

Tomasz Świętoń

**OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA
SIATEK KOREKT LOKALNYCH DO OPRACOWANIA
JEDNOLITEGO ALGORYTMU TRANSFORMACJI
POMIĘDZY UKŁADAMI 1965 A 1992 I 2000
NA TERENIE POLSKI**

**POSSIBILITY OF USING GRIDS OF LOCAL SHIFTS
TO CREATION CONTINUOUS ALGORITHM
OF TRANSFORMATION BETWEEN COORDINATE
SYSTEMS 1965 AND 2000 ON AREA OF POLAND**

Streszczenie

Do transformacji pomiędzy układem 1965 a 2000 stosowane jest wiele różnorodnych algorytmów. Jest to przyczyną wielu problemów, związanych przede wszystkim z niespójnością na stykach transformowanych obszarów, kłopotami z implementacją licznych algorytmów w programach użytkowych i wygodą stosowania. W niniejszym artykule pokazano, że zasadnym byłoby utworzenie siatki korekt lokalnych, która pozwoliłaby na wykonanie transformacji w sposób jednolity i ciągły dla całej Polski, uwzględniając przy tym lokalne deformacje układu 1965, także na poziomie osnów szczegółowych. Wykazano, że taki sposób transformacji byłby dokładniejszy od dotychczas stosowanych ogólnopolskich metod transformacji i porównywalny z metodami stosowanymi lokalnie. Jednocześnie pokazano, że istnieje możliwość takiego opracowania siatek, aby wyniki transformacji były spójne z dotychczas stosowanymi metodami.

Słowa kluczowe: PUW 2000, 1992, 1965, elipsoida Krasowskiego, WGS84, transformacja, siatka korekt lokalnych, transformacja empiryczna, korekty lokalne

Summary

Nowadays, there are many various algorithms used to transform spatial data between coordinate systems 1965 and 2000. Ideal algorithm should be: continuous, accurate, fast, easy to use even not by professionals. It should model distortion of the coordinate system on both: high and low classes networks. Some of widely used algorithms guarantee continuous results over whole zone of 1965 but do not include local distortions of lower classes networks. The most popular example is "empirical" transformation algorithm, which fits to first and second class networks with few centimeter accuracy. On the other hand, surveyors often use locally fitted transformation which allows to achieve high accuracy but causes an inconsistency between two independently transformed areas.

The possible solution is the grid of shifts between coordinate systems. This algorithm is, already used in many countries (for example: USA, Canada, France) but has not been applied in Poland yet. In this article some methods of creation such grid are discussed and various tests on empirical data are described. Results show that it is desirable to create such grid on whole area of Poland.

Key words: PUV 1992, PUV 2000, Krassowski, WGS-84, local distortions, transformation, coordinate systems

WSTĘP

W chwili obecnej, na terenie Polski, podczas transformacji pomiędzy PUV 1965 a układami 2000 i 1992 stosowanych jest wiele, często bardzo różnych rozwiązań. Poszczególne jednostki administracji geodezyjnej starają się opracować algorytmy najlepiej dopasowane do lokalnych warunków. Takie podejście z jednej strony zapewnia wysoką dokładność przeprowadzonych obliczeń, ale z drugiej strony rodzi problemy związane z niespójnością transformacji na stykach obszarów oraz kłopoty z doбором właściwego rozwiązania na danym terenie. Istniejące, jednolite dla całego kraju algorytmy w niewystarczającym stopniu uwzględniają lokalne deformacje układu 1965, które na poziomie osnów szczegółowych wynoszą często nawet kilkanaście centymetrów. Rozwój nowych technik pomiarowych, w szczególności technologii satelitarnych i systemu ASG-EUPOS sprawia, że szczególnego znaczenia nabrało opracowanie metod transformacji zapewniających zarówno wysoką dokładność i eliminację lokalnych deformacji układu jak i ciągłość transformacji na dużym obszarze oraz wygodę użytkownika.

METODYKA

Najpopularniejsze metody stosowane podczas transformacji współrzędnych pomiędzy układem 1965 a 2000 to w chwili obecnej:

– **METODA 1: transformacja „matematyczna”** – oparta jedynie o definicję odwzorowań w poszczególnych strefach układu 1965 i w układach doce-

lowych, oraz o wyznaczone parametry transformacji pomiędzy elipsoidami Krasowskiego i WGS-84. Najczęściej stosowana jest tutaj 7 parametrowa transformacja Burshy-Wolfa. Niewątpliwą zaletą tak przeprowadzonej transformacji jest jej uniwersalność i ciągłość w każdej ze stref. Łatwość zdefiniowania parametrów transformacji w wielu, powszechnie stosowanych na świecie programach użytkowych sprawia, że jest to metoda powszechnie dostępna praktycznie dla każdego. Niestety, tak przeprowadzona transformacja w żaden sposób nie modeluje deformacji układu 1965, dlatego jej faktyczna dokładność nie przekracza kilkudziesięciu centymetrów. To ogranicza stosowanie tej metody jedynie do zastosowań GIS i nie pozwala wykorzystać jej w zadaniach z zakresu geodezji, gdzie oczekiwana jest zdecydowanie wyższa dokładność.

