

Tomasz STOCH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Dokładność wyznaczania wartości wskaźników deformacji na punktach przestrzennej sieci obserwacyjnej z wykorzystaniem pomiaru GPS-RTK

Słowa kluczowe

Górnictwo, deformacje powierzchni, wskaźniki deformacji, pomiary deformacji, pomiary GNSS

Streszczenie

Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu najczęściej określa się na podstawie pomiarów geodezyjnych. Wraz z rozwojem technik pomiarowych poszukiwane są najbardziej optymalne rozwiązania w tym zakresie, pozwalające bardziej wydajnie i bez utraty dokładności pozyskiwać informacje o stanie deformacji powierzchni. Aktualnie rozważane są możliwości stosowania w tego rodzaju badaniach pomiarów GNSS opartych na aktywnej sieci stacji referencyjnych (ASG-EUPOS). W artykule zaprezentowano badania dotyczące oszacowania błędów wartości wskaźników deformacji wyznaczanych w drodze pomiarów GPS RTK na przestrzennej sieci testowej. Praca jest finansowana ze środków na badania naukowe (Grant NN 1199 33 11).

1. Wstęp

Pomiary deformacji na terenach górniczych ulegają nieustannemu rozwojowi, który napędzany jest postępem technologicznym w dziedzinie konstruowania nowych instrumentów pomiarowych oraz opracowywania metod i systemów pomiarowych. W tej wąskiej specjalizacji pomiarów geodezyjnych chodzi głównie o uzyskanie optymalizacji pozyskiwania danych o stanie deformacji powierzchni terenu poddanego wpływowi podziemnej eksploatacji górniczej, skierowanej na uzyskiwanie danych na odpowiednim poziomie dokładności przy jednoczesnym jak najmniejszym nakładzie pracy i czasu. Jest to istotne ze względu na obejmowanie pomiarem coraz większych obszarów i chęcią uniknięcia błędów wynikających z długiego czasu prowadzenia obserwacji na terenie, który ulega szybkim zmianom deformacyjnym.

Klasyczne metody pomiarowe w niektórych przypadkach nie spełniają wymagań stawianych tego typu obserwacjom. Dlatego pojawiają się próby zastosowania do pomiarów deformacji na terenach górniczych coraz bardziej wydajnych metod pomiarowych. Jedną z takich metod jest pomiar GPS w czasie rzeczywistym (RTK – Real Time Kinematic) w oparciu o system precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna – European Positioning System) (Ryczwolski i in. 2008). Wykorzystanie

możliwości tego systemu pozwala na wykonywanie pomiarów jednym ruchomym odbiornikiem bez konieczności zapewnienia dodatkowego sprzętu dla stacji bazowej. Duże znaczenie ma też szybkość uzyskiwania położenia punktu pomiarowego pozwalająca na pomiar dużej ilości punktów w stosunkowo krótkim czasie. W ramach projektu badawczego realizowanego w Katedrze Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej wykonano szereg tego typu pomiarów wykorzystanych m.in. do oceny dokładności oraz określenia ich przydatności do wyznaczania wartości wskaźników deformacji na terenach eksploatacji górniczej.

2. Pomiary testowe

Przed rozpoczęciem pomiarów RTK ASG-EUPOS dysponowano jedynie informacjami o dokładności metody zapewnianej przez system. Dla pomiarów precyzyjnych (serwis NAVGEO) system zapewniał dokładność poziomą do $\pm 0,03$ m i wysokościową do $\pm 0,05$ m (Ryczkowski i in. 2008; strona internetowa serwisu ASG-EUPOS). Dla precyzyjnych pomiarów deformacji na terenach górniczych nie jest to zbyt wysoka dokładność. Można jednakże wziąć pod uwagę szereg czynników, które ograniczają dokładność klasycznych metod pomiarowych i przetestować możliwości stosowania opisywanej metody.

