

Wirtualnie z nową

Metoda szybka statyczna (RS) ma – poza dawaniem wysokich dokładności – drugą istotną zaletę. Wymaga jedynie pomiaru jednoczęstotliwościowym odbiornikiem GPS i odbywa się to bez straty dokładności w porównaniu z innymi odbiornikami.

**Ryszard Pażus,
Aleksander Mróz**

Dane określające wartości modelu obowiązującej quasi-geoidy zamieszczone w Biuletynie Informacji Publicznej GUGiK są wykonaniem delegacji rozporządzenia Rady Ministrów

z 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych. Wprowadzenie do obligatoryjnego stosowania modelu quasi-geoidy o nazwie PL-geoid-2011 istotnie upraszcza procedury obliczania położenia punktów pomiarowej osnowy dwufunkcyjnej (poziomej i wysokościowej). Osobnym tematem jest analiza, czy ten nałożony obowiązek pozwala na dokładniejsze

niż do tej pory wyznaczanie wysokości metodami satelitarnymi. W tym artykule o tych wątpliwościach będzie tylko wzmianka.

Włączenie punktów aktywnej sieci geodezyjnej ASG-EUPOS do krajowej osnowy wysokościowej, czyli wyznaczenie wysokości normalnych (H) dla stacji referencyjnych w układzie wysokości PL-KRON86-NH, umożliwiło modelowanie



Fot. 1. Reper 1 (wiekowy)



Fot. 2. Reper 2 (ziemny)



Fot. 3. Reper 3 (węzłowy)



Fot. 4. Reper 6 (węzłowy)

Problem niszczenia znaków geodezyjnych został opisany przy pomiarach w 2011 roku [3]. Niestety, nic się w tym zakresie nie zmieniło. Tylko reper wiekowy jest w dobrym stanie. Pozostałe trzy są w stanie załamanym do tego stopnia (patrz fot. obok), że do ich odkrycia użyto wszystkich akcesoriów geodety (fot. 8)



