ACTA SCIENTIARUM POLONORUM

Czasopismo naukowe założone w 2001 roku przez polskie uczelnie rolnicze

Geodesia et Descriptio Terrarum

Geodezja i Kartografia

7(4) 2008

Bydgoszcz Kraków Lublin Olsztyn
Poznań Siedlce Szczecin Warszawa Wrocław

Rada Programowa *Acta Scientiarum Polonorum*

Kazimierz Banasik (Warszawa), Janusz Falkowski (Olsztyn),
Florian Gambuś (Kraków), Franciszek Kluza (Lublin), Edward Niedźwiecki (Szczecin),
Janusz Prusiński (Bydgoszcz), Jerzy Sobota (Wrocław) – przewodniczący,
Stanisław Socha (Siedlce), Waldemar Uchman (Poznań)

Rada Naukowa serii *Geodesia et Descriptio Terrarum*

Bernard Kontny (Wrocław) – przewodniczący, sekretarz,
Hieronim Olenderek (Warszawa), Alojzy Wasilewski (Olsztyn), Josef Weigel (Brno),
Mirosław Żak (Kraków)

Korekta:
Elżbieta Winiarska-Grabosz
Janina Szydłowska

Łamanie
Teresa Alicja Chmura

Projekt okładki
Daniel Morzyński

ISSN 1644–0668

Wydanie publikacji dofinansowane ze środków Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu,
Wrocław 2008

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel./fax 071 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl http://www.up.wroc.pl

Nakład 200 + 16 egz. Ark. wyd. 4,4. Ark. druk. 4,25
Druk i oprawa: Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.
ul. Kossaka 72, 85–307 Bydgoszcz

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM
Acta Sci. Pol.,
Geodesia et Descriptio Terrarum 7(4) 2008, 3-14

ZASTOSOWANIE METOD ESTYMACJI ODPORNEJ DO GEODEZYJNEGO OPISU DEFORMACJI OBIEKTU BUDOWLANEGO

Zbigniew Muszyński
Politechnika Wrocławska

Streszczenie. Trójwymiarowa transformacja bez zmiany skali jest jedną z metod wyznaczania geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego. W wyniku dopasowania dwóch zbiorów punktów kontrolowanych (pochodzących z pomiaru wyjściowego i aktualnego) otrzymujemy parametry przemieszczenia obiektu (kąty rotacji i składowe wektora translacji) oraz wartości wektorów przemieszczeń zredukowanych. Zazwyczaj obliczenia przeprowadzane są za pomocą metody najmniejszych kwadratów, która jest wrażliwa na wpływ punktów odstających. Znaczne lokalne deformacje obiektu mogą spowodować zniekształcenie otrzymanych wyników. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania pięciu metod estymacji odpornej do wyznaczania geodezyjnego opisu deformacji. Metody te dostarczają bardziej wiarygodnych wyników wpasowania, co ma duże znaczenie przy ocenie stanu technicznego budowli. Omawiane zagadnienie zostało zilustrowane na przykładzie symulowanego obiektu budowlanego.

Słowa kluczowe: geodezyjny opis deformacji, metody estymacji odpornej

WSTĘP

Prawidłowa i bezpieczna eksploatacja wielu konstrukcji inżynierskich wymaga wykonywania okresowych kontroli stanu technicznego tych obiektów. Dotyczy to przede wszystkim: zapór wodnych i innych obiektów hydrotechnicznych, mostów, budynków i budowli posadowionych na gruntach ekspansywnych, na terenach eksploatacji górniczej, w sąsiedztwie głębokich wykopów itp. Wspomniana kontrola obejmuje m.in. ocenę cech geometrycznych konstrukcji, poprzez tzw. geodezyjne wyznaczanie przemieszczeń. Szczegółową terminologię dotyczącą tego zagadnienia można znaleźć w normie [PN-N-02211:2000] oraz książce [Prószyński, Kwaśniak 2006]. Dla lepszego wprowadzenia w dalszą część pracy przypomniane zostaną podstawowe definicje, zaczerpnięte ze wspomnianych pozycji literaturowych.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Zbigniew Muszyński, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: zbigniew.muszynski@pwr.wroc.pl

Przemieszczeniem obiektu budowlanego nazywa się zmianę położenia obiektu względem przyjętego układu odniesienia, zaistniałą w określonym interwale czasowym, przy czym na przemieszczenie to składa się translacja i obrót obiektu. Parametrami przemieszczenia obiektu są wielkości określające zmianę jego położenia: wielkości przesunięć wzdłuż każdej z osi układu współrzędnych oraz kąty obrotu kolejno wokół każdej z osi tego układu. Fizycznie w terenie układ współrzędnych realizuje zbiór punktów odniesienia (znaków pomiarowych) osadzonych poza strefą oddziaływania badanego obiektu, w miejscach zapewniających stałość wzajemnego położenia tych punktów. Analizowana konstrukcja inżynierska reprezentowana jest przez odpowiednio dobraną liczbę punktów kontrolowanych. Są to sygnalizowane punkty pomiarowe osadzone na kontrolowanym obiekcie (bądź dobrze identyfikowalne charakterystyczne elementy obiektu), których przemieszczenia podlegają wyznaczaniu. Przez przemieszczenie punktu rozumie się zmianę położenia punktu względem układu odniesienia zaistniałą w określonym odstępie czasu. Wspomnianą zmianę położenia opisuje wektor przemieszczenia punktu, łączący położenie punktu w momencie początkowym z położeniem tego punktu w momencie końcowym określonego interwału czasowego, w przyjętym układzie odniesienia.

Zagadnienie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń było szczegółowo rozważane w wielu publikacjach, np. [Bryś, Przewłocki 1998, Czaja 1992, Lazzarini i in. 1977, Prószyński, Kwaśniak 2006]. W niniejszym artykule problem zostanie ograniczony do geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego. Zgodnie z definicją zawartą w normie [PN-N-02211:2000] opis ten realizowany jest przez zbiór wektorów, uzyskanych w wyniku zredukowania wektorów przemieszczeń punktów kontrolowanych obiektu (wyznaczonych w przyjętym, zewnętrznym układzie odniesienia) o wpływ z tytułu przemieszczeń całego obiektu (tzn. o wpływ translacji i rotacji). Otrzymane w ten sposób wektory (służące do geodezyjnego opisu deformacji obiektu) będą nazywane w dalszej części artykułu wektorami przemieszczeń zredukowanych. Jedną z metod wyznaczenia wektorów przemieszczeń zredukowanych jest trójwymiarowa transformacja bez zmiany skali [Adamczewski 1979], która zostanie wykorzystana w niniejszej pracy. Alternatywną metodę, opierającą się na wzorach geometrii analitycznej, przedstawiono w pracy [Grabowski 1998] jako metodę geometryczno-analityczną.

WYKORZYSTANIE TRANSFORMACJI PRZESTRZENNEJ DO GEODEZYJNEGO OPISU DEFORMACJI OBIEKTU BUDOWLANEGO

Załóżmy, że znamy współrzędne określonej liczby punktów kontrolowanych, pochodzące z pomiaru wyjściowego oraz pomiaru aktualnego. Współrzędne te są określone w tym samym, zewnętrznym układzie odniesienia. W rezultacie dysponujemy zbiorem wektorów przemieszczeń, które chcemy zredukować o wpływ translacji i rotacji obiektu, aby uzyskać wektory przemieszczeń zredukowanych. Stosując w tym celu trójwymiarową transformację bez zmiany skali, wykorzystujemy powszechnie znane wzory, które dla pojedynczego punktu kontrolowanego mają postać:

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{(2)} \\ y_{(2)} \\ z_{(2)} \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + M \cdot \begin{bmatrix} x_{(1)} \\ y_{(1)} \\ z_{(1)} \end{bmatrix} \right), \tag{1}$$

gdzie:

f_x, f_y, f_z – składowe wektora przemieszczenia, zredukowanego o wpływ translacji i rotacji obiektu;

$x_{(2)}, y_{(2)}, z_{(2)}$ – współrzędne punktu z pomiaru aktualnego;

$x_{(1)}, y_{(1)}, z_{(1)}$ – współrzędne punktu z pomiaru wyjściowego;

t_x, t_y, t_z – składowe wektora translacji;

M – macierz rotacji wyrażona poniższym wzorem:

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\varphi)\cos(\kappa) & -\cos(\varphi)\sin(\kappa) & \sin(\varphi) \\ \cos(\omega)\sin(\kappa)+\sin(\omega)\sin(\varphi)\cos(\kappa) & \cos(\omega)\cos(\kappa)-\sin(\omega)\sin(\varphi)\sin(\kappa) & -\sin(\omega)\cos(\varphi) \\ \sin(\omega)\sin(\kappa)-\cos(\omega)\sin(\varphi)\cos(\kappa) & \sin(\omega)\cos(\kappa)+\cos(\omega)\sin(\varphi)\sin(\kappa) & \cos(\omega)\cos(\varphi) \end{bmatrix}, \tag{2}$$

gdzie:

ω, ϕ, κ – kąty rotacji wokół osi *x*, *y*, *z*.

Zazwyczaj obiekt budowlany reprezentowany jest przez znaczną liczbę punktów pomiarowych. Dla każdego punktu otrzymujemy trzy równania. Przy sześciu szukanych parametrach orientacji otrzymujemy dużą ilość równań nadliczbowych. Najczęściej wielkości szukane obliczane są w sposób iteracyjny (ze względu na nieliniowość równań) przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Minimalizacji podlega suma ważonych kwadratów odchyłek wpasowania, którymi są poszczególne składowe wektorów przemieszczeń zredukowanych wyrażone wzorem (1). Powszechnie wiadomo, że metoda najmniejszych kwadratów jest wrażliwa na wpływ obserwacji odstających (nietypowych, różniących się od pozostałych obserwacji w zbiorze). W rozważanym zagadnieniu należy spodziewać się, że występowanie na obiekcie znacznych lokalnych deformacji kształtu może poważnie obniżyć wiarygodność otrzymanych wyników: parametrów przemieszczenia obiektu oraz wektorów przemieszczeń zredukowanych [Adamczewski 1979]. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie metod estymacji odpornej.

METODY ESTYMACJI ODPORNEJ

Estymacja odporna jest mocno rozwiniętym działem statystyki matematycznej. W literaturze opisana jest znaczna ilość różnorodnych metod odpornych, stosowanych w różnych dziedzinach nauki. W niniejszej pracy wykorzystano pięć wybranych metod estymacji odpornej (metodę Hubera, Hampela, duńską, Gaździckiego i liniową) do wyznaczania geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego. W kontekście geodezyjnego rachunku wyrównawczego istota wymienionych metod polega na iteracyjnym modyfikowaniu (zmniejszaniu) wag tym obserwacjom, które zostały uznane za odstające. Jako odstającą traktuje się obserwację, dla której obliczona wartość

poprawki przekracza wartość uznaną za dopuszczalną. W rezultacie obserwacje odstające mają mniejszy (a w skrajnym przypadku zerowy) wpływ na uzyskiwane rozwiązanie. Poniżej zamieszczono krótki opis pięciu wymienionych metod odpornych. Szczegółową charakterystykę tych metod, na tle istniejącej w literaturze statystycznej i geodezyjnej klasyfikacji metod estymacji odpornej, można znaleźć w pracy Muszyńskiego [2007].

a) Metoda Hubera

Została zaproponowana przez Hubera w pracy [1964] i powtórzona w artykule [1972]. Stanowi połączenie metody najmniejszych kwadratów i metody najmniejszego odchylenia przeciętnego. Dla *i*-tej obserwacji – iteracyjna modyfikacja wag przebiega zgodnie ze wzorem (3).

$$\hat{p}_i = \begin{cases} p_i & \text{dla} \quad |v_i| \le f \\ p_i \dfrac{f}{|v_i|} & \text{dla} \quad |v_i| > f \end{cases}, \tag{3}$$

gdzie:

p – waga *i*-tej obserwacji z poprzedniej iteracji (w pierwszym kroku obliczeniowym przyjmowana z metody najmniejszych kwadratów);

$\hat{p}$ – waga zmodyfikowana;

v – obliczona poprawka do obserwacji;

f – parametr sterujący, określający przedział dopuszczalnych wartości poprawek v.

b) Metoda Hampela

Metoda ta powstała jako rozwinięcie metody Hubera, a jej opis można znaleźć m.in. w pracy [Hampel 1974]. Iteracyjna modyfikacja wag w tej metodzie przebiega zgodnie z poniższym wzorem:

$$\hat{p}_i = \begin{cases} p_i & \text{dla} \quad |v_i| \le f \\ \dfrac{p_i \cdot f}{|v_i|} & \text{dla} \quad f < |v_i| \le g \\ \dfrac{p_i \cdot f \cdot \dfrac{h - |v_i|}{h - g}}{|v_i|} & \text{dla} \quad g < |v_i| \le h \\ 0 & \text{dla} \quad |v_i| > h \end{cases}, \tag{4}$$

gdzie:

g, h – parametry sterujące, określające granice dodatkowych przedziałów, charakteryzujących się odmiennym sposobem modyfikacji wag.

c) Metoda duńska

Została opracowana przez Krarupa i opisana w pracy [Krarup, Kubik 1983]. W odróżnieniu od poprzednich metod charakteryzuje się bardziej empirycznym podej-

ściem do zagadnienia modyfikacji wag obserwacji odstających. Modyfikacje te, przeprowadzane zgodnie ze wzorem (5), wykorzystują tzw. funkcję tłumienia (6).

$$\hat{p}_i = \begin{cases} p_i & \text{dla} \quad |v_i| \le f \\ p_i \cdot t(v_i) & \text{dla} \quad |v_i| > f \end{cases}, \tag{5}$$

$$t(v_i) = \exp\left(-d\left(\frac{|v_i|}{f}\right)^k\right), \tag{6}$$

gdzie:
d, k – parametry funkcji tłumienia o dodatnich wartościach.

d) Metoda Gaździckiego

Została zaproponowana przez Gaździckiego [1985] i stanowi pewnego rodzaju rozwinięcie metody duńskiej. Postać funkcji tłumienia w tej metodzie przedstawia wzór (8), natomiast modyfikacja wag przebiega zgodnie ze wzorem (7).

$$\hat{p}_i = \begin{cases} p_i & \text{dla} \quad |v_i| < f \\ p_i \cdot t(v_i) & \text{dla} \quad f \le |v_i| < g \\ 0 & \text{dla} \quad |v_i| \ge g \end{cases}, \tag{7}$$

$$t(v_i) = \left(1 + \frac{v_i - f}{\mathrm{f}(v_i)} \cdot \frac{2\left(1 - \mathrm{P}^G\right)}{\mathrm{P}^G (g - f)^2} \int_{\mathrm{f}}^{\mathrm{g}} \mathrm{f}(v)\,dv\right)^{-1}, \tag{8}$$

gdzie:

$\mathrm{f}(v_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v_i^2}{2}\right)$ – funkcja gęstości standaryzowanego rozkładu normalnego;

P^G – prawdopodobieństwo, że wartość poprawki v_i nie wynika z wpływu błędu grubego znajdującego się w innej obserwacji;

$\int_f^g \mathrm{f}(v)dv$ – prawdopodobieństwo przyjęcia przez v_i wartości z przedziału $\langle f; g \rangle$.

e) Metoda liniowa

Metoda liniowa została opisana w podręczniku [Osada 2002]. W odróżnieniu od poprzednich metod przeprowadzane modyfikacje nie dotyczą bezpośrednio wag obserwacji, lecz pośrednio – poprzez zmianę wartości błędów średnich *a priori* dla poszczególnych spostrzeżeń. Początkową, graniczną wartością poprawek (po przekroczeniu której następuje modyfikacja błędów zgodnie ze wzorem (9)) jest wartość odchylenia standardowego poprawek uzyskanych z poprzedniej iteracji – wzór (10) (w pierwszym kroku – z metody najmniejszych kwadratów). Po wstępnej stabilizacji

rozwiązania granicą zostaje podwójna wartość błędu średniego danego spostrzeżenia <wzór (11)> i obliczenia są kontynuowane. Dla poprawki przekraczającej wartość graniczną błąd średni danego spostrzeżenia powiększany jest o wartość równą przekroczeniu przez tę poprawkę przyjętego dla niej przedziału dopuszczalnego, zgodnie ze wzorem (9).

$$\widehat{m}_i^{(j+1)} = \begin{cases} m_i & \text{dla} \quad \left|v_i^{(j)}\right| \le \alpha_i^{(j)} \cdot m_i \\ m_i + \left|v_i^{(j)}\right| - \alpha_i^{(j)} \cdot m_i & \text{dla} \quad \left|v_i^{(j)}\right| > \alpha_i^{(j)} \cdot m_i \end{cases}, \tag{9}$$

gdzie:
j – numer kolejnej iteracji;
m_i – średni błąd pomiaru *a priori* dla *i*-tej obserwacji;
$\widehat{m}_i$ – zmodyfikowana wartość błędu obserwacji;
α – współczynnik obliczany dla *i*-tej obserwacji z poniższych wzorów:

$$\alpha_i^{(j)} = \frac{\sigma^{(j)}}{m_i}, \tag{10}$$

$$\alpha_i = 2, \tag{11}$$

gdzie:
σ – odchylenie standardowe poprawek.

f) Uwarunkowania związane ze stosowaniem metod estymacji odpornej

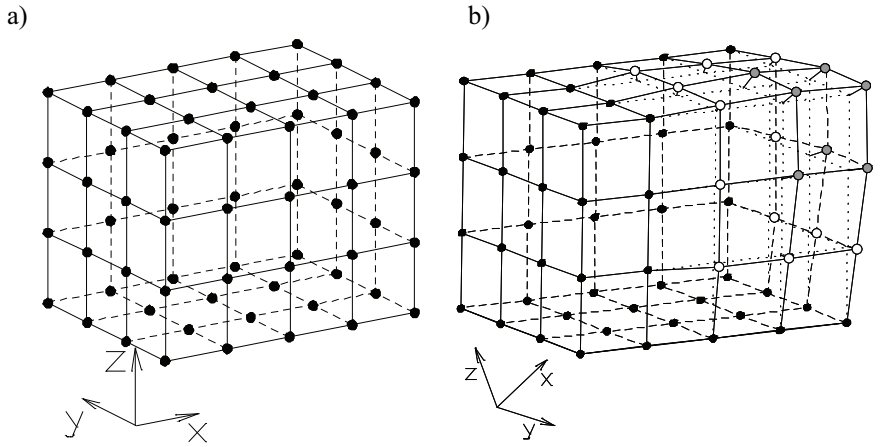
Wykorzystanie metod estymacji odpornej do nietypowego dla nich zastosowania, którym jest wyznaczanie geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego, wiąże się z przyjęciem następujących założeń. Odpowiednikiem klasycznych równań obserwacyjnych będą równania odchyłek wpasowania wyrażone wzorem (1). Zamiast poprawek do obserwacji minimalizowana będzie suma ważonych kwadratów składowych wektorów przemieszczeń zredukowanych. Współrzędne punktów kontrolowanych nie są obarczone wpływem błędów grubych.

Cztery metody odporne (Hubera, Hampela, duńska i Gaździckiego) wymagają przyjęcia w procesie obliczeniowym pewnych wartości parametrów sterujących. Do poszukiwania odpowiednich wartości tych parametrów wykorzystano oryginalny algorytm zaproponowany i przebadany w rozprawie [Muszyński 2007]. Istota wspomnianego algorytmu polega na powiązaniu wartości parametrów granicznych *f*, *g*, *h* z wartością odchylenia standardowego σ odchyłek wpasowania otrzymanych z poprzedniej iteracji. W pierwszym kroku obliczeniowym korzysta się z odchyłek uzyskanych z metody najmniejszych kwadratów. W każdej z czterech metod odpornych testowano 300 dopuszczalnych wariantów parametrów sterujących i wybierano najlepszy z nich. Wybrany wariant miał zapewnić uzyskanie jak najlepszego „nałożenia" na siebie dwóch zbiorów punktów tak, aby znaleźć ich najlepsze dopasowanie. Założono, że sytuacja taka występuje wówczas, gdy wykryta zostanie największa liczba przystających wektorów przemieszczeń zredukowanych. Sformułowanie to oznacza taki wektor przemieszczenia punktu (zredukowany o wpływ translacji i rotacji całego obiektu), którego

wartość nie przekracza podwójnej, uśrednionej (z dwóch epok pomiarowych: pomiaru wyjściowego i aktualnego) wartości błędu średniego przestrzennego położenia punktu pomiarowego. Zatem wektor przemieszczeń zredukowanych jest przystający, jeżeli jego wartość jest nieistotna z punktu widzenia dokładności pomiarów geodezyjnych.

SYMULOWANY OBIEKT BADAWCZY

Szczegółowe analizy badawcze przeprowadzone zostaną na symulowanym budynku w kształcie prostopadłościanu o następujących wymiarach: długość – 8 m, szerokość – 6 m, wysokość – 6 m. Przyjęto, że punkty kontrolowane zlokalizowane są na zewnętrznych ścianach budynku i rozmieszczone w postaci regularnej siatki kwadratów o długości boku 2 m. Uzyskano w ten sposób zbiór 68 punktów o znanych współrzędnych x, y, z, utożsamianych z wynikami pomiaru wyjściowego (rys. 1a). Aby uzyskać symulowane wyniki pomiaru okresowego (aktualnego), przyjęty kształt budynku poddano deformacji, a następnie wykonano translację i obrót obiektu wokół poszczególnych osi współrzędnych. Założone, „prawdziwe" wartości parametrów przemieszczenia budynku zamieszczono w tabeli 1. Zastosowane zniekształcenie polegało na deformacji radialnej 19 punktów reprezentujących wybrany narożnik bryły budynku wraz z najbliższym otoczeniem. Siedem punktów najbliższych narożnika (zaznaczonych na rys. 1b kolorem szarym) przesunięto radialnie na zewnątrz o 10 cm, natomiast otaczające je dwanaście pozostałych punktów (zaznaczonych kolorem białym) przesunięto w identyczny sposób o 5 cm. Po wykonaniu obliczeń uzyskane współrzędne, utożsamiane dla potrzeb artykułu z wynikami pomiaru aktualnego, zaokrąglono do 1 mm. Przyjęto (jednakowy dla wszystkich punktów) błąd średni położenia punktu w kierunkach: x, y, z wynoszący 3 mm. Wagi dla poszczególnych równań obliczono jako odwrotność kwadratu wspomnianego błędu średniego.