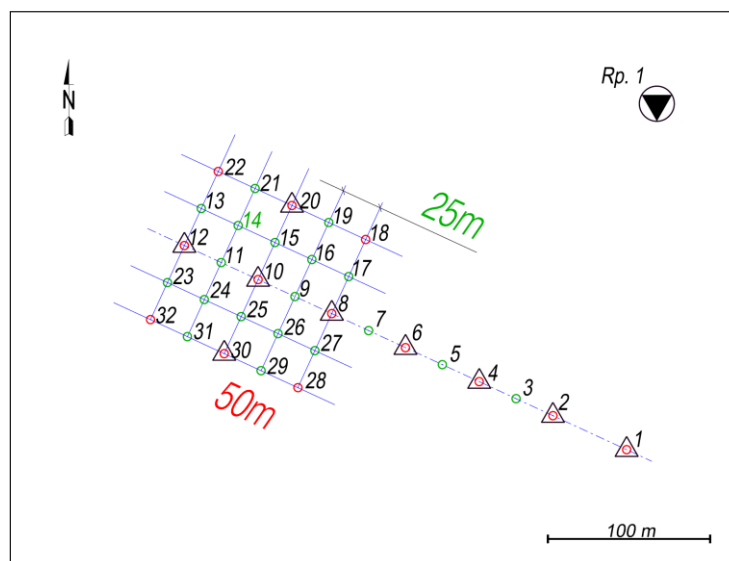
Pierwotnie pomiary testowe rozpoczęto na przestrzennej sieci obserwacyjnej nad rozpoczynającą się eksploatacją górniczą. Ze względu na niestabilność terenu (wpływy od sąsiedniego pola eksploatacji oraz pól wyższego pokładu) uzyskane wyniki pomiarów były trudne do wykorzystania dla oszacowania rzeczywistych błędów wskaźników deformacji wyznaczanych w oparciu o te dane. Z tego względu zdecydowano o utworzeniu tzw. przestrzennej sieci referencyjnej zbudowanej analogicznie do obiektu badawczego na terenie górniczym, lecz o mniejszym zasięgu i położonego w terenie wolnym od pogórnich ruchów powierzchni.

2.1. Geometria sieci referencyjnej

Sieć referencyjną założono w otwartym terenie pozbawionym elementów mogących wprowadzać dodatkowe zakłócenia w pomiarze GNSS. Geometrię sieci przedstawia schematycznie rysunek 2.1.

Sieć została skonfigurowana jako siatka regularnie rozmieszczonych punktów pomiarowych w odstępach co 25 m. Na przedłużeniu osi głównej sieci znajduje się dodatkowo linia obserwacyjna o długości całkowitej 300m. Cała sieć liczyła w sumie 32 punkty pomiarowe stabilizowane długimi (40 cm) palikami z drewna osikowego z nawierconym otworem, w którym umieszczano wkręt z łbem grzybkowym i krzyżowym nacięciem stanowiącym centr znaku pomiarowego. Punkty te były przystosowane zarówno do pomiaru sytuacyjnego (techimetria, RTK) jak i wysokościowego (niwelacja precyzyjna).

Geometria sieci testowej została opracowana w oparciu o geometrię bardziej rozbudowanej sieci obserwacyjnej znajdującej się na obszarze miasta Jaworzno, na której prowadzone są pomiary deformacji terenu pod wpływem podziemnej eksploatacji górniczej (Stoch Sopata 2011).



Rys. 2.1. Szkic przestrzennej sieci referencyjnej
Fig. 2.1. View of the spatial reference network

2.2. Pomiary wykonane na punktach sieci referencyjnej

Założona sieć testowa umożliwiła przeprowadzenie wszelkich pomiarów geodezyjnych jakie stosuje się w pomiarach deformacji na terenach górniczych. Wykonano zatem zarówno klasyczne pomiary niwelacyjne jak również długościowe i sytuacyjne (pomiary hybrydowe: statyczny pomiar GPS połączony z pomiarem poligonowym i tachimetrycznym) oraz pomiar RTK ASG-EUPOS. W niniejszej publikacji przedstawione zostaną wyniki pomiaru RTK oraz wpływ ich błędów na dokładność wyznaczania wybranych wskaźników deformacji.

