

Tadeusz GARGULA<sup>1</sup>  
Andrzej KWINTA<sup>2</sup>  
Zbigniew SIEJKA<sup>3</sup>

## ZASTOSOWANIE SIECI MODULARNYCH ZINTEGROWANYCH Z POMIARAMI GPS DO WYZNACZANIA PRZEMIESZCZEŃ

### Streszczenie

Głównym celem pracy jest pokazanie możliwości zastosowania sieci modularnych w integracji z wektorami GPS do wyznaczania przemieszczeń terenu na obszarach potencjalnie ruchomych (kinematycznych). Proponowana metoda łącznego opracowania obserwacji klasycznych i wektorów GPS składa się z dwóch etapów: I. wyrównanie dwu-wymiarowej sieci na elipsoidzie GRS80; II. wyrównanie wysokościowe (w odniesieniu do geoidy). Pomiary badawcze przeprowadzono na dwóch obiektach testowych: na terenie eksploatacji górniczej oraz na terenie osuwiska. Do wyznaczenia przemieszczeń dla celów niniejszej pracy wykorzystano wyniki dwóch pomiarów okresowych przeprowadzonych na obiekcie osuwiskowym. Wyniki analiz porównawczych pokazują przewagę pomiarów zintegrowanych (w sensie uzyskanych dokładności) w stosunku do jednorodnych pomiarów GPS.

### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach dużą popularnością cieszą się pomiary statyczne GPS, realizowane w oparciu o sieć punktów referencyjnych systemu ASG-EUPOS [1], [2], [3]. Główną zaletą tego systemu (z punktu widzenia użytkownika) jest brak konieczności ustawiania odbiornika na punkcie stałym (referencyjnym). Ta własność systemu decyduje o dużej jego przydatności przy wyznaczaniu przemieszczeń i odkształceń obiektów, zwłaszcza w sytuacji, gdy w sąsiedztwie „wszystko się rusza” (np. w przypadku terenu eksploatacji górniczej lub rozległego osuwiska). Zasadniczą wadą takiego rozwiązania może być jednak zbyt duża odległość obiektu pomiarowego do punktów referencyjnych (nawet do 100km). Takie wektory GPS obciążone są znacznymi błędami, zarówno w sensie długości wektora jak i jego orientacji w przestrzeni [4]. Błędy pomiarowe z kolei decydują o dokładności wyznaczenia pozycji (przemieszczenia bezwzględne) oraz w sposób pośredni wpływają na precyzję wielkości będących funkcjami współrzędnych punktów (np. długości), wykorzystywane do wyznaczenia przemieszczeń względnych (wzajemnych). W badaniach przemieszczeń wskazana jest natomiast stałość (niezmiennność) zewnętrznego układu odniesienia w czasie potrzebnym na wykonanie wszystkich serii (cykli) zaplanowanych pomiarów okresowych [5], [6]. W sytuacji gdy ten warunek nie jest możliwy do spełnienia, należy stosować kontrolę wewnętrzną układu geometrycznego wyznaczonej bazy punktów, np. poprzez wykorzystanie klasycznych technik pomiaru.

W publikacjach z zakresu wyznaczania przemieszczeń kładzie się nacisk na zastosowanie nowych metod pomiaru (technika GPS, systemy hybrydowe) [7], [5], [8]. Pewną alternatywą może być technologia *sieci modularnych* (zob. [9], [10], [11]), stosowana jako odrębna metoda pomiarów klasycznych lub w integracji z techniką GPS [12]. Na korzyść sieci modularnych przemawia duża elastyczność ich konstrukcji, co ułatwia nie tylko etap projektowania pomiaru, ale również samą

---

<sup>1</sup> dr inż., Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

<sup>2</sup> dr inż., Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

<sup>3</sup> dr inż., Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

realizację prac terenowych. Istotne znaczenie w tym względzie mają następujące własności sieci modularnych: 1) stanowiska są dowolnie obierane – bez markowania (brak czynności centrowania instrumentu i błędów z tym związanych); 2) punkty wiążące są z założenia punktami celu – ich rolę mogą pełnić punkty ścienne, np. związane z badanym obiektem (zalety podobne jak w przypadku stanowisk).

Zasady stosowania sieci modularnych są podane w Wytycznych Technicznych G-4.1 [11]. Koncepcja tej technologii pomiaru została rozwinięta i częściowo zmodyfikowana przez autora niniejszej pracy [13]. Obecnie prowadzone są badania nad problemem integracji sieci modularnych z techniką GPS (w zakresie pomiaru oraz numerycznego opracowania) [12], a także nad możliwością wykorzystania tej metody do obsługi geodezyjnej obiektów kinematycznych (ruchomych), czyli obszarów lub budowli inżynierskich, wymagających wyznaczenia modelu przemieszczeń lub odkształceń. Zagadnienia powyższe są tematem projektu badawczego, realizowanego przez autorów niniejszej pracy. W ramach tegoż projektu przeprowadzono serię okresowych pomiarów badawczych m.in. na terenie rozległego osuwiska, zagrażającego bezpieczeństwu ludzi zamieszkałych w pobliżu. Okazuje się, że ze względu na trudne warunki terenowe (duże deniwelacje, liczne skarpy i mikro-osuwiska, zadrzewione zbocza, ogrodzenia posesji itp.) nie można było zastosować tam tradycyjnego pomiaru sytuacyjno-wysokościowego (na bazie stanowisk centrowanych). Pomiar GPS okazał się również niewystarczający z powodu niekorzystnej ekspozycji na sygnały satelitarne. Jediną możliwą do zastosowania metodą pomiaru w takich warunkach była właśnie technika sieci modularnych. Otrzymane wyniki posłużyły do wyznaczenia przemieszczeń poziomych. Metoda sieci modularnych została również przetestowana przy wyznaczaniu przemieszczeń na terenach eksploatacji górniczej [14].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów przy wyznaczaniu przemieszczeń na dwóch obiektach z wykorzystaniem różnych metod (klasycznych i GPS). Do analizy numerycznej wykorzystano wyniki dwóch cykli pomiarów okresowych na jednym z obiektów (osuwisko Siercza). Zestawiono kilka wersji opracowania wyników z uwzględnieniem wyrównania sieci modularnej zintegrowanej z pomiarami GPS. Z powodu braku stałego układu odniesienia dla przeprowadzonych pomiarów, rozważano głównie przemieszczenia wzajemne (względne).

## 2. Charakterystyka obiektów pomiarowych

Pomiary badawcze zrealizowano na dwóch, potencjalnie ruchomych, obiektach. Przy wyborze obiektów przyjęto założenie, że obiekty te będą miały odmienny charakter (przyczyny i skala przemieszczeń, ukształtowanie terenu itp.). Po przeanalizowaniu wielu różnych możliwości i przeprowadzeniu rozpoznania w terenie, zdecydowano na wybór następujących obiektów:

- 1) teren eksploatacji górniczej kopalni Ziemowit w Łędzinach,
- 2) teren rozległego osuwiska w Sierczy k. Wieliczki.