Rys. 1. Punkty kontrolowane (o znanych współrzędnych x,y,z) reprezentujące symulowany budynek: a) pomiar wyjściowy, b) pomiar okresowy (aktualny)

Fig. 1. Check points (with known coordinates x,y,z) which represent simulated building: a) initial survey, b) check (actual) survey

Tabela 1. Zestawienie parametrów przemieszczenia obiektu: „prawdziwych” i obliczonych z poszczególnych metod
Table 1. Comparison of object displacement parameters: calculated from particular methods and the true ones

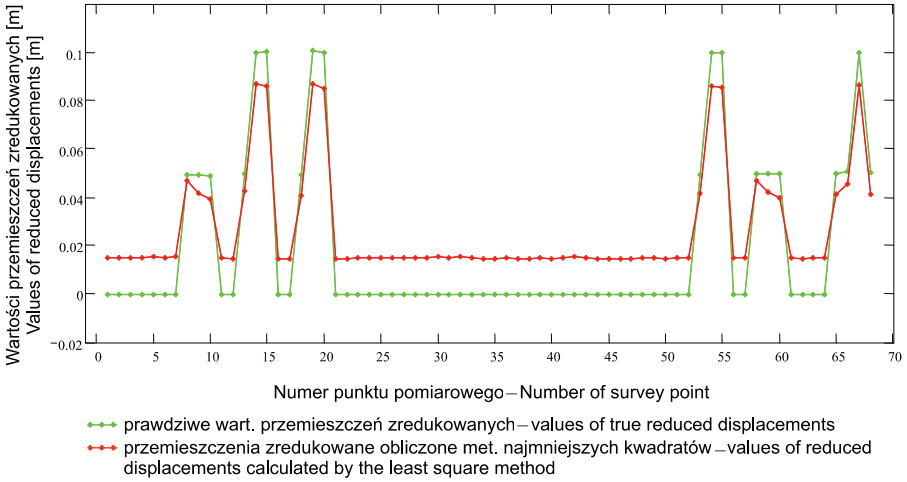
Parametry przemieszczenia obiektu oraz ich błędy średnie: Object displacement parameters and their mean errors:	„prawdziwe” true	Obliczone z metody: Calculated from method: najmniejszych kwadratów least squares	Hubera Huber's	Hampela Hampel's	duńskiej Danish	Gaździckiego Gazdzicki's	liniowej linear
			przy parametrach sterujących: with control parameters:				
			$f = 1.00\ \sigma$	$f = 1.00\ \sigma$ $g = 0.50\ \sigma$ $h = 2.00\ \sigma$	$f = 1.00\ \sigma$ $d = 0.05$ $k = 4.4$	$f = 0.32\ \sigma$ $g = 1.32\ \sigma$ $P^G = 0.5$	
ω [°]	30.0000	30.0014	30.0056	30.0070	30.0065	29.9816	30.0033
m_ω [°]	–	0.0080	0.0092	0.0096	0.0092	0.0015	0.0089
ϕ [°]	45.0000	45.0000	44.9929	44.9910	44.9910	45.0014	45.0041
m_ϕ [°]	–	0.0060	0.0079	0.0087	0.0080	0.0013	0.0070
κ [°]	60.0000	59.9988	59.9900	59.9884	59.9886	60.0211	59.9967
m_κ [°]	–	0.0078	0.0099	0.0109	0.0099	0.0016	0.0093
t_x [m]	11.000	11.013	11.001	11.001	11.001	11.001	11.000
m_{tx} [m]	–	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
t_y [m]	25.000	25.007	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
m_{ty} [m]	–	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
t_z [m]	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
m_{tz} [m]	–	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
liczba wektorów [1] quantity of vectors [2]	**49**	**0**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**
liczba iteracji quantity of iterations	–	5	41	44	47	57	12 + 3

[1] liczba przystających wektorów przemieszczeń zredukowanych
[2] quantity of displacement vectors (reduced with regard to translation and rotation) which are insignificant from a measurement accuracy point of view

Wykorzystywany do oceny istotności wektorów przemieszczeń zredukowanych błąd średni przestrzennego położenia punktu pomiarowego wynosił 5 mm. Przyjęto następujące kryterium zbieżności procesu iteracyjnego: w trzech kolejnych krokach obliczeniowych zmiana wartości kątów obrotu nie przekracza $1 \cdot 10^{-6}$ rad i jednocześnie zmiana składowych translacji nie przekracza $5 \cdot 10^{-4}$ m.

ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Zestawienie parametrów przemieszczenia obiektu obliczonych z poszczególnych stosowanych metod (z wykorzystaniem „optymalnego” wariantu parametrów sterujących) zawiera tabela 1. Wartości przemieszczeń zredukowanych w poszczególnych punktach pomiarowych, obliczone metodą najmniejszych kwadratów, na tle „prawdziwych” wartości przemieszczeń zredukowanych przedstawiono na rysunku 2.

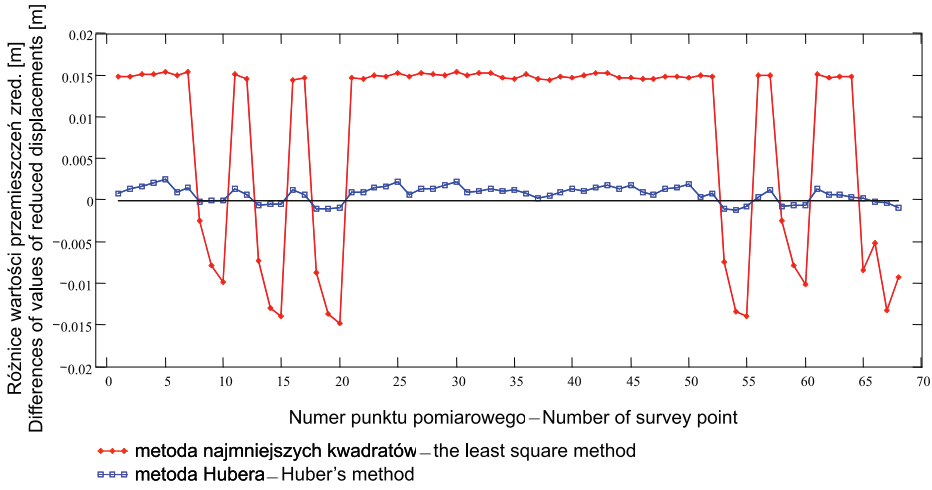


Rys. 2. Porównanie wartości przemieszczeń zredukowanych obliczonych metodą najmniejszych kwadratów z „prawdziwymi" wartościami przemieszczeń zredukowanych w poszczególnych punktach pomiarowych

Fig. 2. Comparison between values of reduced displacements calculated by the least squares method and values of true reduced displacements

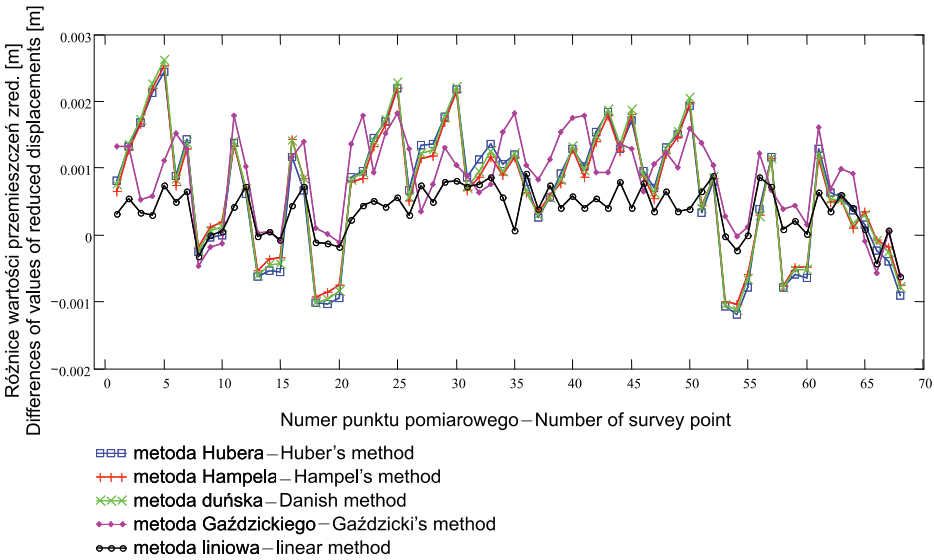
W celu sprawdzenia wiarygodności wyników obliczono różnice wartości przemieszczeń zredukowanych pomiędzy rezultatami otrzymanymi z poszczególnych metod a „prawdziwymi" wartościami tych przemieszczeń. Różnice te przedstawiono w formie wykresu na rysunkach 3 i 4. Dodatnia wartość różnic oznacza, że rozpatrywana metoda obliczeń zniekształciła wyniki, zawyżając wartość obliczonych przemieszczeń zredukowanych (w danym punkcie pomiarowym) w stosunku do „prawdziwej" wartości przemieszczeń zredukowanych. Ujemna wartość różnic – wartości przemieszczeń zredukowanych zostały zaniżone w stosunku do ich wartości „prawdziwych".

Rozpatrywany budynek posiada znaczną lokalną deformację występującą w jednym z jego narożników. Deformacja ta w istotny sposób wpływa na wyniki wpasowania przeprowadzonego metodą najmniejszych kwadratów. Szczególnie widoczne jest to na przykładzie wartości przemieszczeń zredukowanych obliczonych dla wszystkich nie zdeformowanych punktów obiektu. Punkty te zamiast „prawdziwych", zerowych przemieszczeń zredukowanych otrzymały przemieszczenia zredukowane rzędu 15 mm. Jednocześnie punkty kontrolowane opisujące deformacje obiektu, które powinny otrzymać „prawdziwą" wartość przemieszczeń zredukowanych równą 100 mm, otrzymały zaniżone wartości przemieszczeń, dochodzące do 87 mm. W efekcie, wszystkie punkty kontrolowane otrzymały istotne (z punktu widzenia dokładności pomiarów) przemieszczenia zredukowane (nie wykryto żadnego przystającego wektora przemieszczeń zredukowanych).



Rys. 3. Różnice wartości przemieszczeń zredukowanych pomiędzy wynikami z metody najmniejszych kwadratów i metody Hubera a „prawdziwymi" wartościami przemieszczeń zredukowanych

Fig. 3. Differences between values of reduced displacements calculated from two methods (the least squares method and the Huber's one) and the true values of reduced displacements



Rys. 4. Różnice wartości przemieszczeń zredukowanych pomiędzy wynikami z pięciu metod estymacji odpornej a „prawdziwymi" wartościami przemieszczeń zredukowanych

Fig. 4. Differences between values of reduced displacements calculated from robust estimation methods and the true values of reduced displacements

Zupełnie inaczej wyglądają wyniki otrzymane z metod estymacji odpornej. W każdej z nich wykryto prawdziwą liczbę wektorów przystających. Dla wszystkich punktów kontrolowanych odstępstwa od „prawdziwych" wartości przemieszczeń zredukowanych nie przekroczyły: 2.4 mm w metodzie Hubera, 2.5 mm w metodzie Hampela, 2.6 mm w metodzie duńskiej, 1.8 mm w metodzie Gaździckiego oraz 0.9 mm w metodzie liniowej. Odstępstwa te są nieistotne z punktu widzenia dokładności pomiarów, która dla przemieszczeń zredukowanych została określona na poziomie 5 mm.

Obliczone wartości parametrów przemieszczenia obiektu porównano z wartościami „prawdziwymi" tych parametrów. Przyjęto, że odstępstwa od wartości „prawdziwych" przekraczające (co do wartości bezwzględnej) podwójną wartość błędu średniego wyznaczenia tych parametrów są istotne z punktu widzenia dokładności pomiarów. W przypadku metody najmniejszych kwadratów w istotny sposób zniekształcone zostały obliczone wartości składowych translacji t_x i t_y. Wynika to z umiejscowienia lokalnej deformacji obiektu, która „ściągnęła" wpasowywany zbiór punktów, pochodzący z pomiaru wyjściowego. Znacznie bardziej wiarygodne parametry wpasowania obiektu otrzymano przy użyciu metod estymacji odpornej. Cztery spośród pięciu testowanych metod dostarczyły identycznych z „prawdziwymi" (w granicach przyjętej dokładności) wartości kątów obrotu i składowych translacji. Nieco słabiej wypadła metoda Gaździckiego, w której obliczone parametry κ i t_x różniły się istotnie od wartości „prawdziwych". Nie wpłynęło to jednak na liczbę wykrytych przez tę metodę przystających wektorów przemieszczeń zredukowanych.

PODSUMOWANIE

Precyzyjny, geodezyjny opis deformacji obiektu budowlanego ma istotne znaczenie przy sporządzaniu ekspertyz budowlanych, ocenie stanu technicznego i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji. Przedstawiony w artykule symulowany obiekt badawczy zawiera pewne uproszczenia. Posiada jednak niewątpliwą zaletę, która zadecydowała o jego wyborze. Znając przyjęte „prawdziwe" wartości przemieszczeń zredukowanych, można zweryfikować wiarygodność wyników otrzymywanych z różnych stosowanych metod obliczeniowych. W przypadku metody najmniejszych kwadratów wyraźnie widać, jak bardzo metoda ta jest wrażliwa na występowanie obserwacji odstających. Słabości tej pozbawione są metody estymacji odpornej. Każda z pięciu testowanych metod wykryła prawdziwą liczbę przystających wektorów przemieszczeń zredukowanych, podczas gdy metoda najmniejszych kwadratów nie wykryła ani jednego takiego wektora. Przedstawiony w artykule przykład doskonale potwierdza przydatność metod estymacji odpornej do geodezyjnego opisu deformacji. Planowane są dalsze prace badawcze wykorzystujące rzeczywiste obiekty budowlane.

PIŚMIENNICTWO

Adamczewski Z., 1979. Algorytm numerycznej kontroli przylegania obiektów. Geod. i Kart., 3, 195–200.

Bryś H., Przewłocki S., 1998. Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.

Czaja J., 1992. Geodezja inżynieryjno-przemysłowa. Zbiór przykładów i zadań. Część druga. Wydawnictwa AGH, Kraków.
Gaździcki J., 1985. Least squares adjustment with a weight function. Proc. of the 7th International Symposium of Geodetic Computations, Kraków, 299–310.
Grabowski R., 1998. Geometryczno-analityczna metoda wyznaczania translacji i rotacji obiektów inżynierskich. Mat. Symp. Geodezja inżynieryjna i kataster w gospodarce narodowej. Lwów-Rzeszów 21–24 maja 1998. Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej: Bud. i Inż. Środ., z. 29.
Hampel F., 1974. The Influence Curve and Its Role in Robust Estimation. Journal of American Statistical Association, 69, 346, 383–393.
Huber P. J., 1964. Robust Estimation of a Location Parameter. The Annals of Mathematical Statistics, 35, 1, 73–101.
Huber P. J., 1972. The 1972 Wald Lecture Robust Statistics: A Review. The Annals of Mathematical Statistics, 43, 4, 1041–1067.
Krarup T., Kubik K., 1983. The Danish method. Experience and philosophy. Deutsche Geodätische Kommission. Reihe A, 98, 131–134.
Lazzarini T. i in., 1977. Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia. Praca zbiorowa. PPWK, Warszawa.
Muszyński Z., 2007. Zastosowanie metod estymacji odpornej do identyfikacji obiektów budowlanych na podstawie pomiarów geodezyjnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska.
Osada E., 2002. Geodezja. Podręcznik elektroniczny w Mathcadzie 2001i. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
PN-N-02211:2000. Geodezja. Geodezyjne wyznaczanie przemieszczeń. Terminologia podstawowa.
Prószyński W., Kwaśniak M., 2006. Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Pojęcia i elementy metodyki. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej.

APPLICATION OF ROBUST ESTIMATION METHODS TO GEODETIC DESCRIPTION OF BUILDING DEFORMATION

Abstract. The three-dimensional transformation without change of scale is one of methods for geodetic description of building deformations. Object displacement parameters (rotation angles and components of translation vector) and values of reduced displacement vectors are delivered as a result of fitting two sets of check points (from initial survey and check one). Usually these calculations are done with the help of the least squares method. This method is very sensitive to influence of outliers. Considerable local deformations of object can cause distortion of obtained results. In the paper the possibility of the using for geodetic description of building deformation five robust estimation methods is presented. Results of fit obtained in this way are more reliable. This fact is very important for correct assessment of construction safety. This problem is illustrated by simulated building object.

Key words: geodetic description of deformations, robust estimation methods

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008

Do cytowania – For citation: Muszyński Z., 2008. Zastosowanie metod estymacji odpornej do geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr., 7(4), 3–14.

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM
Acta Sci. Pol.,
Geodesia et Descriptio Terrarum 7(4) 2008, 15-25

OCENA FAKTYCZNEJ DOKŁADNOŚCI POMIARÓW GPS-RTK WYKONYWANYCH Z WYKORZYSTANIEM KOREKCJI GENEROWANYCH PRZEZ MAŁOPOLSKI SYSTEM POZYCJONOWANIA SATELITARNEGO

Zbigniew Siejka
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przeprowadzono ocenę faktycznej dokładności uzyskiwanych wyników pomiarów w oparciu o proponowaną technologię. W tym celu wykonano wielokrotnie powtarzalne pomiary satelitarne techniką RTK na kilkunastu punktach kontrolnych sieci EUREF-POL i POLREF. Dodatkowo w pomiarach wykorzystano różne typy poprawek oferowanych przez Małopolski System Pozycjonowania Satelitarnego. Do oceny jakości uzyskanych wyników zastosowano wybrane statystyczne testy zgodności, rozkładów błędów.
Rezultaty opracowania numerycznego doświadczalnych pomiarów pozwoliły w obecnym etapie na ogólne stwierdzenie, że uzyskiwane dokładności pomiarów w czasie rzeczywistym mieszczą się w granicach 1–3 cm dla pozycji horyzontalnej oraz 1–5 cm dla wysokości, co odpowiada podstawowym założeniom budowanego systemu. Ponadto zauważono, że przy wykorzystaniu tej technologii unikamy problemów związanych z zasięgiem radia oraz zakłóceniami jego sygnału w stosunku do klasycznie realizowanej technologii RTK.

Słowa kluczowe: pomiary GPS-RTK, sieć stacji referencyjnych, korekcje RTK

WSTĘP

W ostatnich latach dotarły do naszego kraju najpopularniejsze rozwiązania stosowane na świecie w dziedzinie precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego, które działają na bazie naziemnych stacji referencyjnych GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Rozwiązania te oparte są o wielofunkcyjne systemy stacji referencyjnych, które pozwalają na wykonywanie pomiarów w czasie rzeczywistym za pomocą jednego odbiornika na podstawie odpowiednich obserwacji satelitarnych i specjalnie wyznaczanych dla nich poprawek. Jedynym warunkiem jest posiadanie odbiornika satelitarnego GPS wyposażonego w moduł komunikacji, który umożliwia odbiór korekt RTK oraz

Adres do korespondencji – Corresponding author: Zbigniew Siejka, Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 253A, 30-198 Kraków, e-mail: rmsiejka@cyf-kr.edu.pl

wymianę informacji z centrum zarządzania. Różnicowe metody pomiarów GNSS pomagają wyznaczyć współrzędnych z dokładnością subcentymetrową, a istota ich opiera się na założeniu, że zakłócenia propagacji sygnałów satelitarnych są takie same w tym samym obszarze geograficznym Ziemi, dzięki temu stosunkowo łatwo mogą być wyznaczone i wyeliminowane. Ustalenie błędów spowodowanych zakłóceniem propagacji sygnałów satelitarnych odbywa się przez porównanie obserwacji satelitarnych na punktach o znanych współrzędnych, tzw. stacjach referencyjnych, z obserwacjami uzyskanymi na punkcie wyznaczanym. Jednak wówczas dokładność określenia współrzędnych wyznaczanego punktu zależy istotnie od jego odległości od stacji referencyjnej. Dlatego też stosuje się alternatywną metodę wspólnego opracowania danych obserwacyjnych w sieci stacji referencyjnych, na podstawie których obliczane są poprawki do obserwacji oraz tworzone powierzchniowe modele korekcji. Rozwiązanie to daje możliwość uzyskania bardzo wysokich dokładności pomiarów przy rozmieszczeniu stacji referencyjnych w odległościach rzędu 70–80 km. Wielofunkcyjny System Precyzyjnego Pozycjonowania Satelitarnego działa od 2006 r. na terenie województwa śląskiego i małopolskiego, stanowiąc pierwszy etap projektu ASG-PL, który jest polską częścią szerszego, europejskiego systemu EUPOS, na potrzeby którego zostanie zbudowanych ponad 400 stacji referencyjnych. Dystrybucja poprawek odbywa się przez Internet z wykorzystaniem protokołu NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) oraz transmisji GSM/GPRS w pomiarach RTK i DGPS. W niniejszej pracy podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, jaka jest rzeczywista dokładność pomiarów wykonywanych w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem korekcji tego systemu.

MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

Pomiary eksperymentalne na potrzeby niniejszej pracy wykonano technologią RTK, wykorzystując Małopolski System Pozycjonowania Precyzyjnego, który działa w oparciu o technologię wirtualnych stacji referencyjnych. Stacje permanentne tej sieci spełniają rolę nowoczesnej państwowej osnowy poziomej, stanowiącej nawiązanie dla pomiarów sygnałów GPS na punktach wyznaczanych. Lokalizacje stacji zostały wybrane w taki sposób, aby zapewniały długofalową stabilność centrum fazowego anten odbiorników. Miejsca te są wolne od przeszkód i interferencji fal nośnych oraz efektu wielodrożności sygnałów satelitarnych. W systemie założono, że będzie on generował poprawki RTK dostępne przez Internet, które pozwolą na wyznaczenie współrzędnych punktów w czasie rzeczywistym z dokładnością nie gorszą niż: ±3 cm w poziomie i ±5 cm w pionie. Małopolski System Pozycjonowania Satelitarnego jest częścią szerszego programu ASG-PL/EUPOS, składa się obecnie z jedenastu stacji referencyjnych (fot. 1), a działaniem swoim obejmuje obszar województw: śląskiego i małopolskiego.