Na punktach sieci testowej przeprowadzone zostały 3 serie obserwacyjne trwające kilkadziesiąt minut każda. Wykonano je o różnych porach dnia i przy różnej konfiguracji satelitów. Sprzęt użyty do wykonania pomiarów składał się z jednego odbiornika ruchomego Trimble SPS882 z anteną Trimble R8 GNSS/SPS88x Internal umieszczonego na tyczce o dł. 2 m oraz kontrolera Trimble TSC2. Pomiar wykonywano w dwóch trybach:

- pomiar punktu (trwający 5 sekund)
- pomiar na punkcie osnowy (czas trwania 30 sek.)

Wykorzystywano precyzyjny tryb pomiaru oferowany przez system ASG-EUPOS. W tym trybie pomiarowym używany jest typ poprawek NAWGEO_VRS_3_1. Strumień poprawek sieciowych RTCM 3.1 przesyłany jest pakietowo (GPRS) poprzez sieć GSM (strona serwisu ASG-EUPOS).

Maska elewacji odbiornika ruchomego wynosiła 10 stopni. Pomiar wykonano w układzie 2000/21 (elipsoida odniesienia WGS-84) stosując model geoidy dla małopolski.

3. Wyniki pomiarów

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano przestrzenne współrzędne punktów sieci oraz informacje o dokładności jaką w danym momencie pomiaru zapewniał system. Dane te zapisane zostały w raporcie pomiarowym. Na podstawie uzyskanych przestrzennych współrzędnych punktów pomiarowych obliczono wartości wskaźników deformacji a następnie wyznaczono wartości parametrów statystycznych określających dokładność ich wyznaczenia.

Do analizy wybrano trzy wskaźniki deformacji najistotniejsze ze względu na określanie zagrożenia terenu i obiektów budowlanych, a mianowicie: obniżenie terenu w [m] oraz nachylenie i odkształcenie poziome T i ε [mm/m] (Popiołek 2009). Ze względu na charakter poszczególnych wskaźników deformacji oraz sposób ich wyznaczania należało w inny sposób podejść do określania obniżeń w odróżnieniu od pozostałych dwóch wskaźników. Obniżenia rejestruje się i oblicza w punkcie obserwacyjnym, natomiast nachylenia i odkształcenia są wyznaczane dla poszczególnych odcinków pomiarowych (Ostrowski i in. 2001). Z tego względu należało wybrać bazy pomiarowe, dla których były wyznaczane wartości tych wskaźników. W tym przypadku kierunek i konfiguracja wybranych baz pomiarowych nie był istotny ponieważ obiekt nie był poddany rzeczywistym wpływom górniczym i nie rejestrowano charakterystycznych przebiegów tych wskaźników w stosunku do krawędzi pola eksploatacji. Wartości oczekiwane uzyskiwanych w tym eksperymencie pomiarowym wskaźników deformacji powinny mieć zerowe wartości, ale ze względu na występujący szum pomiarowy zarejestrowany został pewien "stan deformacji" (niezerowe wartości wskaźników) pozwalający na stwierdzenie dokładności wyznaczania wartości wskaźników deformacji zastosowaną metodą pomiarową. Obliczone wartości wskaźników deformacji traktowane były jako odchyłki od wartości oczekiwanej. To założenie dało podstawę do oszacowania błędów wyznaczenia wartości obniżeń, nachyleń i odkształceń poziomych.

Podczas pomiarów w terenie stwierdzono uszkodzenie mechaniczne 4 punktów pomiarowych. Zatem w efekcie dysponowano zbiorem danych liczących 28 obserwacji punktów kontrolnych w jednej serii obserwacyjnej. Na podstawie danych z trzech serii pomiarowych obliczono dwukrotnie (różnicowo) wartości obniżeń terenu oraz na podstawie obliczonych długości baz pomiarowych w każdej serii obserwacyjnej a także informacji o obniżeniu dla poszczególnych punktów sieci wyznaczono wartości nachyleń i odkształceń poziomych. W każdym przypadku przyjmowano pierwszą wykonaną serię pomiarową jako serię zerową.