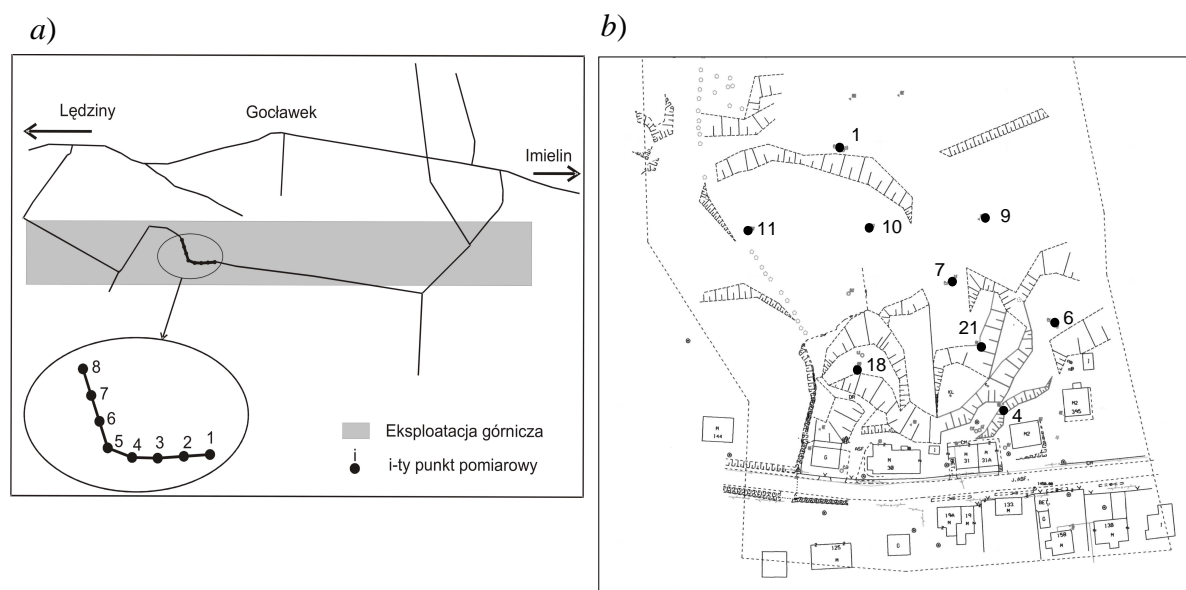
Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę każdego z obiektów.

### Ad. 1) Kopalnia Ziemowit

Przygotowanie tego obiektu do pomiarów testowych wiązało się z koniecznością wcześniejszego nawiązania kontaktów z zarządem kopalni w celu uzyskania pozwolenia na pomiary oraz dokumentacji nt. bieżącej eksploatacji. Obszar eksploatacji zlokalizowany jest na południe od osiedla Gocławek w Chełmie Śląskim (siedziba kopalni mieści się w Łędzinach). Głównym zadaniem prowadzonych okresowych pomiarów geodezyjnych było określenie oddziaływania eksploatacji pokładu nr 209 na powierzchnię terenu, w związku z faktem, że kolejna ściana do eksploatacji zaprojektowana jest bezpośrednio pod osiedlem (zagrożenie bezpieczeństwa mieszkańców). Zabudowa jednorodzinna osiedla Gocławek już kilkakrotnie poddana była oddziaływaniu podziemnej eksploatacji. Bezpośrednio ponad eksploatacją górniczą zastabilizowano 8 punktów pomiarowych, przeciętnie w odległościach co 25 metrów. Na rys. 1a przedstawiono schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych względem prowadzonej eksploatacji górniczej.

## Ad. 2) Osuwisko Siercza

W czasie trwania okresowych pomiarów testowych, na terenie osuwiska prowadzone były równoległe badania geologiczne, mające na celu określenie przyczyn długotrwałego procesu występowania ruchów mas ziemnych, które zagrażają bezpieczeństwu osób zamieszkających w pobliżu. Zadanie monitorowania terenu realizowane było przez Krakowskie Przedsiębiorstwo Geologiczne na zlecenie Starostwa Powiatowego w Wieliczce (k. Krakowa). Dostęp do tego obiektu stał się możliwy dzięki informacjom uzyskanym z Państwowego Instytutu Geologicznego w Krakowie. Bazę pomiarową założono w miejscu występowania największych ruchów mas ziemi, w pobliżu drogi lokalnej i budynków mieszkalnych. Rzeźba terenu jest bardzo urozmaicona, występuje duża ilość skarp i mikro-osuwisk. Deniwelacje terenu sięgają 20m na dystansie 60m. Dodatkowe utrudnienie stanowiły przeszkody w postaci drzew, krzewów oraz ogrodzeń posesji. Przeprowadzenie pomiarów geodezyjnych w takich warunkach, zarówno klasycznych jak i GPS, wymagało bardzo starannego przygotowania (zaplanowania) każdej z metod. Na rys. 1b pokazano szkic usytuowania punktów reprezentujących obiekt przemieszczeń (fragment osuwiska).



Rys. 1. Lokalizacja bazy punktów pomiarowych: a) obiekt „kopalnia Ziemowit”;  
b) obiekt „osuwisko Siercza”

### 3. Opis przeprowadzonych pomiarów testowych

Prace terenowe polegały na przeprowadzeniu 4 cykli pomiarów okresowych na każdym z obiektów, przeciętnie co 2 miesiące. Przyjęto założenie, że wszystkie obserwacje w ramach danej kampanii pomiarowej będą wykonane w ciągu jednego dnia (pełny, domknięty cykl), co umożliwi analizę przemieszczeń według modelu quasi-kinematycznego bądź quasi-statycznego [16]. Zastosowano następujące, niezależne metody pomiaru: klasyczna sieć sytuacyjno-wysokościowa (tachimetryczna), modułarna sieć sytuacyjno-wysokościowa, niwelacja geometryczna oraz metoda statyczna GPS. Poniżej przedstawiono charakterystykę każdej z metod.

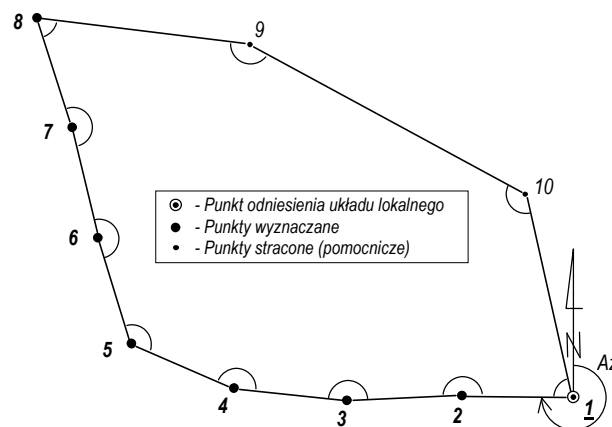
#### *Klasyczna sieć sytuacyjno-wysokościowa*

