

Geodezja wyższa nie jest sztuką dla sztuki, a technolo

Geoida niwel

RYSZARD PAZUS, EDWARD

Do niedawna geodeci zajmujący się pomiarami z zakresu geodezji niższej nie potrzebowali w swoich opracowaniach odwoływać się do zagadnień geodezji wyższej. Jednak z chwilą wprowadzenia technik GPS i globalnych układów odniesienia, praktycznego znaczenia nabierała zaczęła wiedza o możliwościach łączenia pomiarów satelitarnych z klasycznymi, w tym o zaniechanych do tej pory redukcjach. Wykorzystanie technik satelitarnych daje nowe możliwości pomiarów wysokościowych o dokładnościach równorzędnych z klasyczną niwelacją geometryczną i – co najważniejsze – w obowiązującym układzie wysokości. Wszystko za sprawą odpowiednio dokładnego modelu geoidy.

Do czasu wprowadzenia geodezyjnego układu odniesienia EUREF-89, który jest specyficznym rozwiązaniem układu globalnego, obowiązywał w kraju regionalny układ odniesienia na elipsoidzie Krasowskiego z punktem przyłożenia Pułkowo. Rozwiązanie takie pozwalało na lepsze dopasowanie elipsoidy do powierzchni geoidy (w ogólnym pojęciu – powierzchni ekwipotencjalnej siły ciężkości Ziemi, utożsamianej ze swobodnym poziomem mórz i oceanów). Stąd w Polsce (poza obszarem Tatr) powierzchnia geoidy różniła się od elipsoidy jedynie o 2-3 metry. Wielkości te nie powodowały konieczności wprowadzania re-

dukcji do pomiarów kątowych i liniowych wykonywanych w ramach geodezji niższej. Na przykład pomierzony dalmierzem bok o długości 3 km przy odstępnie geoidy od elipsoidy $N=3$ m wymagał redukcji -0.001 m, czyli zaniechanej. Teraz, kiedy elipsoida odniesienia ma położenie geocentryczne, redukcja ta wynosi – w zależności od rejonu kraju – od -0.013 do -0.020 m.

Wprowadzenie technik satelitarnych GPS spowodowało w geodezji rewolucję. Względnie szybko zaczęto stosować je w pomiarach poziomych. Gorzej wygląda sytuacja w pomiarach wysokościowych, bo chociaż wyniki otrzymuje się w układzie trójwymiarowym, to wysokości obliczane z tego układu są wysokościami geometrycznymi, niezwiązanymi z polem grawitacyjnym Ziemi i nie mają one większego znaczenia praktycznego, dopóki nie zostaną przeliczone do obowiązującego układu odniesienia. W Polsce ciągle jeszcze jest nim układ Kronsztad w systemie wysokości normalnych. Stąd tak ważne jest określenie zależności (rys. 1) pomiędzy wysokościami elipsoidalnymi, oznaczanymi zwykle h (pozyskiwanymi z GPS), i znanymi z praktyki geodezyjnej wysokościami H (wyznaczanymi z klasycznej niwelacji). Zależności takie dają matematyczny model powierzchni geoidy, nazywany tu geoidą niwelacyjną (w terminologii angielskiej – *GPS/levelling geoid* lub *GPS/BM's levelling quasi-geoid*, gdzie BM oznacza reper).

● Dotychczasowe prace nad geoidą w Polsce

W ostatnich latach szybko dostrzeżono znaczenie modelu geoidy dla dalszego rozwoju technik satelitarnych na potrzeby praktyki geodezyjnej [3,6,7,11,13]. Bez modelu geoidy wyznaczonego z odpowiednią dokładnością nie można rozpocząć budowy i wykorzystania aktywnych sieci geodezyjnych.

Dla nadrobienia zaległości – zgodnie z maksymą, że „liczą się czyny, a nie słowa” – w 1999 roku rozpoczęto w Departamencie Geodezji GUGiK odpowiednie przygotowania. W tym celu zawarto z wykonawcami kilka umów pomocniczych (wymienionych na końcu tego artykułu), które w rezultacie pozwoliły na rozwiązanie zadania.

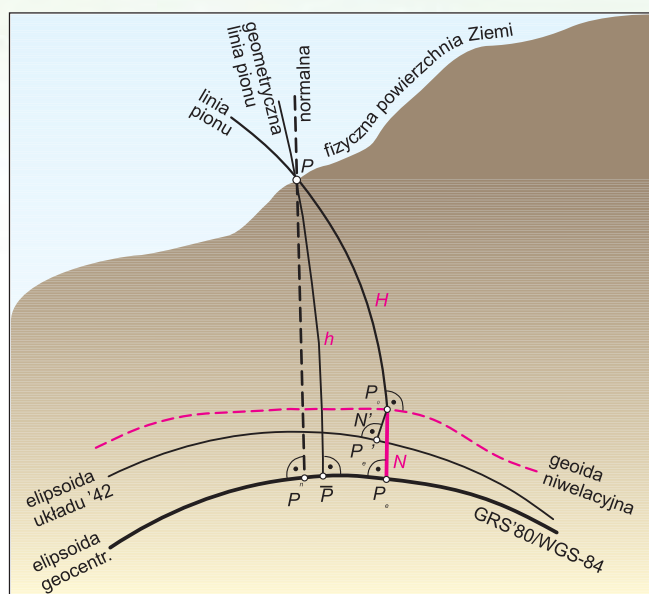
Przyjęto założenie, że model geoidy będzie opracowany w systemie EUVN '97 (European Vertical Reference Network), co nie wyklucza możliwości praktycznego zastosowania go w obowiązującym EUREF-89. Działania te były zgodne z zaleceniami Podkomisji EUREF, która – uznając kampanię pomiarową i wyrównanie sieci EUVN '97 – w rezolucji nr 3 z Trömsö (Norwegia, 22-24.06.2000) zaleciła europejskim agencjom kartograficznym przyjęcie tego rozwiązania dla wyznaczania wy-



ge satelitarne są w zasięgu ręki każdego geodety

geodezyjna 2001

OSADA, SŁAWOMIR OLEJNIK



Rys. 1. Wysokości elipsoidalne i wysokości normalne a geoida niwelacyjna

sokości geoidy niwelacyjnej, która docelowo powinna mieć zasięg europejski.

Pierwsze wyznaczenia astronomiczno-geodezyjnej geoidy dla obszaru Polski przeprowadzono w Instytucie Geodezji i Kartografii w 1961 roku [1]. Następnie udoskonalano ten model przez włączenie pomiarów grawimetrycznych (1970 i 1978 r.). Dalsze prace to modele geoidy/quasi-geoidy grawimetrycznej, zakończone modelem quasi96 [5]. Dopasowanie quasi96 do państwowego układu wysokościowego Kronsztad '86 przez cztero-parametrową transformację na punktach łącznych sieci POLREF dało w rezultacie model quasi97b. Ten ostatni wykorzystano do obliczeń poprawek do redukcji obserwacji w modernizacji krajowej sieci poziomej. Niestety, pozaautorska ocena dokładności tego modelu nie była zadowalająca. W związku z tym nie mógł on być wprowadzony do przeliczeń wysokości elipsoidalnych na normalne i dlatego wysokości punktów zakładanych sieci w dalszym ciągu obliczane były poprzez transformacje lokalne za pomocą punktów łącznych i wyrównań sieci sztucznie przyjmowanych jako niezależne. Analizując rezultaty tych ostatnich opracowań, dochodzi się do wniosku, że rozróżnianie geoidy od quasi-geoidy jest mało znaczące, zwłaszcza przy nieuwzględnia-

niu we wszystkich dotychczasowych modelach (poza quasi97b) poziomu odniesienia wysokości i położenia elipsoidy GRS80 w epoce czasowej określonego geodezyjnego układu odniesienia. Bardziej zainteresowanych tym problemem polecamy publikację D.A. Smith [12].