Poniżej, na podstawie wartości parametrów statystycznych przedstawionych w tabeli 3.1 oraz wykresów rozrzutu uzyskanych wartości poszczególnych wskaźników deformacji zostały omówione uzyskane wyniki.

Tabela 3.1. Wartości parametrów statystycznych charakteryzujących wyznaczone wartości wskaźników deformacji

Table 3.1. Values of statistical parameters characterizing the set value deformation indicators

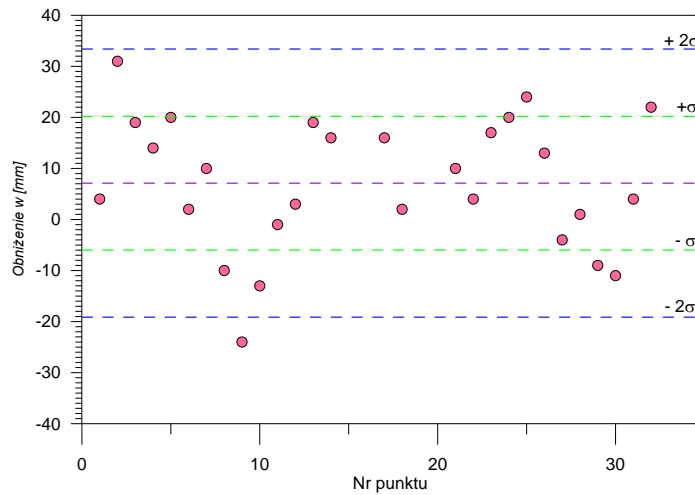
Parametry	Obniżenie w1	Obniżenie w2	Nachylenie T1	Nachylenie T2	Odkształcenie ε1	Odkształcenie ε2
statystyczne	[mm]	[mm]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
Min	-24	-47	1.4	-1.0	-0.8	-1.6
Max	31	33	-1.5	1.8	0.8	1.1
Średnia	7.1	1.0	-0.06	0.36	-0.04	-0.03
Odch. St.	±13.1	±21.0	±0.73	±0.80	±0.40	±0.65
Rozstęp	55	80	2.9	2.8	1.6	2.7

3.1. Obniżenia terenu

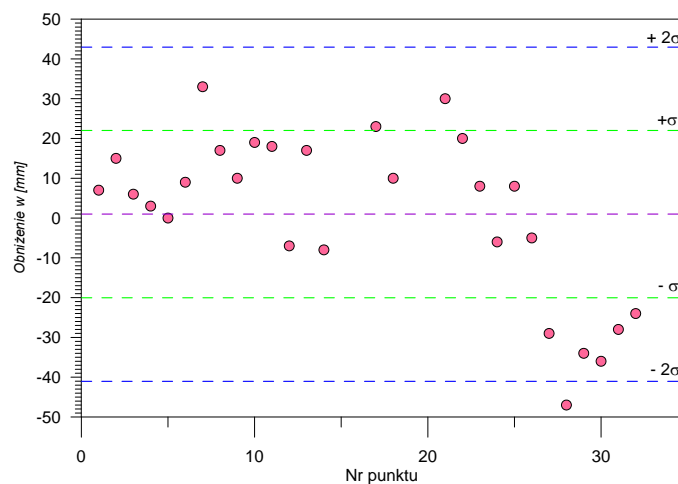
Obniżenia terenu obliczono jako różnicę wysokości punktów pomiędzy serią zerową oraz seriami pierwszą i drugą. Otrzymano zatem do analiz dwie serie obniżeń (w1, w2). Wysokość punktu uzyskiwana z pomiaru satelitarnego jest obarczona większym błędem niż położenie poziome. Z tego względu przewidywano mniejszą dokładność uzyskiwanych wartości obniżeń niż w przypadku wskaźników deformacji wykorzystujących dane o poziomym położeniu punktów obserwacyjnych.