Zastosowano metodę wielostatutową pomiarów, co umożliwiło 2-krotne wykorzystanie każdego scentrowanego i spoziomowanego statywu z wymienną spodarką (usprawnienie procesu pomiarów oraz zminimalizowanie wpływu błędów centrowania). Pomiar wysokości instrumentu i sygnału wykonywano za pomocą odpowiedniej miarki z dokładnością rzędu 1-2mm. Wykorzystany sprzęt pomiarowy (tachimetr elektroniczny Leica TC2003) umożliwiał automatyczną rejestrację wyników. Celem pomiaru było wyznaczenie przestrzennego położenia punktów reprezentujących obiekt w przyjętym, lokalnym układzie odniesienia (rys.2). Z klasycznego pomiaru sytuacyjno-

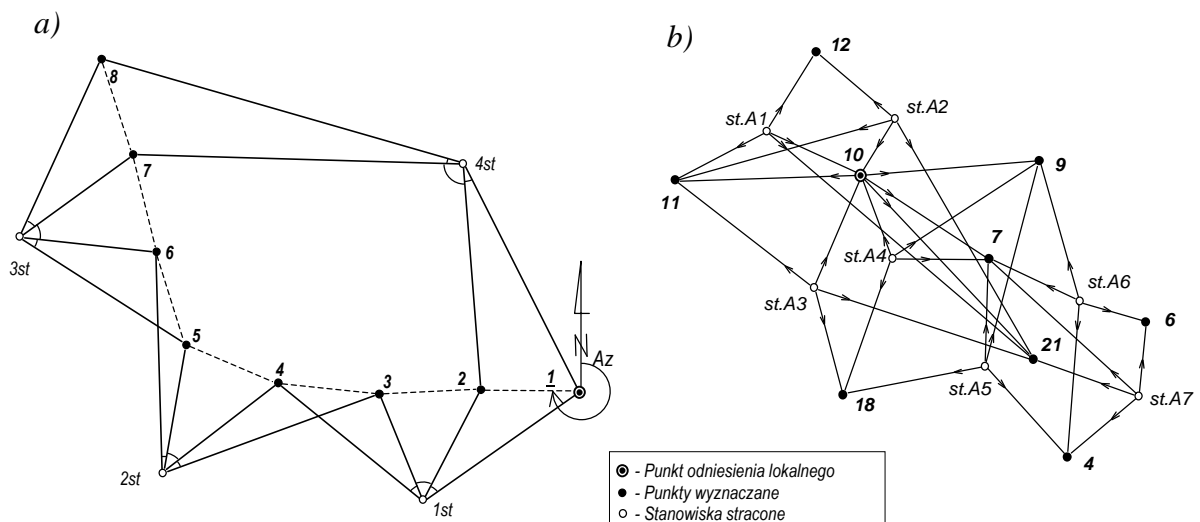
wysokościowego (stanowiska centrowane) zrezygnowano na obiekcie „Siercza” ze względu na duże trudności w uzyskaniu wizur między punktami wyznaczanymi.

### *Modularna sieć sytuacyjno-wysokościowa*

W tym przypadku wyznaczone punkty pełniły zazwyczaj funkcję jedynie punktów celowania (rys. 3), a stanowiska pomiarowe wybierane były w dogodnych miejscach (bez stabilizacji). W celu zrealizowania pomiaru na danym stanowisku niezbędne było jednoczesne ustawienie nad kilkoma punktami wyznaczanymi (zazwyczaj czterema) statywów ze spodarkami i lustrami. Stanowiska były punktami straconymi [13], a więc odpadała konieczność pomiaru wysokości instrumentu. Zaletą tej metody (oprócz eliminacji czynności centrowania instrumentu i pomiaru jego wysokości, jak i błędów z tym związanych) było sprawne przeprowadzenie pomiaru. Na obiekcie „osuwisko Siercza” metoda sieci modularnych (rys. 4b) okazała się jedyną możliwą do wykonania formą pomiaru sytuacyjno-wysokościowego (obok metody GPS). Z klasycznego pomiaru sytuacyjno-wysokościowego (stanowiska centrowane) zrezygnowano ze względu na duże trudności w uzyskaniu wizur między punktami wyznaczanymi.



Rys. 2. Klasyczny ciąg sytuacyjno-wysokościowy (obiekt „Ziemowit”)



Rys. 3. Pomiar metodą sieci modularnych: a) obiekt „Ziemowit”; b) obiekt „Siercza”.

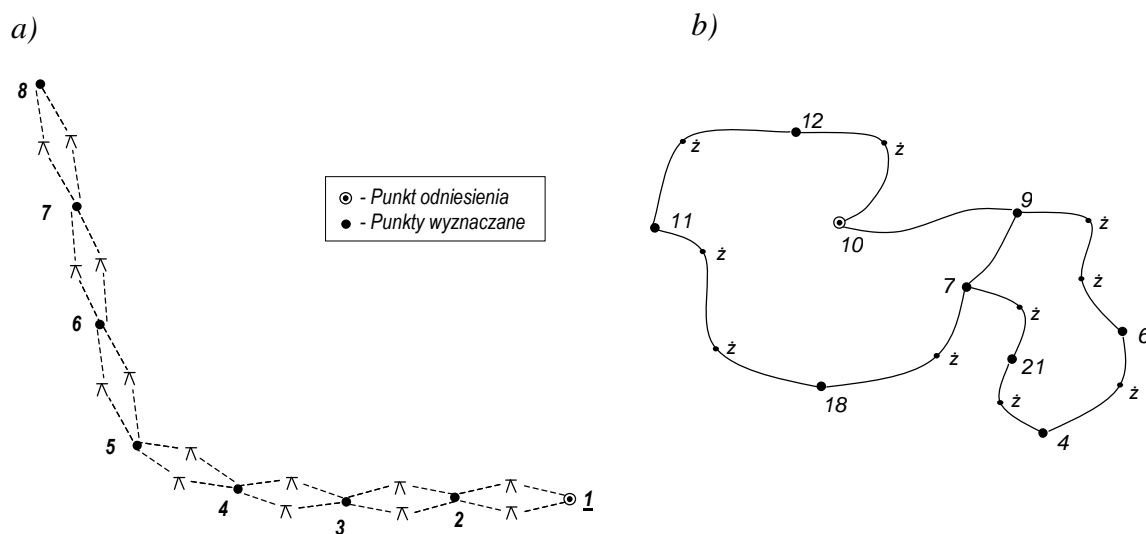
### *Niwelacja geometryczna*

Podstawą dokładnego wyznaczenia wysokości względnych (układ lokalny odniesienia) były wyniki pomiaru sieci niwelacyjnej (rys. 4). Różnice wysokości wyznaczano 4-krotnie (po 2 razy w obydwu

