

Geoida hybrydowa PL-geoid-2011 w praktyce

Poprawki i pogorszki

W USA geoidę hybrydową stale doskonalią w celu podniesienia dokładności pomiarów satelitarnych. W Polsce nie ma zrozumienia dla takiej potrzeby. A przecież dodatkowe obserwacje do poprawy modelu mogłoby dostarczać sami geodeci.

Ryszard Pażus

W przypadku pomiarów metodami satelitarnymi wysokość znaku geodezyjnego może być obliczana w drodze:

1. Wyrównania różnic wysokości między sąsiednimi punktami z zależności $\Delta H = \Delta h - \Delta N$ w układzie wysokościowym. To metoda niwelacji satelitarnej z wykorzystaniem pomiarów statycznych stosowana do otrzymywania wyższej dokładności. Jest ona równorzędna z niwelacją geometryczną aż do standardu 4 mm/km. W metodzie tej ΔN pochodzi z modelu geoidy grawimetrycznej.

2. Uwzględnienia odstępów modelu geoidy N do wysokości elipsoidalnej h punktu otrzymanej z serwisów aktywnych sieci geodezyjnych. Przy obecnie obowiązującym modelu geoidy PL-geoid-2011 dla układu wysokościowego PL-KRON86-NH poprawne w tym przypadku wydaje się oszacowanie dokładności z błędem średnim rzędu 4-5 cm.

Na dokładność pomiarów w opcji drugiej wpływają trzy elementy:

1. błędy pomiaru satelitarnego na punkcie pomiarowym wynikające z błędów instrumentalnych odbiornika (centrowania, pomiaru wysokości nad punktem, stałych instrumentalnych, jak np.

błędy centrum fazowego anteny czy dryftu zegara);

2. błędy generowania punktów wirtualnych (VRS) lub korekt strumieni poprawek, głównie powodowane refrakcją jonosferyczną i troposferyczną;

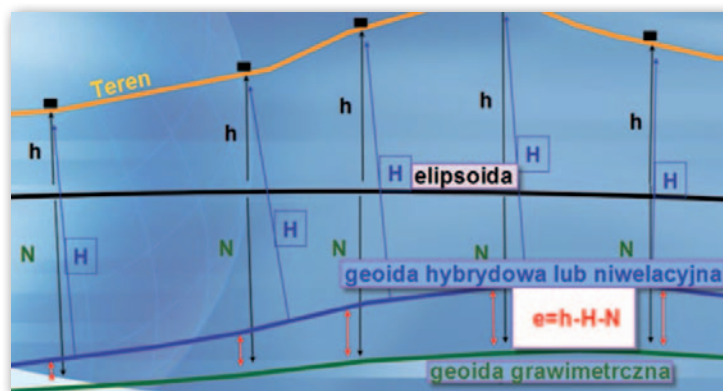
3. błąd N , czyli wielkość odstępów geoidy od elipsoidy w punkcie pomiarowym.

Należy przy tym podkreślić ważną cechę pomiarów wykorzystujących aktywne sieci geodezyjne (ASG). **Wykonawca pomiarów nie ma wpływu na drugi i trzeci składnik.** Usunięcie błędów refrakcyjnych to domena algorytmów na serwerach ASG. Na szczęście dla krótkich wektorów, którymi posługujemy się w czasie pomiaru, błędy te są całkowicie zaniedbywalne, zwłaszcza kiedy nasze wirtualne punkty bazowe VRS są zlokalizowane na obszarze obiektu.

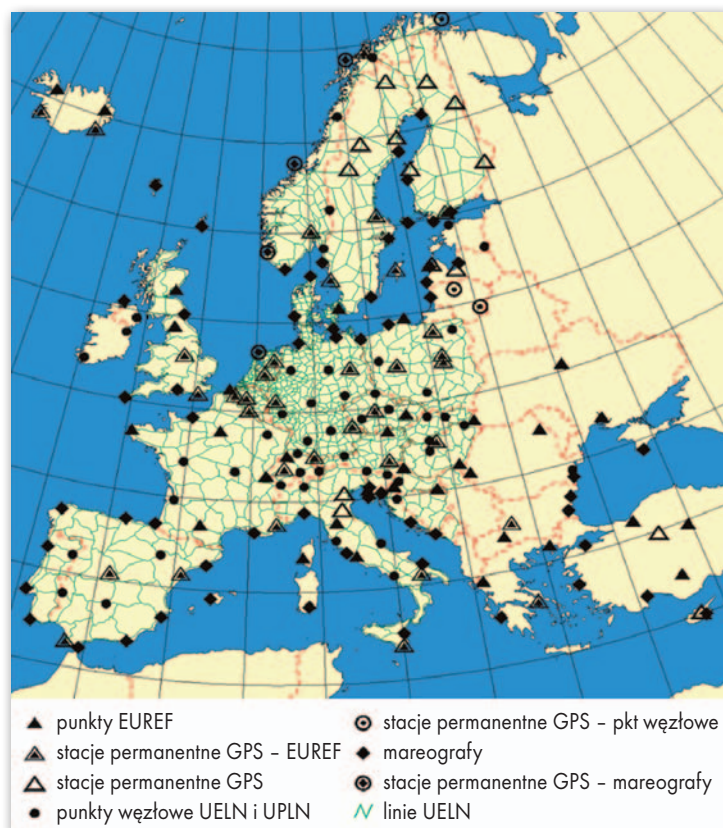
Z kolei krajowy model geoidy jest obligatoryjny – wykonawca pomiaru nie ma więc możliwości użycia innego modelu i musi stosować się do obowiązujących przepisów. Jeżeli kontrolne pomiary wykazują niedopuszczalne różnice w satelitarnych pomiarach wysokości, zwykle skutkuje to koniecznością powrotu do naziemnej niwelacji.