Dla obliczonych wartości w1 i w2, przyjmowanych jako teoretycznie oscylujące wokół wartości zerowej a zatem traktowane jako odchyłki, obliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe (tab. 3.1). Wartości te umieszczono na wykresach rozrzutu obniżeń aby możliwe było oszacowanie dokładności ich wyznaczenia. Otrzymane wyniki prezentują rysunki 3.1 i 3.2.

Dla pierwszej serii obniżeń uzyskane wartości pokazują istnienie pewnej dodatniej tendencji w uzyskiwanych wartościach obniżeń (wartość średnia wyniosła +7,1 mm). Wartość odchylenia standardowego potwierdziła skupienie obniżeń wokół wartości średniej. W tym przypadku ekstremalne wartości obniżeń pokazały, że możliwe jest uzyskiwanie wartości w jednej serii pomiarowej różniących się o ponad 5 cm. W drugiej serii obniżeń widać już lepszą zgodność z teoretycznym założeniem. Wartość średnia zbliżona jest do zera, natomiast odchylenie standardowe potwierdza większy rozrzut wartości obniżeń wokół średniej. Analizując wartości ekstremalne można również zauważyć, że w tej serii pojawiły się wartości obniżeń różniące się od siebie o 8 cm. Można zauważyć na rys. 3.2., że na pogorszenie dokładności wyznaczenia wartości 2 serii obniżeń miała wpływ grupa punktów (od 28 do 32), dla której wyniki widocznie różnią się od pozostałych. Prawdopodobnie uwidocznił się tu wpływ zmiennych warunków pomiaru, ponieważ obserwując parametry pomiaru zapisane w raporcie, można zauważyć spadek liczby widocznych satelitów i pogorszenie się geometrii ich rozmieszczenia nad horyzontem sygnalizowanej przez wzrastającą w danym momencie wartością parametru PDOP określającego niedokładność wyznaczania pozycji względem położenia satelitów.



Rys. 3.1. Wykres rozrzutu wartości 1 serii obniżeń (w1)
Fig. 3.1. Scatterplot of the value of the 1st series of subsidence (w1)



Rys. 3.2. Wykres rozrzutu wartości 2 serii obniżeń (w2)
Fig. 3.2. Scatterplot of the value of the 2nd series of subsidence (w2)

Różnice w uzyskanych wynikach dla pierwszej i drugiej serii obniżeń można tłumaczyć różnym czasem wykonywania pomiarów, a przez to otrzymywaniem pozycji punktów pomiarowych przy różnej - mniej lub bardziej korzystnej - konfiguracji satelitów oraz ich liczności. Ma to duży wpływ na błędy wyznaczonych współrzędnych punktów pomiarowych, co przekłada się dalej na błędy wyznaczonych wartości obniżeń. Nie jest również bez znaczenia przy pomiarach bazujących na wirtualnych stacjach referencyjnych (VRS) z jakiej stacji referencyjnej korzystamy w danym momencie. Zdarza się niejednokrotnie, że w trakcie pomiaru system przełącza nas na inną, bardziej dogodną dla

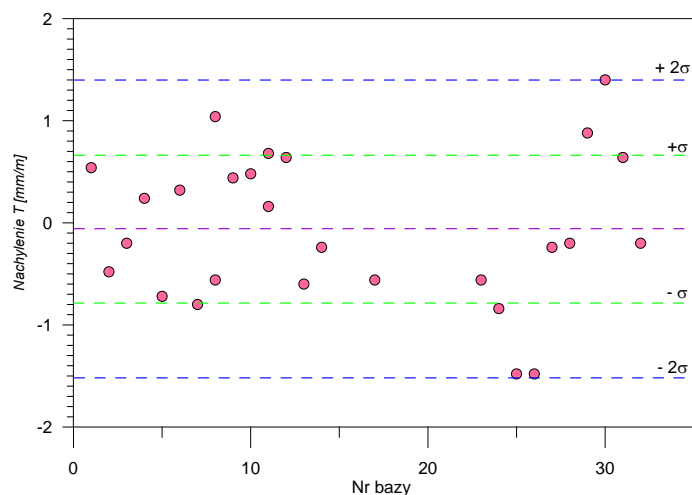
pomiaru, stację VRS. Może to spowodować otrzymywanie nieco innych współrzędnych punktów pomiarowych, oczywiście w zakresie dokładności zapewnianych przez system. Trzeba być jednak świadomym takiego działania systemu ASG-EUPOS.