● Wybór danych geodezyjnych

W wyniku inicjatywy Departamentu Geodezji GUGiK do modelowania geoidy niwelacyjnej pozyskano następujące sieci geodezyjne: EUVN '97 (z krajowym dogęszczeniem), EUREF-POL, POLREF, „Tatry i Podhale” oraz WSSG (Wojskową Szczegółową Sieć Geodezyjną). Przyjęto założenie, że punkty sieci muszą mieć wysokości normalne ze związków geodezyjnych co najmniej według kryteriów dokładności osnowy wysokościowej III klasy. Wykluczyło to znaczną część punktów sieci WSSG. Poniżej krótka charakterystyka poszczególnych sieci.

Sieć EUVN (European Vertical GPS-Reference Network) została założona z inicjatywy Podkomisji dla Europy (EUREF) Międzynarodowej Asocjacji Geodezyjnej (IAG). Głównym zadaniem tej sieci jest połączenie wszystkich narodowych systemów wysokościowych na naszym kontynencie. Umożliwia ona opracowanie jednolitego dla Europy modelu geoidy niwelacyjnej. Podczas kampanii niwelacyjnej przeprowadzonej na obszarze 32 krajów (21-29 maja 1997 r.) obserwowano równocześnie 196 punktów. Jej wyniki przedstawiono na sympozjum EUREF w Bad Neuenahr-Ahrweiler (Niemcy, 1998 r.). Sieć EUVN została w Polsce zagęszczona w wyniku kampanii pomiarowej w 1999 roku i to właśnie punkty sieci zagęszczającej tworzą podstawową osnowę dla wyznaczenia geoidy niwelacyjnej. Punkty EUVN zaliczane są do I klasy podstawowej osnowy poziomej i wysokościowej (stąd otrzymują identyfikator *.*.11 według standardu technicznego G-2).

Cały zbiór, nazywany dalej w skrócie EUVN, tworzą:

- 52 punkty sieci wysokościowej zagęszczającej osnowę EUVN istniejącą na obszarze Polski (numery kolejne 11-62),
- 6 punktów istniejącej w Polsce sieci EUVN '97 (numery 4-9),
- 4 punkty będące polskimi stacjami permanentnymi, które oprócz ciągłej pracy w służbach IGS i EUREF uczestniczyły również w kampanii EUVN '97 (numery 1-3, 10).

Sieć EUREF-POL, nazywana też siecią zerowego rzędu, została założona w celu połączenia naszej osnowy geodezyjnej z europejskim układem odniesienia ETRF alias EUREF (European Reference Frame), wyznaczonym przy użyciu technik satelitarnych. Kampanię pomiarową przeprowadzono w 1992 roku i uczestni-

czyło w niej kilkadziesiąt stacji europejskich (w tym 11 punktów w Polsce) [16]. Wyniki tej kampanii zostały zatwierdzone przez rezolucję nr 1 symposiumu EUREF, które odbyło się w Warszawie (8-11 czerwca 1994 r.). Przyjęła ona te punkty jako wyznaczone w klasie B dokładności, co oznacza dokładność 1 cm, oszacowaną błędem średnim każdej współrzędnej X, Y i Z na epokę 1989.0, tzn. bez gwarancji niezmienności w określonym przedziale czasu (w klasie A, przy tej samej dokładności, stabilność jest określana przedziałem dziesięcioletnim).

Sieć POLREF założono w latach 1994-95, przeprowadzając 3 kampanie pomiarowe, w wyniku których wyznaczono 348 zespołów po 2 punkty (główny i kierunkowy) nawiązanych do 11 punktów sieci EUREF-POL. Powstała w ten sposób pierwsza jednorodna trójwymiarowa osnowa geodezyjna o wysokiej dokładności (błąd położenia dla składowych poziomych – poniżej 0.01 m, a dla wysokości elipsoidalnej – około 0.015 m). Punkty POLREF mają określone kartezjańskie współrzędne przestrzenne XYZ (czyli równocześnie geodezyjne elipsoidalne BLh) w układzie geocentrycznym EUREF-89 i wysokości normalne z dowiązania niwelacją precyzyjną do osnowy wysokościowej w układzie Kronsztad '86 (te ostatnie tylko dla punktów głównych – centrów).

Do modelowania geoidy punkty EUREF-POL włączono do zbioru punktów POLREF.

Sieć WSSG została założona dla potrzeb automatycznej nawigacji. Składa się z 554 zespołów po 2 punkty (główny i bliźniaczy, czyli kierunkowy, w odległości 500-1000 m). Zespoły punktów znajdują się w pobliżu dróg krajowych i wojewódzkich (25-100 m od osi drogi), w odległości 25-30 km od siebie. Tylko część z nich została dowiązana do państwowego systemu wysokości Kronsztad '86 przy zachowaniu kryteriów niwelacji technicznej III klasy. Dla punktów użytecznych do modelowania geoidy niwelacyjnej wymagane było obliczenie wysokości elipsoidalnych, jednorodnych z układem EUVN (ITRF-96 na

EUREF-89 (ep. 1989.0) → EUVN '97 (ITRF-96, epoka 1997.4)

Parametr	Wartość	Błąd
Translacja	[m]	[m]
Tx	- 0,2538	0,0163
Ty	0,1310	0,0151
Tz	0,1838	0,0141
Skala S	[ppm]	[ppm]
	- 0,005450	0,0018
Rotacja dookoła osi	["]	["]
X	- 0,000740	0,0005
Y	- 0,003220	0,0006
Z	0,001432	0,0004

Średnie błędy wtapowania punktów łącznych składowych XYZ i BLh w [m]:

	Błędy [m]		
	Współrzędne XYZ	Współrzędne BLh	Współrzędne DLh
Współrzędne XYZ	0,0036	0,0023	0,0039
Współrzędne BLh	0,0023	0,0014	0,0051

Punkty o różnicach w składowych BL większych niż 2.5*błąd wtapowania

Punkt	B [° ' "]	L [° ' "]	dB [m]	DL [m]	Dh [m]
BOGI	52 28 29.9664	21 02 06.7655	-0.0050	0.0045	-0.0120
LAMA	53 53 32.6365	20 40 11.7831	-0.0016	-0.0047	-0.0096
TOMA	50 32 04.2217	23 44 29.2813	0.0100	-0.0045	-0.0149
PL02	52 34 42.2828	15 33 09.2349	-0.0035	-0.0039	-0.0082
PL04	54 49 39.0218	18 19 35.3676	-0.0067	-0.0026	-0.0007