• Problem z wysokością

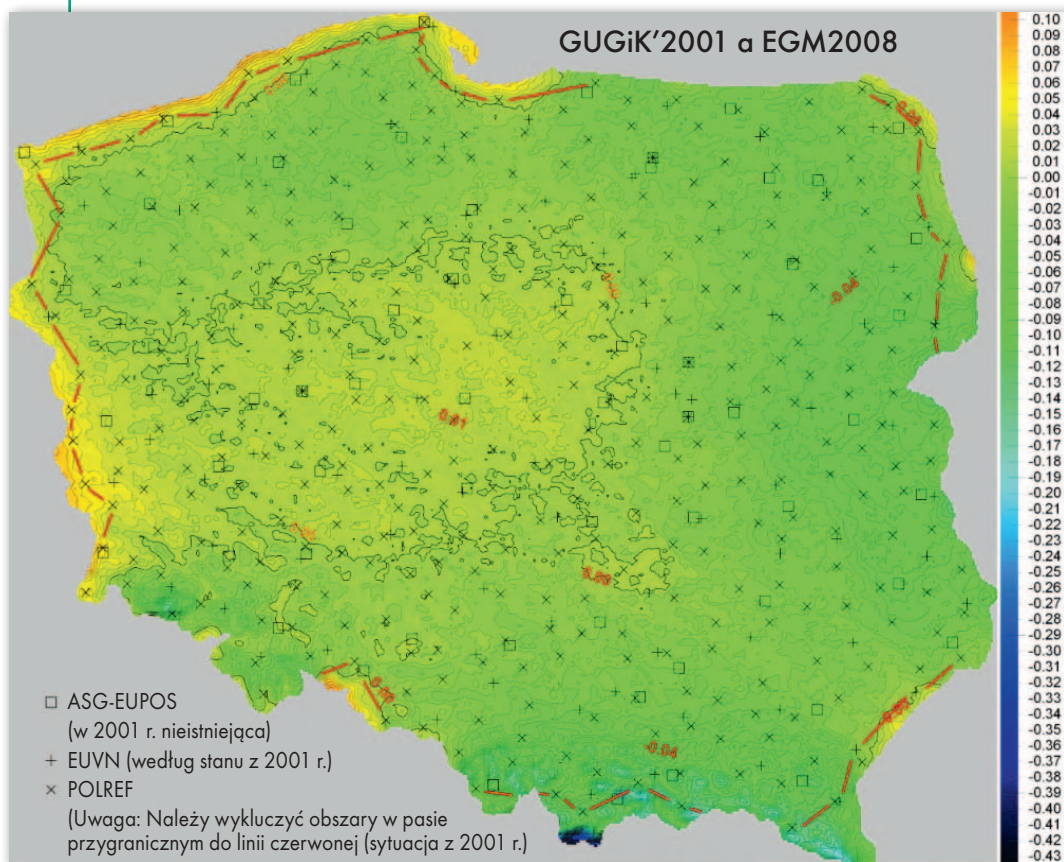
W ostatnich latach wszystkie znaczące aktywne sieci geodezyjne przeszły grun-



Rys. 1. Geoida hybrydowa (dopasowana do reperów) i geoida grawimetryczna (niedopasowana do reperów)



Rys. 2. Europejska sieć niwelacyjna zintegrowana z satelitarną w kampanii pomiarowej EUVN'97



Rys. 3. Porównanie geoidy niwelacyjnej GUGiK'2001 z modelem EGM08 (opis w metrach)

towną modernizację polegającą na włączeniu czterech systemów satelitarnych: GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Znacznie poprawiło to dokładność wyznaczenia położenia punktu w układach współrzędnych płaskich. Brakuje jednak poprawy w wysokościach, czego główną przyczyną jest brak modelu geoidy „centymetrowej”. O potrzebie opracowania algorytmów dających w rezultacie taki model geoidy pisało już dwadzieścia lat temu [7] i takie ambitne prace, mimo braku wystarczających danych geodezyjnych, były podjęte przez Departament Geodezji GUGiK w 2002 roku. Rozwiązaniem problemu jest modelowanie geoidy tzw. hybrydowej, czyli łączącej dane geodezyjne z grawimetrycznymi. Nazwa została wprowadzona przez amerykańską instytucję NGS (National Geodetic Survey). Aktualnie NGS przygotowuje model

GEoid18 dla planowanej na 2022 rok aktualizacji amerykańskiego układu odniesienia do ITRF22 [9].