Biorąc pod uwagę zakładaną dokładność systemu i porównując z wynikami uzyskanymi na sieci testowej dla obniżen nie stwierdzono przekroczenia uzyskanej dokładności wyznaczenia obniżen terenu z gwarantowaną przez system. Należy jednak ostrożnie podchodzić do wartości obniżen uzyskiwanych z pomiaru tą metodą i uznawać za istotne wartości przekraczające poziom podwójnego odchylenia standardowego czyli $w > 0,04\text{m}$.

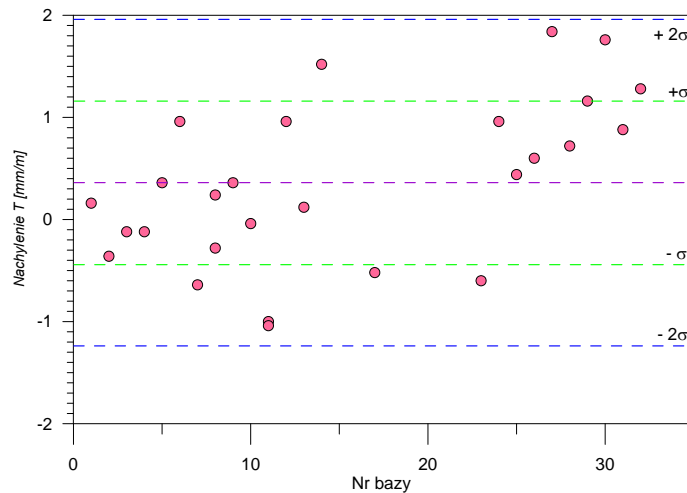
3.2. Nachylenia

Nachylenia zostały obliczone na wybranych bazach pomiarowych jako różnice obniżen na ich końcach odnoszone do długości bazy pomiarowej wyznaczonej ze współrzędnych końców odcinka pomiarowego. Otrzymano zatem do analiz dwie serie nachyleń (T1, T2). Wartości podstawowych parametrów statystycznych dla pomierzonych nachyleń podaje tabela 3.1. Wartości te (średnia i odchylenie standardowe) umieszczono na wykresach rozrzutu aby możliwe było oszacowanie dokładności ich wyznaczenia. Otrzymane wyniki prezentują rysunki 3.3 i 3.4.

Na dokładność wyznaczenia nachyleń ma wpływ zarówno błąd wyznaczenia położenia wysokościowego jak i poziomego punktów końcowych odcinka pomiarowego. Jak widać w tabeli średnia wartość dla obydwu serii nachyleń jest bliska zero. W drugiej serii nachyleń średnia jest nieznacznie przesunięta w stronę dodatnich wartości nachyleń. Odchylenie standardowe ma zbliżoną wartość wynoszącą około 0,8 mm/m. Podobnie jest z rozstępem, który dla obydwu serii nachyleń wynosi ok. 2,9 mm/m. Oznacza to, że wśród wartości nachyleń mogą znaleźć się takie, dla których wzajemna odległość może dochodzić do 3 mm/m.



Rys. 3.3. Wykres rozrzutu wartości 1 serii nachyleń (T1)
Fig. 3.3. Scatterplot of the value of the 1st series of slopes (T1)