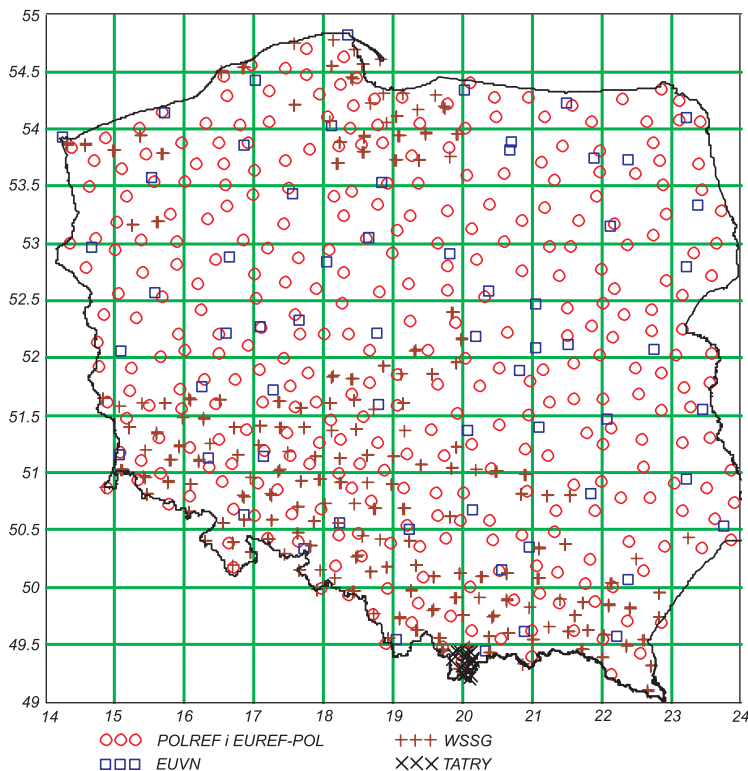
Tabela 1. Parametry transformacji XYZ (EUREF-89) → XYZ (EUVN '97) obliczone z 62 punktów krajowego zagęszczenia sieci EUVN '97

epokę 1997.4). Należy tu wyjaśnić, że wyrównanie WSSG pierwotnie zostało wykonane w nawiązaniu do stacji sieci globalnej IGS (GRAZ, KOSG, MATE, METS, ONSA, ZIMM, WETT), bez przyjęcia nawiązania do krajowej sieci zerowego rzędu EUREF-POL, co wprowadziło do wartości wysokości istotne błędy systematyczne [2]. Oznaczało to konieczność powtórnego wyrównania tej sieci z dostosowaniem do obowiązujących standardów technicznych w nawiązaniu do sieci POLREF i z wykorzystaniem parametrów transformacji między EUREF-89 a EUVN '97. Parametry wyznaczono na podstawie 62 punktów łącznych krajowego zagęszczenia EUVN (wyrównanie w ITRF96 ep.1997.4 przy nawiązaniu do 10 krajowych punktów EUVN '97) i odpowiednio tej samej sieci w EUREF-89 (wyrównanie w ETRF89 epoka 1989.0, przy nawiązaniu do 8 punktów EUREF-POL, z których 3 pozyskano w drodze nowych pomiarów – związów geodezyjnych). Te same parametry transformacji wykorzystano do przeliczeń sieci POLREF. W ten sposób rozwiązano problem sprowadzenia wszystkich sieci do układu odniesienia EUVN '97.

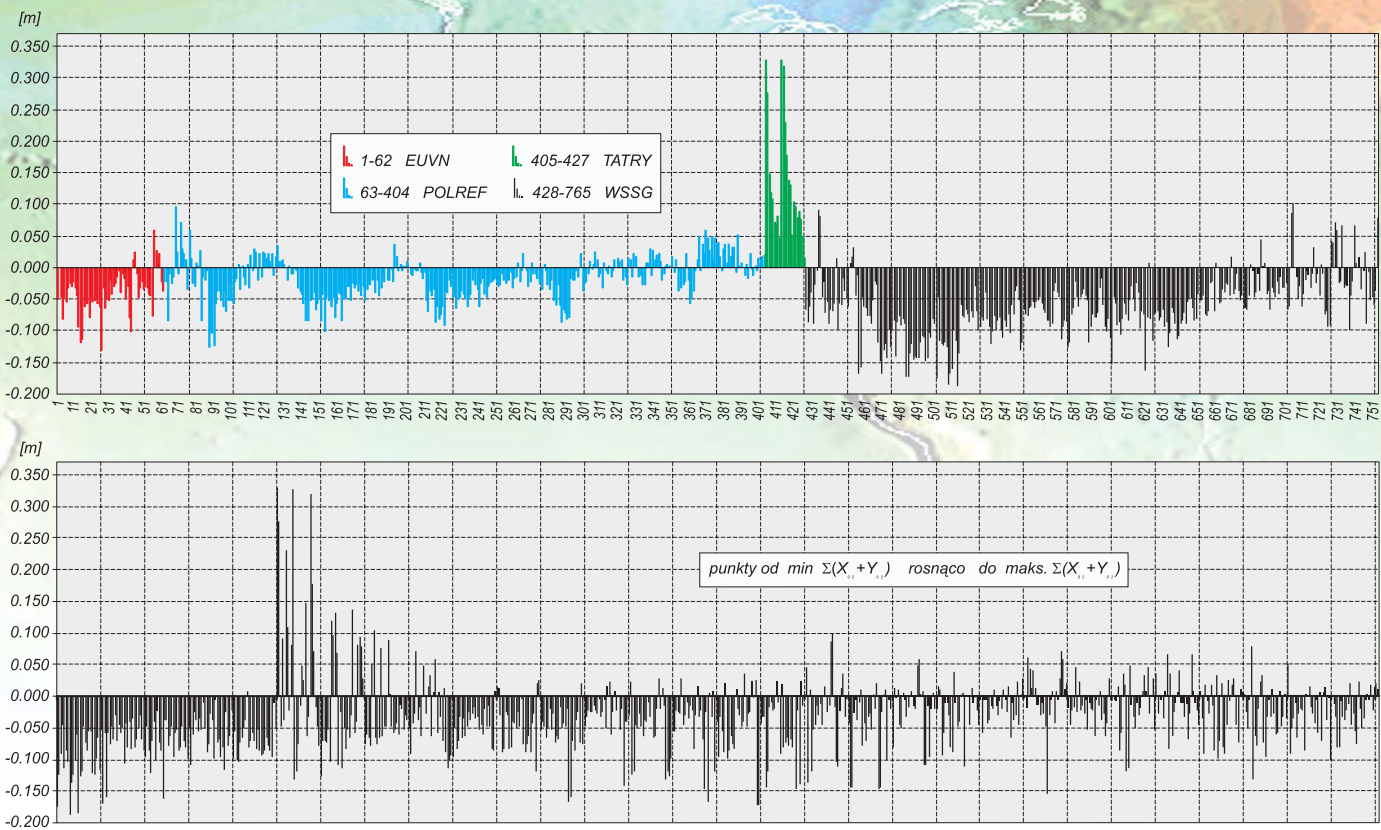
Sieć Tatry została pomierzona przez IGiK (16-22 września 2000 r.). Składa się ona z 23 punktów, w tym: 3 punktów sieci POLREF, 5 punktów państwowej osnowy wysokościowej I i II klasy (w tym jeden punkt dogęszczenia EUVN), 10 ekscentrów punktów osnowy wysokościowej I i II klasy i 5 punktów Tatrzańskiego Poligonu Geodynamicznego.