Fot. 5. Zniszczona górna część słupa betonowego reperu 2

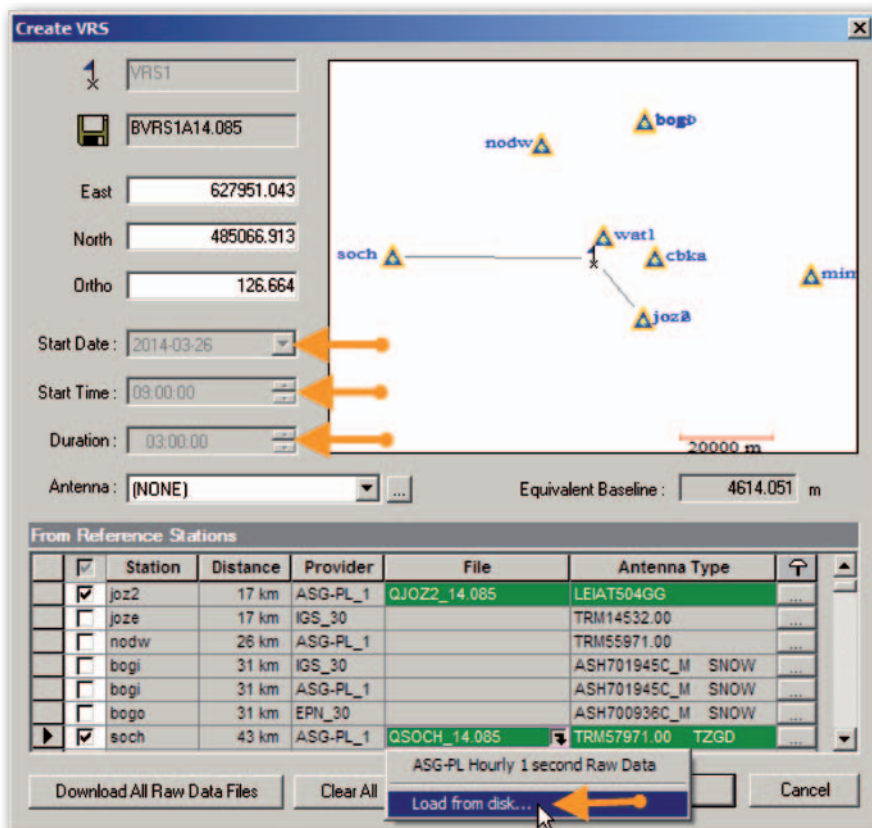


Fot. 6. Reper 3 bez pokrywy, całkowicie zasypany



Fot. 7. Reper 6 bez pokrywy, zalany całkowicie wodą i błotem

geoidą



Rys. 1. Tworzenie punktu VRS w pobliżu reperu 1 – wybrano stację referencyjną GPS/GLONASS L1/L2 dostępną w serwisie POZGEO DF

geoidy hybrydowej (niwelacyjnej) opartej na najnowszych wynikach kampanii pomiarowo-obliczeniowej integrującej stacje referencyjne ASG-EUPOS z podstawowymi i na globalnym modelu geopotencjalnym EGM-2008. Do wpasowania (kalibrowania) EGM-2008 na podstawę wysokościową wykorzystano w sumie 570 punktów, na których wykonane zostały nowe pomiary, w tym: 213 stacji referencyjnych i ich ekscentrów (osnowa 3D pomierzona metodą GNSS i 1D pomierzona metodą niwelacji precyzyjnej w latach 2010-11), 40 punktów sieci EUVN (osnowa 3D pomierzona metodą GNSS i 1D pomierzona metodą niwelacji precyzyjnej) i 317 punktów sie-

Fot. 8. Przy reperze 3 dr Ryszard Pażus z „niezbędnikiem” geodety, w skład którego wchodzi: łopata, grabie, łopka żelazna, szpila, łom, wiaderko oraz kłęcznik ogrodniczy

ci EUREF-POL i POLREF (osnowa 3D pomierzona metodą GNSS i 1D pomierzona metodą niwelacji precyzyjnej i technicznej w latach 90. ubiegłego wieku) [1].

Przyjęto oryginalne, ale też dyskusyjne założenie, że odstęp geoidy od elipsoidy na stacjach referencyjnych ASG-EUPOS powinny być bezbłędnie równe empirycznej różnicy wysokości geodezyjnych (h) w układzie PL-ETRF2000-GRS80h i wysokości normalnych (H) w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH. Czyli wysokości punktów wyrównywanych wyznacza się wprost z różnicy między wysokościami elipsoidalnymi i odstępami N (z uwagi na hybrydowe pochodzenie zrezygnowano z oznaczania odstępów jako ξ), zgodnie z zależnością:

$$H_{(PL-KRON86-NH)} = h_{(PL-ETRF2000-GRS80h)} - N_{(PL-geoid-2011)},$$

gdzie: $h_{(PL-ETRF-GRS80h)}$ – wysokość elipsoidalna z wyrównania punktu do ASG-EUPOS.

Optymalnym sposobem pomiaru i obliczeń dla wyznaczania położenia punktów pomiarowej osnowy dwufunkcyjnej jest metoda szybka statyczna (RS – Rapid Static). Inne metody są zdecydowanie mniej dokładne i, co istotne, w RS nie ma potrzeby użycia odbiorników wieloczęstotliwościowych i wielosystemowych. Wypada w tym miejscu wyjaśnić, że pojęcie pomiaru RS



UŻYTKOWNIK :GeoDigitalGPS/pazus
PLIK :vrs10850.14o
CZAS POBRANIA :2014-03-28 20:48:15
CZAS OBLICZEŃ :2014-03-28 20:56:54

RINEX - INFORMACJE

Nazwa punktu : 1
Numer punktu :
Wersja RINEX : 2.10
Program : GPP.DLL V3.06
Instytucja :
Model anteny : (NONE)
Numer seryjny ant. :
Wysokość anteny : 0
Interwał rejestracji : 5
Początek obserwacji :
2014-3-26 9:0:0.0000 Tydzień GPS: 1785 sek. GPS: 291600.0000
Koniec obserwacji :
2014-3-26 11:59:55.0000 Tydzień GPS: 1785 sek. GPS: 302395.0000
Czas obserwacji [hh:mm:ss]: 02:59:055.0000