• Geoida hybrydowa

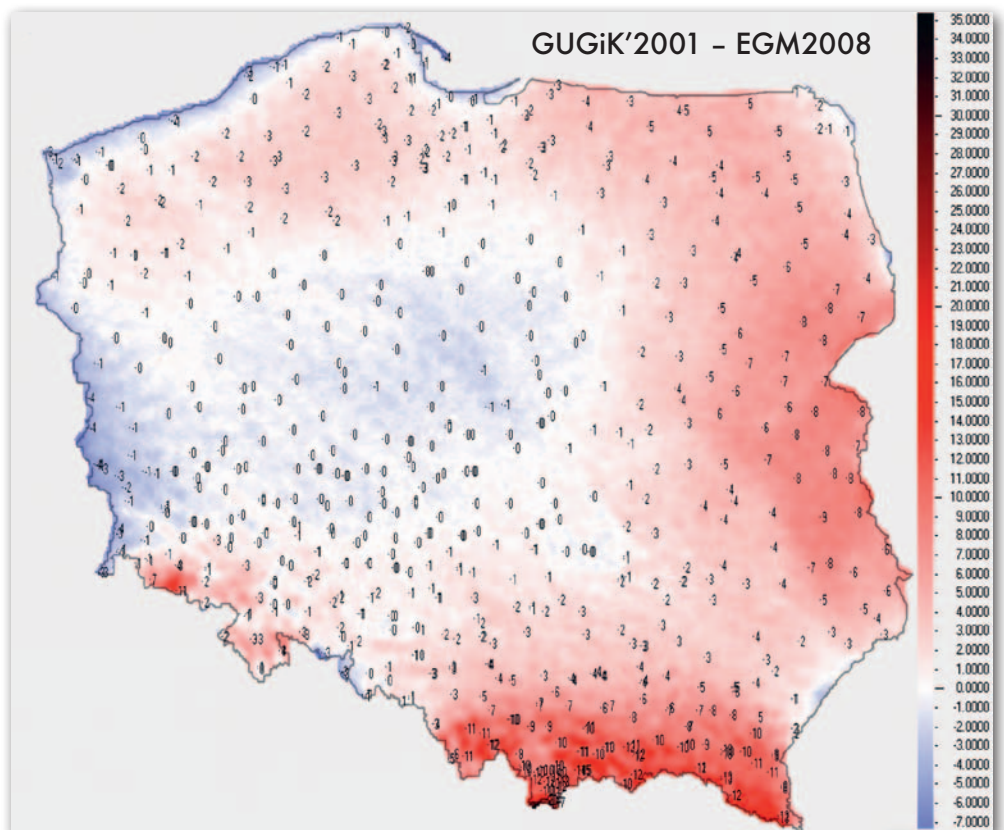
Pod pojęciem geoidy hybrydowej należy rozumieć

wyznaczenie powierzchni ekwipotencjalnej potencjału siły ciężkości Ziemi przez punkty dyskretne satelitar-no-niwelacyjne, czyli punkty z wysokościami elipsoidalnymi wyznaczonymi przy użyciu systemów satelitarnych