● Przygotowanie danych

Najtrudniejsze i najbardziej pracochłonne było przygotowanie danych. O zasięgu prac świadczy załączony na końcu wykaz dokumentacji technicznej. Sieci: EUVN, WSSG i Tatry wymagały weryfikacji oryginalnych opracowań i powtórzenia procesu obliczeniowego. Wszystkie sieci zostały przeliczone do układu EUVN '97. Parametry transformacji między EUREF-89



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych



Rys. 3. Różnice odstępów $N_{\text{geod.}} - N_{\text{QUASI97b}}$ w punktach sieci: EUVN, POLREF, Tatry, WSSG

a EUVN '97 zamieszczone są w tabeli 1. Jak widać, błąd transformacji wysokości elipsoidalnych m_h wynosi 0.005 m, co również należy brać pod uwagę przy sumowaniu wszystkich błędów. Do opracowania modelu przyjęto ostatecznie (rys. 2):

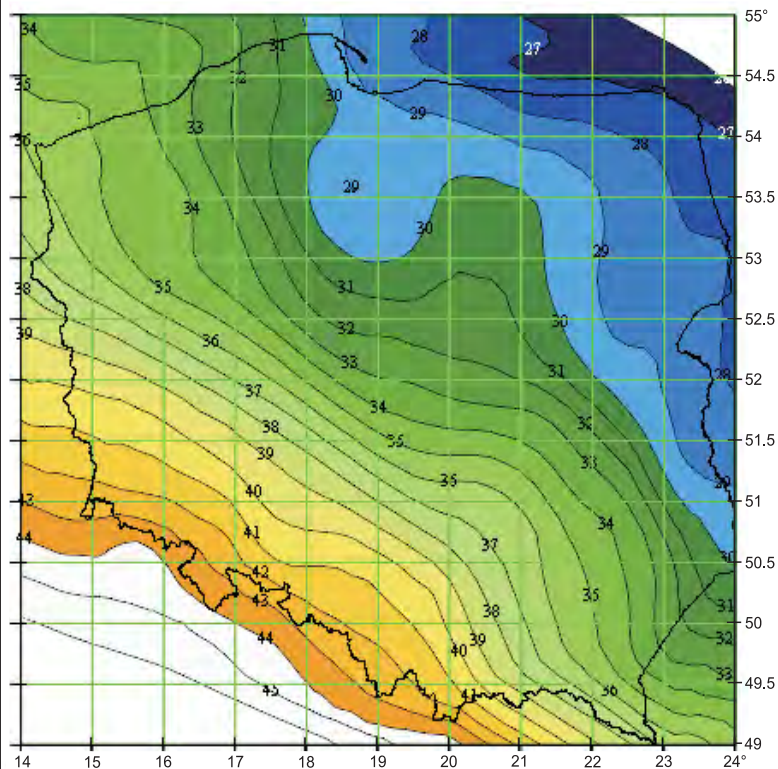
- 62 punkty EUVN,
- 341 punktów POLREF (w tym EUREF-POL),
- 23 punkty TATRY,
- 326 punktów WSSG.

Obliczone z zależności $N=h-H$ odstępów geoidy od elipsoidy (rys. 1), nazywane tutaj „geodezyjnymi” i oznaczane jako $N_{\text{geod.}}$ zostały skonfrontowane z ostatnim modelem quasi97b. Wyniki tego porównania przedstawiono na dwóch diagramach (rys. 3). Na górnym odchyłki pogrupowano sieciami, w kolejności wykażu punktów. Na dolnym zaś – dwuwymiarowym – punkty na osi uszeregowano według rosnącej sumy ich współrzędnych x i y w układzie „1992”. Daje to przegląd odchyłek w punktach zgrupowanych od pld.-zach. do pln.-wsch. części kraju. Jak widać, różnice odstępów $N_{\text{geod.}} - N_{\text{QUASI97b}}$ są bardzo znaczne: od +0.33 m w Tatrach do -0.19 m w kilku innych regionach kraju.

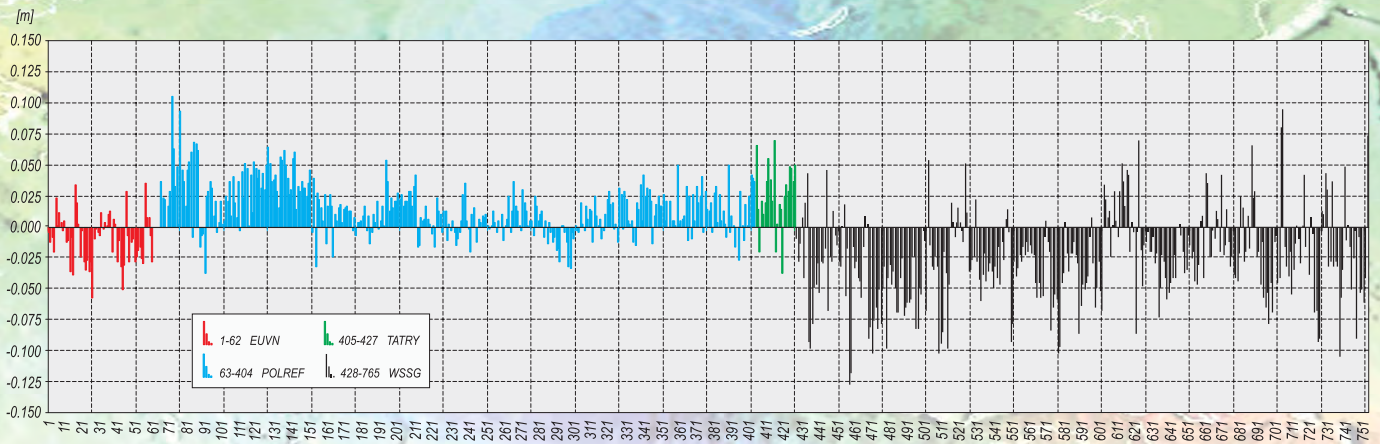
● Opracowanie modelu geoidy niwelacyjnej 2001

Zadanie to polegało na znalezieniu optymalnego wielomianu aproksymującego model quasi97b do punktów sieci: EUVN, POLREF, TATRY i WSSG. Wykonano wiele testów doboru stopnia wielomianu, aż do dziewiątego włącznie. Ostatecznie przyjęto wielomian stopnia trzeciego, dla którego wymagane było zastosowanie funkcji sklejałej. Wybierając ten stopień wielomianu, usunięto w rezultacie szczytkowy wpływ stałych przesunięć poszczególnych sieci na wynik modelowania, co ma istotne znaczenie dla dokładności modelu. Odchyłkom, jakie tworzyły różnice $N(\text{geod.}) - N(\text{quasi})$, przypisano wagi: $p=1$ dla

EUVN, $p=1/2$ dla POLREF, $p=1/4$ dla sieci TATRY i WSSG. Do transformacji i obliczenia użyto modelu dyskretnego w postaci siatki geograficznej o węzłach $1' \times 1'$ (model quasi97b został opracowany na siatce $1.5' \times 3.0'$). Model wysokości geoidy $N(B, L)$ pokazuje rys. 4.



Rys. 4. Mapa geoidy niwelacyjnej 2001 (izolinie opisane w metrach)



Rys. 5. Różnice odstępów $N_{\text{geod.}} - N_{2001}$ w punktach sieci: EUVN, POLREF, Tatry, WSSG

Sieć	Odchyłka średnia	Odchylenie standardowe	Odchyłka śr. po korekcie odchyłek wielkością	Odchylenie standardowe korygowane
	$(\sum v)/n$	$\sqrt{(\sum vv)/(n-1)}$	$-(\sum v)/n$	$\sqrt{(\sum \Delta\Delta)/(n-1)}$
EUVN	-0.010	0.022	0.000	0.020
POLREF	+0.014	0.025	0.000	0.021
TATRY	+0.025	0.037	0.000	0.029
WSSG	-0.027	0.045	0.000	0.036

Tabela 2. Odchyłki standardowe dla modelu geoidy 2001 [m]

Dla poszczególnych grup obserwacji ($N_{\text{geod.}}$) otrzymano odchyłki standardowe od modelu, wykazane na diagramie (rys. 5) i w tabeli 2.

Jak już wspomniano, założony stopień wielomianu uzasadnia przyjęcie odchylenia standardowego korygowanego do oceny poprawności modelowania. Otrzymane odchylenia standardowe dla poszczególnych sieci nie odbiegają od oceny dokładności a priori przeprowadzonej na podstawie analizy programów obserwacyjnych i wielkości wektorów GPS, jak również dokładności związków wysokościowych punktów.