Fot. 1. Rozmieszczenie stacji referencyjnych Małopolskiego Systemu Pozycjonowania Satelitarnego [www.gps.malopolska.pl]

Photo.1. Location of the reference stations of Małopolski Satelite Positioning System [www.gps.malopolska.pl]

W lutym 2007 roku wykonano na wybranych punktach sieci POLREF pomiary eksperymentalne za pomocą wielokanałowego odbiornika sygnałów satelitarnych Trimble R8 GNSS (fot. 2). Trimble R8 GNSS to zaawansowany technologicznie, zintegrowany w jednej obudowie z anteną GPS precyzyjny odbiornik wyposażony w moduł komunikacji bezprzewodowej bluetooth oraz pamięć wewnętrzną. Odbiornik ten może pracować zarówno jako odbiornik ruchomy (rover lub rover VRS) lub też jako stacja bazowa. Posiada 76 kanałów do pomiarów sygnałów satelitarnych. Dla satelitów GPS wykonuje pomiary na nośnych: L1 kod C/A, L1/L2 pełny pomiar fazy, obsługuje nowy sygnał L2C i dodatkowo przystosowany jest do odbioru sygnałów na częstotliwości L5. Dla satelitów GLONASS wykonuje pomiary: kodu C/A i P na L1, kodu P na L2 oraz pełny pomiar fazy na L1/L2. Dodatkowo odbiera sygnały SBAS WAAS/EGNOS. Dokładność pomiarów kinematycznych w systemie pojedynczej lub wielokrotnej stacji bazowej podawanej przez producenta wynosi:

– poziomo ±10 mm + 1 ppm
– pionowo ±20 mm + 1 ppm.

Fot. 2. Odbiornik GPS Trimble R8 GNSS [www.trimble.com]
Photo. 2. The Trimble R8 GNSS receiver [www.trimble.com]

Pomiary kontrolne wykonano techniką satelitarną GPS/RTK na 14 punktach sieci POLREF zlokalizowanych na terenie województwa małopolskiego. Na każdym punkcie wykonano 75 pomiarów współrzędnych przy 5 inicjalizacjach bazy. Pomiar wykonano niezależnie dwoma metodami. Pierwsza dotyczyła wykorzystania korekcji z pojedynczej stacji referencyjnej, druga natomiast posłużyła się poprawkami systemu VRS.

Podczas pomiaru wykorzystano poprawki RTK dla precyzyjnych aplikacji generowane przez system obliczeniowy w formacie RTCM S.C. 104 ver. 2.3 i 3.0, które odbierano przez Internet za pomocą protokołu NTRIP.

ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ

Analizy uzyskanych wyników badań dokonano poprzez porównanie otrzymanych z pomiarów eksperymentalnych współrzędnych punktów kontrolnych z ich danymi katalogowymi, które przyjęto jako bezbłędne. Analizy dotyczyły wartości parametrów określonych zmiennych losowych, a także postaci (rodzaju) rozkładu zmiennych losowych [Adamczewski 2005].

Badanie przeprowadzono dwoma testami statystycznymi:

1) testem na podstawie parametrów,
2) testem Kołmogorowa-Smirnowa.

Badania na podstawie parametrów

W celu zbadania zgodności rozkładów błędów empirycznych z rozkładem normalnym zastosowano następujące parametry:

– wartość średnią zmiennej losowej (x),
– odchylenie standardowe (δ),
– współczynnik asymetrii (S),
– współczynnik spłaszczenia – kurtoza (K).

Dla stwierdzenia zgodności rozkładu empirycznego z teoretycznym porównano wyżej wymienione wielkości empiryczne z wartościami teoretycznymi tych parametrów dla rozkładu normalnego, czyli [Krysicki i in. 1986]:

$$\bar{x} = 0\,; \qquad S = 0\,; \qquad K = 0$$

Tabele od 1 do 6 przedstawiają wyniki przeprowadzonych analiz na punktach kontrolnych w tym zakresie dla poszczególnych zmiennych losowych.

Gdy różnice pomiędzy wartościami empirycznymi a teoretycznymi przekraczają dwukrotnie błędy średnie ich wyznaczenia – hipotezę o normalności rozkładu empirycznego należy odrzucić. Natomiast gdy różnice te są mniejsze – można przyjąć, że błędy mają rozkład normalny [Greń 1970, Krupiński 2006].

Tabela 1. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dx – poprawki z pojedynczej stacji
Table 1. Basic descriptive statistics for dx variable – corrections from single reference station

Nr. pkt.	$\bar{X}$	**Min.**	**Max.**	δ	**S**	**dS**	**K**	**dK**
0310	0,012	-0,012	0,036	0,010623	0,085168	0,27740	-0,317752	0,548211
0501	0,018	0,003	0,034	0,007490	-0,609510	0,27740	-0,463477	0,548211
0502	0,024	0,017	0,030	0,003065	-0,265477	0,27740	-0,55552	0,548211
0503	0,012	-0,014	0,024	0,008875	-1,26584	0,27740	1,037677	0,548211
0505	0,017	0,003	0,026	0,006472	-0,495557	0,27740	-1,00884	0,548211
0601	0,003	-0,014	0,017	0,006895	-0,022875	0,27740	-0,18525	0,548211
0603	0,011	-0,009	0,032	0,009411	0,220882	0,27740	-0,382873	0,548211
0604	0,014	-0,004	0,040	0,010651	0,595944	0,27740	-0,722636	0,548211
0701	0,017	-0,002	0,050	0,012900	0,737541	0,27740	-0,42452	0,548211
1509	0,029	0,018	0,041	0,006021	0,192879	0,27740	-0,771768	0,548211
1605	0,010	0,001	0,023	0,003452	1,455209	0,27740	5,122992	0,548211
1606	0,010	-0,001	0,024	0,006122	0,049478	0,27740	-0,686561	0,548211
1607	0,009	-0,001	0,021	0,005138	0,283216	0,27740	-0,739798	0,548211
1707	-0,008	-0,023	0,019	0,010801	0,836192	0,27740	0,17146	0,548211

Tabela 2. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dy – poprawki z pojedynczej stacji
Table 2. Basic descriptive statistics for dy variable – corrections from single reference station

Nr. pkt.	$\bar{X}$	Min.	Max.	δ	S	dS	K	dK
0310	-0,005	-0,020	0,015	0,007116	0,583630	0,27740	0,280045	0,548211
0501	0,008	-0,001	0,017	0,004212	-0,531044	0,27740	-0,023194	0,548211
0502	-0,003	-0,010	0,003	0,002684	-0,411871	0,27740	0,24515	0,548211
0503	-0,004	-0,021	0,005	0,006524	-0,52267	0,27740	-0,647503	0,548211
0505	-0,008	-0,023	0,000	0,005586	-0,990207	0,27740	0,56329	0,548211
0601	-0,001	-0,014	0,015	0,008393	0,114276	0,27740	-1,37183	0,548211
0603	0,022	0,006	0,031	0,005696	-0,472706	0,27740	-0,314754	0,548211
0604	-0,003	-0,018	0,017	0,007624	0,073921	0,27740	-0,258893	0,548211
0701	-0,008	-0,018	0,001	0,005386	-0,129732	0,27740	-1,23383	0,548211
1509	-0,019	-0,031	-0,013	0,004529	-0,524791	0,27740	-0,406297	0,548211
1605	-0,003	-0,007	0,001	0,001847	-0,645397	0,27740	-0,162322	0,548211
1606	-0,008	-0,046	0,015	0,017867	-0,888718	0,27740	-0,516012	0,548211
1607	-0,003	-0,014	0,010	0,005414	-0,480407	0,27740	-0,286550	0,548211
1707	-0,012	-0,027	0,003	0,009717	-0,012222	0,27740	-1,55287	0,548211

Tabela 3. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dh – poprawki z pojedynczej stacji
Table 3. Basic descriptive statistics for dh variable – corrections from single reference station

Nr. pkt.	$\bar{X}$	Min.	Max.	δ	S	dS	K	dK
0310	0,026	-0,016	0,074	0,024278	0,415323	0,27740	-0,879077	0,548211
0501	-0,054	-0,075	-0,031	0,009961	0,040274	0,27740	-0,628891	0,548211
0502	-0,036	-0,053	-0,015	0,011070	0,272626	0,27740	-1,28386	0,548211
0503	-0,069	-0,083	-0,060	0,005405	-0,13609	0,27740	-0,251480	0,548211
0505	-0,017	-0,043	0,006	0,013674	-0,223170	0,27740	-1,09546	0,548211
0601	-0,078	-0,101	-0,047	0,017297	0,371693	0,27740	-1,51217	0,548211
0603	-0,030	-0,050	-0,009	0,009837	0,468692	0,27740	-0,385419	0,548211
0604	0,018	-0,040	0,072	0,025577	0,258935	0,27740	-0,830129	0,548211
0701	-0,082	-0,114	-0,052	0,017395	-0,175706	0,27740	-1,11423	0,548211
1509	-0,044	-0,069	-0,016	0,012236	0,377012	0,27740	-0,433241	0,548211
1605	-0,049	-0,060	-0,035	0,004975	0,209289	0,27740	0,753913	0,548211
1606	-0,092	-0,155	-0,054	0,031616	-0,755552	0,27740	-0,812073	0,548211
1607	-0,079	-0,100	-0,058	0,009110	0,123076	0,27740	-0,308069	0,548211
1707	-0,102	-0,131	-0,075	0,012052	-0,469904	0,27740	0,04939	0,548211

Tabela 4. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dx – poprawki VRS
Table 4. Basic descriptive statistics for dx variable – VRS corrections

Nr. pkt.	$\overline{\mathbf{X}}$	**Min.**	**Max.**	δ	**S**	**dS**	**K**	**dK**
0310	0,025	-0,016	0,067	0,020536	0,199068	0,27740	-0,998378	0,548211
0501	0,015	-0,024	0,054	0,017642	-0,191207	0,27740	-0,31482	0,548211
0502	0,022	0,016	0,036	0,004359	1,48965	0,27740	1,968900	0,548211
0503	0,004	-0,013	0,026	0,008869	0,070612	0,27740	-0,292151	0,548211
0505	-0,008	-0,027	0,015	0,013104	0,25259	0,27740	-1,42246	0,548211
0601	0,021	0,010	0,033	0,005121	-0,408779	0,27740	-0,446261	0,548211
0603	0,010	-0,021	0,027	0,010181	-0,949768	0,27740	0,709738	0,548211
0604	0,018	0,003	0,040	0,009090	0,79373	0,27740	-0,022772	0,548211
0701	0,017	-0,017	0,063	0,018706	0,746380	0,27740	-0,264304	0,548211
1509	0,020	0,003	0,034	0,006819	-0,765982	0,27740	0,247596	0,548211
1605	0,011	0,002	0,018	0,004497	-0,26334	0,27740	-1,23198	0,548211
1606	0,021	-0,001	0,038	0,008713	-0,148529	0,27740	-0,566819	0,548211
1607	0,022	-0,002	0,036	0,008748	-1,01366	0,27740	-0,07065	0,548211
1707	0,004	-0,013	0,024	0,012124	-0,046292	0,27740	-1,46541	0,548211

Tabela 5. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dy – poprawki VRS
Table 5. Basic descriptive statistics for dy variable – VRS corrections

Nr. pkt.	$\overline{\mathbf{X}}$	Min.	Max.	δ	S	dS	K	dK
0310	0,001	-0,008	0,012	0,004194	-0,130932	0,27740	-0,465054	0,548211
0501	0,014	0,003	0,030	0,007855	0,453340	0,27740	-1,21968	0,548211
0502	0,006	-0,002	0,009	0,002678	-1,62781	0,27740	1,561292	0,548211
0503	0,001	-0,010	0,010	0,004567	0,068555	0,27740	-0,558332	0,548211
0505	-0,001	-0,021	0,015	0,007835	-0,40501	0,27740	-0,34224	0,548211
0601	-0,004	-0,015	0,008	0,005924	0,458677	0,27740	-0,896635	0,548211
0603	0,019	0,006	0,029	0,005770	-0,552349	0,27740	-0,471790	0,548211
0604	0,006	-0,007	0,020	0,005939	-0,22811	0,27740	-0,499498	0,548211
0701	-0,006	-0,017	0,007	0,005582	-0,463510	0,27740	-0,651906	0,548211
1509	-0,019	-0,028	-0,009	0,004802	0,400981	0,27740	-0,614037	0,548211
1605	-0,004	-0,009	0,003	0,002815	0,33391	0,27740	-0,26036	0,548211
1606	0,010	-0,002	0,022	0,005745	0,110072	0,27740	-0,743826	0,548211
1607	-0,003	-0,011	0,009	0,004281	0,51952	0,27740	0,05655	0,548211
1707	-0,003	-0,012	0,007	0,004382	0,207890	0,27740	-0,17793	0,548211

Tabela 6. Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennej dh – poprawki VRS
Table 6. Basic descriptive statistics for dh variable – VRS corrections

Nr. pkt.	$\overline{X}$	Min.	Max.	δ	S	dS	K	dK
0310	0,036	0,001	0,094	0,020574	0,765457	0,27740	0,043821	0,548211
0501	-0,065	-0,107	-0,026	0,023923	-0,088269	0,27740	-1,07999	0,548211
0502	-0,048	-0,080	-0,037	0,011200	-1,55705	0,27740	1,172897	0,548211
0503	-0,057	-0,076	-0,031	0,010918	0,659558	0,27740	-0,400372	0,548211
0505	0,016	-0,033	0,044	0,018495	-1,24951	0,27740	1,29602	0,548211
0601	-0,068	-0,123	-0,031	0,023940	-0,239729	0,27740	-0,947830	0,548211
0603	-0,044	-0,065	-0,025	0,008792	0,016385	0,27740	-0,171543	0,548211
0604	-0,035	-0,082	-0,012	0,016086	-1,41639	0,27740	1,831699	0,548211
0701	-0,077	-0,105	-0,039	0,014636	0,260823	0,27740	-0,731485	0,548211
1509	-0,071	-0,092	-0,031	0,013696	0,844909	0,27740	0,514914	0,548211
1605	-0,047	-0,067	-0,038	0,006739	-1,26175	0,27740	0,89151	0,548211
1606	-0,050	-0,077	-0,030	0,010014	-0,613137	0,27740	0,413364	0,548211
1607	-0,064	-0,106	-0,024	0,023690	0,25207	0,27740	-1,13441	0,548211
1707	-0,077	-0,111	-0,053	0,016426	-0,411971	0,27740	-1,10555	0,548211

Test Kołmogorowa–Smirnowa

Test Kołmogorowa–Smirnowa jest testem badającym zgodność rozkładu empirycznego (próbkowego) z rozkładami teoretycznymi, w szczególności z rozkładem normalnym [Stanisz 1998]. Wykorzystuje on statystykę, która opiera się na porównaniu dystrybuanty empirycznej ze stablicowaną dystrybuantą teoretyczną wynikającą z weryfikacji hipotezy zerowej. Zaletą testu jest możliwość wykorzystania go do badań rozkładów o stosunkowo nielicznej próbie.

Tabela 7. Wyniki testów statystycznych dla zmiennych wyznaczonych w oparciu o poprawki pochodzące z pojedynczej stacji referencyjnej
Table 7. Results of statistical tests for variables determined on base of corrections gotten from single reference station

Nr pkt.	0310	0501	0502	0503	0505	0601	0603	0604	0701	1509	1605	1606	1607	1707
Zmienna dx	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
Zmienna dy	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
Zmienna dh	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1

Tabela 8. Wyniki testów statystycznych dla zmiennych wyznaczonych w oparciu o poprawki pochodzące z systemu VRS
Table 8. Results of statistical tests for variables determined on base of corrections gotten from VRS system

Nr pkt.	**0310**	**0501**	**0502**	**0503**	**0505**	**0601**	**0603**	**0604**	**0701**	**1509**	**1605**	**1606**	**1607**	**1707**
Zmienna dx	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0
Zmienna dy	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Zmienna dh	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Aby zweryfikować hipotezę o normalności rozkładu błędów pomiarów uzyskanych na punktach kontrolnych, przeprowadzono dla analizowanych zmiennych (x, y, h) testy zgodności Kołmogorowa–Smirnowa na poziomie istotności α=0.05. Tabela 7 przedstawia wyniki testu dla pomiarów wykonanych z wykorzystaniem poprawek pochodzących z pojedynczej stacji referencyjnej, natomiast w tab. 8 zestawiono wyniki dla punktów pomierzonych w oparciu o poprawkę pochodzącą z systemu powierzchniowego VRS. Wyniki testów zapisano w systemie zero-jedynkowym, gdzie:

a) 1 oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu na poziomie ufności 95%,
b) 0 oznacza, że hipoteza zerowa o normalności rozkładu została odrzucona na poziomie ufności 95%.

WNIOSKI

Wartość przeciętna zmiennej losowej w znakomitej większości analizowanych przypadków oscyluje w okolicach zera. Jednak dla współrzędnych ***x*** przyjmuje wyraźnie wartości dodatnie, natomiast dla współrzędnych ***y*** oraz wysokości ***h*** wartości ujemne. Współczynnik skośności ***S*** przyjmuje w około 43% wartości bliskie zera $\{S \in (-0.3 \div +0.3)\}$, co świadczy o symetrii zmiennych rozkładu. W około 23% przypadków skośność ma wartości dodatnie, co świadczy o prawostronnej asymetrii rozkładu, natomiast w około 34% analizowanych przypadków współczynnik ten przyjmuje wartości ujemne, wskazując na lewostronną asymetrię i wydłużone lewe ramię rozkładu zmiennych.

Kurtoza jako jedna z miar spłaszczenia rozkładu wartości cechy przyjmowała wartości bliskie 0 dla około 23% analizowanych zmiennych, co świadczy o tym, że w tych przypadkach spłaszczenie rozkładu było podobne do spłaszczenia rozkładu normalnego. Dla 15% przypadków kurtoza (K) wykazała rozkłady leptokurtyczne, co wskazuje, że wartości zmiennych w tych przypadkach były bardziej skoncentrowane niż przy rozkładzie normalnym. Natomiast w 62% przypadków kurtoza wykazała wartości ujemne, dla tych przypadków wartości analizowanych zmiennych były mniej skoncentrowane niż przy rozkładzie normalnym.

Analiza szczegółowa uzyskanych wyników testu Kołmogorowa–Smirnowa wykazała, że dla około 74% badanych zmiennych wyznaczonych w oparciu o poprawkę

pochodzącą z pojedynczej stacji i około 70% zmiennych wyznaczonych o poprawki z systemu VRS – brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu na poziomie istotności α=0.05.

Dla jedenastu z czternastu badanych punktów sieci POLREF wyniki testów statystycznych wykazały pełną lub wysoką zgodność uzyskanego faktycznego rozkładu błędów wyznaczanych współrzędnych z rozkładem normalnym. Przy czym za pełną zgodność należy rozumieć brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu na poziomie ufności 95% dla wszystkich analizowanych współrzędnych: x, y, h. Natomiast wysoka zgodność oznacza, że spośród analizowanych współrzędnych w jednym przypadku dla danego punktu wynik testu statystycznego dawał podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu na przyjętym poziomie ufności. Tylko w jednym przypadku dla obydwu rodzajów analizowanych poprawek uzyskano brak jakiejkolwiek zgodności rozkładu błędów z rozkładem normalnym (dx=0, dy=0 i dz=0).

Powyższe analizy pozwalają na ogólne wnioskowanie o przydatności do wykonywania pomiarów geodezyjnych zastosowanej technologii. Podstawowe jej zalety to podniesienie efektywności wykonywanych pomiarów, zwiększenie dokładności wyznaczanych współrzędnych za pomocą jednego odbiornika, zwiększenie zasięgu pomiarów oraz obniżenie kosztów. Uzyskane wyniki świadczyć mogą również o występowaniu pewnych błędów systematycznych, których źródłem może być przyjęta metoda pomiarów lub też układ odniesienia. Jednak ocena tych błędów wymaga podjęcia badań na większej próbie statystycznej i będą one źródłem dalszych badań autora w tym zakresie.

PIŚMIENNICTWO

Adamczewski Z., 2005. Teoria błędów dla geodetów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Greń J., 1970. Modele i zadania statystyki matematycznej. PWN, Warszawa.

Krupiński W., 1973. Sposoby badania zgodności rozkładów błędów niektórych pomiarów geodezyjnych z rozkładami teoretycznymi. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, ser. Geodezja, 3, 83.

Krysicki W. i in., 1986. Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II, Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa.

Stanisz A., 1998. Przystępny kurs statystyki. StatSoft Polska Sp. z o. o., Kraków.

EVALUATION OF ACTUAL ACCURACY IN GPS-RTK MEASUREMENTS PERFORMED USING CORRECTIONS GENERATED BY SATELLITE POSITIONING SYSTEM OF MAŁOPOLSKA

Abstract. The main aim of the thesis was the evaluation of actual accuracy of survey results obtained by using suggested technology. In this purpose satellite measurements realized by RTK technique have been repeated many times on several control points of EUREF-POL and POLREF network. Additionally, few different types of corrections offered by Satellite Positioning System of Małopolska were used in measurements. For estimate of the quality of obtained results, statistical tests of goodness of fit distribution of errors, have been applied.

The results of numerical analysis of experimental measurements allowed, on present stage, to general state, that obtained real time measurements accuracies are contained in 1–3 cm limit in horizontal position and 1–5 cm limit in vertical, that corresponds to basic guidelines of the created system. Moreover, it has been determined by using this technology we avoid problems with the radio range and disturbances of its signal in comparison with the traditionally realized RTK method.

Key words: GPS-RTK measurements, reference stations network, RTK corrections.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008

Do cytowania – For citation: Siejka Z., 2008. Ocena faktycznej dokładności pomiarów GPS-RTK wykonywanych z wykorzystaniem korekcji generowanych przez Małopolski System Pozycjonowania Satelitarnego. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr., 7(4), 15–25.

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM
Acta Sci. Pol.,
Geodesia et Descriptio Terrarum 7(4) 2008, 27-36

ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII GPS DO WYZNACZENIA WSPÓŁRZĘDNYCH OSNOWY REALIZACYJNEJ OBWODNICY MIASTA WYSZKOWA

Mieczysław Bakuła, Stanisław Oszczak, Roman Bornus, Wojciech Jarmołowski, Renata Pelc-Mieczkowska, Rafał Gregorczyk

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę pomiaru i opracowania obserwacji GPS dla zastosowań inżynierskich przy budowie autostrad. Pomiar osnowy realizacyjnej na odcinku 13 km dla obwodnicy Wyszkowa wykonano przy użyciu 7 odbiorników GPS: Ashtech Z-XII, Z-Surveyor oraz Z-Xtreme. Punkty osnowy realizacyjnej były w większości stabilizowane na skraju lasu, co znacznie utrudnia wiarygodne wyznaczenie precyzyjnych współrzędnych. W takich przypadkach niezwykle ważne jest określenie właściwej metodyki pomiaru i opracowanie obserwacji GPS w celu uzyskania wysokiej i wiarygodnej dokładności wyznaczanych pozycji. Przedstawiona metodyka pomiaru oraz opracowania obserwacji GPS umożliwiła otrzymanie dokładności po wyrównaniu rzędu 2–3 mm przy 1.5–3 h sesjach obserwacyjnych.