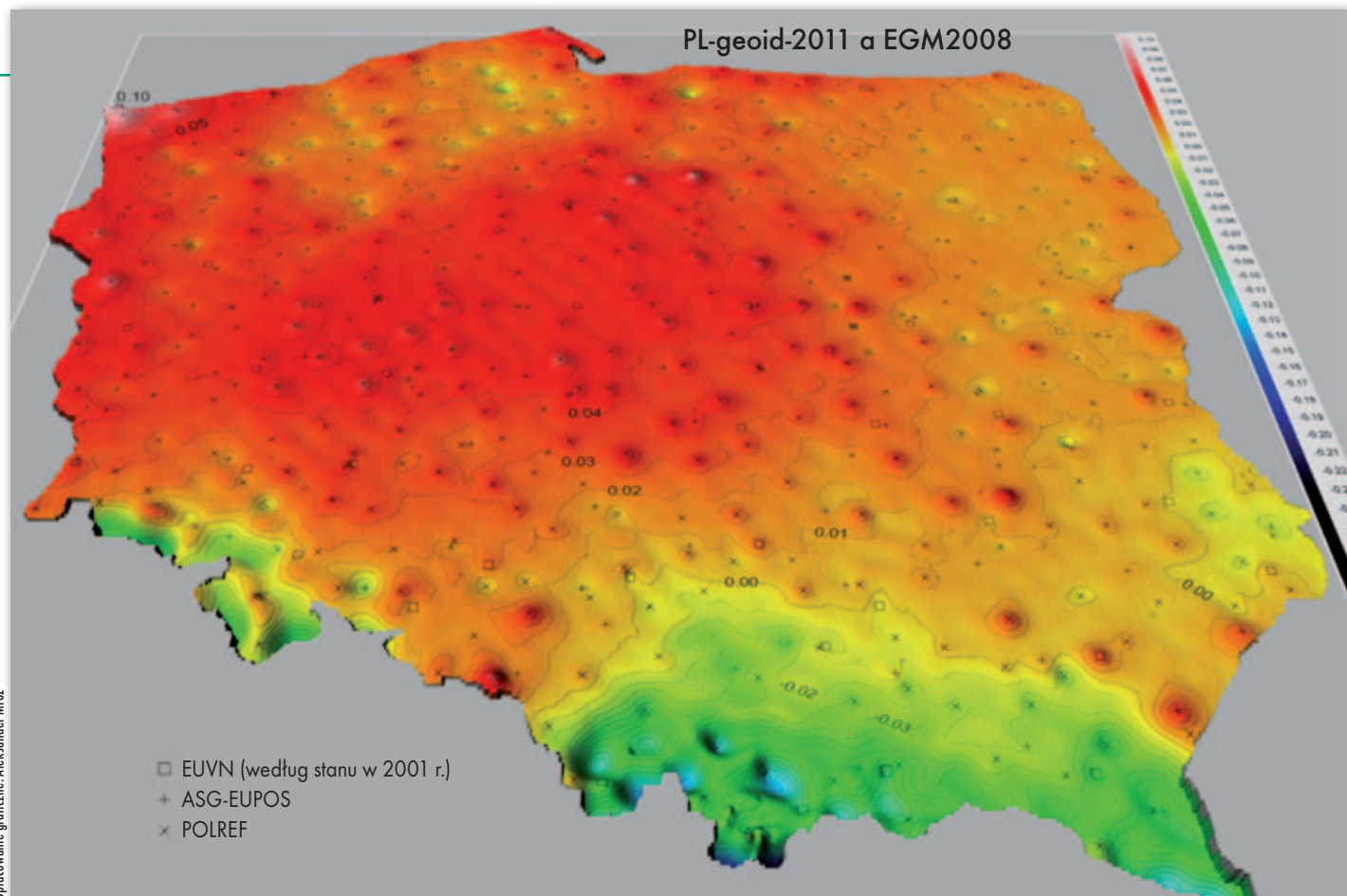
i wysokościami normalnymi wyznaczonymi za pomocą niwelacji geometrycznej. Wypełnienie obszarów między tymi punktami wzięte jest z przebiegu powierzchni modelu geoidy grawimetrycznej (rys. 1). To w skrócie podstawowa zasada aproksymacji jednej powierzchni drugą [8].

W geoidzie hybrydowej powierzchnia geoidy grawimetrycznej pełni funkcję pomocniczą modelowania obszaru. Obecnie najbardziej dokładną geoidą grawimetryczną o zasięgu globalnym jest model EGM2008 [9]. Jego dokładność na podstawie porównań globalnych szacuje się na kilkanaście centymetrów (GPS/niwelacja na 12 387 punktach), ale brak do tego szczegółowego opisu. Tak czy inaczej, mamy tu do czynienia z danymi geodezyjnymi o dokładności na poziomie 1 cm i grawimetrycznymi o rząd wielkości gorszymi.

Jak wynika z powyższego, o dokładności geoidy hybrydowej decydują dokładności danych geodezyjnych i odpowiednie algorytmy transformujące powierzchnię modelu do układu odniesienia wysokości. Obecnie w Polsce jest nim Kronsztad (PL-KRON86-NH), ale już niedługo, bo od



Rys. 4. Różnice wysokości geoidy niwelacyjnej GUGiK'2001 i modelu EGM08 w centymetrach



Rys. 5. Porównanie geoidy PL-geoid-2011 z modelem geopotencjalnym EGM08 dla wysokości normalnych (ciężkie warstwice różnic wysokości centymetrowe, opis w metrach)

przyszłego roku obowiązującym układem wysokościowym będzie PL-EVRF2007-NH, w którym wysokości normalne są odniesione do średniego poziomu Morza Północnego wyznaczonego dla mareografu w Amsterdamie zgodnie z rezolucją podkomisji EUREF z 2000 roku. To rezultat połączenia i wyrównywania krajowych sieci niwelacji precyzyjnej jako wspólnej sieci europejskiej. Sieć ta jest zintegrowana z europejską siecią satelitarną w kampanii pomiarowej EUVN'97 (rys. 2), w której wysokości elipsoidalne punktów są odniesione do systemów ITRS/ETRS w standardzie dokładności 1 cm.