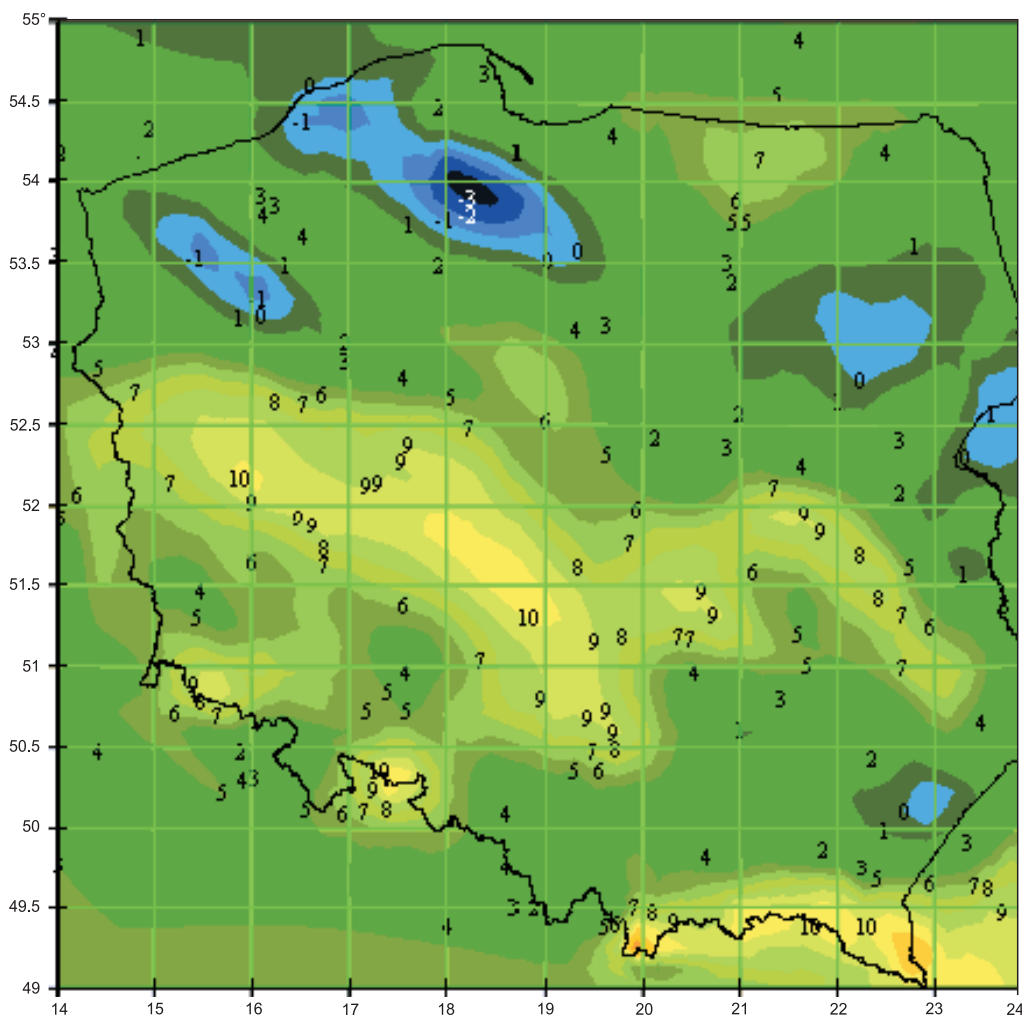
Trzeba podkreślić, że zamieszczona tu statystyka nie ma bezpośredniego związku z dokładnością modelu, kiedy różnice wysokości geoidy ΔN pomiędzy punktami GPS w pomierzonej sieci przeznaczone są do redukcji przewyższenia elipsoidalnego Δh pomiędzy tymi punktami, a następnie obliczenia przewyższenia niwelacyjnego ΔH w systemie wysokości Kronsztad '86 według wzoru:

$$\Delta H = \Delta h - \Delta N.$$

Podobnie jak w technice pomiaru GPS, metoda różnicowa daje tu znacznie lepsze rezultaty i jej zastosowanie pozwala osiągnąć dokładności takie jak w klasycznej niwelacji precyzyjnej.

● Model składowych odchylen pionu

Odchylenie pionu jest określone składowymi w kierunku północnym ξ i wschodnim η (w funkcji B i L) jako pochodnymi wysokości geoidy $N(B, L)$ w tych kierunkach, wyrażonymi w sekundach miary kątovej [11]. Modele



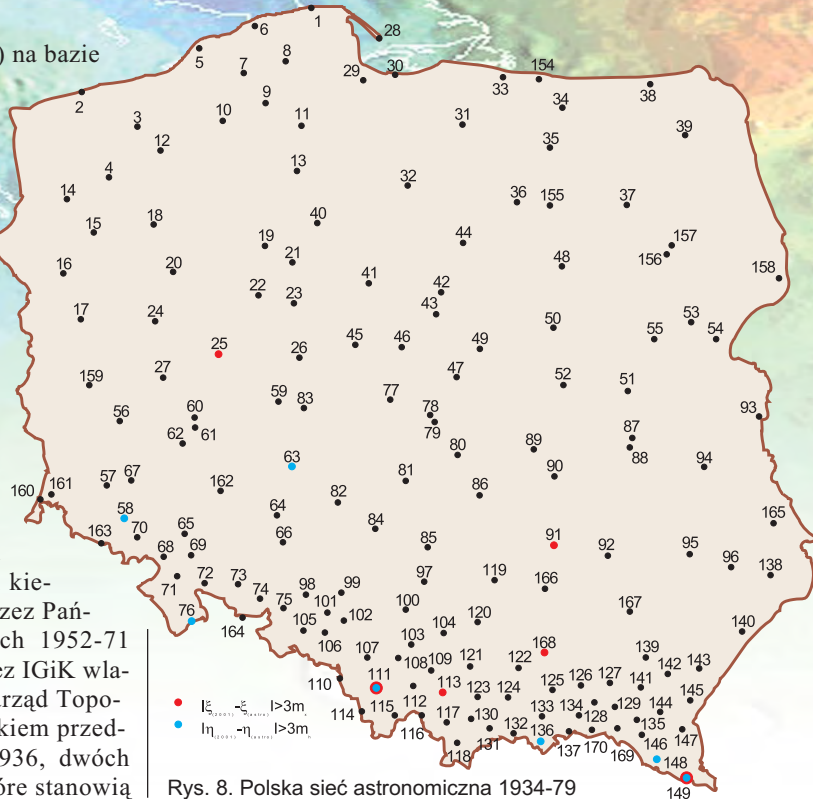
Rys. 6. Składowa odchylenia pionu w kierunku północnym ξ (B,L) wyrażona w ["]

składowych odchylenia pionu $\xi(B, L)$ i $\eta(B, L)$ na bazie dyskretnego modelu wysokości geoidy $N(1' \times 1')$ pokazują rysunki 6 i 7.

