0,313	247	3,180	1050
P_π / G_π	0,313	328	3,180	1300
P_π / G_π	0,527	407	1,891	984
G_π	0,527	417	1,891	1022

Tabela 7. Wartości parcia określone wg Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Podejście projektowe 1.2

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]
nN (P_s)	0,333	48,7	-	-
nN (G)	0,390	41,5	-	-
nN (G)	0,390	83,0	-	-
nN (G)/ G_π	0,527	72,0	-	-
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	95,9	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	95,9	-	-
P_s	0,527	141	-	-
P_s	0,294	88,0	-	-
P_s	0,294	124	-	-
P_s	0,294	124	-	-
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	184	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	178	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	214	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	176	-	-
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	203	2,278	258
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	247	1,891	250
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	272	1,891	446
G_π / P_π	0,527	268	1,891	446
P_π	0,527	340	1,891	690
P_π	0,313	237	3,180	976
P_π	0,313	249	3,180	1016
P_π	0,313	249	3,180	1016
P_π / G_π	0,313	333	3,180	1274
P_π / G_π	0,527	417	1,891	964
G_π	0,527	428	1,891	1004

Tabela 8. Wartości parcia określone wg Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Podejście projektowe 2

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]
nN (P_s)	0,333	54,4	-	-
nN (G)	0,390	46,8	-	-
nN (G)	0,390	86,9	-	-
nN (G)/ G_π	0,527	74,4	-	-
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	97,5	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	97,5	-	-
P_s	0,527	141	-	-
P_s	0,294	91,0	-	-
P_s	0,294	126	-	-
P_s	0,294	126	-	-
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	184	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	176	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	211	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	174	-	-
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	200	2,278	203
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	243	1,891	197
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	267	1,891	346
G_π / P_π	0,527	267	1,891	346
P_π	0,527	333	1,891	514
P_π	0,313	235	3,180	723
P_π	0,313	247	3,180	750
P_π	0,313	247	3,180	750
P_π / G_π	0,313	328	3,180	928
P_π / G_π	0,527	407	1,891	703
G_π	0,527	417	1,891	730

Tabela 9. Wartości parcia określone wg Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Podejście projektowe 3.1

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]
nN (P_s)	0,333	58,2	-	-
nN (G)	0,390	47,0	-	-
nN (G)	0,390	103	-	-
nN (G)/ G_π	0,527	85,0	-	-
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	117	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	117	-	-
P_s	0,527	178	-	-
P_s	0,294	112	-	-
P_s	0,294	161	-	-
P_s	0,294	161	-	-
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	242	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	228	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	277	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	228	-	-
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	264	2,278	326
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	321	1,891	315
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	355	1,891	558
G_π / P_π	0,527	350	1,891	558
P_π	0,527	447	1,891	888
P_π	0,313	312	3,180	1245
P_π	0,313	330	3,180	1298
P_π	0,313	330	3,180	1298
P_π / G_π	0,313	442	3,180	1648
P_π / G_π	0,527	550	1,891	1258
G_π	0,527	565	1,891	1312

Tabela 10. Wartości parcia określone wg Eurokodu 7 PN-EN 1997-1. Podejście projektowe 3.2

Warstwa	K_a [-]	P_a [kPa]	K_b [-]	P_b [kPa]
nN (P_s)	0,333	48,7	-	-
nN (G)	0,390	41,5	-	-
nN (G)	0,390	83,0	-	-
nN (G)/ G_π	0,527	72,0	-	-
G_π / $G_{\pi z}$	0,527	95,9	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	95,9	-	-
P_s	0,527	141	-	-
P_s	0,294	88,0	-	-
P_s	0,294	124	-	-
P_s	0,294	124	-	-
P_s / $G_{\pi z}$	0,294	184	-	-
$G_{\pi z}$ / P_s	0,527	178	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,527	214	-	-
$G_{\pi z}$ / G_p	0,438	176	-	-
G_p / $G_{\pi z}$	0,438	203	2,278	258
G_p / $G_{\pi z}$	0,527	247	1,891	250
$G_{\pi z}$ / G_π	0,527	272	1,891	446
G_π / P_π	0,527	268	1,891	446
P_π	0,527	340	1,891	690
P_π	0,313	237	3,180	976
P_π	0,313	249	3,180	1016
P_π	0,313	249	3,180	1016
P_π / G_π	0,313	333	3,180	1274
P_π / G_π	0,527	417	1,891	964
G_π	0,527	428	1,891	1004

Analiza wyników obliczeń

Na podstawie opisanych sposobów wyznaczania wartości parcia oraz zestawionych w tabelach wyników obliczeń stwierdzono, iż otrzymane na podstawie polskiej normy PN-81/B-03020 wartości parcia czynnego i biernego działających na konstrukcję oporową są mniejsze od wartości wyznaczonych w oparciu o Eurokod 7 PN-EN 1997-1 w przypadku różnych podejść projektowych. Różnica ta wynika z zastosowania w metodzie obliczeniowej opisanej w Eurokodzie 7 współczynników częściowych, które zwiększają wartości obciążeń trwałych i zmiennych oraz wartości parametrów geotechnicznych zarówno w przypadku parcia czynnego jak i biernego. Wartość odporu została podzielona przez współczynnik nośności podłoża, czyli została pomniejszona. Mimo to i tak jest większa od wartości otrzymanej na podstawie normy PN-81/B-03020. W celu zobrazowania wyżej opisanej różnicy wyznaczono wartości parcia dla poszczególnych metod na głębokościach odpowiadających połowie głębokości wykopu (8m), dna wykopu (16m) oraz na spodzie konstrukcji oporowej. Wyniki zestawiono w Tabeli 11.