– **METODA 2: transformacja „empiryczna”** – algorytm opracowany i opublikowany przez prof. dr hab. inż. Romana Kadaję bazuje na wielomianach wysokiego stopnia wpasowanych w punkty osnów podstawowych. Wielomiany zostały określone dla każdej ze stref układu 1965 niezależnie, dzięki czemu zapewniona została ciągłość transformacji wewnątrz strefy ale spowodowało to pewne problemy na styku dwóch stref. Metoda dosyć dobrze (w granicach ok. 3 cm) modeluje deformacje układu 1965 na poziomie osnów I i II klasy, i zapewnia zdecydowanie wyższą dokładność niż transformacja „matematyczna”. Algorytm ten posiada jednak pewne wady. Przede wszystkim nie uwzględnia deformacji układu na poziomie osnów niższych klas, co znacznie obniża rzeczywistą dokładność tej metody. W dużej mierze to osnowy szczegółowe i pomiarowe stanowiły podstawę do tworzenia wykorzystywanych obecnie map, dlatego pominięcie ich deformacji może być źródłem błędów. Dodatkowym problemem jest implementacja algorytmu w programach użytkowych. O ile większość rodzimych autorów oprogramowania stosuje transformację empiryczną w swoich programach (SWDEKonwerter, EWMAPA, GeoInfo, GEONET itp...), to wykorzystanie go w wielu popularnych na świecie aplikacjach jest często niemożliwe.

– **METODA 3: transformacja oparta o osnowy szczegółowe na danym obszarze** – najczęściej opracowany jest jednolity algorytm dla pewnego obszaru: powiatu lub miasta i następnie wykorzystywany do wszystkich prac geodezyjnych na tym terenie. Mogą tutaj być stosowane rozmaite algorytmy, jednak najczęściej wykorzystuje się transformacje w trzech etapach (rys. 1).



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 1. METODA 3 – trzyetapowa transformacja pomiędzy układem 1965 a układem 2000

Współrzędne w układzie 1965 transformowane są do układu 2000 przy pomocy powszechnie dostępnej transformacji empirycznej, następnie wykonywana jest dodatkowa transformacja konforemna 1 lub 2 stopnia oraz stosowane są korekty posttransformacyjne Hausbrandta. Jako punkty dostosowania w układzie wtórnym przyjęte są, wyznaczone wcześniej innymi metodami, katalogowe współrzędne w układzie 2000. Takie podejście zapewnia likwidację deformacji układu 1965 na poziomie osnów szczegółowych. Jak wykazują badania [Świętoń 2010], metoda ta pozwala modelować deformacje układu z dokładnością powyżej 3 cm. Transformacja empiryczna zapewnia podobną dokładność ale jedynie na poziomie osnów podstawowych, bez uwzględnienia istotnych deformacji osnów niższych klas.

Niewątpliwą zaletą tej metody jest, oprócz wysokiej dokładności, zastosowanie korekt posttransformacyjnych, dzięki czemu punkty dostosowania (osnowy) transformowane są dokładnie do swoich współrzędnych katalogowych.

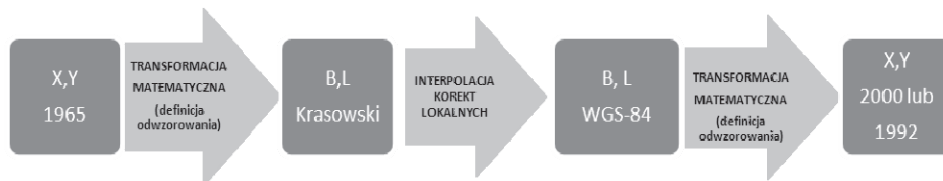
Do wad tej metody należy: utrudnione stosowanie w powszechnej praktyce geodezyjnej. Brak standardowych narzędzi pozwalających wykonać transformację w większości dostępnych programów. Częściowo problem ten jest rozwiązywany dzięki specjalnym aplikacjom wykonującym taką transformację, udostępnianym dla wykonawców prac geodezyjnych. Istotną wadą jest także niespójność transformacji na granicy dwóch obszarów (np. granicy powiatów) oraz konieczność pamiętania o doborze odpowiedniego algorytmu dla danego terenu.

– **METODA 4: transformacja w oparciu o lokalnie dobrane punkty dostosowania** - transformacja standardowymi algorytmami (konforemna, afiniczna, z korektami posttransformacyjnymi lub bez) w oparciu o punkty dostosowania dobrane stosownie do zadania. Zaletą takiego podejścia jest wysoka dokładność (zależna od jakości dobranych punktów dostosowania) oraz możliwość wykonania jej w większości programów geodezyjnych i GIS. Wadą jest niespójność tak wykonanej transformacji na sąsiadujących ze sobą obiektach, oraz często pracochłonność związana z pozyskaniem współrzędnych punktów łącznych. Dodatkowo od osoby wykonującej obliczenia wymagana jest wiedza, pozwalająca na odpowiedni dobór punktów i algorytmu transformacji, co ogranicza jej stosowanie jedynie do użytkowników posiadających pewne kwalifikacje.