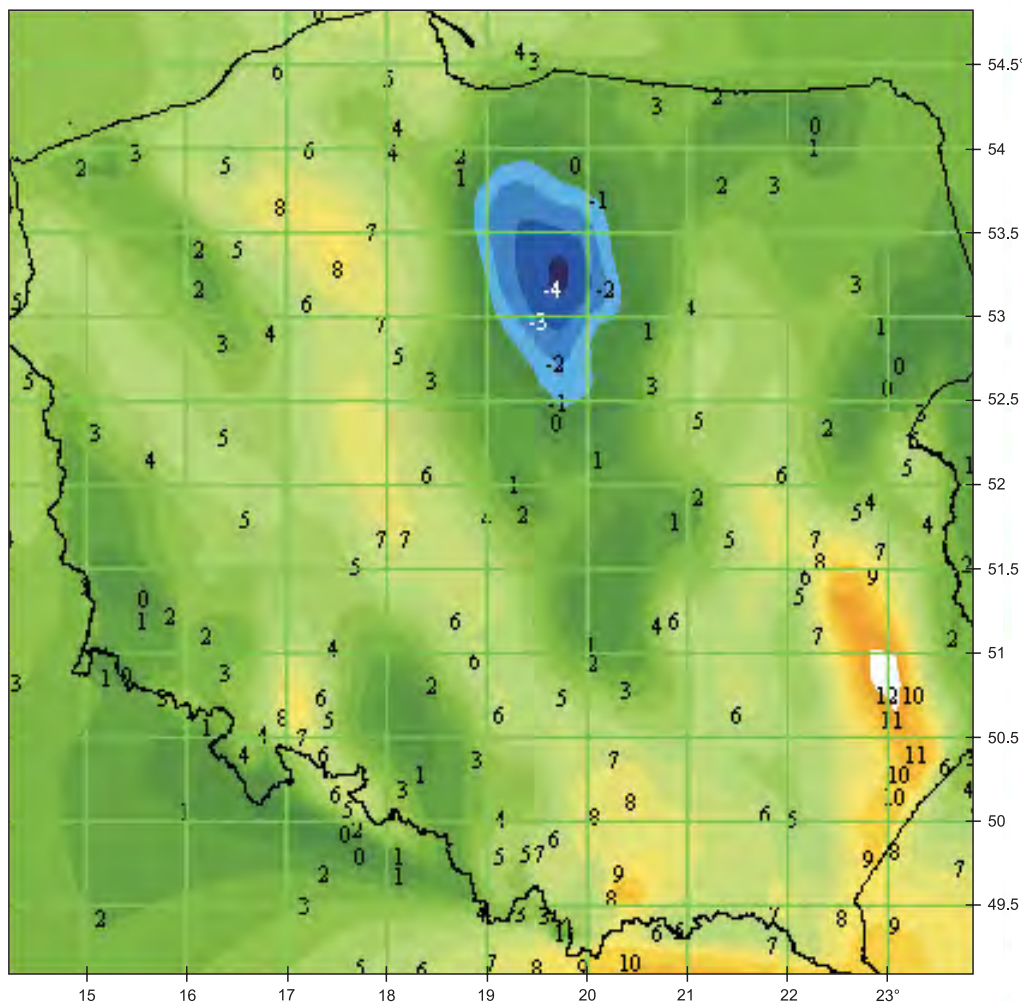
Podobnie jak w modelu geoidy niwelacyjnej 2001 w celu sprawdzenia modelu odchylenia pionu sięgnięto do obserwacji. W tym przypadku jedyną możliwością konfrontowania wyników jest porównanie z polską siecią astronomiczną z lat 1934-1979. Obejmuje ona w systemie BIH 1968/OCI 168 punktów (rys. 8), w tym 54 połowe punkty Laplace'a, 113 punktów niwelacji astronomiczno-grawimetrycznej, z czego 35 rzędu I i 78 rzędu II oraz podstawowy punkt Laplace'a w Borowej Górze. Dla statystyki można dodać (nie jest to przedmiotem zainteresowania tej publikacji), że sieć składała się z ogólnej liczby 55 azymutów Laplace'a: 24 głównych, 24 zwrotnych i 7 azymutów obserwowanych tylko w jednym kierunku. Większość pomiarów była wykonana przez Państwowe Przedsiębiorstwo Geodezyjne w latach 1952-71 z wyjątkiem: jednego punktu pomierzonego przez IGiK w latach 1957-59 (Borowa Góra), jednego przez Zarząd Topograficzny WP w 1968 r., dwóch, które są wynikiem przedwojennych polskich pomiarów z lat 1934 i 1936, dwóch z pomiarów radzieckich z 1940 r. i czterech, które stanowią

wynik przedwojennych pomiarów niemieckich z 1934 r. Należy jeszcze przypomnieć kryteria dokładności wyznaczeń tych pomiarów. Na punktach Laplace'a i punktach niwelacji astronomiczno-grawimetrycznej I rzędu średnie błędy obserwacji obliczone z rozrzutu wyników pomiaru nie powinny przekraczać: $\pm 0.2''$ – dla szerokości astronomicznej, $\pm 0.3''$ – dla długości, a na punktach niwelacji astr.-graw. II rzędu odpowiednio: $\pm 0.4''$ i $\pm 0.6''$ [14]. Wartości ostateczne były zredukowane na poziom morza i tym samym mogą być porównywalne bezpośrednio z modelem odchylenia pionu 2001 (pozostałe redukcje można zaniedbać). W konfrontacji tych wyników pominięto specyficzne dla punktów niuanse techniczne, przede wszystkim rozróżnienie dokładności wynikającej z programów obserwacji dla punktów I i II rzędu niwelacji astr.-graw. i korzystania z różnych katalogów gwiazd (FK3 i FK4). A więc sieć punktów dla oceny statystycznej potraktowano jako jeden zbiór.

Do porównania poprzez obliczenie odchylenia standardo-



Rys. 8. Polska sieć astronomiczna 1934-79



Rys. 7. Składowa odchylenia pionu w kierunku wschodnim $\eta(B, L)$ wyrażona w ["]

wego różnicy $\xi(2001)-\xi(\text{astro})$ przyjęto wyniki pomiarów szerokości astronomicznych na 148 punktach. Nie uwzględniono wyników pomiarów 6 szerokości astronomicznych o numerach na szkicu: 25, 91, 111, 113, 149 i 168, gdzie różnice wyraźnie wskazują na niedokładności wynikające ze słabości modelu quasi97b, jak również z ekstrapolacji wielomianu. Otrzymano odchylenie standardowe $m_{\xi} = 0.53''$. Podobna sytuacja jest w przypadku różnicy $\eta(2001)-\eta(\text{astro})$. Tutaj z kolei wyraźnie widać wpływ ekstrapolacji wielomianu i modelu quasi97b na punkty o numerach: 58, 63, 76, 111, 136, 148 i 149. Bez tych punktów odchylenie standardowe różnicy $m_{\eta} = 0.50''$. Przewidywane w przyszłości łączenie modeli krajowych w model europejski powinno tę sytuację poprawić. Bardziej szczegółowa statystyka pokazana jest na rysunkach 9 i 10.