Tabela 11. Wartości parcia czynnego i biernego

Norma	Nr podejścia projektowego	h [m]	P _a [kPa]	P _b [kPa]
PN-81/B03020	-	8,0	88	-
		16,0	140	-
		28,3	304	738
Eurokod 7 PN-EN 1997-1	1.1	8,0	123	-
		16,0	195	-
		28,3	417	1022
Eurokod 7 PN-EN 1997-1	1.2	8,0	121	-
		16,0	198	-
		28,3	428	1004
Eurokod 7 PN-EN 1997-1	2	8,0	123	-
		16,0	195	-
		28,3	417	730
Eurokod 7 PN-EN 1997-1	3.1	8,0	156	-
		16,0	257	-
		28,3	565	1312
Eurokod 7 PN-EN 1997-1	3.2	8,0	121	-
		16,0	198	-
		28,3	428	1004

W zależności od wielkości zastosowanych współczynników częściowych otrzymano różne wartości parcia w poszczególnych podejściach projektowych.

Wnioski końcowe

Obudowę mającej powstać w przyszłości stacji II linii metra w Warszawie C14 Stadion zaprojektowano w osłonie ścian szczelinowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń wyciągnięto następujące wnioski:

1. Wykonane obliczenia są obliczeniami wstępnymi do zaprojektowania odpowiedniej obudowy głębokiego wykopu.
2. Otrzymane wyniki są wartościami bardzo dużymi, rzadko spotykanymi w geotechnice. Wartości takie występują jedynie przy skomplikowanych budowlach ziemnych, jaką jest metro warszawskie. Przyczyną otrzymania tych wyników jest duża głębokość wykopu wynosząca 16 m.
3. Konstrukcja oporowa zaprojektowana na tak dużą głębokość wymaga dodatkowego wzmocnienia, gdyż obudowa w osłonie ścian szczelinowych jest niewystarczająca.
4. Z powodu niemożności zastosowania metody kotwionej, niezbędne jest wykorzystanie w przenoszeniu obciążeń rozparcia przy pomocy płyty dennej i płyty stropowej.
5. Po wzmocnieniu ścian szczelinowych rzędami rozpór w każdym z opisanych sposobów, warunek stateczności konstrukcji oporowej spełniony to znaczy, że parcie pasywne równoważy parcie aktywne i nie dojdzie do awarii ściany szczelinowej.
6. Najmniejsze wartości parcia otrzymano według polskiej normy PN-81/B-03020, największe zaś w oparciu o Eurokod 7 PN-EN 1997-1 w podejściu projektowym 3.1.
7. Różnice w otrzymanych wynikach obliczeń są rezultatem zastosowania w metodzie opisanej w Eurokodzie 7 częściowych współczynników bezpieczeństwa, których zadaniem jest zwiększenie wartości obciążeń trwałych i zmiennych oraz wartości parametrów geotechnicznych o odpowiedni rząd procentów. Wartość odporu zaś została pomniejszona o pewną wielkość.

Literatura:

- [1] Konsorcjum GEOTEKO-SGGW-GEOPROJEKT, Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska i Hydrologiczna dla II linii Metra w Warszawie-Stacja S13 Stadion, Warszawa 2003-2004
- [2] Wolski W. i inni, 2007: „Budowa geologiczna”, [w:] „Dokumentacja geologiczno inżynierska dla zmienionej trasy II linii metra w Warszawie na odcinku stacja Nowy Świat Stacja Dworzec Wileński”, Warszawa;
- [3] Wolski W. i inni, 2007: „Warunki hydrogeologiczne”, [w:] „Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zmienionej trasy II linii metra w Warszawie na odcinku stacja Nowy Świat – Stacja Dworzec Wileński”, Warszawa;
- [4] Wolski W. i inni, 2007: „Charakterystyka warunków geologiczno - inżynierskich”, [w:] „Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zmienionej trasy II linii metra w Warszawie na odcinku stacja Nowy Świat – Stacja Dworzec Wileński”, Warszawa;
- [5] PN-B/81-03020. Grunty budowlane. Posadowienia bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie;
- [6] Eurokod 7 PN-EN 1997-1. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne;
- [7] Mostowska M., 2009: „Ocena parcia na obudowę głębokiego wykopu na przykładzie stacji metra S13 Stadion”, Warszawa –praca inżynierska.