Słowa kluczowe: GPS, osnowa realizacyjna, wyznaczanie nieoznaczoności

WPROWADZENIE

Do wyznaczenia precyzyjnego współrzędnych wektora GPS z obserwacji satelitarnych niezbędne jest właściwe wyznaczenie nieoznaczoności pomiarów fazowych. Jest to warunek konieczny, ale w przypadkach o ograniczonym dostępie anteny odbiornika GPS do sfery niebieskiej wyznaczenia nieoznaczoności mogą być dla danej pary satelitów wyliczone błędnie; co jest możliwe do wykrycia tylko w procesie wyrównania wektorów GPS, przy odpowiedniej liczbie obserwacji nadliczbowych i odpowiednim powiązaniu z kilkoma punktami referencyjnymi. Na otrzymanie wysokiej dokładności z obserwacji satelitarnej wpływa szereg czynników związanych nie tylko z rodzajem użytego sprzętu, ale przede wszystkim z poprawnie zaplanowanymi i przeprowadzonymi obserwacjami satelitarnymi. Sposób opracowania obserwacji GPS, tzn. dobranie

Adres do korespondencji – Corresponding author: M. Bakuła, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. J. Heweliusza 5, 10-724 Olsztyn

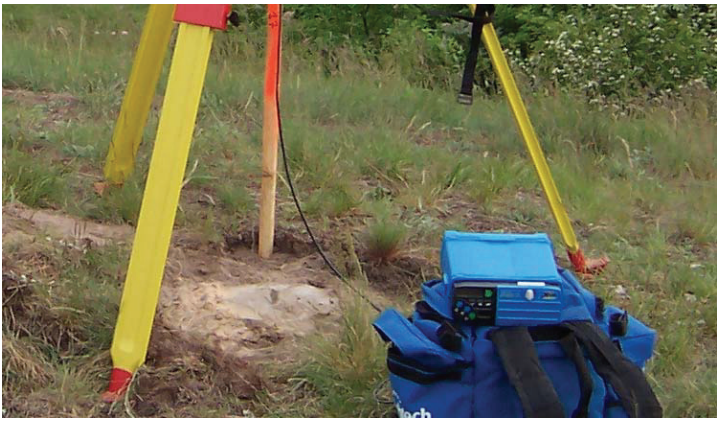
odpowiedniej metodyki opracowania wektorów GPS, a następnie przeprowadzenia szczegółowych analiz ich poprawnego wyznaczenia ma także istotne znaczenie. Dopiero wtedy w procesie wyrównania wektorów GPS możemy otrzymać wysoką dokładność. Na kolejnych etapach pomiaru i opracowania obserwacji satelitarnych należy stosować niezależne kontrole i obserwacje nadliczbowe.

W pracy przedstawiono koncepcję przeprowadzenia obserwacji GPS i ich opracowania dla poziomych sieci o podwyższonej dokładności. Wymaganiem Zleceniodawcy było otrzymanie poziomej osnowy realizacyjnej o dokładności wewnętrznej rzędu 5–10 mm. Osiągnięcie takiej dokładności nie jest jednak sprawą prostą, jeśli pomiary sieci liniowych o długości rzędu 13 km wykonujemy w pobliżu drzew, stosując metody pomiaru i opracowania odpowiednie dla typowych szczegółowych osnów geodezyjnych. Dlatego też, w celu otrzymania wymaganej dokładności, zastosowano inną koncepcję opracowania obserwacji satelitarnych dla wektorów długich i krótkich.

ROZMIESZCZENIE WYZNACZANYCH PUNKTÓW

Zastabilizowane w terenie punkty do pomiaru GPS były tak usytuowane, aby umożliwić sprawne przeprowadzanie klasycznych pomiarów geodezyjnych związanych z obsługą budowy obwodnicy. Przykład stabilizacji przedstawiono na fotografii 1. Z betonowego słupa wystaje metalowy trzpień stanowiący zarówno znak osnowy poziomej, jak i wysokościowej.

Punkty rozmieszczono po obu stronach projektowanej osi drogi. Z uwagi jednak na to, że część trasy musiała przebiegać przez las, część punktów była z konieczności umieszczona niedaleko drzew lub nawet pod ich koronami (fot. 2). Jako że umieszczono punkty niedaleko drzew, pogarsza się znacznie geometryczny rozkład satelitów nad obserwowanym punktem, jak również dla części satelitów odbierane są sygnały przedostające się przez gałęzie drzew. Stwarza to poważne zagrożenie przy opracowaniu obserwacji GPS [Bakuła i in. 2006a,b]. Biorąc pod uwagę możliwość błędnego wyznaczenia nieoznaczoności pomiarów fazowych a przez to i błędne wyznaczenie współrzędnych wektora, planowanie sesji obserwacyjnych GPS należy tak wykonać, aby istniała niezawodna kontrola wyznaczonych współrzędnych pomierzonych punktów. Lokalizację pomierzonych punktów osnowy geodezyjnej przedstawiono na fotografii 3.

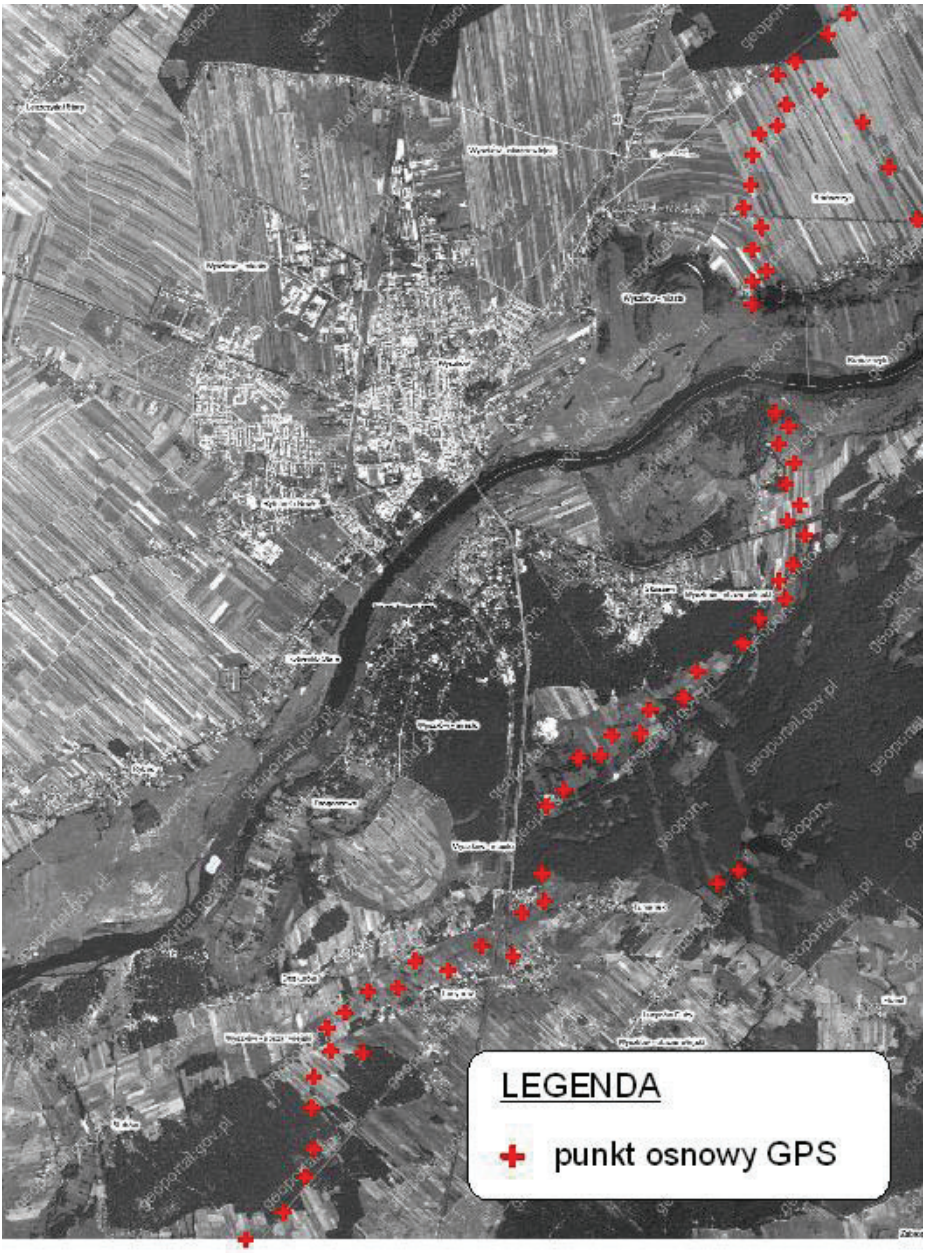


Fot. 1. Przykład stabilizacji osnowy geodezyjnej
Phot. 1. An example of monumentation of control points

a

b

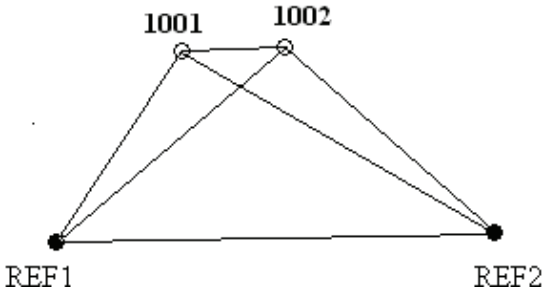
Fot. 2. Przykłady lokalizacji mierzonych punktów, w pobliżu drzew
Phot. 2. Examples of localisations of control points near trees



Fot. 3. Rozmieszczenie punktów osnowy geodezyjnej dla obwodnicy miasta Wyszkowa
Phot. 3. Deployment of control points for the ring road of Wyszków city

PRZEPROWADZENIE POMIARÓW GPS

Pomiar GPS przeprowadzono w ciągu trzech dni pomiarowych, z wykorzystaniem 7 zestawów odbiorników GPS typu Ashtech Z-XII i Ashtech Z-Surveyor oraz Ashtech Z-Xtreme [Ashtech 1998]. Przed przystąpieniem do obserwacji wykonano analizę warunków obserwacyjnych (ilości satelitów, ich konfiguracji geometrycznej etc.). Przy ustalaniu kolejności pomiarów brano pod uwagę geometrię sieci oraz optymalny czas dojazdu do poszczególnych punktów. Na podstawie analizy warunków obserwacji oraz położenia punktów w terenie sporządzono projekt wykonania obserwacji GPS. Na terenie objętym pomiarami wybrano do nawiązania 4 punkty sieci POLREF o numerach: CBKA, BOGO, 3702, 3709. Pomiar wyznaczanych punktów wykonywano w nawiązaniu do co najmniej jednego punktu z poprzedniej sesji, który posiadał najlepszy, tzn. bez zakłóceń, dostęp do sfery niebieskiej. Pozostałe odbiorniki były umieszczane na kolejnych punktach w taki sposób, aby długość wektorów była w miarę możliwości podobna.



Rys. 1. Sieć wektorów GPS dla wyznaczanej pary punktów 1001 i 1002 w odniesieniu do punktów referencyjnych
Fig. 1. Network of GPS baselines between control and reference points

W typowych pomiarach geodezyjnych stosuje się stacje referencyjne (rys. 1). Każdy punkt posiada co najmniej dwie obserwacje nadliczbowe, jeśli będziemy brać pod uwagę dwa odbiorniki ruchome. W praktyce jednak, przy takiej metodyce, pomiar, gdzie istnieją zasłony na punktach wyznaczanych wektor 1001–1002, często nie jest poprawnie wyznaczany, tzn. nie osiąga rozwiązania tzw. „fixed" (nieoznaczoności pomiarów fazowych nie są określone jako liczby całkowite). Jest to spowodowane tym, iż na obu punktach występują zakłócenia sygnału satelitarnego dla różnych satelitów. Zmniejsza to liczbę wspólnych satelitów przy opracowaniu wektorów GPS. Zastosowanie synchronicznych sesji obserwacyjnych GPS znacznie zwiększa liczbę obserwacji nadliczbowych, eliminując wektory o błędnych wyznaczeniach współrzędnych. W przypadku poprawnie wyznaczonych wektorów GPS (dla sieci przedstawionej na rys. 1) istnieje dodatkowa kontrola wyznaczeń współrzędnych wektorów GPS z uwagi na warunki geometryczne nieoznaczoności pomiarów fazowych drugich różnic, które jak wiadomo powinny być równe zeru w figurach zamkniętych, przy tym samym satelicie odniesienia [Wanninger 1995, Wübbena i in. 1996, Raquet 1997, Lachapelle, Alves 2001]. Na przykład dla trójkąta REF1-REF2-1001 można zapisać:

$$N^{j,k}_{REF1-REF2} + N^{j,k}_{REF2-1001} + N^{j,k}_{1001-REF1} = 0$$

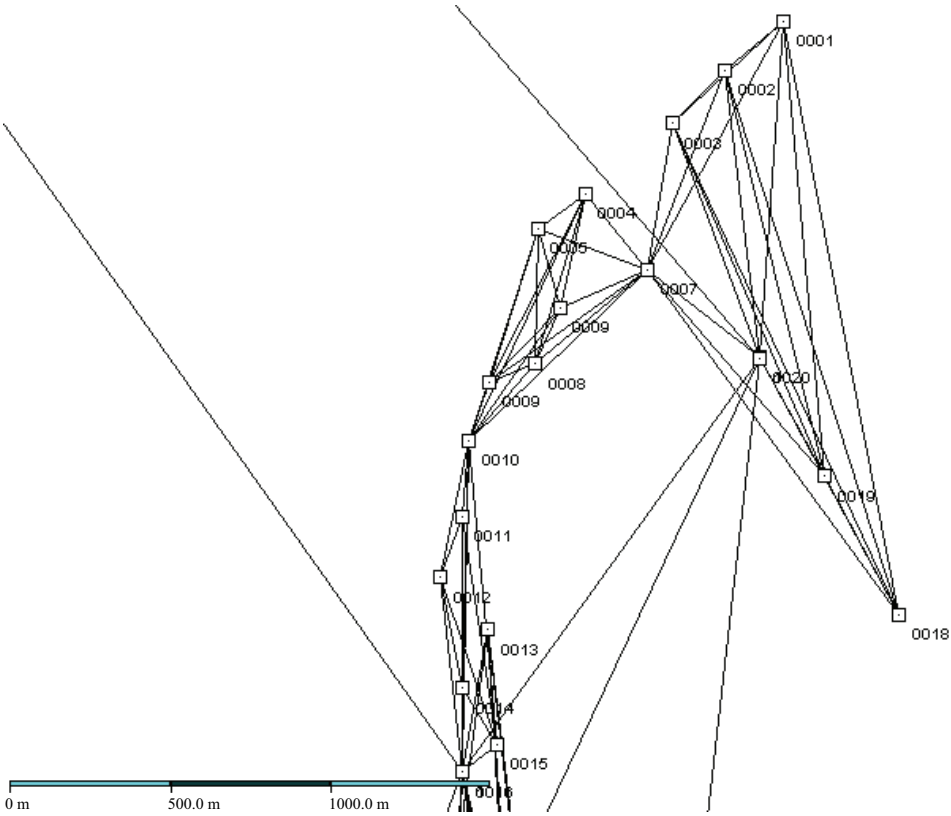
Cztery punkty wyznaczane w danej sesji umożliwiają zatem niezależną kontrolę poprawności wyznaczeń nieoznaczoności pomiarów fazowych w trójkątach: REF1-REF2-1001, REF1-REF2-1002, REF1-1001-1002, REF2-1001-1002.

Taka analiza umożliwia wiarygodną kontrolę wyznaczeń wektorów GPS, w przypadkach, gdy błędy wstępnego wyrównania są większe od dopuszczalnych w odniesieniu do punktów referencyjnych. Dopiero po poprawnym wyznaczeniu nieoznaczoności wektory mogą być brane do wyrównania przestrzennego sieci GPS, np. z wykorzystaniem programu GEONET, który dodatkowo umożliwia badanie zgodności zamknięć przyrostów współrzędnych w trójkątach.

Do pomiaru GPS zakwalifikowano 65 nowo wyznaczanych punktów, na których wykonano obserwacje GPS. Przyjęto następujące podstawowe parametry pomiaru GPS:

- minimalna wysokość satelitów nad horyzontem 15°,
- interwał pomiarowy 10 s,
- minimalna liczba satelitów 3,
- wartość PDOP < 6.

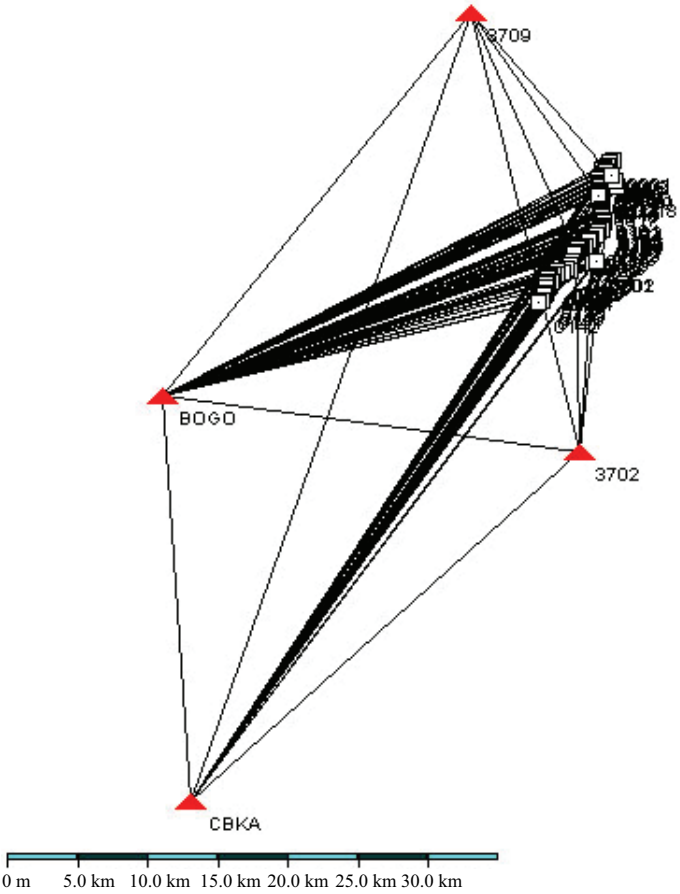
Długość sesji pomiarowych wynosiła co najmniej 90 min i była wydłużana w przypadkach o utrudnionym dostępie do sfery niebieskiej do 150 minut. Sesje nawiązujące do sieci POLREF oraz sesje wiążące wynosiły w granicach 1.5–4 h, w zależności od sytuacji satelitarnej, konfiguracji sieci oraz długości wektora.



Rys. 2. Fragment sieci wektorów GPS, z czterech sesji pomiarowych
Fig. 2. A part of GPS network obtained from four GPS sessions

Składowe wektorów sieci wyznaczanych punktów GPS obliczono przy użyciu programu GPPS, firmy Ashtech. Obliczenia kontrolne wykonywano na bieżąco, w czasie trwania kampanii pomiarowej. Nawiązanie sieci wektorów GPS do sieci POLREF przeprowadzono przy użyciu oprogramowania AOS (Ashtech Office Suite) – przy nawiązaniu sieci do układu ETRF-89. Obliczenia wykonano, przyjmując kąt minimalnej elewacji 15 stopni.

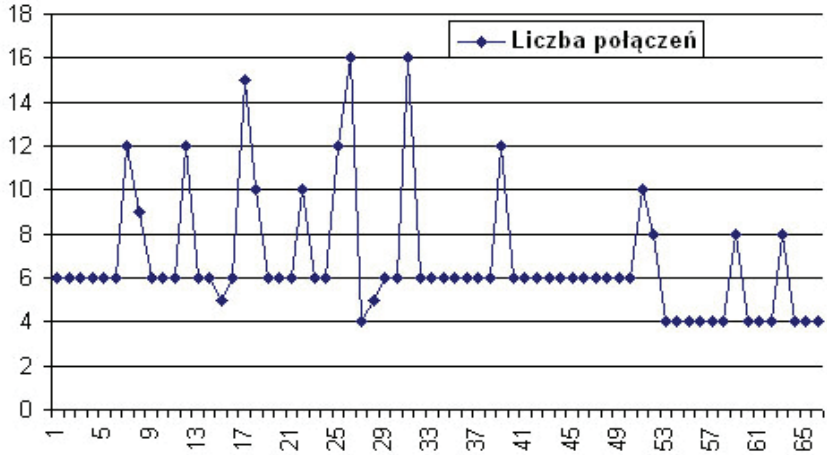
Ścisłe wyrównanie sieci wyznaczanych punktów przeprowadzono przy użyciu programu GEONET (autorstwa prof. dr. hab. inż. Romana Kadaja), na podstawie punktów oporowych wyznaczonych z nawiązania do osnowy POLREF. Wyniki wyrównania otrzymano w układzie ETRF-89. Średnie błędy wyznaczanych punktów po wyrównaniu nie przekroczyły 3 mm (rys. 5). Przeciętna wielkość poprawki do wektorów GPS wyniosła 2.2 mm, natomiast maksymalna była równa 10.2 mm.