ANTENA - INFORMACJE

MODEL WYKORZYSTANY: NONE Numer seryjny:
BRAK MODELU ANTENY W BAZIE!
Info antena L1: DeltaE : 0.00000 DeltaN : 0.00000 DeltaUp : 0.00000
Info antena L2: DeltaE : 0.00000 DeltaN : 0.00000 DeltaUp : 0.00000

Do obliczeń wykorzystano efemerydę IGS RAPID

Do obliczeń wykorzystano dostępny model jonosfery

Lista satelitów w pliku RINEX

G2 G4 G7 G10 G13 G16 G20 G23 R23 R6 R7 R8 R9 R15 R16 R22 R24 G8 R10 G9 G5 R18 R17
R1 G26 R11 G28 G3 G27

WYKORZYSTANE STACJE REFERENCYJNE:

Nazwa	Odległość[m]	Efekt. liczba epok	Efekt. czas sesji [s]
WAT1	4614	2117	10585
JOZ2	17128	2117	10585
NODW	26306	2117	10585
SOCH	43122	2117	10585
MIMA	47053	2117	10585
RWMZ	66078	2110	10550

WYNIKI OSTATECZNE:

UWAGA! Jeśli nie oznaczono inaczej, wartości podane w metrach
ETRS89 Współrzędne kartezjańskie
X: 3659010.546 Y: 1395302.049 Z: 5017742.724 mp: 0.007

ETRS89 Współrzędne geodezyjne

B: 52° 13' 0.40881" L: 20° 52' 24.62758" h_{el}: 158.156

Układ 1992

X: 485066.914 Y: 627951.046
mx: 0.002 my: 0.003 mp: 0.003

Układ 2000 strefa 7

X: 5787026.465 Y: 7491355.450
mx: 0.002 my: 0.003 mp: 0.003

Układ 1965 strefa 2

X: 5718858.577 Y: 4560123.147
mx: 0.030 my: 0.030 mp: 0.043

Układ UTM strefa 35

X: 5785157.111 Y: 4491358.242
mx: 0.002 my: 0.003 mp: 0.003

WYZNACZONE WYSOKOŚCI PUNKTU:

Wysokość elipsoidalna: 158.156 mh: 0.007
Anomalia wysokości : 31.449 31.458
Kronszadt 86 : 126.707 mH: 0.016 126.698

Rys. 2. Kontrola dokładności VRS w serwisie POZGEO (występujące w pliku obserwacji GLONASS nie biorą udziału w wyrównaniu, anomalia wysokości nie jest obliczana z obowiązującego modelu – poprawiona na czerwono)

ma charakter względny. W amerykańskiej aktywnej sieci geodezyjnej CORS (Continuously Operating Reference Stations) w serwisie automatycznego post-processingu OPUS (Online Positioning User Service), czyli odpowiadającym naszemu serwisowi POZGEO, obserwacje w sesjach trwających do 2 godzin są obliczane metodą szybką statyczną (OPUS-RS), przy czym sesja nie może być krótsza niż 15 minut [2]. Obserwacje dłuższe są liczone metodą statyczną OPUS-S.

Jak wiadomo, w naszym serwisie POZGEO zastosowano jedynie metodę sta-

tyczną przy zaleceniu, aby sesja nie była krótsza od 40 minut (różnice w długości sesji wynikają z gęstości rozmieszczenia stacji aktywnej sieci geodezyjnej). Nie ma opcji RS i takie obliczenia trzeba wykonywać samodzielnie. Ale obsługa programów jest nieskomplikowana. Ułatwieniem jest generowanie VRS (virtual reference station) w serwisie POZGEO D, której to z kolei opcji nie ma CORS. Obserwacje wirtualne dla VRS jakościowo są równoważne pomiarowi odbiornikami zainstalowanymi na stacjach referencyjnych aktywnej sieci geodezyjnej.