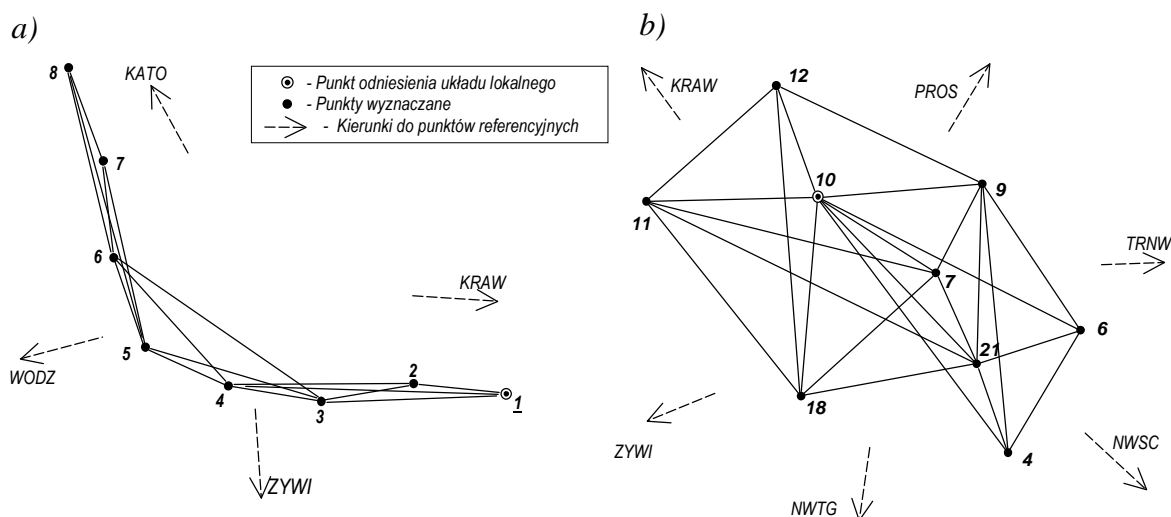
kierunkach). Zastosowano metodę niwelacji geometrycznej przy wykorzystaniu niwelatora cyfrowego Leica NA3003 z łałami kodowymi. Wyniki pomiaru były rejestrowane automatycznie w pamięci wewnętrznej instrumentu.

#### *Pomiar GPS (metoda statyczna)*

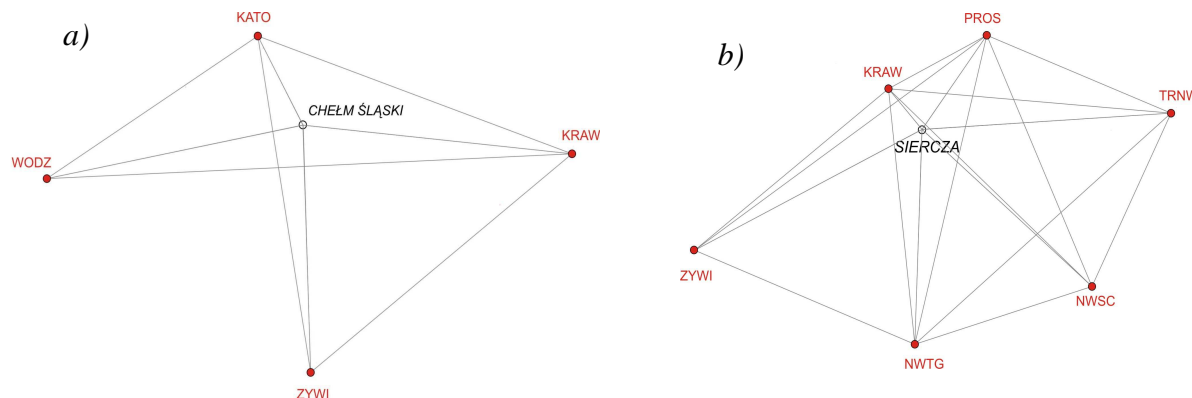
Celem pomiaru było wyznaczenie wzajemnego położenia punktów obiektu, co zapewniły wektory uzyskane w różnych kombinacjach pomiędzy tymi punktami (rys. 5). Dodatkowo, wyznaczane punkty zostały powiązane z globalnym układem odniesienia WGS84 za pomocą dostępnych punktów referencyjnych systemu ASG-EUPOS (4 punkty dla obiektu Ziemowit, 6 punktów dla obiektu Siercza – rys. 6). Punkty te były niezbędne do wyznaczenia współrzędnych punktów pomiarowych w układzie globalnym związanym z elipsoidą GRS80. Sygnały satelitarne były rejestrowane równocześnie przez 4 - 5 odbiorników GePos RM24 firmy *Carl Zeiss*. Czas obserwacji w sesji pomiarowej wyniósł 60 minut.



Rys. 4. Niwelacja geometryczna: a) obiekt „Ziemowit”; b) obiekt „Siercza”.



Rys. 5. Pomiar metodą statyczną GPS: a) obiekt „Ziemowit”; b) obiekt „Siercza”



Rys. 6. Pomiar GPS – wykorzystanie punktów referencyjnych systemu ASG-EUPOS:  
a) obiekt „Ziemowit”; b) obiekt „Siercza”

#### 4. Metodologia wyrównania sieci modularnych zintegrowanych z wektorami GPS

Realizacja zadania wyrównania pomiarów zintegrowanych (klasycznych: odległości, kątów poziomych i różnic wysokości oraz satelitarnych wektorów GPS) wymaga odpowiedniego przygotowania obserwacji – sprowadzenia ich do wspólnej powierzchni odniesienia [16]. Jedną z możliwości jest przeprowadzenie procesu wyrównania na elipsoidzie GRS80. Przy założeniu, że obserwacje klasyczne stanowią wyniki pomiaru sieci modularnej, opracowanie sieci zintegrowanej na elipsoidzie odbywa się według następujących etapów (por. [4]):

##### I. Opracowanie sieci „poziomej” (na elipsoidzie)

- 1) Wyrównanie pomiarów GPS w układzie geocentrycznym elipsoidy GRS80 (ETRF-89) i obliczenie współrzędnych XYZ [18].
- 2) Przeliczenie współrzędnych kartezjańskich XYZ na współrzędne elipsoidalne BLH.
- 3) Rzutowanie wektorów GPS na elipsoidę, czyli przekształcenie każdego wektora  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  na tzw. pseudo-obszary:
  - azymut początkowy linii geodezyjnej  $A$ ,
  - długość linii geodezyjnej  $s$ ,
  - różnica wysokości elipsoidalnych  $\Delta H$

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \Rightarrow (A, s, \Delta H) \quad (1)$$

- 4) Przygotowanie odległości z pomiarów klasycznych  $d$  – korekta odwzorowawcza przy rzutowaniu na geoidę i na elipsoidę

$$\delta d = \frac{(H_{sr} + N_{sr}) \cdot d}{R} \quad (2)$$

$H_{sr}$  – średnia wysokość normalna punktów końcowych odcinka  $d$ ,  
 $N_{sr}$  – średni odstęp geoidy od elipsoidy GRS80 (~34m na obszarze Polski),  
 $R$  – średni promień Ziemi.

- 5) Utworzenie zbioru obserwacji (pseudo-obszary) na elipsoidzie, złożonego z:
  - a) pomiarów GPS (azymuty  $A$  i długości linii geodezyjnych  $s$ ),
  - b) pomiarów klasycznych (odległości  $d$  i kierunki lub kąty poziome).
- 6) Obliczenie współrzędnych przybliżonych BL:
  - a) dla punktów z pomiaru GPS (zob. etap 2),
  - b) dla punktów występujących tylko przy pomiarze metodą sieci modularnych, np. stanowisk pomiaru biegunowego (etap ten zostanie odrębnie przedstawiony poniżej).