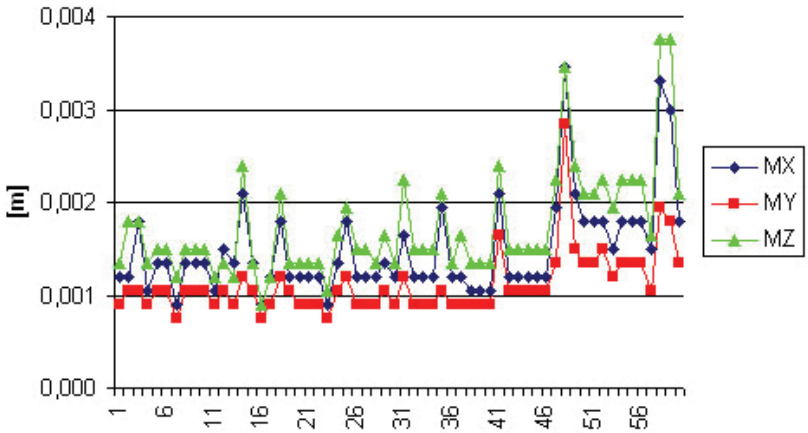
Rys. 3. Nawiązanie sieci punktów GPS do osnowy POLREF
Fig. 3. Connections of control points with POLREF network

Tabela 1. Analiza dokładności z wyrównania punktów oporowych sieci przy nawiązaniu do sieci POLREF
Table 1. Standard deviations of coordinates of the main control-reference points after adjustment, tied into POLREF network

Point	sN [mm]	sE [mm]	sH [mm]
0020	6.2	4.2	9.7
0108	10.7	8.5	20.8
0116	8.0	5.9	13.6
0122	5.9	3.9	9.1
0138	12.4	8.5	21.6



Rys. 4. Liczba połączeń dla mierzonych punktów po wyrównaniu sieci
Fig. 4. Numbers of baselines for particular control points obtained after adjustment



Rys. 5. Błędy współrzędnych po wyrównaniu w układzie ETRF-89
Fig. 5. Estimated errors obtained after adjustments in the ETRF-89 frame

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodykę pomiaru i opracowania obserwacji GPS dla sieci geodezyjnych o podwyższonej dokładności, dla pomiaru dróg. Zastosowana metodyka pomiaru i opracowania obserwacji uwzględnia długość pomiaru sesji GPS od sposobu opracowania obserwacji. Chociaż w pomiarach wykorzystano różne typy odbiorników i anten, po wyrównaniu sieci w układzie ETRF-89 błędy składowych współrzędnych nie przekroczyły 4 mm. W pomiarach GPS w utrudnionych warunkach obserwacyjnych niezwykle ważne jest stosowanie jak największej liczby obserwacji nadliczbowych, poprzez np. zwiększoną liczbę odbiorników lub dodatkowe sesje wiążące.

Długości sesji wiążących i nawiązania powinny być dopasowane do sytuacji satelitarnej. Dla tych sesji proponuje się także wykorzystanie w obliczeniach składowych wektora tzw. rozwiązania Lc (ionosphere-free).

PIŚMIENNICTWO

Ashtech and Spectra Precision Terrasat GmbH Germany, 1998. Ashtech Office Suite for Survey. User's Manual, USA.

Bakuła M., Oszczak S., 2006a. Experiences of RTK Positioning in Hard Observational Conditions During Nysa Kłodzka River Project. Vienna, Austria, Reports on Geodesy, No. 1(76), 71–79.

Bakuła M., Oszczak S., Pelc-Mieczkowska R., Suchocki M., Chrostowska M., Rudziński M., 2006b. Analiza precyzji i dokładności pomiarów GPS w warunkach leśnych. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Rocznik GEOMATYKI, Tom IV, zeszyt 3, 23–32.

Lachapelle G., Alves P., 2002. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research, Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No 2, 133–136.

Raquet J., 1997. A New Approach to GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using a Reference Receiver Network. Proceedings of National Technical Meeting, Santa Monica, January 14–16), The Institute of Navigation, Alexandria, VA, 357–366.

Wanninger L., 1995. Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. Proceedings of ION GPS-95, Palm Springs, Sep. 12–15, 55–62.

Wübbena G., Bagge A., Seeber G., Böder V., Hankemeier P., 1996. Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1845–1852.

APPLICATION OF GPS TECHNOLOGY FOR CONTROL POINTS POSITION DETERMINATION USED FOR THE RING ROAD OF WYSZKÓW CITY

Abstract. The paper presents methods of measurements and post-processing of GPS observations for engineering applications used for construction of highways. The measurements of geodetic control points on the distance of 13 km of the ring road of Wyszkow were done with the use of seven GPS receivers as Ashtech Z-XII, Ashtech Z-Surveyor and Ashtech Z-Xtreme. The control points of network were situated close to wooden area what makes more difficult accurate coordinates determination. In such situa-

tion it is extremely important to choose a proper methodology of GPS measurements and post-processing strategy in order to obtain high and reliable accuracy. The methodology of measurement and post-processing of GPS data presented in this paper allowed to obtain 2-3 mm accuracy after network adjustment having 1.5 – 3 hours GPS sessions.

Key words: GPS, control points, ambiguity solution

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008

Do cytowania – For citation: Bakuła M., Oszczak S., Bornus R., Jarmołowski W., Pelc-Mieczkowska R., Gregorczyk R., 2008. Zastosowanie technologii GPS do wyznaczenia współrzędnych osnowy realizacyjnej obwodnicy miasta Wyszkowa. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr., 7(4), 27–36.

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM
Acta Sci. Pol.,
Geodesia et Descriptio Terrarum 7(4) 2008, 37-43

MAPY ANAMORFICZNE W KARTOGRAFICZNYM MODELOWANIU ZMIENNOŚCI ZJAWISK*

Adam Michalski
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W artykule opisano zastosowanie map anamorficznych w kartograficznym modelowaniu zmienności zjawisk. Podjęto próbę klasyfikacji metod przedstawiania zmienności zjawisk ze względu na sposób prezentacji. Dokonana została ocena zastosowania takich map pod względem zgodności z podstawowymi celami prezentacji kartograficznej. Jako przykłady ilustracyjne pokazane zostały powierzchniowe mapy anamorficzne.

Słowa kluczowe: mapy anamorficzne, mapy zmienności zjawisk

WSTĘP – MAPY ANAMORFICZNE

Mapa anamorficzna to taka mapa, w której pewna zmienna tematyczna – przykładowo czas podróży lub produkt narodowy brutto – jest wyrażona odpowiednio przez długość lub powierzchnię jednostki odniesienia. Geometria i przestrzeń ulegają zmianie w taki sposób, aby mapy służyły pokazaniu tak zmienionych wartości. Istnieją dwa rodzaje map anamorficznych:

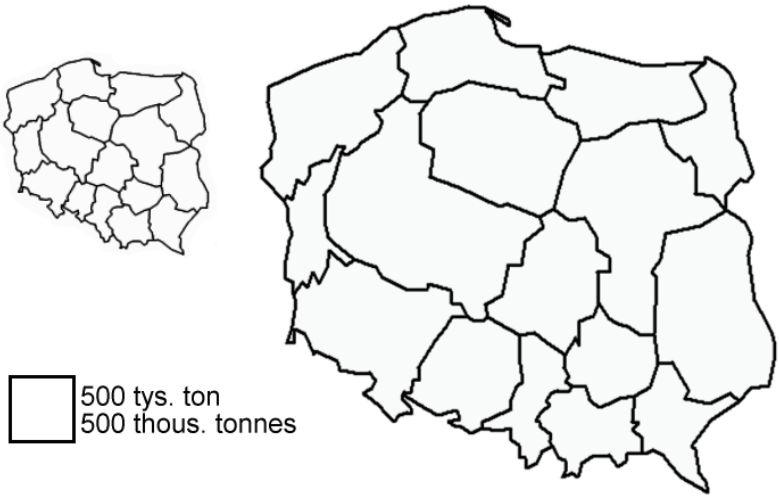
- liniowe (o zniekształconych odległościach, ale odmiennie niż w teorii odwzorowań),
- powierzchniowe.

Powyższa definicja bazuje na opisie zamieszczonym w Wikipedii i dobrze opisuje istotę tego rodzaju map [Wikipedia]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową powierzchniową mapę anamorficzną. Modelowanie anamorficzne stosowane jest raczej rzadko. Największą popularność osiągnęło w Stanach Zjednoczonych, gdzie szczególnie czasopisma i gazety sięgają do takich map.

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2009 jako projekt badawczy.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Adam Michalski, Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław, e-mail: adam.michalski@up.wroc.pl

Osobnym zagadnieniem jest kwestia umiejscowienia map anamorficznych w kartografii. Nawiązując do literatury, kwestią otwartą jest, czy obrazy takie można nazwać mapami i zaliczyć do kartografii [Saliszczew 1998, Ratajski 1989, Tobler 1963]. W tym artykule przyjęto, że można potraktować je jako mapy tematyczne.



Rys. 1. Plony zbóż zebrane w województwach w 2000 roku [opracowanie własne]
Fig. 1. Crops of cereals gathered in provinces in 2000 [authors' map]

MODELOWANIE ZMIENNOŚCI ZJAWISK W KARTOGRAFII

W literaturze można spotkać się z różnym ujęciem tematu przedstawiania zmienności zjawisk z użyciem środków kartograficznych [Ostrowski 2002, Meksuła 2002]. Poniżej przedstawiona została propozycja podziału ze względu na sposób prezentacji.

Zmienność można w kartografii rozpatrywać w sensie przestrzennym i czasowym.

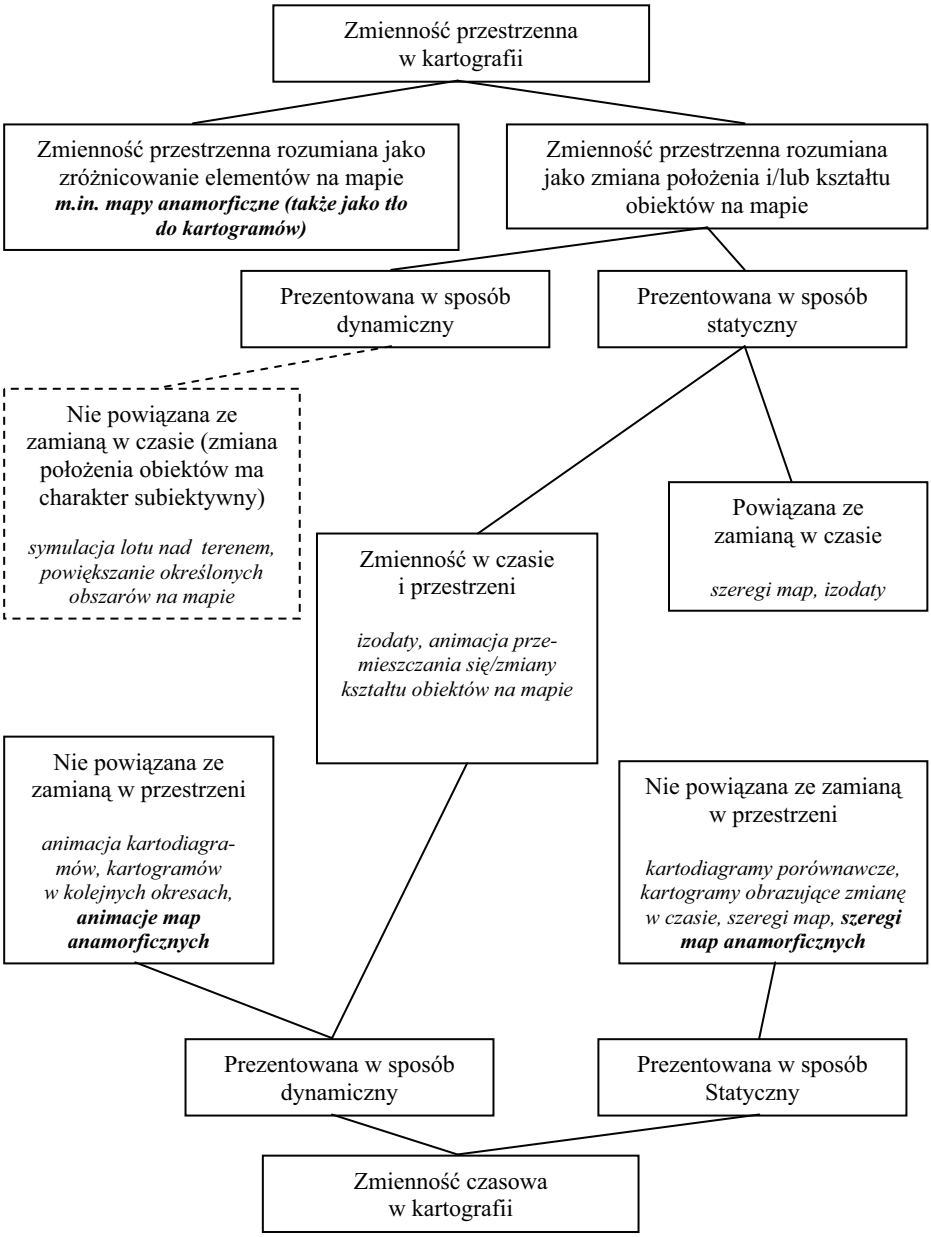
Zmienność przestrzenna rozumiana może być jako zróżnicowanie cech przestrzennych, między innymi takich jak długość, kierunek, kształt, sąsiedztwo struktura, układ [Ostrowski 2002].

Z drugiej strony, zmienność przestrzenną postrzega się jako zmianę położenia i/lub kształtu obiektów na mapie. Sposób prezentacji takiej zmienności ma charakter statyczny lub dynamiczny. W przypadku statycznego opracowania zastosowane mogą być na przykład serie map, które obrazują taką zmianę w czasie. Dlatego mówi się o zmienności czasowo-przestrzennej. Natomiast prezentacja o charakterze dynamicznym związana jest z techniką animacji. Także przy zastosowaniu tej techniki odbiorca ma do czynienia z czynnikiem czasu, czyli ze zmiennością czasowo-przestrzenną. Należy jednak zaznaczyć, że w kartografii stosowane są animacje, które nie mają charakteru czasowego,

a mimo to zaliczenie ich do metod prezentacji zmienności przestrzennej, rozumianej jak wyżej, może być dyskusyjne. Są to animacje, gdzie następuje zmiana kształtu i położenia obiektów na mapie, ale ma to związek z wirtualną zmianą położenia obserwatora, więc jest to zmiana subiektywna. Przykład stanowi wizualizacja poruszania się nad modelem trójwymiarowym miasta czy też łańcucha górskiego lub dynamiczna zmiana skali mapy w celu zwrócenia uwagi na określone obszary.

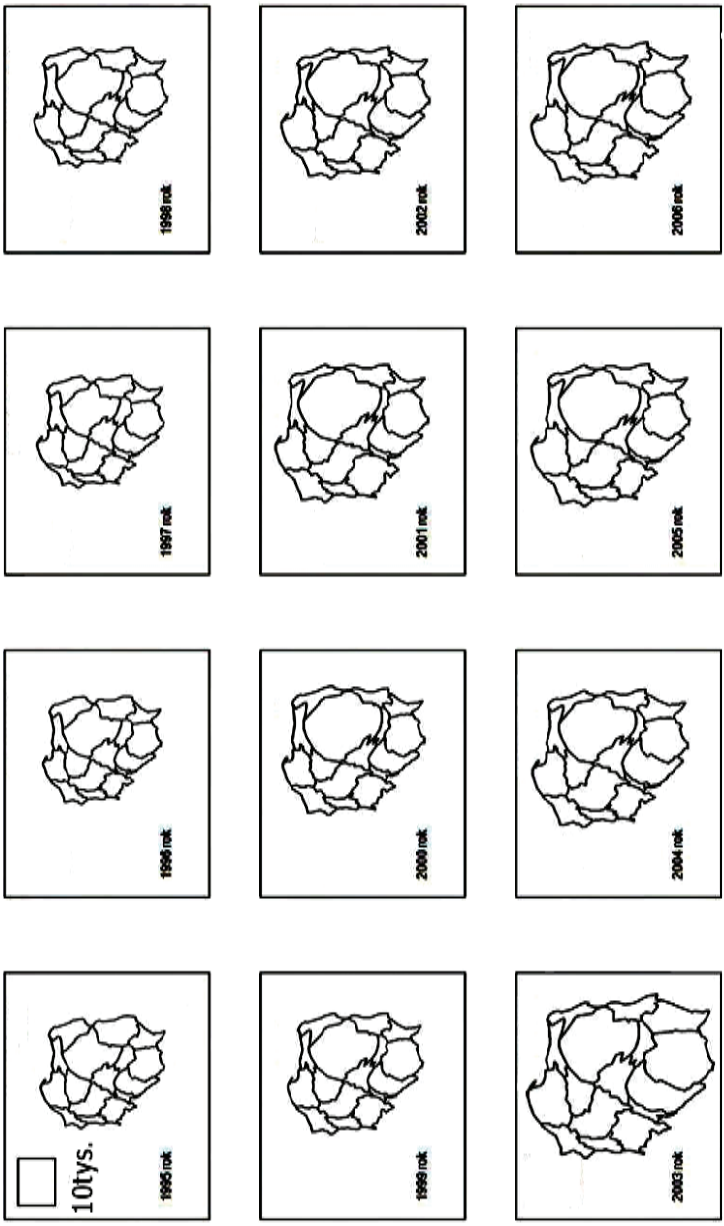
Drugim rodzajem jest zmienność czasowa, która też może być przedstawiana w sposób statyczny i dynamiczny. Jak można wnioskować z powyższych rozważań, ma ona często związek ze zmiennością przestrzenną. Zmienność czasowa pozbawiona czynnika przestrzennego dotyczy zmiany stanu obiektów odnośnie do ich atrybutów nieprzestrzennych. Najczęściej stosowaną w tym przypadku metodą prezentacji jest kartodiagram porównawczy. W przypadku prezentacji statycznej ma ona ograniczenia, jeśli chodzi o liczbę okresów, które mogą być przedstawione. Problemu takiego nie ma przy zastosowaniu metody dynamicznej, czyli animacji.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zaproponowanego podziału wraz z wymienionymi przykładami metod prezentacji kartograficznej. Jak można zauważyć, mapy anamorficzne wymienione zostały w trzech miejscach. Po pierwsze w punkcie, w którym zmienność przestrzenna rozumiana jest jako zróżnicowanie cech przestrzennych, między innymi takich jak długość, kierunek, kształt, sąsiedztwo, struktura, układ. Ze względu na specyfikę map anamorficznych, gdzie jednostki odniesienia podlegają przekształceniu, w taki sposób, aby wyrażać bezwzględną zmienną ilościową, niemożliwe jest za ich pomocą wyrażenie zmienności dla takich cech jak długość, kierunek czy kształt. Zachowane zostaje natomiast sąsiedztwo, struktura i układ. Dlatego można przyjąć, że w tak określonym zakresie mapy anamorficzne mogą służyć kartograficznemu przedstawieniu przestrzennej zmienności zjawisk. Dwa pozostałe przypadki, w których zaproponowano użycie map anamorficznych, dotyczą wizualizacji zmienności czasowej zjawisk. Dla prezentacji zmienności czasowej w sensie statycznym (czyli w sposób pośredni) zastosować można szereg map anamorficznych. Przykład takiego opracowania pokazany został na rysunku 3. W przypadku prezentacji zmienności czasowej w sensie dynamicznym (czyli w sposób bezpośredni) zaproponowano użycie animowanych map anamorficznych. Animacje można wykonywać zarówno dla map anamorficznych powierzchniowych, jak i liniowych. Zastosowanie takich animacji pozwala na osiągnięcie interesujących efektów. Brak przyporządkowania modelowania anamorficznego w pozostałych przypadkach prezentacji zmienności przestrzennej wynika z takiego faktu, że zmiany kształtu i położenia obiektów na mapie mają tu charakter nieeuklidesowy i służą przekazaniu informacji ilościowej.



Rys. 2. Schemat podziału metod modelowania zmienności zjawisk w kartografii ze względu na sposób prezentacji

Fig. 2. The schema of division of the methods of modelling the changeability of phenomena in cartography because of the way of the presentation



Rys. 3. Szereg map anamorficznych – liczba oddanych mieszkań [opracowanie własne]
Fig. 3. Sequence of cartograms – number of built flats [authors' map]

MAPY ANAMORFICZNE W MODELOWANIU ZMIENNOŚCI ZJAWISK

W literaturze określone zostały [Ostrowski 2002] podstawowe cele prezentacji kartograficznej, które można przedstawić w trzech punktach:

1. Określenie położenia obiektów (przede wszystkim położenia wzajemnego) oraz w odniesieniu do obiektów liniowych i powierzchniowych, unaocznienie ich właściwości przestrzennych (np. kierunku, długości, kształtu),
2. Prezentacja nieprzestrzennych cech (atrybutów) obiektów,
3. Zróżnicowanie przestrzenne (zmienność przestrzenna) oraz czasowe (zmiany w czasie) przedstawionych obiektów lub ich atrybutów.

Pierwszy z wymienionych celów jest przez mapy anamorficzne częściowo spełniany. Położenie wzajemne obiektów, czyli utrzymanie właściwości topologicznych jest konieczne dla zachowania czytelności takich map. Istnieją wprawdzie mapy anamorficzne kołowe [Dorling 1996] oraz nieciągłe (*noncontinuous*) [Olson 1976], które nie zachowują ciągłości jednostek odniesienia, ale są to przypadki nietypowe i można się zastanowić, czy nie należą one tak naprawdę do metody kartodiagramu. Natomiast unaocznienie właściwości takich jak kierunek, kształt czy długość jest możliwe tylko w przybliżeniu.

Drugim celem jest prezentacja nieprzestrzennych, atrybutowych cech obiektów. Mapy anamorficzne mogą pokazywać bezwzględne dane ilościowe, jak też stanowić tło dla kartogramu. Zastosowanie jako tła dla kartogramu powoduje polepszenie poprawności oceny prezentowanego zjawiska. Przykład stanowią mapy dotyczące danych ludnościowych, gdzie nałożenie kartogramu na granice krajów o zbliżonej liczbie ludności, a znacząco różnej powierzchni (np. Polska i Kanada) skutkuje wizualną przewagą kraju większego, co również psychologicznie wpływa na nieprawidłową ocenę skali zjawiska.

Trzecim celem prezentacji kartograficznej jest wizualizacja zmienności przestrzennej i czasowej obiektów wraz z ich atrybutami nieprzestrzennymi. Jak wykazano w poprzednim rozdziale, mapy anamorficzne zasadniczo spełniają tak postawiony cel.

WNIOSKI

W artykule dowiedziono, że mapy anamorficzne mogą być stosowane w wielu przypadkach kartograficznego przedstawiania zmienności zjawisk. Ocena pod względem zgodności z celami, jakie stawia się przed prezentacją kartograficzną, pokazuje, że z wyłączeniem pewnych szczegółów wynikających bezpośrednio z roli i sposobu ich konstrukcji – mapy anamorficzne okazały się być wartościowym środkiem wyrazu. Mapy anamorficzne są specyficzną metodą prezentacji, wymagającą pewnego wyrobienia w kartografii i oswojenia się z odmiennym sposobem widzenia przestrzeni tematycznej.