Z dwóch dostępnych procedur obliczeniowych RS bardziej pogładowa jest ta z generowaniem punktów wirtualnych VRS programem GNSS Solutions. Druga opcja to wykorzystanie generowania VRS poprzez serwis POZGEO D. W tym przypadku stacje referencyjne do generowania VRS są wybierane automatycznie i program nie wykorzystuje parametrów: orbit satelitów, zegarów i jonosfery, opracowywanych a posteriori przez IGS (International GNSS Service). Procedury obliczeniowe najlepiej pokazać na przykładzie. Do tego celu wykorzystałem punkty terenowe opisane w artykule „Aktywnie i wirtualnie z geoidą” (GEODETA 6/2011) [3]. Pomiary wykonano na czterech reperach: reper 1 jest reperem wiekowym, głębinowym (fot. 1), repery: 3 i 6 są reperami węzłowymi (fot. 3 i 4), a reper 2 jest reperem ziemnym (fot. 2). Sesje pomiarowe były krótkie (kolejno: 23, 21, 30 i 29 minut). Pomiary wykonano w dniach: 26 marca (na reperach 1 i 2) i 28 marca (na reperach 3 i 6). Fizyczny stan reperów pokazano na fot. 5-7.

O dokładności wyznaczenia położenia punktów decydują VRS w ich pobliżu. Dlatego też sesje generowanych stacji wirtualnych powinny być długie, domyślnie w programie do preprocessingu sugerowane są jako 3-godzinne z interwałem 5 sekund (rys. 1). Takie sesje gwarantują dokładność położenia rzędu kilku milimetrów, co potwierdza raport z POZGEO (rys. 2). Tutaj $m_{(p)} = 0,003$ m, błąd średni $m_{(h)} = 0,007$ m i takie błędy, czyli kilkumilimetrowe, są typowe dla innych punktów VRS. W stosunku do zadanych współrzędnych VRS generowanych z najbliższych trzech stacji referencyjnych w wyrównaniu do sześciu najbliższych stacji ASG-EUPOS (maks. odległość 66 km) różnice wyniosły: $\Delta x = -0,003$ m, $\Delta y = -0,001$ m i $\Delta H = -0,034$ m.

Mając wygenerowane tak dokładne VRS-y, które odpowiadają dokładnościom otrzymywanym odbiornikami L1/L2 GPS/GLONASS (rys. 3), do wyznaczenia krótkich wektorów potrzeba już tylko odbiornika jednoczesotliwościowego. Typowy błąd średni $m_{(H)} (68\% \text{ ufności})$ względem VRS: $m_{(p_rover)} = 0,002$ m, $m_{(h)} = 0,001$ m. Z kolei VRS względem stacji referencyjnych ASG-EUPOS z oceny w POZGEO: $m_{(p_VRS)} = 0,003$ m i $m_{(h_VRS)} = 0,007$ m. Do pełnej oceny należałoby uwzględnić jeszcze błąd $m_{(AN)}$ (tutaj brak danych) i przyjęto 1 cm – z geoidy niwelacyjnej GUGiK 2001) i oczywiście błędy pomiaru wysokości centrum fazowego anteny (oznaczone jako $m_{(ARP)}$, szacowane na rzędu 2 mm – pomiar na tyczce teleskopowej). Z zależności:

$$m_{(H)}^2 = m_{(h_VRS)}^2 + m_{(h)}^2 + m_{(AN)}^2 + m_{(ARP)}^2$$

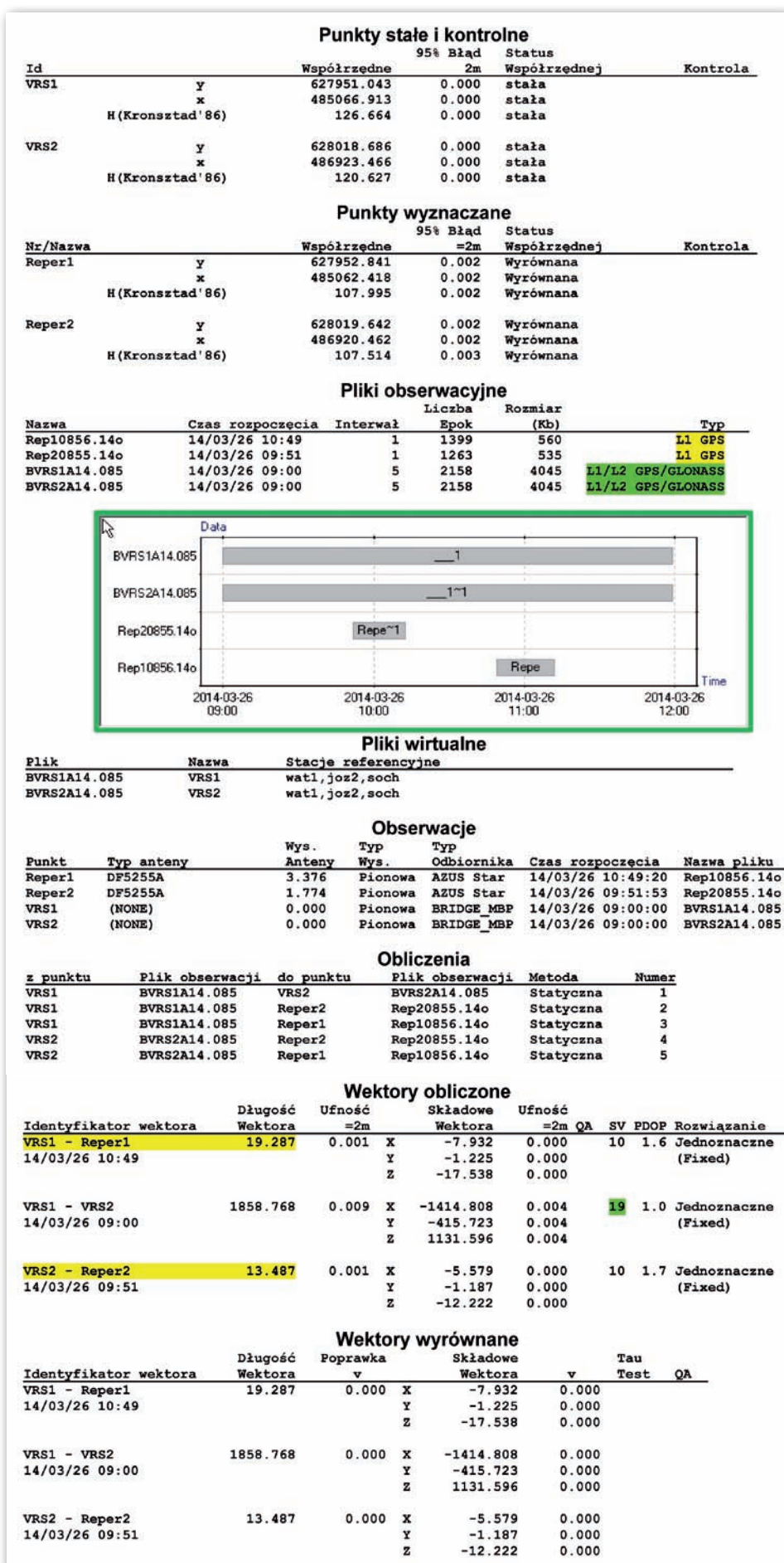
otrzymujemy wysokość H z błędem średnim $m_{(H)} = 0,012$ m. Dość powszechnie, zwłaszcza w raportach z pomiarów RTK, nie uwzględnia się w ocenie błędów $m_{(h_VRS)}$ i $m_{(AN)}$. Pomijanie tych błędów daje w rezultacie ocenę dokładności wewnętrznej na danym obiekcie; błędy te przyjmują wtedy charakter błędów systematycznych o jednakowej wielkości (stałe przesunięcia N i h_VRS) i otrzymujemy wysoką zgodność względną rezultatów. Metoda RS dla współrzędnych poziomych daje jeszcze wyższą dokładność:

$$m_{(p)}^2 = m_{(p_rover)}^2 + m_{(p_VRS)}^2 + m_{(centr)}^2$$

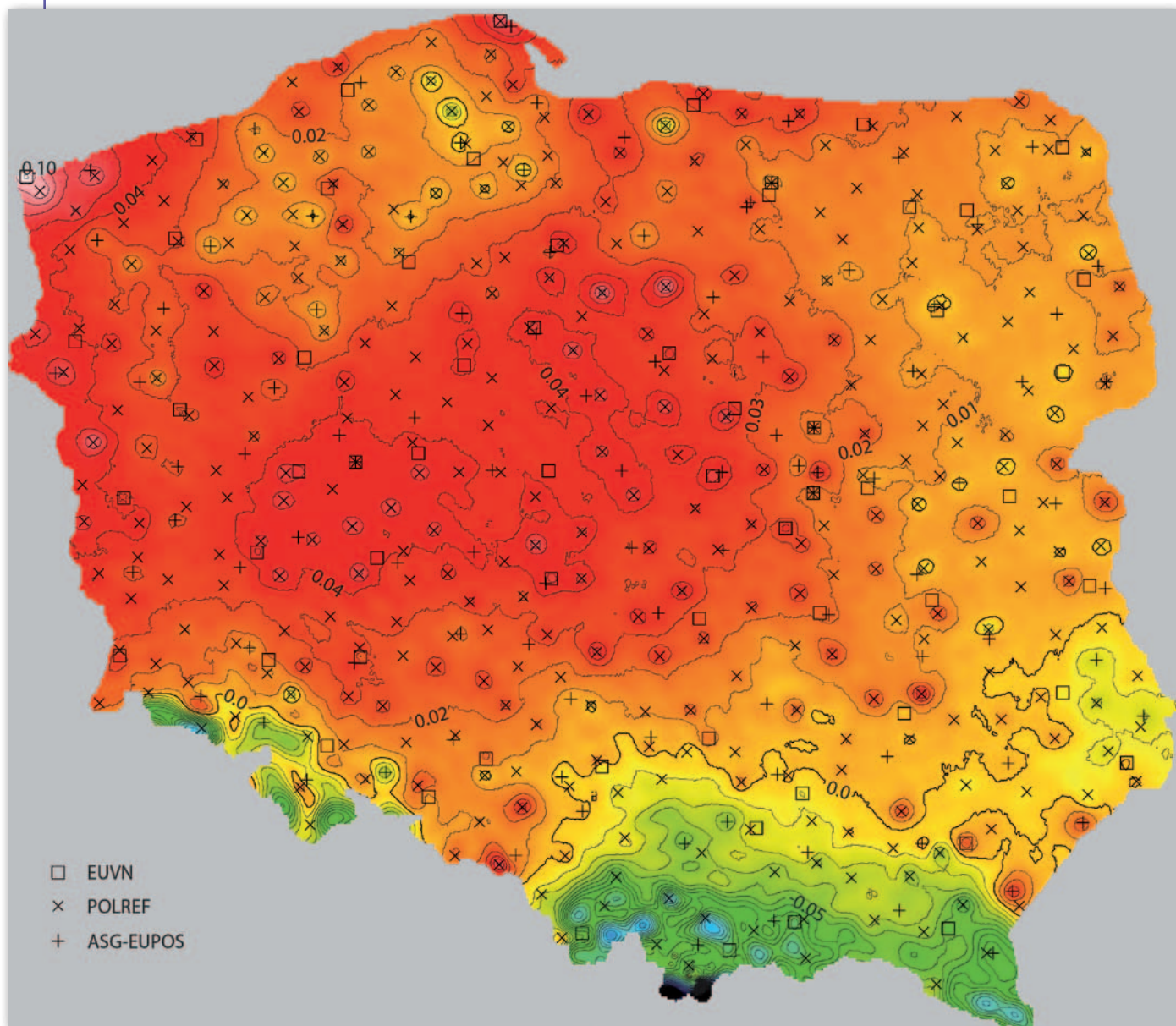
Otrzymujemy położenie z błędem średnim $m_{(p)} = 0,006$ m przy założeniu, że $m_{(centr)}$ (dokładność centrycznego ustawienia anteny nad punktem) wynosi 0,005 m.

Wyciąg z raportu wyrównania pokazuje szczegóły metody RS (rys. 3). Geodetom z doświadczeniem zakładania osnów geodezyjnych z pewnością nasuwa się analogia z przenoszeniem współrzędnych z centra punktu niedostępnego – tutaj takim centrem jest VRS.