- 7) Wyrównanie na elipsoidzie sieci zintegrowanej (2-wymiarowej) oraz obliczenie wyrównanych współrzędnych elipsoidalnych  $B^{(w)}, L^{(w)}$  dla wszystkich punktów (symbol  $^{(w)}$  oznacza wielkości wyrównane).

## II. Opracowanie sieci wysokościowej

- 8) Przeliczenie elipsoidalnych różnic wysokości (pseudo-observacji  $\Delta H$  – zob. etap 3) na normalne różnice wysokości  $\Delta H_n$  w oparciu o numeryczny model geoidy [17]

$$\Delta H_n = \Delta H - \Delta N \quad (3)$$

$\Delta N$  – różnica odstępów geoidy od elipsoidy.

- 9) Przygotowanie zbioru normalnych różnic wysokości, złożonego z:
- a) pomiarów satelitarnych  $\Delta H_n$ ,
  - b) klasycznych obserwacji z niwelacji geometrycznej.
- 10) Wyrównanie niwelacji zintegrowanej; obliczenie wyrównanych wysokości normalnych  $H_n^{(w)}$ .
- 11) Przeliczenie wysokości normalnych  $H_n^{(w)}$  na elipsoidalne  $H^{(w)}$  w oparciu o numeryczny model geoidy

$$H^{(w)} = H_n^{(w)} + N \quad (4)$$

$N$  – odstęp geoidy od elipsoidy.

- 12) Transformacja współrzędnych elipsoidalnych  $B^{(w)}, L^{(w)}, H^{(w)}$  na kartezjańskie  $X^{(w)}, Y^{(w)}, Z^{(w)}$ .

Realizacja etapu 6b) wymaga niezależnego przygotowania przybliżonych współrzędnych elipsoidalnych dla punktów stanowisk pomiarowych w sieci modularnej. W przypadku gdy pomiar klasyczny był odniesiony do układu lokalnego (bez nawiązania), zadanie to może być zrealizowane w następujący sposób (przykład w tablicy 1):

- 6b.1) przygotowanie współrzędnych geocentrycznych XYZ dla punktów wiążących (etap 1),
- 6b.2) transformacja współrzędnych XYZ na układ „2000”,
- 6b.3) wyrównanie sieci modularnej (obserwacje klasyczne) w układzie „2000”,
- 6b.4) transformacja współrzędnych płaskich xy („2000”) na elipsoidalne BL.

Tablica 1. Etapy obliczania współrzędnych przybliżonych na przykładzie pomiaru „Siercza 1”

P- kty wią- żące	Układ GRS80 (etap 6b.1) [m]			Układ 2000 (etap 6b.2) [m]		Stano- wiska	Układ 2000 (etap 6b.3) [m]		Wspólrz. elipsoidalne (etap 6b.4) [° ' "]	
	X	Y	Z	x	y		x	y	B	L
4	3861268.071	1409139.263	4861199.456	5537919.944	7431796.903	A1	5537999.657	7431736.616	49 58 27.59219	20 02 53.87954
6	3861237.249	1409147.425	4861216.117	5537950.456	7431815.526	A2	5537967.354	7431718.217	49 58 26.53890	20 02 52.97686
7	3861236.436	1409103.963	4861219.393	5537965.074	7431775.169	A3	5537985.091	7431764.588	49 58 27.13233	20 02 55.29270
9	3861215.209	1409107.532	4861232.752	5537987.859	7431786.089	A4	5537998.249	7431758.817	49 58 27.55578	20 02 54.99465
10	3861234.468	1409068.595	4861230.800	5537983.519	7431742.850	A5	5537955.032	7431777.321	49 58 26.16473	20 02 55.95099
11	3861253.985	1409025.286	4861230.624	5537981.340	7431695.447	A6	5537942.094	7431800.051	49 58 25.75541	20 02 57.10000
18	3861276.046	1409079.881	4861202.645	5537932.602	7431738.559	A7	5537932.604	7431813.634	49 58 25.45390	20 02 57.78770
21	3861252.407	1409123.062	4861208.447	5537941.376	7431787.327	A8	5537914.424	7431801.181	49 58 24.86036	20 02 57.17448

Wszystkie przedstawione powyżej etapy można zrealizować przy wykorzystaniu systemu obliczeniowego GEONET [15].

Alternatywnym sposobem wyrównania sieci modularnej zintegrowanej z wektorami GPS jest zastosowanie metody transformacji wielogrupowej. Model funkcjonalny wyrównania składa się w tym przypadku z równań warunkowych z niewiadomymi, zestawianymi dla współrzędnych punktów wiążących (dostosowania), czyli punktów wspólnych dla sąsiednich modułów. Dotyczy to zarówno klasycznych modułów pomiaru biegunowego jak i modułów (wektorów) GPS. Rozwiązanie takie zostało zaproponowane w pracy [12].

### 5. Analiza uzyskanych wyników pomiarów

Obliczenia typu: wyrównania, transformacje, redukcje odwzorowawcze itp. przeprowadzono za pomocą programu GEONET [15], natomiast do przygotowania plików wejściowych jak również do wykonania szczegółowych analiz i zestawień wyników wykorzystano inne, ogólnodostępne aplikacje komputerowe (np. arkusz kalkulacyjny). Analizę porównawczą dla zastosowanych metod pomiarowych (par. 3) przeprowadzono w oparciu o wyniki uzyskane w czasie dwóch pierwszych cykli pomiarowych na obiekcie Siercza. Przyjęto następujące umowne oznaczenia: S1 – pierwszy cykl pomiarowy; S2 – drugi cykl pomiarowy. W tablicy 2 zestawiono współrzędne oraz parametry dokładnościowe wyrównania pomiarów z metod klasycznych. Błędy średnie pomiaru przyjęto podobne dla wszystkich wersji: kąta (poziomego i pionowego)  $\pm 15''$ , długości  $\pm 0.003\text{m}$ ; pomiaru wysokości sygnału  $\pm 0.002\text{m}$ ; pomiaru różnicy wysokości w niwelacji  $\pm 0.001\text{m}$ . Błąd średni jednostkowy  $m_o$  zbliżony do jedności wskazuje na wewnętrzną spójność (brak błędów grubych) układu obserwacyjnego w każdej wersji wyrównania.

Analizując błędy średnie wyznaczanych parametrów ( $m_P$ ,  $m_H$ ) można wnioskować, że:

- „najlepsze” wysokości uzyskano z niwelacji geometrycznej;
- wyrównanie sieci 3-wymiarowej wpływa korzystnie na dokładność wysokości uzyskanych z niwelacji trygonometrycznej, co wskazuje na niższą dokładność pomiaru wysokościowego niż sytuacyjnego (prawdopodobnie z powodu błędów pomiaru wysokości sygnału);
- pomiar wysokościowy (niwelacja trygonometryczna) wpływa niekorzystnie na dokładność pomiaru sytuacyjnego przy jednoczesnym wyrównaniu sytuacyjno-wysokościowym.