PIŚMIENNICTWO

Dorling D., 1996. Area Cartograms: Their Use and Creation, Department of Geography, University of Bristol, England.

Meksuła M.W., 2002. Kartograficzna prezentacja dynamiki zjawisk, Główne problemy współczesnej kartografii, Świat mapy świat na mapie, Wrocław, Uniwersytet Wrocławski, 122–136.

Olson J.M., 1976. Noncontiguous area cartograms, The Professional Geographer, vol. 28, no. 4, 371–380.
Ostrowski W., 2002. Zmienność przestrzenna i czasowa w ujęciu kartograficznym, Główne problemy współczesnej kartografii, Świat mapy świat na mapie, Wrocław, Uniwersytet Wrocławski, 76–84.
Ratajski L., 1989. Metodyka kartografii społeczno-gospodarczej, PPWK, Wrocław–Warszawa.
Saliszczew K., 1998. Kartografia ogólna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
Tobler W.R., 1963. Geographic area and map projections, The Geographical Review, No 53, 59–78.
Wikipedia, www.wikipedia.org.

CARTOGRAMS IN CARTOGRAPHIC MODELLING OF PHENOMENA CHANGEABILITY

Abstract. The paper describes cartographical modelling the changeability of phenomena. Author proposed the classification of the methods of representing the changeability of phenomena because of the method of presentation. Was executed valuation of the use such the maps in relation to the basic aims of the cartographical presentation. As illustrative examples were showed area cartograms.

Key words: cartograms, value-by-area maps, phenomena changeability maps

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008

Do cytowania – For citation: Michalski A., 2008. Mapy anamorficzne w kartograficznym modelowaniu zmienności zjawisk. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr., 7(4), 37–43.

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM
Acta Sci. Pol.,
Geodesia et Descriptio Terrarum 7(4) 2008, 45-66

JEDNOLITY SYSTEM GRAWIMETRYCZNEGO ODNIESIENIA POLSKICH STACJI PERMANENTNYCH GNSS I POLIGONÓW GEODYNAMICZNYCH – CZĘŚĆ DOLNOŚLĄSKA

Tomasz Olszak[2], Andrzej Pachuta[2], Dominik Próchniewicz[2], Ryszard Szpunar[2], Marek Trojanowicz[1], Janusz Walo[2]

[1] Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
[2] Politechnika Warszawska

Streszczenie. W latach 2006–2007 założono na obszarze Polski sieć punktów bezwzględnych pomiarów grawimetrycznych stanowiącą system grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych. Dolnośląska część tego systemu składa się z pięciu punktów położonych w miejscowościach: Wrocław, Kłodzko, Janowice Wielkie, Lubiąż i Świebodzice. W niniejszej pracy szczegółowo omówiono położenie punktów Wrocław, Kłodzko, Janowice i Lubiąż, sposób ich stabilizacji oraz wyniki pierwszych pomiarów zrealizowanych na tych punktach.

Słowa kluczowe: geodynamika Dolnego Śląska, pomiary grawimetryczne

WSTĘP

Południowo-zachodnia Polska, w tym szczególnie Dolny Śląsk, charakteryzuje się bardzo skomplikowaną i złożoną budową tektoniczną. Wydzielone szeregiem głębokich dyslokacji jednostki tektoniczne tego obszaru są wciąż obiektem badań specjalistów z wielu dziedzin, a sporo pytań dotyczących przede wszystkim ewolucji poszczególnych struktur, zwłaszcza obszaru Sudetów i Przedsudecia, wciąż czeka na odpowiedź [Stupnicka 2007]. Elementem tych badań są prowadzone od lat siedemdziesiątych XX w., pomiary geodezyjne na poligonach geodynamicznych i sieciach badawczych tego obszaru. W skład szerokiego spektrum metod i technik pomiarowych stosowanych w tych sieciach wchodzą powtarzalne pomiary grawimetryczne, wykonywane na punktach obserwacyjnych. Pomiary te odnoszone są do punktów Podstawowej Osnowy Grawimetrycznej Kraju. Ogromny rozwój badań geodynamicznych, zauważalny nie tylko w Polsce, skłania jednak do stworzenia niezależnego systemu odniesienia dla

Adres do korespondencji – Corresponding author: Tomasz Olszak, Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej, Politechnika Warszawska, Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, e-mail: t.olszak@gik.pw.edu.pl

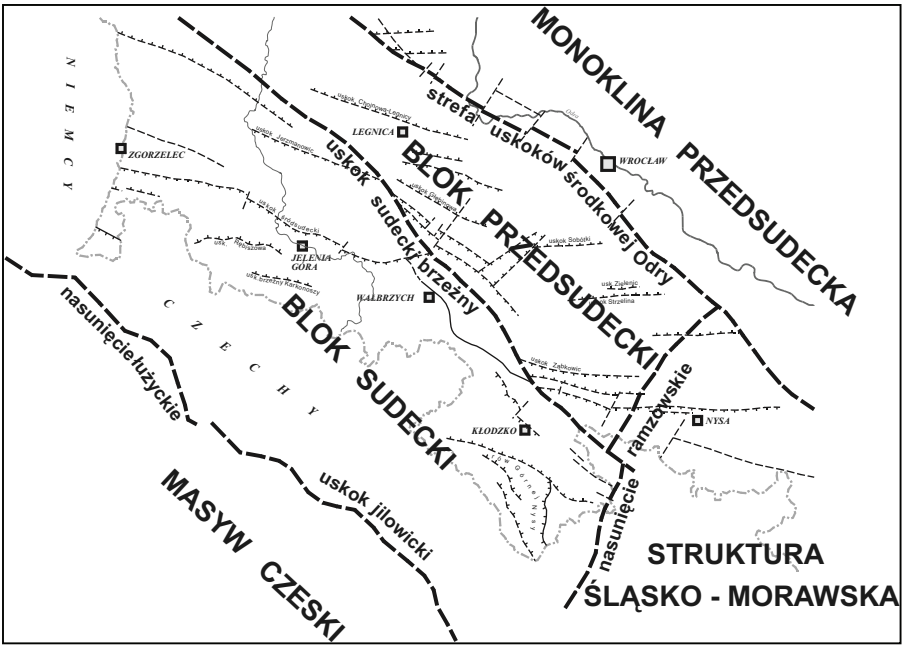
pomiarów grawimetrycznych prowadzonych w ramach tych badań. Prace nad stworzeniem takiego systemu prowadzone są w Polsce od 2006 r. w ramach projektu MNiSW nr 4 T12E 037 30. Część dolnośląską tego systemu prezentujemy w niniejszej publikacji.

CHARAKTERYSTYKA GŁÓWNYCH STRUKTUR TEKTONICZNYCH POŁUDNIOWO-ZACHODNIEJ POLSKI

Obszar południowo-zachodniej Polski jest w całości położony na platformie paleozoicznej Europy Zachodniej i Środkowej, będąc jednocześnie najbardziej wysuniętym na wschód jej fragmentem [Mizerski 2005]. Na tym obszarze wyróżnia się trzy spośród kilkunastu głównych jednostek tektonicznych Polski. Są to blok dolnośląski, struktura śląsko-morawska i monoklina przedsudecka (rys. 1). Całą południowo-zachodnią część tego obszaru zajmuje blok dolnośląski, który oddzielony jest na północnym-wschodzie od monokliny przedsudeckiej strefą głębokich uskoków środkowej Odry. Wzdłuż uskoku ramzowskiego graniczy od wschodu ze strukturą śląsko-morawską, a od południa jest ograniczony masywem czeskim wzdłuż nasunięcia łużyckiego i uskoku jilowickiego. Na zachodzie blok dolnośląski rozciąga się do granicy z Niemcami, sięgając masywu łużyckiego [Stupnicka 2007]. Głównymi jednostkami tektonicznymi bloku dolnośląskiego są oddzielone od siebie uskokiem sudeckim brzeżnym, blok przedsudecki i blok sudecki (rys. 1) [Mizerski 2005].

Ogólnie, w obrębie bloku dolnośląskiego wyróżnia się szereg mniejszych jednostek o różnych cechach budowy geologicznej, wydzielonych najprawdopodobniej bardzo starymi i sięgającymi głęboko w skorupę ziemską dyslokacjami. Z tego powodu budowa geologiczna tego bloku określana jest jako mozaikowa [Stupnicka 2007]. Taką mozaikową budowę blok dolnośląski zawdzięcza bardzo złożonym i wieloetapowym procesom tektonicznym, którym towarzyszył silny magmatyzm i metamorfizm [Oberc 1972].

Ostatecznie jednostki tektoniczne tego bloku zostały uformowane w czasie ruchów waryscyjskich. Po denudacji orogenu waryscyjskiego i jego przedpola, począwszy od późnego karbonu przez perm i mezozoik, obszar ten tworzył wraz z obszarem całej Polski jeden basen sedymentacyjny. Powstałe w tym okresie lądowe i morskie osady zostały odsłonięte dopiero w wyniku ruchów laramijskich, na przełomie kredy i kenozoiku. W wyniku tego wypiętrzenia całego obszaru powstały młodsze jednostki tektoniczne Polski, m.in. monoklina przedsudecka. Późniejsza erozja odsłoniła duże fragmenty starszego podłoża waryscyjskiego, którego widocznym dzisiaj na powierzchni fragmentem są Sudety [Mizerski 2005]. Sudety, jako górska część bloku dolnośląskiego, ostatecznie zostały ukształtowane w okresie trzeciorzędowych ruchów tektonicznych.



Rys. 1. Główne jednostki tektoniczne południowo-zachodniej Polski
Fig. 1. Primary tectonic units in the South-West of Poland

Struktura śląsko-morawska od zachodu graniczy z blokiem dolnośląskim i masywem czeskim, od południowego-wschodu ograniczona jest nasunięciem Karpat, natomiast północno-wschodnią granicę stanowią podkredowe i podtrzeciorzędowe wychodnie skał monokliny przedsudeckiej i krakowsko-częstochowskiej [Stupnicka 2007]. Na obszarze Polski znajduje się jedynie północny fragment tej struktury. W obrębie struktury śląsko-morawskiej wyróżnia się blok Sudetów Wschodnich oraz strefę kulmową [Mizerski 2005]. Warto zaznaczyć, że granice geograficzne Sudetów jako całości nie pokrywają się z granicami jednostek tektonicznych. Sudety Zachodnie i Sudety Środkowe należą do bloku Sudeckiego, natomiast Sudety Wschodnie, jak wspomniano wyżej, są częścią struktury śląsko-morawskiej.

Monoklina przedsudecka stanowi część niecki szczecińsko-łódzko-miechowskiej. Na południowym wschodzie przechodzi w monoklinę krakowsko-częstochowską, od południowego-zachodu graniczy z blokiem dolnośląskim, natomiast północną jej granicę wyznacza linia biegnąca przez Niemodlin, Strzelce Opolskie, Lubliniec w stronę Częstochowy [Stupnicka 2007].

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA POLIGONÓW GEODYNAMICZNYCH NA OBSZARZE POŁUDNIOWO-ZACHODNIEJ POLSKI

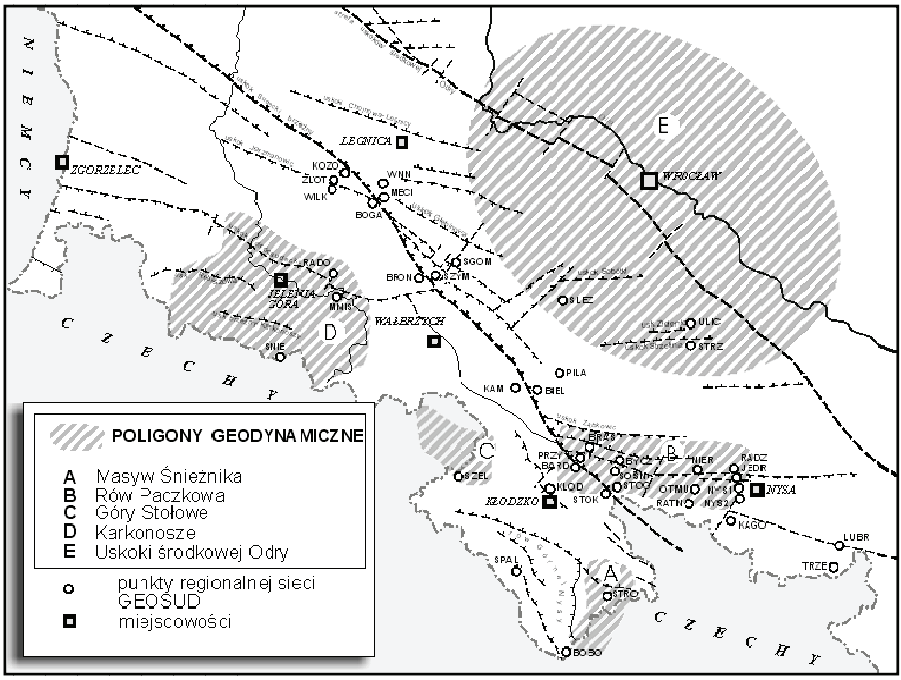
Rejon południowo-zachodniej Polski charakteryzuje się dosyć skomplikowaną i złożoną budową tektoniczną. Część głębokich dyslokacji, wydzielających jednostki tektoniczne tego obszaru, jest wciąż aktywna. Badanie tej aktywności, z uwagi na loka-

lizację niektórych obiektów inżynierskich, jest istotne nie tylko z naukowego punktu widzenia [Kontny 2003] i wymaga stosowania szerokiego spektrum metod badawczych, które ogólnie podzielić można na dwie grupy [Liszkowski 1976]:

- Metody bezpośrednie, oparte niemal wyłącznie na różnych technikach pomiarowych szeroko rozumianej geodezji. W metodach tych pomiarowi bezpośrednio podlegają przemieszczenia i czas. Wyróżnić tu można głównie: pomiary mareograficzne, pomiary ekstensometryczne, powtarzalne pomiary kątowo-liniowe i niwelacyjne, astronomiczne i kosmiczne techniki pomiarowe oraz pomiary satelitarne.
- Metody pośrednie, w których przemieszczenia i czas wyznaczane są w sposób pośredni. W szczególności wyróżnić tu można metody geologiczne i geomorfologiczne, metody geofizyczne (w tym metody sejsmiczne, paleomagnetyczne, grawimetryczne i elektrooporowe), metody oparte na ilościowej i jakościowej analizie obrazów satelitarnych i kartograficznych.

Badania geodynamiczne metodami geodezyjnymi prowadzone są w Sudetach i na terenie Przedsudecia już od lat siedemdziesiątych XX wieku. Pierwotnie prace pomiarowe prowadzone były technikami klasycznymi. Od roku 1992 dominującą techniką pomiarową stały się pomiary satelitarne GPS, uzupełniane w zależności od specyfiki sieci okresowymi, powtarzalnymi pomiarami grawimetrycznymi, pomiarami zmian pochylenia słupów obserwacyjnych i innymi. Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę sieci założonych i obserwowanych w tym rejonie do dnia ukazania się niniejszego opracowania.

- Poligon geodynamiczny „Masyw Śnieżnika" jest siecią składającą się z 27 punktów usytuowanych w rejonie masywu Śnieżnika Kłodzkiego (rys. 2). Na terytorium Republiki Czeskiej znajduje się 11 punktów, natomiast na obszarze Polski 16 [Cacoń i in. 1996]. Od roku 1992 prowadzone są tam pomiary satelitarne GPS, pomiary grawimetryczne [Barlik, Cacoń 1999] oraz pomiary pochylenia słupów obserwacyjnych. W latach 1992 i 1993 przeprowadzono pomiary całej sieci. Polska część została pomierzona jeszcze w latach 1996, 1997 oraz 2001. Od roku 2008 przewidziane do realizacji są kolejne trzy kampanie pomiarowe tej sieci.
- Poligon geodynamiczny „Rów Paczkowa" składa się z 15 punktów rozmieszczonych w rejonie zbiorników wodnych Nysa i Otmuchów (rys. 2), leżących na obszarze aktywnego rowu tektonicznego [Cacoń, Dyjor 1995], [Cacoń i in. 1998]. W latach 1993–2001 zrealizowano 6 kampanii pomiarowych polegających na obserwacjach satelitarnych GPS i grawimetrycznych.



Rys. 2. Poligony geodynamiczne i sieci badawcze Dolnego Śląska
Fig. 2. Geodynamic networks of Lower Silesia

- Poligon geodynamiczny „Góry Stołowe" jest siecią, która składa się z 10 punktów (rys. 2) zlokalizowanych głównie po stronie czeskiej Gór Stołowych (8 punktów). Polską część sieci stanowią dwa punkty mikrosieci badawczej „Szczeliniec". W latach 1993–2002 zrealizowano cztery kampanie pomiarowe sieci „Góry Stołowe", polegające na pomiarach satelitarnych i grawimetrycznych [Barlik, Cacoń 2001].
- Sieci geodynamiczna GEOSUD składa się z wybranych punktów poligonów badawczych „Masyw Śnieżnika", „Rów Paczkowa" i „Góry Stołowe" oraz punktów nowych [Cacoń i in. 1998] (rys. 2). Od roku 1996 prowadzone są prace pomiarowe tej sieci polegające na obserwacjach satelitarnych oraz grawimetrycznych. Sieć ta powiązana została także z siecią stacji permanentnych EUREF-EPN [Kontny 2003]. W celu włączenia do obliczenia tej sieci najbliższych stacji EPN zaprojektowano również specjalną strategię opracowania danych lokalnych GPS w nawiązaniu do stacji permanentnych [Bosy, Kontny 1998].
- Sieć GEOSUD powiązana została w roku 1997 z czeską siecią SILESIA obejmującą północną część regionu morawsko-śląskiego. Sieć SILESIA oraz wybrane punkty sieci GEOSUD utworzyły sieć SUDETY. Od września 1997 roku prowadzone są coroczne, dwudobowe obserwacje GPS na punktach sieci SUDETY.

- Sieć geodynamiczną „Karkonosze" założono w roku 2000. Sieć składa się z 19 punktów i obejmuje swym zasięgiem rejon Karkonoszy, Kotliny Jeleniogórskiej i Gór Kaczawskich [Mąkolski i in. 2002] (rys. 2). Sieć pomierzono dwukrotnie w latach 2001 i 2002 [Kontny i in. 2002].
- Wiosną roku 2008 rozpoczęto budowę kolejnej sieci geodynamicznej na Dolnym Śląsku. Zadaniem tej sieci, składającej się z 17 punktów, jest monitorowanie aktywności tektonicznej w strefie uskoków środkowej Odry. Obszar monitoringu zaznaczono na rysunku 2. Wstępnie planowane są trzy kampanie pomiarowe tej sieci.

Na obszarze Dolnego Śląska istnieje jeszcze kilka innych sieci powtarzalnych pomiarów GPS. Są to: sieć Kopalni Węgla Brunatnego „Turów" w Bogatyni, sieć Lubińsko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM), mikrosieć badawcza w rejonie zapory wodnej w Dobromierzu oraz sieć niwelacji satelitarnej Wrocławia, dla której zrealizowano dwie kampanie pomiarowe w latach 1998 i 2002.

W sumie, poza sieciami KWB „Turów" oraz LGOM, na obszarze Dolnego Śląska zlokalizowanych jest ok. 90 punktów obserwacyjnych wchodzących w skład sieci mierzonych w ramach różnych programów badawczych. Podstawowymi obserwacjami realizowanymi na tych punktach są pomiary satelitarne GPS oraz pomiary grawimetryczne, wykonywane w oparciu o punkty POGK. Szeroki zakres prowadzonych prac pomiarowych zmusza jednak do ustalenia jednolitego systemu odniesienia grawimetrycznego tych pomiarów. System taki został opracowany i zbudowany w ramach projektu „Jednolity system grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych". Dolnośląska część tego systemu jest prezentowana w kolejnych punktach.

DOLNOŚLĄSKA CZĘŚĆ JEDNOLITEGO SYSTEMU GRAWIMETRYCZNEGO ODNIESIENIA POLSKICH STACJI PERMANENTNYCH GNSS I POLIGONÓW GEODYNAMICZNYCH

W skład dolnośląskiej części jednolitego systemu grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych wchodzi 5 punktów bezwzględnych pomiarów grawimetrycznych: *WROCŁAW, KŁODZKO, JANOWICE, LUBIĄŻ* i *KSIĄŻ*.

Punkt *WROCŁAW* jest punktem grawimetrycznym stacji GNSS o nazwie *WROC*, która realizuje permanentne obserwacje GPS/GLONASS także w systemie stacji EPN, natomiast punkt *KSIĄŻ* jest punktem Podstawowej Osnowy Grawimetrycznej Kraju (POGK). Podstawową funkcją pozostałych punktów jest stworzenie jednolitego systemu odniesienia grawimetrycznego dla badań geodynamicznych prowadzonych na Dolnym Śląsku. Dla każdego z tych punktów zaprojektowano i zastabilizowano łatwo dostępny punkt ekscentryczny. Ogólne położenie punktów prezentuje rysunek 3.

Wyboru położenia punktów dokonano, biorąc pod uwagę trzy podstawowe czynniki. Pierwszym z nich jest przewidywana stabilność wartości przyspieszenia siły ciężkości, drugim techniczne możliwości realizacji pomiarów na punkcie, trzecim zaś rozmieszczenie istniejących i projektowanych sieci do badań geodynamicznych na obszarze Dolnego Śląska.