• Opcjonalna geoida niwelacyjna GUGiK'2001

Pierwszą próbą modelowania krajowej geoidy hybrydowej była „geoida niwelacyjna 2001”, opracowana przez Departament Geodezji GUGiK w latach 1999-2001 na potrzeby budowy i wykorzystania aktywnej sieci geode-

zyjnej ASG-PL uruchomionej w 2002 roku [3]. Nazwę modelu „geoida niwelacyjna” przyjęto z terminologii angielskiej: *GPS/levelling geoid*, *GPS/BM's levelling*, gdzie *BM* oznacza reper (*bench-mark*). Z powodu niedokładności dostępnej geoidy grawimetrycznej zrezygnowano z określenia „hybrydowa”.

Geoida niwelacyjna GUGiK'2001 nie miała charakteru obligatoryjnego, tzn. można było stosować inne modele, które wykonawca pomiarów był w stanie udokumentować jako bardziej dokładne lokalnie, czyli zgodne z punktami osnowy wysokościowej. Ten warunek jest wart podkreślenia, bo celem nadrzędnym geoidy hybrydowej jest doprowadzenie rezultatów pomiarów satelitarnych do zgodności z istniejącymi na danym obszarze naziemnymi osnowami wysokościowymi.

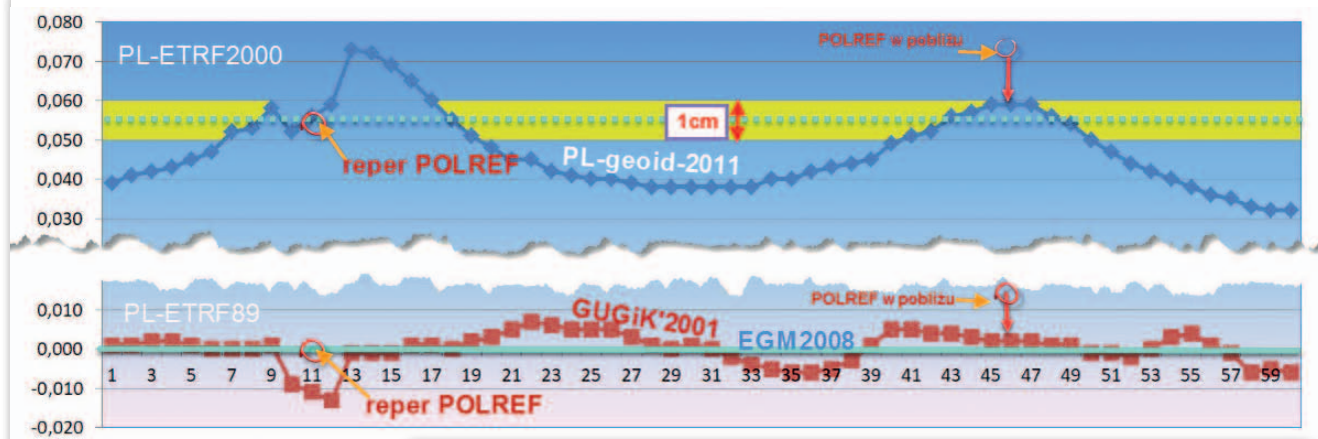
Jednak rozporządzenie Rady Ministrów z 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych zmieniło ten

stan rzeczy. Dla wszystkich pomiarów satelitarnych został wprowadzony obligatoryjnie nowy model geoidy hybrydowej PL-geoid-2011 dla układu wysokościowego PL-KRON86-NH opublikowany w Biuletynie Informacji Publicznej Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii.

• Obligatoryjna geoida hybrydowa PL-geoid-2011

Algorytm opracowania modelu PL-geoid-2011 jest opisany w publikacji [1], z której zacytujemy obszernie streszczenie: „Model quasi-geoidy PL-geoid-2011 został utworzony w oparciu o globalny model geopotencjalny EGM08 oraz krajowe osnowy satelitarno-niwelacyjne, w tym przede wszystkim stacje ASG-EUPOS i skojarzone z nimi punkty ekscentryczne. Istotnym elementem algorytmu był proces kalibracji (wpasowania) modelu globalnego do polskich układów odniesienia, czyli PL-ETRF2000 w zakresie wysokości geometrycznych oraz