Tablica 2. Wyniki opracowania pomiarów klasycznych S1 (Siercza, 1 cykl pomiaru)

Sieć mod. 1-wymiar. [m]			Sieć mod. 2-wymiarowa [m]			Sieć modularna 3-wymiarowa [m]					Sieć niwelacyjna [m]		
Nr	H	$m_H$	X	Y	$m_P$	X	Y	H	$m_P$	$m_H$	H	$m_H$	Nr
4	311.8842	0.0021	971.578	1078.447	0.003	971.577	1078.451	311.8838	0.006	0.0014	311.8920	0.0007	4
6	307.8239	0.0019	1007.297	1079.512	0.002	1007.298	1079.516	307.8237	0.005	0.0013	307.8297	0.0007	6
7	300.2300	0.0018	1000.000	1037.201	0.001	1000.000	1037.203	300.2297	0.003	0.0011	300.2307	0.0005	7
9	298.4415	0.0018	1025.181	1035.384	0.001	1025.183	1035.386	298.4412	0.003	0.0011	298.4414	0.0004	9
10	300.0000	0.0000	1000.000	1000.000	0.000	1000.000	1000.000	300.0000	0.000	0.0000	300.0000	0.0000	10
11	302.1190	0.0018	974.603	959.900	0.002	974.602	959.898	302.1187	0.004	0.0012	302.1184	0.0007	11
12	295.4207	0.0023	1019.293	974.998	0.002	1019.294	974.997	295.4203	0.005	0.0011	295.4210	0.0005	12
18	306.0400	0.0020	953.641	1021.495	0.002	953.638	1021.496	306.0395	0.005	0.0016	306.0458	0.0007	18
21	305.7267	0.0016	985.437	1059.519	0.002	985.436	1059.523	305.7264	0.004	0.0012	305.7327	0.0007	21
A1	300.1777	0.0017	1010.927	986.585	0.001	1010.927	986.585	300.1773	0.004	0.0008	–		
A2	302.3600	0.0018	973.745	986.618	0.001	973.744	986.617	302.3597	0.003	0.0011			
A3	300.1006	0.0016	1012.141	1018.101	0.002	1012.141	1018.100	300.1000	0.004	0.0009			
A4	298.2842	0.0016	1020.708	1006.566	0.001	1020.709	1006.567	298.2841	0.003	0.0009			
A5	303.5597	0.0016	992.345	1044.059	0.002	992.345	1044.061	303.5592	0.004	0.0012			
A6	309.4430	0.0018	992.376	1070.214	0.002	992.375	1070.217	309.4428	0.005	0.0012			
A7	313.1285	0.0018	990.866	1086.714	0.003	990.866	1086.718	313.1278	0.006	0.0014			
A8	315.9226	0.0019	968.905	1084.910	0.003	968.903	1084.915	315.9224	0.007	0.0015			
$m_o = 1.27$			$m_o = 0.87$			$m_o = 1.12$					$m_o = 0.83$		
$m_H$ (śr.) = 0.0017			$m_P$ (śr.) = 0.0018			$m_P / m_H$ (śr.) = 0.0043 / 0.0011					$m_H$ (śr.) = 0.0005		
$m_H$ (max.) = 0.0023			$m_P$ (max.) = 0.0029			$m_P / m_H$ (max.) = 0.0069 / 0.0016					$m_H$ (max.) = 0.0007		

Na podstawie powyższych wniosków przyjęto do dalszej analizy (jako wyniki pomiarów klasycznych) współrzędne  $xy$  z wyrównania płaskiej sieci modularnej oraz wysokości  $H$  z niwelacji geometrycznej (tab. 3). Obserwacje z tych metod wykorzystano również do wyrównania sieci zintegrowanej (według metodologii opisanej w par. 4.). Dla sieci GPS zastosowano tzw. wyrównanie pseudo-swobodne w nawiązaniu tylko jednego punktu sieci (nr 10 – najkorzystniejsza ekspozycja oraz najdłuższy czas obserwacji) do punktów referencyjnych (por. rys. 5b). Punkt nr 12 nie został wyznaczony w pierwszym cyklu (S1) ze względu na duże błędy pomiarowe.



Tablica 3. Zestawienie współrzędnych przyjętych do analizy porównawczej (cykl pomiaru S1)

Nr pkt	Pomiary klasyczne - ukł. Lokalny [m]			Pomiary GPS – układ WGS84 [m]			Pomiary zintegrowane – układ WGS84 [m]		
	x	y	H	X	Y	Z	X	Y	Z
4	971.5781	1078.4469	311.8920	3861268.071	1409139.263	4861199.456	3861268.076	1409139.257	4861199.463
6	1007.2970	1079.5122	307.8297	3861237.249	1409147.425	4861216.117	3861237.260	1409147.428	4861216.118
7	1000.0000	1037.2014	300.2307	3861236.436	1409103.963	4861219.393	3861236.417	1409103.952	4861219.382
9	1025.1811	1035.3842	298.4414	3861215.209	1409107.532	4861232.752	3861215.216	1409107.512	4861232.745
10	1000.0000	1000.0000	300.0000	3861234.468	1409068.595	4861230.800	3861234.468	1409068.595	4861230.800
11	974.6030	959.9001	302.1184	3861253.985	1409025.286	4861230.624	3861254.000	1409025.277	4861230.629
18	953.6409	1021.4947	306.0458	3861276.046	1409079.881	4861202.645	3861276.044	1409079.872	4861202.646
21	985.4365	1059.5193	305.7327	3861252.407	1409123.062	4861208.447	3861252.411	1409123.062	4861208.445

W oparciu o współrzędne zestawione w tablicy 3 obliczono w trzech wersjach wybrane odległości przestrzenne pomiędzy wyznaczanymi punktami (tab. 4), odpowiadające wektorom z pomiaru GPS. Porównanie odchyłek długości wektorów (w stosunku do odległości klasycznych) pokazuje przewagę sieci zintegrowanej nad siecią GPS (zmniejszenie odchyłek średnio o 30%). Pozwala to przypuszczać, że współrzędne geocentryczne XYZ przy rozpatrywaniu sieci zintegrowanej bardziej są zbliżone do wartości rzeczywistych.

Tablica 4. Odchyłki odległości wyznaczonych ze współrzędnych przestrzennych

Wektor		Odległość przestrzenna S1* [m]			Odchyłki długości [m]	
od	do	S1 klas.	S1 GPS	S1 integr.	GPS—klas.	Integr.—klas.
4	21	24.254	24.263	24.256	0.009	0.002
9	7	25.310	25.333	25.313	0.023	0.003
7	21	27.211	27.197	27.214	-0.014	0.003
6	21	29.698	29.701	29.701	0.003	0.003
4	6	35.965	35.976	35.969	0.011	0.004
7	10	37.202	37.214	37.206	0.012	0.004
9	10	43.458	43.484	43.463	0.026	0.005
9	21	47.067	47.070	47.072	0.003	0.005
11	10	47.513	47.504	47.518	-0.009	0.005
18	7	49.292	49.289	49.297	-0.003	0.005
18	21	49.567	49.569	49.573	0.002	0.006
18	10	51.456	51.467	51.462	0.011	0.006
21	10	61.543	61.548	61.549	0.005	0.006
18	11	65.182	65.193	65.189	0.011	0.007
6	10	80.229	80.234	80.238	0.005	0.009
11	7	81.388	81.389	81.397	0.001	0.009
4	10	84.280	84.295	84.289	0.015	0.009
11	21	100.272	100.272	100.282	0.000	0.010
*S1 – pierwszy pomiar okresowy na obiekcie Siercza				wart. śr.  ·	0.009	0.006
				wart. max.  ·	0.026	0.011