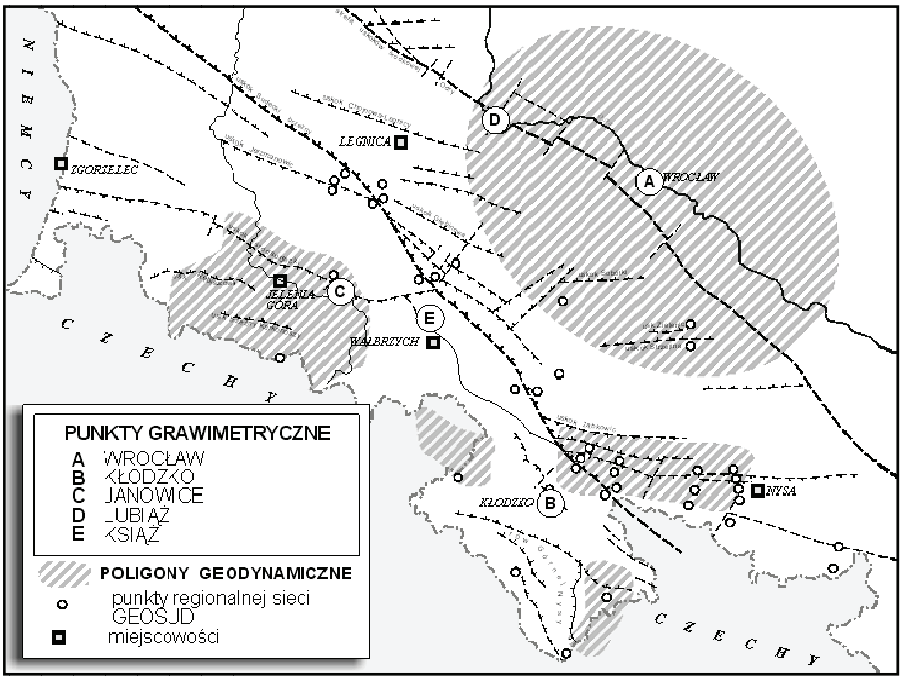
W dalszej części pracy przedstawiony został szczegółowy opis stabilizacji oraz położenia wyżej wymienionych punktów z wyjątkiem punktu *KSIĄŻ*, który z uwagi na

swoje położenie i znaczenie w badaniach geofizycznych wymaga oddzielnego szerszego opracowania.

SZCZEGÓŁOWY OPIS POŁOŻENIA I STABILIZACJI PUNKTÓW

WROCŁAW

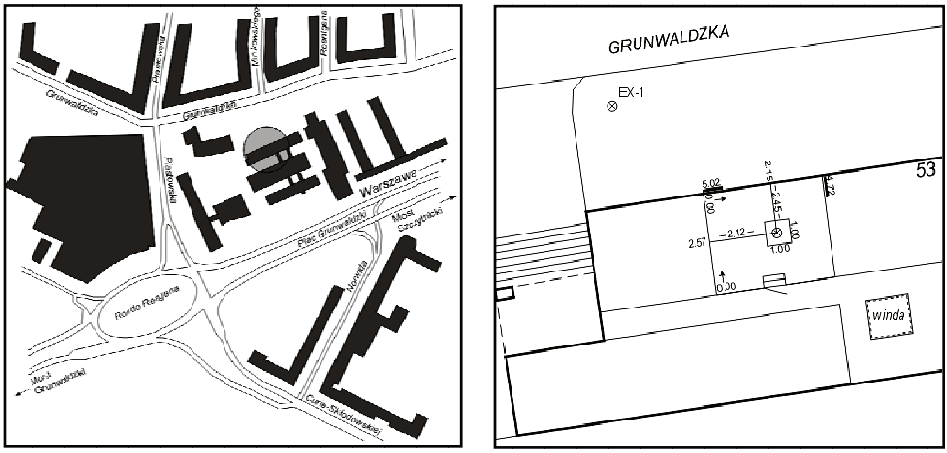
Punkt *WROCŁAW* znajduje się w budynku Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, przy ul. Grunwaldzkiej 53 (na dachu tego budynku umieszczony jest punkt permanentnych obserwacji GNSS *WROC*), w sali 09G. Jest to pomieszczenie znajdujące się w piwnicy budynku, obecnie wyłączone z zajęć dydaktycznych. Punkt ten został zastabilizowany w 2003 r. jako blok betonowy o wymiarach 100x100x100 cm z bolcem metalowym. Blok posadowiono na słupie betonowym o średnicy 30 cm, sięgającym do głębokości 4 m od poziomu posadzki. Punkt jest zabezpieczony metalową pokrywą.



Rys. 3. Położenie punktów dolnośląskiej części jednolitego systemu grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych

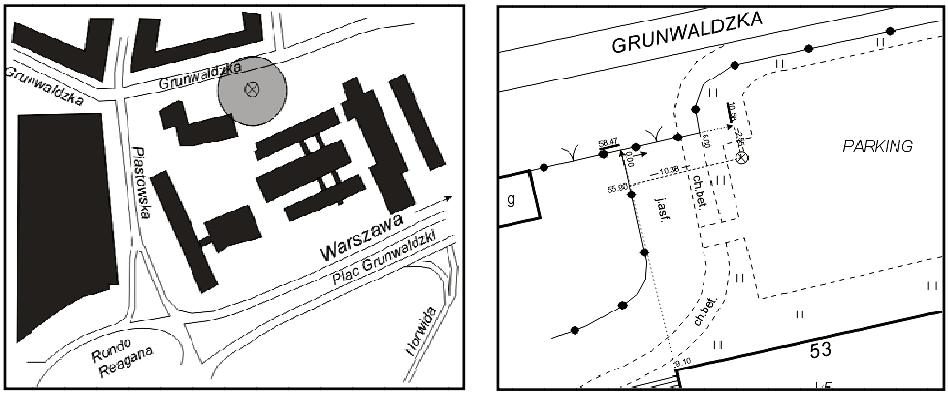
Fig. 3. Location of the gravity station of Lower Silesian part of the unified gravity reference system of Polish permanent GNSS network and geodynamic networks

Szczegółowa lokalizacja punktu przedstawiona jest na rysunku 4.



Rys. 4. Lokalizacja punktu *WROCŁAW*
Fig. 4. Location of *WROCŁAW* station

Jako punkt ekscentryczny punktu *WROCŁAW* wybrany został jeden z punktów geodezyjnej sieci testowej założonej w pobliżu budynku przy ul. Grunwaldzkiej 53. Lokalizację tego punktu, o nazwie *WROCŁAW EX1*, przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Lokalizacja punktu *WROCŁAW EX1*
Fig. 5. Location of *WROCŁAW EX1* station

Niżej przedstawione są fotografie punktu *WROCŁAW* oraz jego punktu ekscentrycznego (fot. 1a,b).

a) b)

Fot. 1. Fotografie punktu *WROCŁAW* (a) i punktu *WROCŁAW EX1* (b)
Phot. 1. Photos of stations *WROCŁAW* (a) and *WROCŁAW EX1* (b)

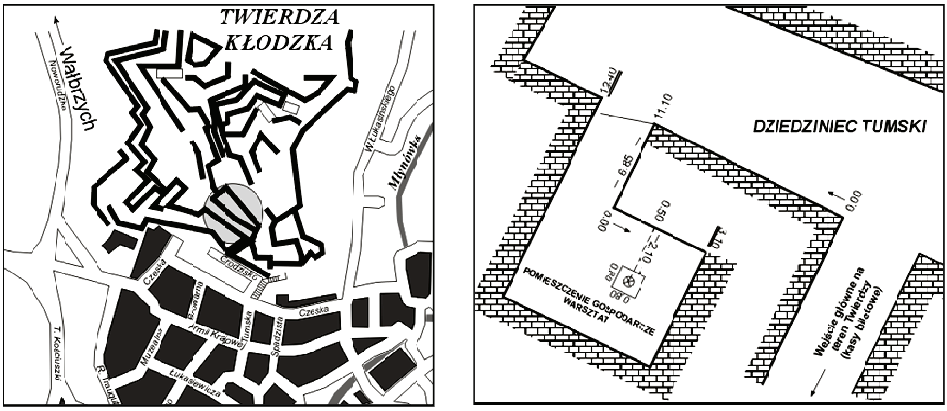
KŁODZKO

Punkt *KŁODZKO* znajduje się na terenie Twierdzy w Kłodzku przy ul. Grodzisko 1, w pomieszczeniu gospodarczym obok Muzeum Pożarnictwa. Ze względu na brak możliwości wykonania pełnej (tzw. w postaci prostopadłościennego bloku betonowego) stabilizacji, zdecydowano się na umieszczenie w posadzce pomieszczenia gospodarczego – metalowego bolca o długości 10 cm. Część posadzki stanowiąca kwadrat o wymiarach 80x80 cm, w środku której znajduje się punkt, oddzielona została od pozostałej części posadzki dylatacją o szerokości 5 mm i głębokości ok. 8 cm. Taka głębokość dylatacji nie zapewniła jednak całkowitego odizolowania punktu od pozostałej części podłogi. Jest to spowodowane grubością i budową posadzki tego pomieszczenia. Pod posadzką betonową, która została całkowicie przecięta, znajduje się jeszcze posadzka ceglana, której ze względu na ograniczenia techniczne nie udało się przeciąć na całej jej grubości. Stąd obszar wokół punktu nie jest całkowicie odizolowany od pozostałej części podłogi.

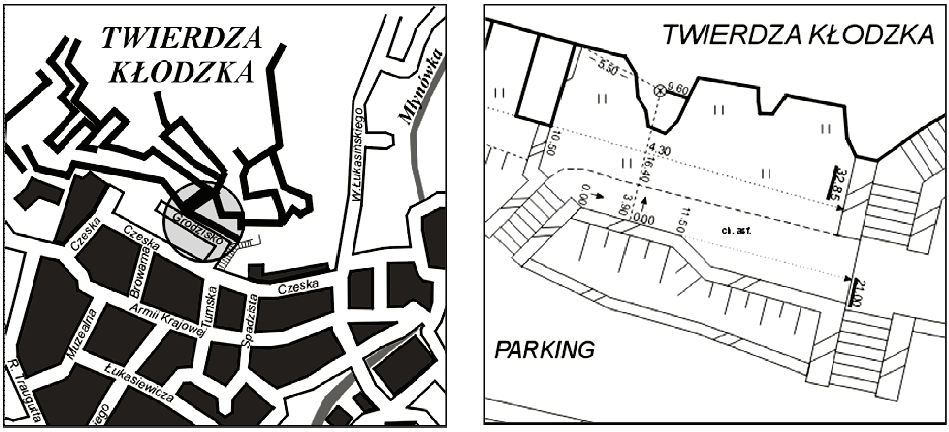
Szczegóły lokalizacji punktu przedstawia rysunek 6.

Lokalizacja punktu oraz sposób stabilizacji wynikały głównie z wymogów technicznych bezwzględnych pomiarów grawimetrycznych (pomieszczenie zamknięte, dostęp do energii elektrycznej), których nie spełniały inne, proponowane przez zarządcę obiektu pomieszczenia.

Punkt ekscentryczny punktu *KŁODZKO* został umieszczony na wychodni skał magmowych, przed głównym wejściem na teren twierdzy. Położenie punktu gwarantuje jego najlepszą stabilność oraz pełną dostępność. Stabilizacja punktu polegała na umieszczeniu w skale bolca metalowego o długości 10 cm. Punkt nosi nazwę *KŁODZKO EX1*, a jego lokalizację przedstawia rysunek 7.



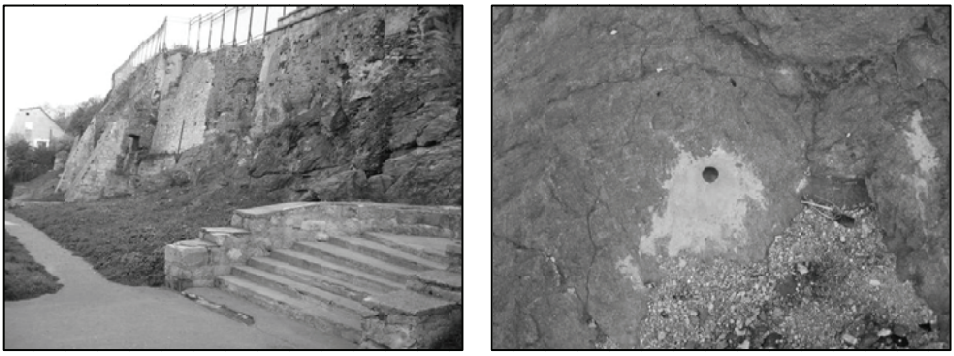
Rys. 6. Lokalizacja punktu *KŁODZKO*
Fig. 6. Location of *KŁODZKO* station



Rys. 7. Lokalizacja punktu *KŁODZKO EX1*
Fig. 7. Location of *KŁODZKO EX1* station

Niżej zamieszczone fotografie przedstawiają szczegóły lokalizacji punktu *Kłodzko* (fot. 2) oraz jego punktu ekscentrycznego (fot. 3).

Fot. 2. Fotografie przedstawiające położenie punktu *KŁODZKO*
Phot. 2. Photos of *KŁODZKO* station

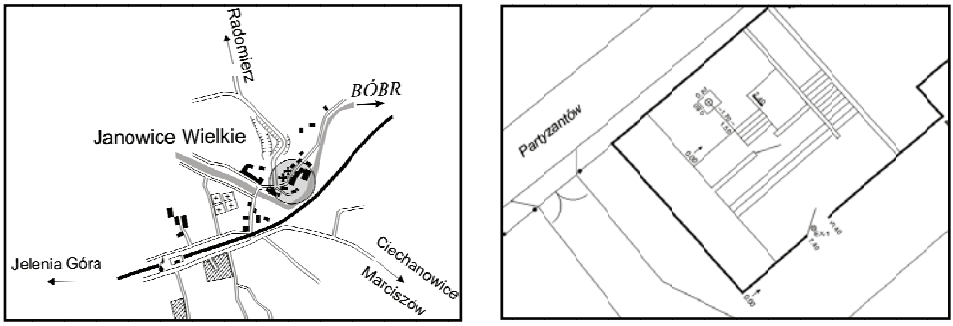


Fot. 3. Fotografie przedstawiające położenie punktu *KŁODZKO EX1*
Phot. 3. Photos of *KŁODZKO EX1* station

JANOWICE

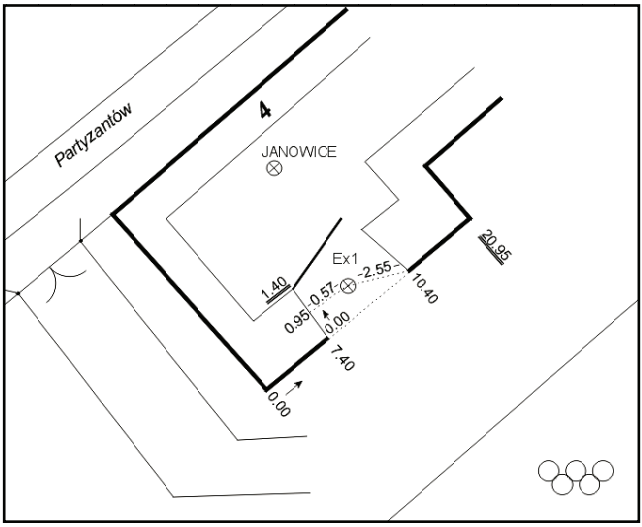
Punkt ***JANOWICE*** umieszczono w piwnicy Szkoły Podstawowej w Janowicach Wielkich, przy ul. Partyzantów 4, w pomieszczeniu dawnej kotłowni. W trakcie stabilizacji, po skuciu posadzki i usunięciu warstwy rumoszu skalnego natrafiono na jednolity fragment skały granitowej, wypełniający całą powierzchnię otworu o wymiarach ok. 80x80 cm, przygotowywanego do stabilizacji. Skała ta, znajdująca się na głębokości 20–30 cm od poziomu posadzki stanowiła podłoże stabilizowanego punktu. Tak przygotowany otwór wypełniono betonem, izolując jednocześnie tworzony blok betonowy od pozostałej części posadzki warstwą styropianu o grubości 1 cm. W środku takiego bloku umieszczony został bolec metalowy o długości 10 cm wskazujący położenie punktu.

Szczegóły położenia punktu przedstawione są na rys. 8.



Rys. 8. Lokalizacja punktu *JANOWICE*
Fig. 8. Location of *JANOWICE* station

Punkt ekscentryczny punktu *JANOWICE* umieszczono w progu bocznego wejścia do budynku szkoły. Wejście to prowadzi wprost do pomieszczenia, w którym znajduje się punkt *JANOWICE*. Stabilizacja punktu polegała na umieszczeniu w bloku granitowym, z którego zbudowany jest próg, metalowego bolca o długości 10 cm. Szczegóły lokalizacji punktu o nazwie *JANOWICE EX1* przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Lokalizacja punktu *JANOWICE EX1*
Fig. 9. Location of *JANOWICE EX1* station

Niżej przedstawione są fotografie punktu *JANOWICE* i jego punktu ekscentrycznego.

a)

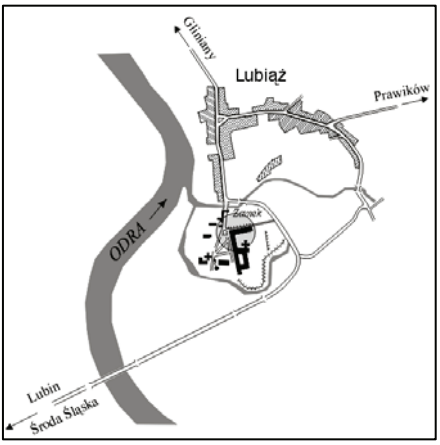
b)

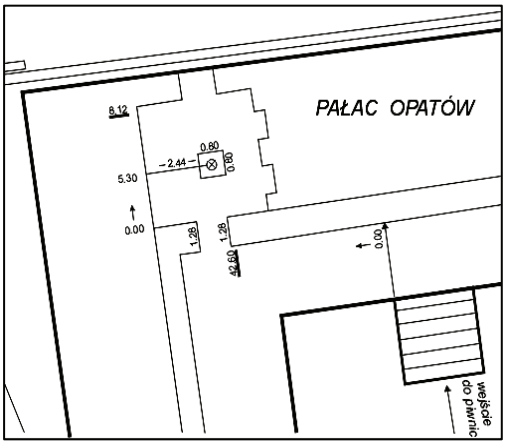
Fot. 4. Fotografie punktu *JANOWICE* (a) i punktu *JANOWICE EX1* (b)
Phot. 4. Photos of stations *JANOWICE* (a) and *JANOWICE EX1* (b)

LUBIĄŻ

Punkt *LUBIĄŻ* został posadowiony na terenie pocysterskiego zespołu pałacowego w Lubiążu, w piwnicznym pomieszczeniu leżącym pod Jadalnią Opata, wchodzącym w skład Pałacu Opatów. Punkt ten został zastabilizowany na przełomie marca i kwietnia 2007 r. jako blok betonowy o wymiarach 80x80x100 cm z bolcem metalowym. Punkt odizolowany jest od podłogi piwnicy warstwą styropianu o grubości 1 cm.

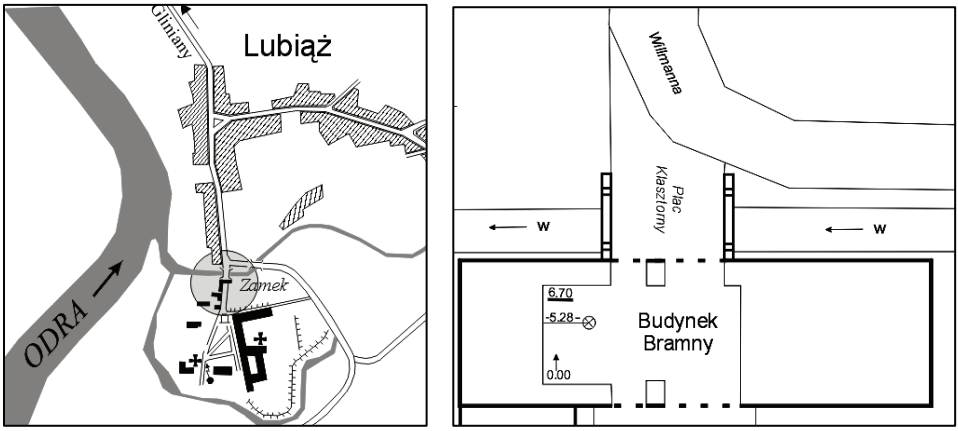
Lokalizację punktu prezentuje rysunek 10.





Rys. 10. Lokalizacja punktu *LUBIĄŻ*
Fig. 10. Location of *LUBIĄŻ* station

Punkt ekscentryczny dla punktu *LUBIĄŻ* (*LUBIĄŻ EX1*) położony jest w bramie wjazdowej (Budynek Bramny) do zespołu pałacowego. Stabilizacja punktu polegała na umieszczeniu w posadzce bramy bolca metalowego o długości 10 cm. Szczegółowe położenie punktu prezentowane jest na rys. 11.



Rys. 11. Lokalizacja punktu *LUBIĄŻ EX1*
Fig. 11. Location of *LUBIĄŻ EX1* station

Fotografie 5a,b przedstawiają punkt *LUBIĄŻ* oraz jego punkt ekscentryczny.

a) b)

Fot. 5. Fotografie punktu *LUBIĄŻ* (a) i punktu *LUBIĄŻ EX1* (b)
Phot. 5. Photos of stations *LUBIĄŻ* (a) and *LUBIĄŻ EX1* (b)

WYZNACZENIE POZYCJI PUNKTÓW GRAWIMETRYCZNYCH

Pozycje poziome (B, L) wszystkich punktów wyznaczono w dwóch etapach. W etapie pierwszym techniką GPS, w nawiązaniu do stacji referencyjnych udostępnionych w systemie ASG-PL, wyznaczono pozycje punktów pomocniczych stanowiących osnowę pomiarową. Na podstawie tych punktów, techniką klasyczną (wiszące ciągi poligonowe), wyznaczono pozycje punktów grawimetrycznych. Pomiary satelitarne wykonano za pomocą odbiorników Z-extreme oraz Z XII firmy Ashtech.

Wysokości normalne wszystkich punktów zostały wyznaczone za pomocą niwelacji technicznej w nawiązaniu do reperów III kl. Wysokości geodezyjne, ponad elipsoidą WGS 84, wyznaczono poprzez dodanie do wysokości normalnych wysokości quasi-geoidy obliczonych z modelu „Geoidy niwelacyjnej 2001".

Błędy wyznaczonych współrzędnych *B* i *L* zależą głównie od dokładności wyznaczonych techniką GPS współrzędnych punktów osnów pomiarowych oraz dokładności pomiarów klasycznych. Podane niżej błędy obserwacji klasycznych uwzględniają zarówno dokładności pomiarowe wykorzystanych instrumentów, jak i błędy ustawcze.

Błędy wysokości normalnych *H* zależą właściwie tylko od dokładności wysokości reperów dowiązania i wykonanej niwelacji. Dokładność wysokości geodezyjnych *h* jest dodatkowo uzależniona od dokładności modelu geoidy.