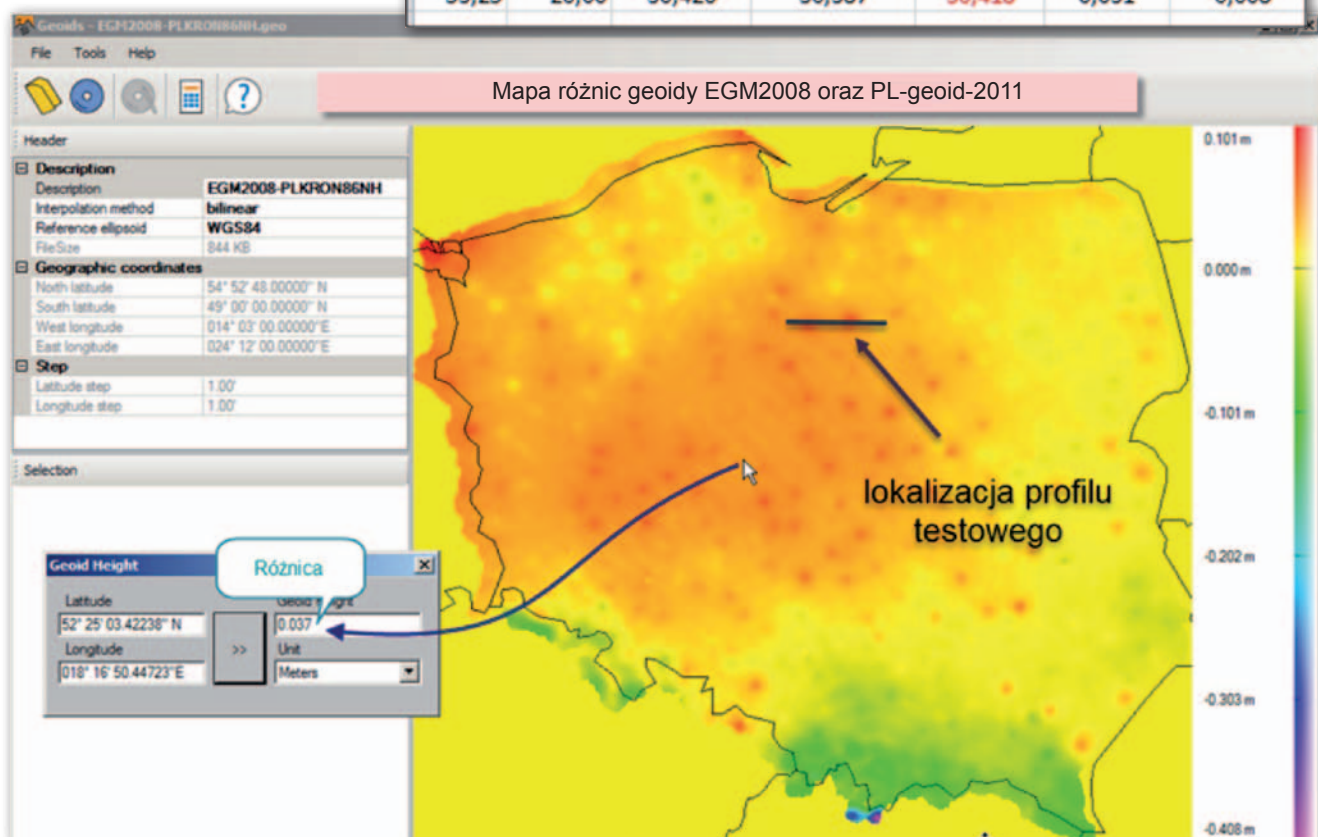
PL-KRON86-NH w zakresie wysokości normalnych. Zadanie to wykonano przy zastosowaniu transformacji 3D oraz wyrównawczych korekt lokalnych mierzących propagację odchyłek transformacji (punktów dostosowania) na węzły siatki modelu. Układ PL-ETRF2000 był reprezentowany przez punkty wyznaczone w ramach kampanii pomiarowej 2009-2012 (stacje + ekscentry ASG-EUPOS oraz zachowane punkty sieci EUVN, EU-REF-POL, POLREF). Niestety, wykorzystane wysokości normalne punktów mogą budzić pewne wątpliwości, gdyż były pozyskane w nawiązaniu do nieaktualnych już danych wysokościowych. Może to mieć istotny wpływ na dokładność określanych anomalii wysokości i wykonywanych niwelacji satelitarnych. Pilnym zadaniem w tym zakresie powinno być ponowne obliczenie wysokości normalnych stacji ASG-EUPOS na podstawie danych z najnowszych wyrównań podstawowych osnów wy-