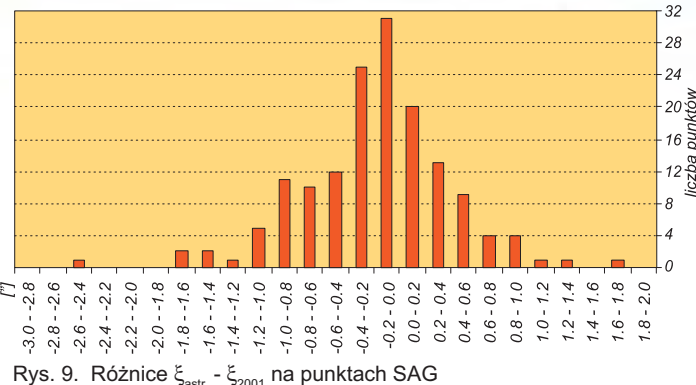
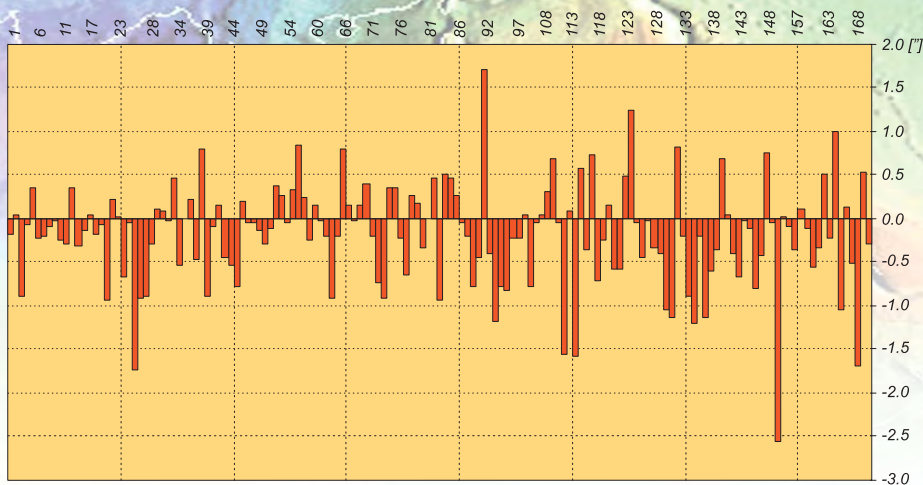
Z konfrontacji pomiarów astronomicznych z pomiarami satelitarnymi można też wysnuć ciekawy wniosek: nie stwierdza się żadnych istotnych błędów systematycznych, oczywiście w granicach dokładności wyznaczeń, między dawnymi układami odniesienia, wzorowanymi wyłącznie na klasycznych pomiarach astronomicznych, a nowoczesnymi pomiarami Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi IERS (International Earth Rotation Service).

● Ocena dokładności

Jak wynika z wcześniejszego opisu, model geoidy niwelacyjnej został opracowany na podstawie danych pochodzących głównie z dwóch źródeł: zbioru wysokości geoidy na punktach pomiarowych (GPS/reper) i wysokości geoidy/quasi-geoidy grawimetrycznej (quasi97b). Różnice między punktami pomiarowymi N(geod.) a quasi97b są podstawą do zdefiniowania wielomianu transformującego powierzchnię quasi97b do powierzchni geoidy niwelacyjnej 2001. Z tabeli 2 wiadomo, że model ten został wyznaczony powierzchnią minimalnej krzywizny z dopasowaniem przebiegu geoidy przez punkty EUVN i POLREF z odchyleniem standardowym ± 20 mm. To odchylenie nie jest jednak parametrem dokładności geoidy. Można z niego tylko oszacować, że np. z punktu w okolicach Szczecina punkt położony w okolicach Rzeszowa może być wyznaczony techniką GPS z błędem średnim 2 cm wynikającym z modelu geoidy. Takie pomiary nie mają jednak praktycznego znaczenia z uwagi na wpływy innych błędów. Z doświadczenia [9], gdzie zastosowano podobną procedurę wyznaczenia modelu geoidy, wiadomo, że tak opracowany model daje dokładności porównywalne z dokładnością niwelacji precyzyjnej II klasy ($2\text{mm}\sqrt{L_{[\text{km}]}}$) na odległości kilkudziesięciu kilometrów, co ma już kapitalne znaczenie praktyczne. Prawdziwą ocenę dokładności dostarczy praktyka. W każdym razie model geoidy niwelacyjnej 2001 zostaje wprowadzony jako standard G-2, tzn. dla stosowania przy zakładaniu szczegółowej osnowy wysokościowej, z dużym prawdopodobieństwem możliwości jego wykorzystania w pomiarach o wymaganej wyższej dokładności.

W publikacjach na temat wyznaczania geoidy (przykładem jest [11]), pojawiają się ostatnio określenia o metodach wyznaczania geoidy nazywanej skrótowo „centymetrową”. Ma-

jąc na uwadze niektóre porównywalne parametry, jak stopień zagęszczenia punktami pomiarowymi i standardowe odchylenie (RMS) wartości N(geod.), opisujący tutaj model geoidy niwelacyjnej spełnia kryteria geoidy centymetrowej. Przypada jednak należy, że tego typu określenia nie mają swojej defini-



Rys. 9. Różnice $\xi_{\text{astr.}} - \xi_{2001}$ na punktach SAG

cji i są nadużywane. Model ten, wprowadzony do instrukcji technicznej G-2 [4, 14], został opracowany w szczególności dla zastosowania w aktywnej sieci geodezyjnej ASG-PL.

● CD-ROM dla praktyków

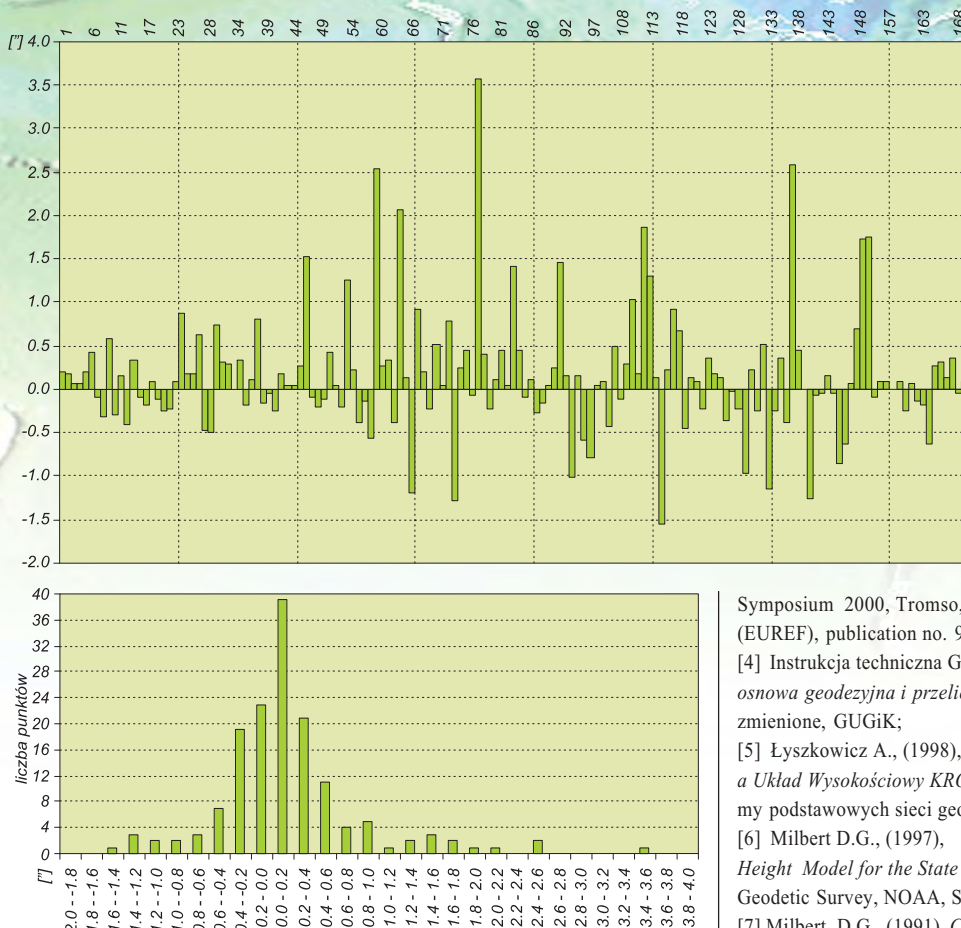
Do publikacji załączono płytę CD-ROM z informacjami i oprogramowaniem użytecznym do wykorzystania modelu geoidy niwelacyjnej, w tym pozwalającym na wybór punktów nawiazania. Płyta zawiera:

1. program *Geoida niwelacyjna 2001*,
2. przeglądarkę państwowych osnow geodezyjnych,
3. zbiory identyfikatorów państwowej osnowy geodezyjnej I i II kl.,
4. tekst instrukcji technicznej G-2 *Szczegółowa pozioma i wysokościowa osnowa geodezyjna i przeliczenia współrzędnych między układami*.