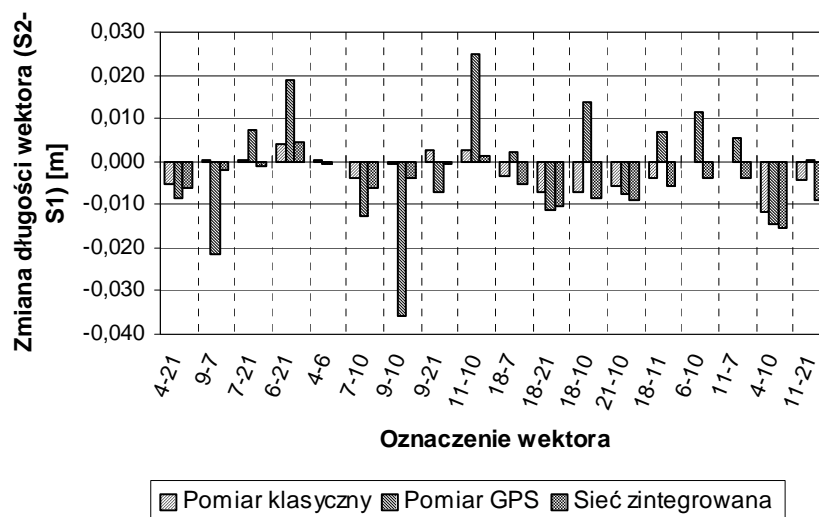
Na podobnej zasadzie wyznaczono długości wektorów ze współrzędnych otrzymanych w drugim cyklu pomiarowym (S2), co dało podstawę do obliczenia przemieszczeń wzajemnych S2-S1 (tab. 5).

Tablica 5. Przeszyczenia wzajemne (w przestrzeni) w zaleźności od metody pomiaru

Wektor		Odległość przestrzenna S2* [m]			Zmiana odległości S2-S1 [m]			Odchyłki zmian dł. S2-S1 [m]	
od	do	S2 klas.	S2 GPS	S2 integr.	Klas.	GPS	Integr.	GPS-klas.	Integr.-klas.
4	21	24.248	24.254	24.250	-0.005	-0.009	-0.006	-0.004	-0.001
9	7	25.310	25.312	25.311	0.000	-0.021	-0.002	-0.021	-0.002
7	21	27.212	27.204	27.213	0.000	0.007	-0.001	0.007	-0.001
6	21	29.702	29.720	29.706	0.004	0.019	0.005	0.015	0.001
4	6	35.965	35.975	35.969	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	10	37.198	37.202	37.200	-0.004	-0.012	-0.006	-0.008	-0.002
9	10	43.457	43.448	43.459	-0.001	-0.036	-0.004	-0.035	-0.003
9	21	47.069	47.063	47.072	0.002	-0.007	0.000	-0.009	-0.002
11	10	47.516	47.528	47.519	0.003	0.025	0.001	0.022	-0.002
18	7	49.288	49.292	49.292	-0.003	0.002	-0.005	0.005	-0.002
18	21	49.560	49.558	49.563	-0.007	-0.011	-0.010	-0.004	-0.003
18	10	51.449	51.481	51.454	-0.007	0.014	-0.008	0.021	-0.001
21	10	61.537	61.540	61.540	-0.006	-0.008	-0.009	-0.002	-0.003
18	11	65.178	65.200	65.183	-0.004	0.007	-0.006	0.011	-0.002
6	10	80.229	80.246	80.234	0.000	0.011	-0.004	0.011	-0.004
11	7	81.388	81.394	81.393	0.000	0.005	-0.004	0.005	-0.004
4	10	84.268	84.281	84.273	-0.012	-0.014	-0.016	-0.002	-0.004
11	21	100.268	100.272	100.273	-0.004	0.000	-0.009	0.004	-0.005
*S2 – drugi pomiar okresowy na obiekcie Siercza					wart. śr.  ·			0.011	0.002
					wart. max.  ·			0.035	0.005

Przy umownym założeniu, że wielkości tych przeszczeń są prawidłowo wyznaczone na bazie metody klasycznej, obliczono odchyłki, które wskazują jakim błędem obarczone są przeszczenia uzyskane z dwóch pozostałych metod. W zestawieniu tym sieć zintegrowana również zdecydowanie przewyższa jednorodną sieć GPS (redukcja odchyłek średnio o ok. 80%).

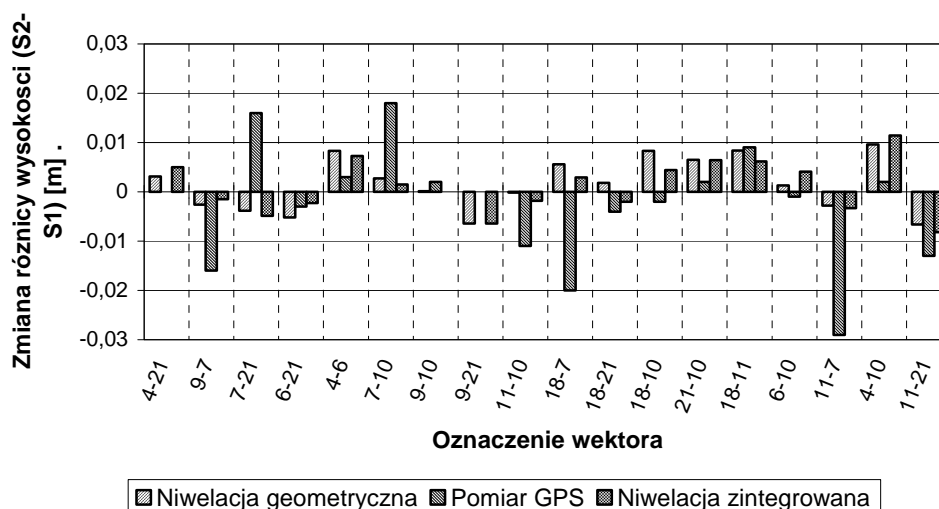
Zależności z tablicy 5 ilustruje wykres na rys. 7. Wektory zestawiono w porządku od najkrótszego do najdłuższego (24 ÷ 100m), ale jak widać, nie ma to przełożenia na wielkości odchyłek.



Rys. 7. Wpływ metody pomiaru na wielkości wyznaczonych wzajemnych przeszczeń przestrzennych (zmiana odległości skośnych)

Analogiczne zależności przedstawia również wykres na rys. 8, z tym że dotyczą one przeszczeń pionowych. Różnice wysokości pomiędzy punktami wyznaczono w trzech wersjach: z niwelacji geometrycznej, z pomiaru GPS oraz z wyrównania niwelacji zintegrowanej. Porównanie

przemieszczeń wzajemnych na poszczególnych punktach prowadzi do podobnego wniosku jak poprzednio: sieć zintegrowana pozwala na znaczną redukcję wpływu błędów pomiarowych na współrzędne w sieci GPS. Widoczne jest to szczególnie na tych punktach, gdzie zanotowano duże (największe) odchyłki dla metody GPS.