Wyznaczone pozycje punktów w układzie ETRF 89 oraz wysokości normalne punktów zestawiono w tabeli 1. Błędy tych współrzędnych prezentuje tabela 2.

Tabela 1. Współrzędne punktów w układzie ETRF 89 oraz ich wysokości normalne
Table 1. Coordinates of the station in ETRF 89 system and its normal heights

Numer	B			L			h	H
	°	'	"	°	'	"	[m]	[m]
LUBIĄŻ	51	15	44.3776	16	28	7.1882	143.170	102.394
LUBIĄŻ EX 1	51	15	48.0812	16	28	5.1681	141.968	101.192
KŁODZKO	50	26	24.9808	16	39	9.0388	370.054	326.926
KŁODZKO EX 1	50	26	22.2450	16	39	11.0365	355.745	312.617
JANOWICE	50	52	54.2200	15	55	33.2631	424.594	381.906
JANOWICE EX 1	50	52	53.9854	15	55	33.9890	425.409	382.721
WROCŁAW	51	6	47.9959	17	3	43.8875	155.644	115.317
WROCŁAW EX 1	51	6	49.3893	17	3	42.6384	158.818	118.491

Tabela 2. Błędy współrzędnych punktów
Table 2. Errors of the coordinates

Numer	m_B	m_L	m_h	m_H
	[m]	[m]	[m]	[m]
LUBIĄŻ	0.029	0.019	0.039	0.020
LUBIĄŻ EX 1	0.037	0.024	0.039	0.020
KŁODZKO	0.029	0.034	0.039	0.020
KŁODZKO EX 1	0.031	0.078	0.039	0.020
JANOWICE	0.017	0.015	0.039	0.020
JANOWICE EX 1	0.012	0.012	0.039	0.020
WROCŁAW	0.014	0.014	0.039	0.020
WROCŁAW EX 1	0.001	0.001	0.039	0.020

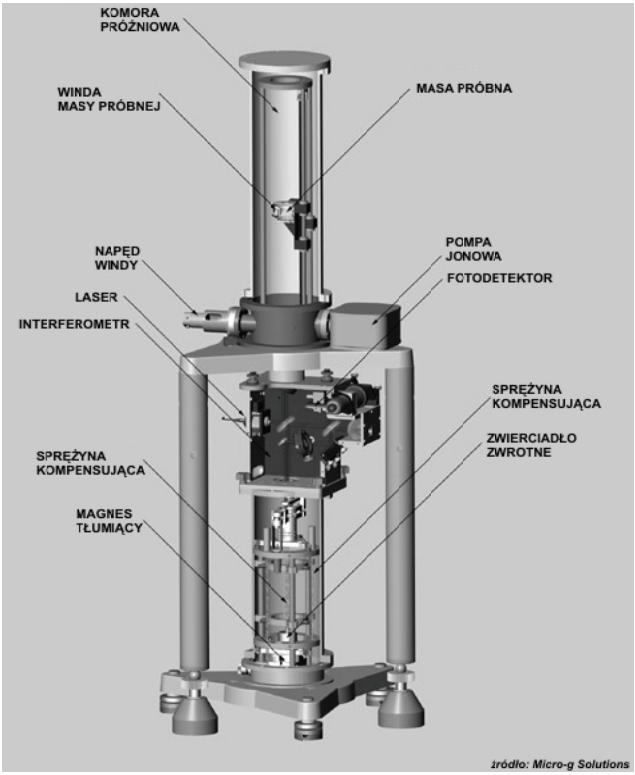
POMIARY ABSOLUTNEJ WARTOŚCI PRZYSPIESZENIA SIŁY CIĘŻKOŚCI

Pomiary na stanowiskach sudeckiej części jednolitego systemu grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych wykonano w okresie maj-czerwiec 2007 grawimetrem balistycznym FG-5 nr 230. Pomiary wykonał Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej.

Konstrukcja grawimetru absolutnego

Pierwsze prace nad konstrukcją aparatu balistycznego rozpoczęto w 1962 r. i były one związane z konstrukcją interferometru. Przez ponad 30 lat wprowadzano w konstrukcji wiele poprawek, których skutkiem jest obecny status aparatów FG5, jako najdokładniejszych oraz oferujących dużą mobilność.

Deklarowana przez producenta i potwierdzona podczas synchronicznych pomiarów kalibracyjnych dokładność wyznaczenia pionowej składowej ciężkości wynosi 2 μGal (1 μGal = 10^{-8} ms^{-2}). Dokładność ta uwzględnia nie tylko czynniki instrumentalne ale również te, które są związane z dokładnościami wprowadzanych poprawek do pomierzonej wartości przyspieszenia.



Fot. 6. Schemat konstrukcji grawimetru absolutnego FG5
Phot. 6. Scheme of absolute gravimeter FG5

Grawimetr FG5 składa się z następujących podstawowych elementów (fot. 6):

- Dropping chamber (komora próżniowa, w której porusza się masa próbna);
- Interferometr;
- Superspring (sprężyna kompensująca do zagwarantowania stabilności zwierciadła zwrotnego);
- Elektronika (pozwalająca na rejestrację i opracowanie danych).

Zasadą działania grawimetru balistycznego FG-5 jest wykorzystanie równania drogi swobodnie spadającej masy próbnej w polu siły ciężkości. Obserwowany jest spadek retroreflektora (corner cube) w komorze próżniowej. Obserwowana droga spadku ma ok. 20 cm, co przy wykorzystaniu zjawiska interferencji dla lasera He-Ne powoduje pojawienie się ok. 700000 prążków interferencyjnych. Pozycja spadającej masy jest obserwowana w funkcji czasu dla co tysięcznego prążka interfencyjnego.

Przy wykorzystaniu zjawiska interferencji do wyznaczania drogi pryzmatu niezwykle ważnym jest zagwarantowanie stabilności zwierciadła zwrotnego (internal reference corner cube). Zapewnia to konstrukcja sprężyny kompensującej (superspring).

Podczas spadku obiektu prążki interferencyjne są zliczane przez fotodiodę, a rejestrowany czas podawany jest przez zegar rubidowy. To, w zestawieniu z długością definiowaną przez stabilizowany jodowo laser, powoduje, że wyznaczana wartość *g* związana jest bezpośrednio z układem SI, przez związanie z jednostkami metra i sekundy.

Typowa sesja pomiarowa składa się z 12–48 serii obserwacyjnych, powtarzanych co godzinę. Zwykle stosuje się pełną dobową sesję, czyli 24 serie obserwacyjne. Pojedyncza seria obserwacyjna (set) składa się ze stu spadków (drop) powtarzanych co 10 sekund. Średnia wartość przyspieszenia wyznaczonego dla pojedynczej serii obserwacyjnej cechuje się odchyleniem standardowym zależnym od jakości stanowiska pod względem sejsmicznym. W wyjątkowo dobrych warunkach jest to 4μGal. Za dobre uchodzą punkty, na których odchylenie standardowe obserwacji w pojedynczej serii nie przekracza 20 μGal.

Ostateczna wartość przyspieszenia jest średnią z serii obserwacyjnych uzupełnioną poprawkami: pływową litosferyczną, pływową uwzględniającą przemieszczanie mas morskich, barometryczną i poprawką ze względu na zmiany położenia bieguna.

Wyznaczenie wartości przyspieszenia

Opracowanie rezultatów pojedynczego spadku obejmującego ok. 700 zarejestrowanych pozycji ciała – x_i – oraz czasu – t_i – polega na wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów wartości *g* z równania drogi o następującej postaci:

$$x_i = x_0 + v_0\tilde{t}_i + \frac{g_0\tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma x_0\tilde{t}_i^2}{2} + \frac{1}{6}\gamma x_0\tilde{t}_i^3 + \frac{1}{24}\gamma x_0\tilde{t}_i^4 \qquad \tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c}$$

gdzie:

γ – pionowy gradient ciężkości (~3 μGal/cm);
c – szybkość światła;
x_0 – pozycja wyjściowa;
v_0 – prędkość wyjściowa;
g – wyznaczona wartość przyspieszenia.

Wyznaczona wartość jest odniesiona do pozycji x_0, t_0, czyli do początku drogi spadku. W konstrukcji grawimetru FG-5 jest to wysokość ok. 130 cm nad znakiem pomiarowym. Niezbędna jest zatem redukcja absolutnej wartości przyspieszenia na poziom znaku pomiarowego przez pomiar rzeczywistego pionowego gradientu przyspieszenia siły ciężkości między poziomem znaku a wysokością ok. 130 cm (aby gradient obejmował pełny zakres redukcji przyspieszenia). Wartość gradientu jest również niezbędna jako element równania drogi.

Zaobserwowana, wyznaczona na podstawie równania drogi wartość przyspieszenia nie uwzględnia wielu czynników powodujących krótko- lub długookresowe zmiany przyspieszenia, związane np. ze zmianą grawitacyjnego wpływu ciał niebieskich, zmianami ciśnienia atmosferycznego, zmianami położenia bieguna etc. Wpływ każdego z tych efektów należy wprowadzić do obserwowanej wartości przyspieszenia jako poprawkę.

- Poprawka pływowa litosferyczna – *Earth Tide Correction*.
- Poprawka pływowa oceaniczno-obciążeniowa – *Ocean Loading Effect*.
- Poprawka barometryczna – *Barometric Correction*.
- Poprawka ze względu na ruch bieguna – *Polar Motion Correction*.
- Poprawka redukująca przyspieszenie na wybrany poziom odniesienia – *Datum Height Reduction*.

Wyznaczane na podstawie równania drogi przyspieszenie jest odniesione dla początku drogi spadku, czyli dla grawimetru balistycznego FG-5 do wysokości ok. 130 cm nad znakiem pomiarowym. Redukcja na wybrany poziom odniesienia wymaga znajomości rzeczywistego gradientu pionowego. Dokładność tej redukcji, a tym samym dokładność zredukowanej na poziom centru znaku wartości przyspieszenia, jest zależna od dokładności wyznaczenia gradientu pionowego.

Budżet błędów pomiarów absolutnych grawimetru FG-5

Standardowa procedura pomiaru obejmuje 24 serie obserwacyjne po 100 spadków każda. Każdy spadek masy próbnej pozwala na wyznaczenie i rejestrację wartości przyspieszenia. Wartość ta, poprawiona stosownymi poprawkami, po uśrednieniu daje nam absolutne przyspieszenie siły ciężkości na stanowisku. Z racji tego, że średnia wartość przyspieszenia może być tworzona nawet przez kilka tysięcy obserwacji, statystyczna analiza dokładności rozumiana jako błąd średni średniej arytmetycznej prowadzi do „sztucznych" dokładności szacowanych na około 0,2–0,3 μGal. Wartości tej nie możemy nazywać dokładnością wyznaczenia również i z innego powodu. Obserwowana wartość przyspieszenia jest poprawiana kilkoma poprawkami, zatem należy wziąć pod uwagę również i błędy związane z modelowaniem tych poprawek. Producent sugeruje także uzupełnienie analizy dokładności o elementy związane z czynnikami instrumentalnymi, związanymi np. z resztkowym wpływem atmosfery w komorze spadku, krótkookresowym wpływem zmian częstotliwości zegara, wpływem pola magnetycznego na masę próbną, wpływem dyfrakcji promienia laserowego w zjawisku interferencji etc.

Można zatem wyróżnić trzy składniki uwzględniane przy analizie dokładności: analiza statystyczna obserwacji (*measurement precision*), wpływ błędów poprawek (*model errors*), wpływ konstrukcji instrumentu (*system type error*).

Dla określenia ostatecznego błędu wyznaczenia wartości przyspieszenia wykorzystuje się prawo przenoszenia Gaussa, sumując:

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma^2_{\text{obserwacje}} + \sigma^2_{\text{model}} + \sigma^2_{\text{instrument}}}$$

Błąd wyznaczenia wartości przyspieszenia jest zatem rozumiany jako niepewność wyznaczenia. Dla typowej, 24-godzinnej sesji obserwacyjnej uzyskuje się niepewność pomiaru o wartości około 2 μGal.

Rezultaty pomiarów absolutnej wartości przyspieszenia

W ramach wyznaczenia wartości absolutnej przyspieszenia siły ciężkości wykonano dobowe sesje pomiarowe. Do wyznaczeń absolutnej wartości przyspieszenia siły ciężkości użyto grawimetru balistycznego FG-5 nr 230. W pomiarach absolutnych na każdym ze stanowisk stosowano identyczny schemat pomiarowy obejmujący 24-godzinne serie obserwacyjne po 100 spadków w każdej z serii. Dla minimalizacji efektu związanego z wpływem siły Coriolisa na tor ruch masy próbnej orientowano grawimetr zawsze w kierunku północnym. Wyznaczenia gradientu dokonywano na podstawie obserwacji grawimetrem względnym na dwóch poziomach – na centrze znaku grawimetrycznego i na poziomie ok. 1,35 nad znakiem pomiarowym. Dobór wysokości wynikał z konstrukcji grawimetru balistycznego FG-5 w potrzeby redukcji absolutnej wartości przyspieszenia z wysokości ok. 1,30 m, tj. z początku drogi spadku.

Fot. 7. Pomiar grawimetrem FG-5 na stanowisku *JANOWICE*
Phot. 7. Measurement by FG-5 gravimeter at *JANOWICE* station

Fot. 8. Pomiar grawimetrem FG-5 na stanowisku *WROCŁAW*
Phot. 8. Measurement by FG-5 gravimeter at *WROCŁAW* station

Do wyznaczenia ostatecznych wartości przyspieszenia na stanowiskach badawczych wykorzystano wartości przyspieszenia uzyskane w seriach obserwacyjnych, poprawione ze względu na:

- pływy litosferyczne (*tide*) wg modelu ETGTAB z globalnymi wartościami współczynników fal pływowych:

```
Start    Stop      Amplitude     Phase Term
  0.000000  0.002427   1.000000   0.0000 DC
  0.002428  0.249951   1.160000   0.0000 Long
  0.721500  0.906315   1.154250   0.0000 Q1
  0.921941  0.974188   1.154240   0.0000 O1
  0.989049  0.998028   1.149150   0.0000 P1
  0.999853  1.216397   1.134890   0.0000 K1
  1.719381  1.906462   1.161720   0.0000 N2
  1.923766  1.976926   1.161720   0.0000 M2
  1.991787  2.002885   1.161720   0.0000 S2
  2.003032  2.182843   1.161720   0.0000 K2
  2.753244  3.081254   1.07338    0.0000 M3
  3.791964  3.937897   1.03900    0.0000 M4
```

- pływy oceaniczne (*ocean loading*) wyznaczane na podstawie modelu Schwiderskiego ze współczynnikami rozwinięcia potencjału:

```
Waves:            M2    S2    K1    O1    N2    P1    K2    Q1    Mf    Mm    Ssa
Amplitude uGal: 0.819 0.258 0.091 0.142 0.159 0.031 0.066 0.039 0.103 0.050 0.058
Phase (deg):    -34.8 -5.7 -35.6 -143.7 -51.9 -54.3  2.1  165.1  9.4  18.9  74.8
```

- poprawkę atmosferyczną (*barometric correction*) ze współczynnikiem zmiany przyspieszenia c = 0,3 μGal/mbar;
- liniowe współczynniki rzeczywistego gradientu pionowego przyspieszenia siły ciężkości – wyznaczane na każdym stanowisku na potrzeby równania drogi i redukcji wartości przyspieszenia (*datum height correction*);
- zmianę orientacji osi obrotu Ziemi poprawką (*polar motion*) uwzględniającą ruch bieguna, wyznaczaną na podstawie współrzędnych bieguna – x, y – wyznaczonych na średni moment obserwacji na podstawie Biuletynu B publikowanego przez służbę International Earth Rotation Service (IERS).

Wyniki wyznaczeń uzyskane w latach 2007 i 2008 umieszczono w tablicy poniżej (w zestawieniu pominięto stanowisko Książ). Przedstawione wyniki wyznaczeń odnoszą się do centru znaku grawimetrycznego, natomiast błąd wyznaczenia uwzględnia również błąd redukcji do centru znaku grawimetrycznego.

Rok 2007				
Stanowisko	**Data**	**gradient**	**g**	**m_g**
		μGal/cm	*μGal*	*μGal*
WROCŁAW	9.06.2007	2,79	981145886,72	3,10
JANOWICE	8.06.2007	2,26	981043667,30	3,06
KŁODZKO	12.06.2007	2,92	981036427,48	3,08
LUBIĄŻ	13.06.2007	2,87	981177942,88	3,05
Rok 2008				
WROCŁAW	19.04.2008	2,79	981145890,55	3,10

WNIOSKI

Założone w latach 2006–2007 punkty sudeckiej części jednolitego systemu grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych stanowią znakomite odniesienie do planowanych w tym rejonie grawimetrycznych pomiarów na poligonach geodynamicznych. Definiują one precyzyjny poziom odniesienia dla pomiarów względnych oraz umożliwiają kalibrację (skalowanie) grawimetrów względnych. Jednocześnie po wykonaniu następnej epoki pomiarowej będzie możliwa interpretacja zmian ciężkości na stanowiskach absolutnych.

PIŚMIENNICTWO

Barlik M., Cacoń S., 1999. Gravity changes observed in the Polish part of Eastern Sudety Mountains and Fore-Sudetic Block in period 1992–1998, International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment, Vol. IV, No. 2, 8–10.

Barlik M., Cacoń S., 2001. Gravity variations monitoring in the Polish part of Eastern Sudety Mts and Sudetian foreland in period 1992–2000, Reports on Geodesy No. 2 (57), 2001. Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, 115–124.

Bosy J., Kontny B., 1998. Strategy of GPS data processing in local geodynamical networks. Reports on Geodesy No. 9 (39), 1998. Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, 105–114.

Camp Van M., Camelbeeck T., 2003. The FG5 absolute gravimeter: metrology and geophysics; Physicalia Magazine, Journal of the Belgian Society, 25(3) 2003.

Cacoń S., Dyjor S., 1995. Neotectonic and recent movements of the earth crust in Polish part of the Sudety and Fore-Sudetic Block. International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment, Vol. VI, No. 2, 11–16.

Cacoń S., Kontny B., Bosy J., 1998. Recent geodynamics of Eastern Sudety Mountains and Foreland. Reports on Geodesy No. 9 (39), 1998. Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, 115–124.

Cacoń S., Weigel J., Svabensky O., Kontny O., Jamroz O., 1996. Geodynamika masywy Śnieżnika i obszarów przyległych, Monografia: „Masyw Śnieżnika – zmiany w środowisku przyrodniczym", Wyd. PAE, Warszawa 1996, 57–70.

FG5 Absolute Gravimeter Operator's Manual; Micro-g Solutions inc., Lafayette.

Kontny B., 2003. Geodezyjne badania współczesnej kinematyki głównych struktur tektonicznych polskich Sudetów bloku przedsudeckiego na podstawie pomiarów GPS. Zesz. Nauk. AR Wroc., Nr 468, Rozprawy.

Kontny B., Bosy J., Mąkolski K., 2002. Geodynamic GPS Network Karkonosze – Preliminary results of the campaign 2001. Acta Montana, Ser. A, Geodynamics, No. 20, Prague, 25–29.

Mąkolski K., Mierzejewski M., Kaczałek M., 2002. Geodynamic research concerning recent movements in the Karkonosze Mts. And Karkonosze foreland. Acta Montana, Ser. A, Geodynamics, No. 20, Prague, 93–96.

Mizerski W., 2005. Geologia Polski dla geografów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.

Liszkowski J., 1976. Metody badań geotektonicznych i współczesnych ruchów skorupy ziemskiej, Mat. I Kraj. Symp. Współczesne i geotektoniczne ruchy skorupy ziemskiej w Polsce, t. 2, Wyd. Geol., Warszawa, 55–74.

Oberc J., 1972. Sudety i obszary przyległe. Budowa geologiczna Polski, t. IV, cz. 2, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.

Stupnicka E., 2007. Geologia regionalna Polski. Wydanie III zmienione. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego.

THE UNIFIED GRAVITY REFERENCE SYSTEM OF THE POLISH PERMANENT GNSS NETWORK AND GEODYNAMIC NETWORKS – PART OF LOWER SILESIA

Abstract. In years 2006–2007, at the area of Poland there were established a network of the absolute gravity measurements points for definition gravity reference system of the Polish Permanent GNSS network and geodynamic networks. Lower Silesian part of the system consist of five points situated in places: Wrocław, Kłodzko, Janowice Wielkie, Lubiąż i Świebodzice. The paper contain detailed description of location of the points Wrocław, Kłodzko, Janowice and Lubiąż, methods of monumentation and first results of measurements made at the points.

Key words: geodynamic of Lower Silesia, gravity measurements

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008

Do cytowania – For citation: Olszak T., Pachuta A., Próchniewicz D., Szpunar R., Trojanowicz M., Walo J., 2008. Jednolity system grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych – część dolnośląska. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr., 7(4), 45–66.

SPIS TREŚCI
CONTENTS

Zbigniew Muszyński
Zastosowanie metod estymacji odpornej do geodezyjnego opisu deformacji obiektu budowlanego 3
Application of robust estimation methods to geodetic description of building deformation

Zbigniew Siejka
Ocena faktycznej dokładności pomiarów GPS-RTK wykonywanych z wykorzystaniem korekcji generowanych przez Małopolski System Pozycjonowania Satelitarnego 15
Evaluation of actual accuracy in GPS-RTK measurements performed using corrections generated by Satellite Positioning System of Małopolska

Mieczysław Bakuła, Stanisław Oszczak, Roman Bornus, Wojciech Jarmołowski, Renata Pelc-Mieczkowska, Rafał Gregorczyk
Zastosowanie technologii GPS do wyznaczenia współrzędnych osnowy realizacyjnej obwodnicy miasta Wyszkowa 27
Application of GPS technology for control points position determination used for the ring road of Wyszków city

Adam Michalski
Mapy anamorficzne w kartograficznym modelowaniu zmienności zjawisk 37
Cartograms in cartographic modelling of phenomena changeability

Tomasz Olszak, Andrzej Pachuta, Dominik Próchniewicz, Ryszard Szpunar, Marek Trojanowicz, Janusz Walo
Jednolity system grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych – część dolnośląska 45
The unified gravity reference system of the polish permanent GNSS network and geodynamic networks – part of Lower Silesia