Dokumentacja techniczna

Model „Geoida niwelacyjna 2001” opracowano na podstawie następującej dokumentacji technicznej państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego dostępnej w CODGiK (uszeregowanej według chronologicznego zawierania umów):

- *Sieć I rzędu POLREF* – operat techniczny z wykonania umowy 26/CBK/95 z 11.09.1995 roku *Wykonanie robót geodezyjnych na obiekcie POLREF*;
- *System obliczania odstępów quasigeoidy model QUASI96 od elipsoidy GRS80 dla obszaru Polski* opracowany dla GUGiK przez Centrum Badań Kosmicznych PAN na podstawie umowy 38/CBK/97 zawartej 11 grudnia 1997 roku;



Rys. 10. Różnice $\eta_{astr.} - \eta_{2001}$ na punktach SAG

- Rozwinięcie krajowej sieci EUVN poprzez wykonanie pomiarów satelitarnych na punktach podstawowej osnowy wysokościowej – praca na podstawie umowy 16/IGWiAG/99 z 6.08.1999 pomiędzy Departamentem Geodezji GUGiK i Instytutem Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej PW;
- Wyrównanie wspólne sieci WSSG w nawiązaniu do krajowej podstawowej osnowy geodezyjnej, praca na podstawie umowy z 18.11.1999 pomiędzy Departamentem Geodezji GUGiK a dr. inż. Mariuszem Figurskim;
- Wykonanie kontrolnych obliczeń współrzędnych i wysokości normalnych punktów zagęszczenia krajowej sieci EUVN – na podstawie umowy nr GD/13/2000 z 03.07.2000 pomiędzy GUGiK i Leszkiem Jaworskim;
- Wykonanie pomiarów nawiązujących techniką GPS trzech punktów sieci EUREF-POL z punktami podstawowej osnowy wysokościowej stanowiącej zagęszczenie EVRF2000 – na podstawie umowy nr 17/2000/GD z 3.07.2000 pomiędzy Głównym Geodetą Kraju a Centrum Badań Kosmicznych PAN;
- Wyznaczenie geoidy niwelacyjnej (quasigeoidy satelitarnej) dla obszaru Tatr i Podhala dla sprawdzenia wcześniej wyznaczonej geoidy niwelacyjnej na tym obszarze – na podstawie umowy nr CEU/56/GD/2000 z 21.08.2000 pomiędzy GUGiK i IGiK;
- Wykonanie kontrolnych obliczeń współrzędnych i wysokości normalnych osnowy geodezyjnej Tatr i Podhala założonej przez IGiK – na podstawie umowy nr 31/2000 zawartej 05.12.2000 pomiędzy GUGiK i Leszkiem Jaworskim;
- Wyznaczenie geoidy niwelacyjnej QGEOID'PL01 i modelu odchylenia pionu DEFLEC'01 na podstawie pomiarów satelitarnych i pomiarów wysokościowej osnowy geodezyjnej, wykonane na zlecenie Departamentu Geodezji GUGiK w ramach umowy nr 1/2001/GD z 10 stycznia 2001 r przez prof. Edwarda Osadę;
- Weryfikacja wyznaczenia modelu geoidy niwelacyjnej 2001 poprzez zastosowanie innej metody modelowania numerycznego i porównanie wyników, wyko-

nana na zlecenie Departamentu Geodezji GUGiK w ramach umowy nr 25/2001/GD z 27 sierpnia 2001 r przez prof. Romana Kadaję.

Literatura

- [1] Bokun J., (1961), *Zagadnienie wyznaczenia odstępów geoidy w Polsce od elipsoidy Krasowskiego biorąc pod uwagę posiadane materiały astronomiczno-geodezyjne i grawimetryczne*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, tom VIII, z.1, str.113-140;
- [2] Figurski M., (1998), *Wojskowa Szczegółowa Sieć Geodezyjna (WSSG) – Ostateczne wyniki wyrównania*, VI Sympozjum „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych”, Warszawa;
- [3] Ihde J., Adam J., Gurtner W., Harsson B. G., Sacher M., Schuler W., Wöppelmann G., (2000), *The Height Solution of the European Vertical Reference Network (EUVN)*, EUREF

- Symposium 2000, Tromsø, 22-24 June 2000, Sub-commission for Europe (EUREF), publication no. 9, Monachium;
- [4] Instrukcja techniczna G-2, (2001), *Szczegółowa pozioma i wysokościowa osnowa geodezyjna i przeliczenia współrzędnych między układami*, wydanie V zmienione, GUGiK;
- [5] Łyszkowicz A., (1998), *Grawimetryczna quasigeoida model QUASI97B a Układ Wysokościowy KRONSZTAD86*, VI Sympozjum „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych”, Warszawa;
- [6] Milbert D.G., (1997), *An Accuracy Assessment of the GEIOD96 Geoid Height Model for the State of Ohio*, Geodetic Services Division, National Geodetic Survey, NOAA, Silver Spring, MD;
- [7] Milbert, D.G., (1991), *Computing GPS-derived orthometric heights with the GEIOD90 geoid height model*, Technical Papers of the 1991 ACSM-ASPRS Fall Convention, Atlanta, American Congress on Surveying and Mapping, Washington, pp. A46-55;
- [8] Osada E. (1998), *Analiza wyrównanie i modelowanie geo-danych*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu;
- [9] Pażus R., (1990), *Geodetic Control of Kuwait, Final Report*, Directorate of Surveying, Kuwait, pp. 49-55;
- [10] Radecki J., Radwańska C., Magdalińska B., Moskwiński M., Roszkowski S., (1975, 1981), *Katalog punktów astronomicznych: I. Szerokości astronomiczne, II. Długości astronomiczne*, Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Astronomii Geodezyjnej (raport wewnętrzny z uwzględnieniem suplementu z 1981 roku: *Sieć punktów astronomicznych na obszarze PRL*);
- [11] Roman D.R., Smith D.A. (2000), *Recent investigations toward achieving a one centimeter geoid*, GGG2000 session 9 of the IAG Symposium in Banff, Alberta, Canada;
- [12] Smith D.A., (1998), *There is no such thing as „The” EGM96 geoid: Subtle points on the use of a global geopotential model*, IgeS Bulletin N. 8, International Geoid Service, Milan, 1998 pp. 17-28;
- [13] Snay R.A., Soler T., (2000), *Practical considerations for Accurate Positioning, Modern Terrestrial Reference Systems – Part 4*, Professional Surveyor, April 2000;
- [14] Wytyczne techniczne G-2.5, (2002), *Szczegółowa pozioma i wysokościowa osnowa geodezyjna – projektowanie, pomiar i opracowanie wyników*. Wydanie I, GUGiK;
- [15] Wytyczne techniczne G-1.1, (1980), *Pomiary astronomiczne i opracowanie ich wyników*, GUGiK i Zarząd Topograficzny Sztabu Generalnego WP, Warszawa;
- [16] Zieliński J.B., Jaworski L., Zdunek R., Engehardt G., Seeger H., Töppe F., *EUREF-POL 1992 GPS Observation Campaign and data Processing*, Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, Helf No 53, München. ■