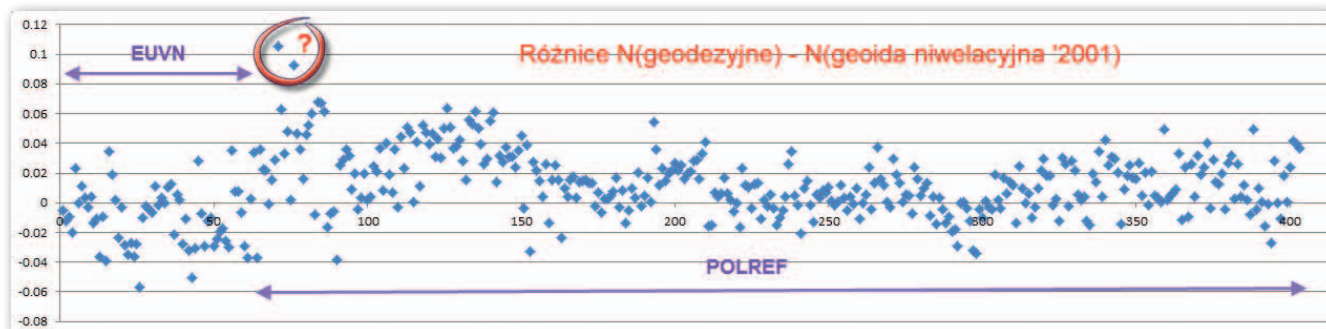


PRZYKŁAD

Różnice ΔN w profilu pionowym dla równoleżnika o szerokości $B = 53^{\circ}15'$ na odcinku jednego stopnia długości L : od 19° do 20° dla węzłów siatki interpolacyjnej $1'$ (na osi poziomej). Oś pozioma 0,000 to linia odniesienia węzłów globalnej geoidy grawimetrycznej, która w rzeczywistości jest krzywizną – od $N = 29,293$ m do $N = 30,418$ m (patrz tabela). Pokazano zniekształcenia modeli krajowych pod wpływem położenia dwóch punktów POLREF o współrzędnych: ($B = 53^{\circ}15'23''$, $L = 19^{\circ}12'23''$), ($B = 53^{\circ}17'25''$, $L = 19^{\circ}45'20''$). Na powyższym diagramie węzły PL-geo-2011 powinny być zbliżone do linii poziomej łączącej punkty POLREF, podobnie jak dla EGM08.

B	L	GUGiK'2001	PL-geo-2011	EGM2008	2011-2008	2001-2008
53,25	19,00	29,292	29,254	29,293	0,039	0,001
53,25	19,05	29,311	29,270	29,313	0,043	0,002
53,25	19,10	29,341	29,289	29,341	0,052	0,000
53,25	19,15	29,371	29,310	29,362	0,052	-0,009
53,25	19,20	29,412	29,338	29,411	0,073	-0,001
53,25	19,25	29,454	29,390	29,455	0,065	0,001
53,25	19,30	29,504	29,455	29,506	0,051	0,002
53,25	19,35	29,556	29,518	29,563	0,045	0,007
53,25	19,40	29,617	29,582	29,622	0,040	0,005
53,25	19,45	29,682	29,645	29,683	0,038	0,001
53,25	19,50	29,744	29,706	29,744	0,038	0,000
53,25	19,55	29,813	29,768	29,808	0,040	-0,005
53,25	19,60	29,881	29,833	29,876	0,043	-0,005
53,25	19,65	29,943	29,899	29,948	0,049	0,005
53,25	19,70	30,019	29,967	30,023	0,056	0,004
53,25	19,75	30,096	30,039	30,098	0,059	0,002
53,25	19,80	30,17	30,117	30,171	0,054	0,001
53,25	19,85	30,242	30,196	30,240	0,044	-0,002
53,25	19,90	30,301	30,267	30,305	0,038	0,004
53,25	19,95	30,37	30,331	30,364	0,033	-0,006
53,25	20,00	30,426	30,387	30,418	0,031	-0,008





Rys. 6. Zestawienie różnic na punktach sieci EUVN i POLREF w modelowaniu geoidy GUGiK'2001

sokościowych (wykonano takowe w roku 2013). Oczywiście, może to skutkować koniecznością odpowiedniej modyfikacji modelu. Aktualnie model PL-geoid-2011 (z afiliacją GUGiK) jest stosowany powszechnie w odbornikach GNSS, do wyznaczania wysokości normalnych na obszarze Polski”.

• Polskie geoidy a model EGM08

Jak wygląda wynik porównania geoidy niwelacyjnej GUGiK'2001 z modelem EGM08, pokazują rysunki 3 i 4. Na podstawie mapy różnic GUGiK'2001-EGM2008 można zauważyć, że spełnia ona kryterium geoidy „centymetrowej” dla prawie całego obszaru kraju [4] z wyjątkiem strefy przygranicznej, będącej poza zasięgiem sieci POLREF z powodu braku danych geodezyjnych. Większe różnice $e = h - H - N$ w części wschodniej nie świadczą wcale o jakichś większych błędach aproksymacji, bo krzywizny modelu są zachowane (rys. 4). Z kolei duże różnice w rejonie sieci TATRY to znana wada modelu geopotencjalnego dla terenów górskich, w podobnej skali rejestrowana także w opracowaniach amerykańskich.

Analogiczne porównanie wykonano dla geoidy hybrydowej PL-geo-2011. Zastrzeżenia do jakości tego modelu były już publikowane na łamach GEODETA [6], ale nie spotkały się ze zrozumieniem. Aby bardziej unaocznic ten problem, przedstawił w tamtym artykule mapę, jest tutaj pokazana w ujęciu

perspektywicznym (rys. 5). Widać wyraźnie, w jaki sposób niespójność sieci POLREF zniekształca model PL-geoid-2011. Dokumentacja opracowania modelu GUGiK'2001 nie wykazywała żadnych tego typu różnic w sieciach przyjętych do modelowania. Uwzględniono wtedy: 62 punkty EUVN, 341 punktów POLREF (w tym EUREF-POL), 23 punkty TATRY i 326 punktów WSSG [3]. Sieć POLREF jest tej samej dokładności co EUVN – porównanie różnic N pokazuje rys. 6.