Rys. 8. Wpływ metody pomiaru na wielkości wyznaczonych wzajemnych przemieszczeń pionowych

## 6. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wykonanych pomiarów okresowych (na obydwóch obiektach) oraz w oparciu o przeprowadzone analizy porównawcze, sformułować można następujące wnioski:

- najdokładniejszą metodą pomiaru wysokościowego jest niwelacja geometryczna z użyciem niwelatora kodowego (odchyłki zamknięcia „oczek” nie przekraczały 1mm – także w przypadku osuwiska, gdzie stosowano punkty pośrednie, tzw. żabki);
- metoda sieci modularnych bardzo dobrze sprawdziła się (w zakresie pomiaru sytuacyjnego) na osuwisku Siercza, gdzie występowały trudne warunki terenowe; efektem był sprawny pomiar oraz zadowalające dokładności wyznaczeń poziomych (rzędu kilku mm);
- metoda GPS na terenie otwartym (kopalnia Ziemowit) zapewnia dokładności wyznaczeń sytuacyjno-wysokościowych podobne jak w przypadku sieci modularnych, natomiast przy trudnych warunkach (osuwisko Siercza) błędy pomiarowe są znacznie wyższe – porównywalne z przemieszczeniami zaobserwowanymi w okresie pomiędzy dwoma cyklami pomiaru (do ok. 3cm);
- metoda GPS jest jedynym sposobem powiązania obiektu z zewnętrznym układem odniesienia w sytuacji, gdy wszystko dookoła się „rusza” (np. obiekt znajduje się na terenie eksploatacji górniczej);
- metoda sieci modularnych w integracji z pomiarem GPS pozwala znacznie ograniczyć wpływ błędów pomiarowych metody GPS przy wyznaczaniu współrzędnych w układzie globalnym (o ok. 30%), co może decydować o dokładności wyznaczania przemieszczeń bezwzględnych;
- metoda sieci zintegrowanych pozwala uzyskać zdecydowanie bardziej wiarygodne wielkości przemieszczeń wzajemnych (między punktami) niż metoda jednorodnych sieci GPS (o ok. 80%);
- wadą metody sieci modularnych zintegrowanych z pomiarami GPS jest duża pracochłonność przy numerycznym opracowaniu wyników (istnieje potrzeba opracowania odpowiedniej aplikacji eliminującej tę niedogodność).

## Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007 - 2009 jako projekt badawczy (Nr N N526 2094 33).

### Literatura

- [1] BOSY J., JAWOROWSKI D., Kijak P., Konik T., ASG-EUPOS zdaje egzamin. *Magazyn Geoinformacyjny GEODETA*, 2008, Nr 10 (161), s. 22-26.
- [2] GUGiK, Wytyczne techniczne G-1.12, Pomiary satelitarne oparte na systemie precyzyjnego pozycjonowania ASG EUPOS (Projekt z dnia 1.03.2008 r. z poprawkami), *Główny Urząd Geodezji i Kartografii*, Warszawa, 2008.
- [3] KADAJ R., Jak rachować pomiary GPS? *NAVI – dodatek do GEODETY*, 2009, Nr 1 (19), s. 10-13.
- [4] KADAJ R., Sieci wektorowe GPS z obserwacjami klasycznymi w aspekcie modernizacji państwowych osnów geodezyjnych, *Zesz. Nauk. Politechniki Rzeszowskiej, seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2007.
- [5] BAŁUT A., GOCAŁ J., Precise GPS and classical control for local ground deformations in mining and landslide areas and for project surveys. *Reports on Geodesy, Komitet Geodezji PAN*, 1997, No. 5(28).
- [6] PRÓSZYŃSKI W., KWAŚNIAK M., Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Pojęcia i elementy metodyki, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, 2006.
- [7] ASTERIAS G., SCHWAN H., GPS and Terrestrial Measurements for Detecting Crustal Movements in Seismic Area. *Survey Review*, Wielka Brytania, 1998, Vol. 34, No. 269, s. 447-454.
- [8] WELSH W. M., Problems of accuracies in combined terrestrial and satellite control networks. *Journal of Geodesy*, Springer Berlin / Heidelberg, 1986, Vol. 60, No 3, s. 193-204.
- [9] GARGULA T., *Research on geometrical structure of modular networks*. *Geodezja i Kartografia (Geodesy and Cartography)*, 2004, 53, s. 189-202.
- [10] GARGULA T., Analiza własności geometrycznych modularnych sieci hybrydowych, *XX Jubileuszowa Jesienna Szkoła Geodezji „Współczesne metody pozyskiwania i modelowania geodanych”*, Polanica Zdrój, 16-18 września 2007 r.
- [11] GUGiK, Wytyczne techniczne G-4.1. Sieci modularne, *Główny Urząd Geodezji i Kartografii*, Warszawa, 1986.
- [12] GARGULA T., The conception of integrated survey networks composed of modular networks and GPS vectors. *Survey Review*, Wielka Brytania, 2009, Vol. 41, No. 313, s. 301-313.
- [13] GARGULA T., Badania nad określeniem kryteriów technicznej poprawności oraz zasad konstruowania pomiarowych sieci modularnych. *Rozprawa doktorska - maszynopis, AR-T Olsztyn*, 1998.
- [14] GARGULA T., KWINTA A., Porównanie geodezyjnych metod pomiaru przemieszczeń. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górniczego*, Katowice, VI/2008, s. 83-92.
- [15] KADAJ R., System geodezyjny GEONET (4.0-5.0) – opis funkcjonalny i instrukcja obsługi. *AlgoRes-Soft*, Rzeszów, 2006.
- [16] KADAJ R., Modele, metody i algorytmy obliczeniowe sieci kinematycznych w geodezyjnych pomiarach przemieszczeń i odkształceń obiektów. *Wyd. AR*, Kraków, 1998.
- [17] GÓRAL W., BANASIK P., KUDRYS J., SKORUPA B., Współczesne metody wykorzystania GPS w geodezji. *Uczelniane Wyd. Nauk.-Dyd. AGH*, Kraków, 2008.
- [18] GUGiK, Zalecenia techniczne: Pomiary satelitarne GNSS oparte na systemie stacji referencyjnych ASG-EUPOS, *Główny Urząd Geodezji i Kartografii*, Warszawa, 2011.

### APPLICATION OF MODULAR NETWORK INTEGRATED WITH GPS MEASUREMENTS FOR THE DETERMINATION OF DISPLACEMENTS

#### Summary

The main aim of this work is to show the possibility of using modular networks in the integration of GPS vectors to determine the ground displacement in potentially mobile (kinematic) areas. The proposed method of the total observation development of classical and GPS vectors consists of two parts (steps): I. a two-dimensional network adjustment on GRS80 ellipsoid; II. height adjustment

(in relation to the geoid). The research surveys have been carried out on two test sites: the site of an underground mining operation and the landslide area. To determine the displacements for the purpose of this paper, the results of two cycles of periodic measurements carried out in the landslide were used. The results of the comparative analysis show an advantage of the integrated measurements (in terms of accuracy obtained) with respect to the homogeneous GPS measurements.