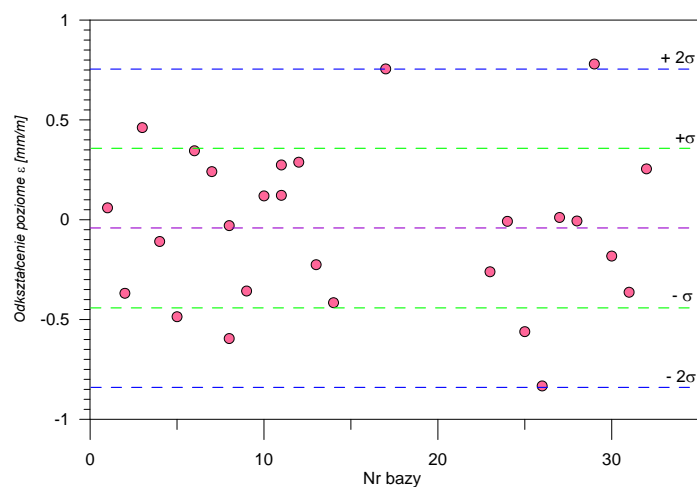
Rys. 3.4. Wykres rozrzutu wartości 2 serii nachyleń (T2)
Fig. 3.4. Scatterplot of the value of the 2nd series of slopes (T2)

Bazując na pomiarach RTK ASG-EUPOS jesteśmy zatem w stanie wykrywać wartości nachyleń przekraczające wartość podwójnego odchylenia standardowego czyli $> \pm 1,6$ mm/m. Można stwierdzić, że wiarygodne wartości nachyleń stwierdzane na podstawie tych pomiarów pozwolą na określenie granicy II i wyższych kategorii terenu górniczego ze względu na nachylenia.

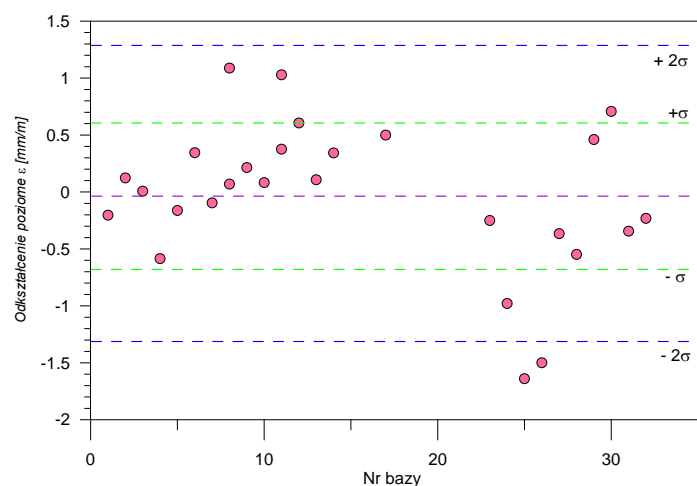
3.3. Odkształcenia poziome

Odkształcenia poziome zostały obliczone na tych samych bazach pomiarowych wybranych dla nachyleń jako różnice długości bazy pomiarowej obliczonej ze współrzędnych końców odcinka pomiarowego w kolejnych seriach pomiarowych. Wartości podstawowych parametrów statystycznych dla odkształceń podaje tabela 3.1. Wartości te (średnia i odchylenie standardowe) umieszczono na wykresach rozrzutu odkształceń w celu oszacowania dokładności ich wyznaczenia. Otrzymane wyniki prezentują rysunki 3.5 i 3.6.

Dokładność wyznaczenia odkształceń poziomych zależy tylko od błędu poziomego położenia punktów końcowych odcinka pomiarowego. Ta składowa położenia punktu jest wyznaczana z mniejszym błędem niż składowa wysokościowa. Jak widać w tabeli średnia wartość dla obydwu serii odkształceń jest praktycznie taka sama i bliska zero. Odchylenie standardowe dla pierwszej serii ma mniejszą wartość wynoszącą $\sigma_{\epsilon} = \pm 0,4$ mm/m. W drugiej serii odkształceń widać większy rozrzut wartości. Odchylenie standardowe wynosi $\sigma_{\epsilon} = \pm 0,65$ mm/m. Podobnie jest z rozstępem, który dla pierwszej serii odkształceń wynosi ok. 1,6 mm/m, natomiast w drugiej serii jest zdecydowanie większy i wynosi 2,7 mm/m. Oznacza to, że wśród wartości odkształceń poziomych mogą znaleźć się takie, dla których wzajemna odległość może dochodzić prawie do 3 mm/m.