Porównanie rezultatów zestawiono w tabeli na następnej stronie. Obliczenia wykonano dwiema procedurami: generowaniem VRS z POZGEO D i generowaniem samodzielnym w programie GNSS Solutions. Głównym celem tego artykułu jest pokazanie zalet metody RS. W ocenie dokładności tej metody, jak wspomniano wcześniej, brakuje analiz dokładności tworzenia modelu nowej quasi-geoidy. Nie jest to naszym zasadniczym tematem, ale wpasowanie (kalibrację) globalnego modelu geopotencjalnego EGM-2008 można chyba było wykonać znacznie dokładniej. Widać to na warstwicach różnic EGM-2008 i PL-KRON86-NH (rys. 4). Jest to graficzne przedstawienie porównania na 429 385 punktach siatki bazowej 0,6' x 0,6' długości i szerokości geodezyjnej. Do kalibracji modelu EGM-2008 do układu odniesienia PL-ETRF2000 przyjęto parametry zalecane przez komisję EUREF [4]. Przebieg powierzchni quasi-geoidy jest zniekształcony w otoczeniu punktów łącznych – poza ASG-EUPOS zaznaczono tutaj położenie tylko punktów EUVN i POLREF biorących udział w modelowaniu geoidy niwelacyjnej 2001 [5]. Takie opracowania powinny być sprawdzane na kilka sposobów i wnikliwie analizowane przed ich wprowadzaniem jako obligatoryjny standard techniczny.



Rys. 3. Wyciąg z raportu wyrównania obserwacji RS z 26 marca 2014 r. (repery 1 i 2)



Rys. 4. Porównanie modelu geopotencjalnego EGM-2008 z geoidą hybrydową PL-geoid-2011 (cięcie warstwiczne różnic odstępów centymetrowe, opis w metrach). Widoczne odkształcenia modelu PL-geoid-2011 w otoczeniu punktów sieci POLREF

Na zakończenie należy stwierdzić, że na podstawie już wieloletniego stosowania metody RS realizowanej odbiornikami jednoczesnościowymi GPS L1 w ASG-EUPOS otrzymuje się standardowo dokładności określone błędem średnim położenia punktu $m_{(p)}$ rzędu 1 cm i wysokości $m_{(H)}$ rzędu kilkunastu milimetrów. Lokalnie, czyli względne błędy średnie położenia punk-

tów i wysokości, to przeważnie pojedyncze milimetry. Widać, jak istotne są opracowania numeryczne pomiarów satelitarnych, w tym modelowanie geoidy.

Jako ciekawostkę dodamy jeszcze, że w miesięczniku „The American Surveyor” artykuł o zaletach postprocesingu miał najwięcej czytelników on-line w 2013 r. [6]. Chociaż w porównaniu z klasyczną metodą statyczną Ameryka-

nie dość późno zauważyli zalety postprocesingu metodą RS, to ich odpowiednik naszego serwisu POZGEO stosuje tę metodę obliczeń już od 2007 r. (OPUS RS).

**dr Ryszard Pażus
Aleksander Mróz**

Literatura:

- [1] Kadaj R., Świętoń T., Opis algorytmów i oprogramowania programu TRANSPOL v 2.06, GUGIK 2012;
- [2] Silver M., OPUS-Projects – The Next Revolution in GPS, The American Surveyor, October 2013, www.amerisurv.com/PDF/TheAmericanSurveyor_Silver-OPUSProjects_Vol10No11.pdf
- [3] Pażus R., Aktywnie i wirtualnie z geoidą, GEODETA 6/2011;
- [4] Altamimi Z., Transformation ITRF2008 to ETRF2000, EUREF TWG 2010, Lisboa;
- [5] Pażus R., Osada E., Olejnik S., Geoida niwelacyjna 2001, GEODETA 5/2002;
- [6] www.amerisurv.com/newsletter/13NOV2013.htm

Porównanie rezultatów obliczenia pomiarów RS dwoma programami

Reper	Obliczenia VRS		Dane banku osnów H (Kronsztad'86)	Odchyłka ΔH	
	POZGEO D	GNSS Solutions		POZGEO D	GNSS Solutions
Reper 1	107,987	107,995	107,9831	-0,004	-0,012
Reper 2	107,501	107,514	107,4913	-0,010	-0,023
Reper 3	106,138	106,128	106,1267	-0,011	-0,001
Reper 6	98,116	98,114	98,0902	-0,026	-0,024