• Jak to robią w Ameryce

Modele geoidy są bardzo ważnym elementem aktywnych sieci geodezyjnych. Niedokładności modeli degradują rezultaty wysokościowych pomiarów satelitarnych. Stąd ciągle prace nad ich doskonaleniem [10]. Dla przykładu w USA najnowszą wersją jest *hybrid model GEOID'18 beta* [11]. Jako ciekawostkę należy dodać, że amerykański National Geodetic Survey od 2014 r. sponsoruje coroczne kampanie gromadzenia danych wejściowych o nazwie *GPS on Bench Marks (GPSONBM)*, aby poprawić dokładność geoidy hybrydowej. Tylko w 2018 r. prawie 600 firm zgłosiło ponad 3800 4-godzinnych obserwacji GNSS dla około 2500 punktów referencyjnych. Te dodatkowe dane znacznie poprawiły model, zamykając luki w danych i rozwiązując konflikty w starszych danych. Tu nasuwa się retoryczne pytanie: czy podobne zasady nie mogłyby działać np. przy odbiorach operatorów w naszych

PODGiK-ach, w których pojawiają się odpowiednio użyteczne dane geodezyjne? Oczywiście przy założeniu, że dysponujemy dobrze opracowanymi algorytmami aktualizacji modelu.

• Mamy sporo do zrobienia

O tym, z jakimi pogorszeniami (pogorszenia jako przeciwnieństwo poprawki) mamy do czynienia w obowiązującym modelu PL-geoid-2011, możemy przekonać się na przykładzie (patrz ramka na s. obok). Taka kontrola jakości powinna być wykonana przed decyzją o wprowadzeniu modelu do obowiązkowego stosowania. Na przykładzie – w sposób możliwie najbardziej pogłębiony – wykazano, że jeśli wymagane pomiary kontrolne wykonamy np. na reperach zlokalizowanych w dalszej odległości między punktami, które były brane do modelowania geoidy PL-geoid-2011, możemy spodziewać się stałego pionowego przesunięcia, dochodzącego do kilku centymetrów.

Do tego niezbyt budującego wniosku można dodać wniosek optymistyczny. W opisie algorytmu [2] jest zawarty następujący komentarz: „Ponadto trzeba przetestować także inne formuły funkcji wagowej dla korekty lokalnej, by sprawić bardziej równomierną dystrybucję odchylek transformacji. Przykładowo, zamiast odwrotności kwadratu odległości, przyjąć odwrotność odległości w potęgę 1 lub 1/2”. Chyba nie ma przeszkód, by takie działania doprowadziły do powstania

geoidy „centymetrowej”. Potrzebna jest tylko aktywność decydentów.

Dr inż. Ryszard Pażus
dyrektor Departamentu
Geodezji GUGiK w latach
2000-2002

Literatura

1. Kądzaj R.: GEOIDPOL-2008CN – model i program quasigeoidy dostosowany do nowego układu PL-ETRF2000 [publ. internetowa 2(5)/2013 ALGORES-SOFT, www.geonet.net.pl, 12 sierpnia 2013], nota dodatkowa z maja 2014: Prezentowany model quasigeoidy GEOIDPOL-2008CN jest identyczny z modelem „urzędowym” PL-geoid-2011, który powstał właśnie z modelu GEOIDPOL2008CN poprzez jego obcięcie obszarowe do granic Polski z niewielkim 5-kilometrowym pasem zewnętrznym;
2. Kądzaj R.: Algorytm opracowania modelu PL-geoid-2011, Seminarium „Realizacja osnów geodezyjnych a problemy geodynamiki”, KG PAN i Wydział Geodezji i Kartografii PW, Grybów, 25-27 września 2014;
3. Pażus R., Osada E., Olejnik S.: Geoida niwelacyjna 2001, GEODETA 5/2002;
4. Pażus R.: Aktywnie i wirtualnie z geoidą, GEODETA 6/2011;
5. Pażus R., Mróz A., Saniewski J.: Z Azus Start+ osnowa w zasięgu ręki, GEODETA 3/2013;
6. Pażus R., Mróz A.: Wirtualnie z nową geoidą, GEODETA 5/2014;
7. Roman D.R., Smith D.A.: Recent Investigations Towards Achieving a One Centimeter Geoid, NOAA National Geodetic Survey, 2000;
8. Roman D.R.: Gravity, Geoid and Heights, US National Geodetic Survey, 2001;
9. Zilkoski D.B., Carlson E., Smith C.L.: Guidelines for Establishing GPS-Derived Orthometric Heights, NOAA Technical Memorandum NOS NGS 59, National Geodetic Survey, 2008;
10. Zilkoski D.B.: A look at NGS' experimental and hybrid geoid models, GPS World, December 2018;
11. Roman D., Ahlgren K.: GEOID18: Last U.S. Hybrid Geoid Prior to NAPGD2022, FIG Working Week 2019, Hanoi, Vietnam, April 22-26, 2019.