Rys. 3.5. Wykres rozrzutu wartości 1 serii odkształceń poziomych (ϵ_1)
Fig. 3.5. Scatterplot of the value of the 1st series of horizontal deformation (ϵ_1)



Rys. 3.6. Wykres rozrzutu wartości 2 serii odkształceń poziomych (ϵ_2)
Fig. 3.6. Scatterplot of the value of the 2nd series of horizontal deformation (ϵ_2)

W oparciu o pomiary RTK ASG-EUPOS jesteśmy zatem w stanie wykrywać wartości odkształceń poziomych przekraczających podwójne odchylenie standardowego czyli $\epsilon > \pm 1,3$ mm/m. Można stwierdzić, że istotne wartości odkształceń poziomych stwierdzone na podstawie tych pomiarów pozwolą na określenie granicy II i wyższych kategorii terenu górniczego ze względu na odkształcenia.

4. Podsumowanie

Przedstawione powyżej wyniki testowych pomiarów deformacji z wykorzystaniem techniki RTK ASG-EUPOS pokazały, że uzyskiwane błędy pomiarowe w zakresie wyznaczania pozycji odbiornika ruchomego faktycznie mieszczą się w przedziałach zapewnianych przez system. Istniejący szum pomiarowy przekłada się zatem na wartości wskaźników deformacji wyznaczanych na podstawie wyników pomiarów punktów terenowych. Dokładność wyznaczania poszczególnych wskaźników deformacji można oszacować na podstawie wartości odchyień standardowych uzyskanych podczas pomiaru testowego. Natomiast przydatność do pomiaru deformacji na terenach górniczych w zakresie istotności wyznaczanych tą metodą wartości wskaźników deformacji można określić na podstawie podwójnego odchylenia standardowego. Dla obniżeń jest to wartość $w_{gr} = 0,04$ m, dla nachyleń $T_{gr} = \pm 1,6$ mm/m a dla odkształceń poziomych $\epsilon_{gr} = \pm 1,3$ mm/m.

Podsumowując można stwierdzić, że pomiar RTK ASG-EUPOS raczej nie znajdzie zastosowania w precyzyjnych pomiarach prowadzonych na terenach górniczych. Jednak ze względu na swoją wysoką wydajność mógłby być stosowany do pomiarów deformacji terenu w rejonach o wyjątkowo dużej dynamice ujawniana się wpływów górniczych, gdzie szybkość wykonania pomiaru ma istotne znaczenie a dokładność pomiaru RTK ASG-EUPOS w takim przypadku można uznać za zadowalającą.

Literatura

- [1] Ostrowski J. i inni , Ochrona środowiska na terenach górniczych, Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2001
- [2] Popiołek E.: Ochrona Terenów Górniczych, wydawnictwa AGH, Kraków 2009
- [3] Ryczywolski M., Oruba A., Leończyk M., The Precise satellite Positioning System ASG-EUPOS, materiały międzynarodowej konferencji GEOS, Praga 2008
- [4] Stoch T., Sopata P.: Ocena przydatności pomiarów GPS-RTK do wyznaczania wartości obniżeń terenu w oparciu o przestrzenną sieć obserwacyjną, Mat. konferencyjne „XI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Hucisko maj 2011
- [5] Strona internetowa systemu ASG-EUPOS, <http://www.asgeupos.pl>

Precision of determination of the indicators values of surface deformation on the spatial observation network using GPS-RTK measurement

Key words

Mining, surface deformation, geodetic measurements of surface deformation, GNSS measurement

Summary

Effects of underground mining on ground surface usually is determined by geodetic measurements. Along with the development of measurement techniques optimal solutions in this area are searched, allowing more efficiently and without loss of accuracy to gain information about the state of surface deformation. Currently under consideration is the possibility of using in this kind of research the GNSS measurements based on an active network of reference stations (ASG-EUPOS). This article presents the research on estimation

of average error values of indicators of the deformation appointed by RTK GPS measurements on a spatial test networks. This work was funded by the research (Research project NN 1199 33 11).

Przekazano: 2 kwietnia 2012 r.