SIATKA KOREKT LOKALNYCH

Rozwiązaniem pozwalającym na wyeliminowanie części problemów wynikających ze stosowania wymienionych powyżej algorytmów jest wykorzystanie siatki (grid) korekt lokalnych. Metoda ta stosowana z powodzeniem w wielu krajach (np. NADCON w Stanach Zjednoczonych [Dewhurst 1990], NTv2 w Kanadzie [Junkins, Farley 1995], NTF \leftrightarrow RGF93 we Francji [IGN 1997]) w Polsce praktycznie nie jest wykorzystywana. Polega na utworzeniu regularnej

siatki zawierającej przesunięcia pomiędzy współrzędnymi geograficznymi w dwóch układach odniesienia. Algorytm tak wykonywanej transformacji jest podobny do transformacji „matematycznej”, z tą różnicą, że zamiast 7-parametrowej transformacji Burshy-Wolfa pomiędzy elipsoidami, wprost interpolowane są na podstawie siatki różnice (przesunięcia) współrzędnych geograficznych. Różnice te „zawierają w sobie” zarówno zniekształcenia wynikające z samej definicji poszczególnych elipsoid jak i deformacje wynikające z realizacji obu układów.



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2. Transformacja wykonana przy pomocy siatki korekt lokalnych

Takie podejście do problemu transformacji może być korzystniejsze od wymienionych wcześniej metod z kilku powodów.

Możemy otrzymać jeden algorytm transformacji spójny i ciągły dla terenu całej Polski. Siatka opiera się na przesunięciach współrzędnych geograficznych dlatego jest niezależna od odwzorowania. Nic nie stoi na przeszkodzie, żeby opracować jedną siatkę dla wszystkich stref układu 1965 łącznie.

W ramach jednej siatki, przy odpowiednim doborze rozmiaru oczka i metody interpolacji korekt w oczkach, można zgromadzić dane o różnych dokładnościach. Przykładowo na obszarze na którym wyznaczone są wiarygodne współrzędne osnów niższego rzędu (np. z wyrównania archiwalnych danych obserwacyjnych lub z ponownego pomiaru) siatka może być wyliczana w oparciu o osnowę szczegółową lub nawet pomiarową, na pozostałych obszarach, jedynie w oparciu o osnowy podstawowe.

Metoda jest stosunkowo prosta w implementacji, dlatego należy się spodziewać że szybko zostałaby zastosowana w programach użytkowych a przez to łatwo dostępna dla dużej szerokiej grupy odbiorców.

Istnieje możliwość poprawiania siatek wraz z pojawieniem się nowych, dokładniejszych danych dla poszczególnych obszarów. Nie jest to bez znaczenia z uwagi na organizację służby geodezyjnej w Polsce. Mimo upływu terminu wskazanego w [Rozporządzenie RM, 2000] nadal wiele ODGiK nie stosuje układu 2000 na swoim terenie i nie określiło sposobu transformacji danych w zasobie. Należy się spodziewać, że jeszcze przez pewien czas będą pojawiały się dodatkowe dane pozwalające podnieść dokładność transformacji w poszczególnych powiatach. Ewentualna aktualizacja siatki mogłaby dotyczyć jedynie

wskazanego obszaru (np. pojedynczego powiatu) i pozostać bez wpływu na tereny sąsiednie.

Podczas stosowania takiej metody pojawiają się też pewne wątpliwości:

a – jak dokładność tak przeprowadzonej transformacji ma się do dotychczas stosowanych algorytmów?

b – czy kolejny algorytm transformacji, który przecież nigdy nie będzie idealnie spójny z algorytmami stosowanymi wcześniej nie będzie powodował problemów z np. topologią transformowanych map numerycznych?

TESTY

W celu odpowiedzi na powyższe pytania zostały przeprowadzone testy na rzeczywistych danych z terenu Polski. W ramach pierwszego z testów opracowano siatkę dla terenu województwa wielkopolskiego jedynie w oparciu o osnowę I i II klasy. Przed utworzeniem siatki ze zbioru wszystkich punktów usunięto 100 losowo wybranych, które następnie zostały potraktowane jako punkty testowe. Wartości przesunięć współrzędnych (korekt lokalnych) w oczkach siatki obliczone zostały przy pomocy modelu minimalnej krzywizny, którego parametry wyznaczone są w wyniku rozwiązania układu równań zestawionych w n -punktach (w tym wypadku osnow) [Osada 2002]:

$$D_j = a_{n+1} + a_{n+2}x_j + a_{n+3}y_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i d_{ij}^2 \ln d_{ij}^2$$

z warunkami:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 0 \quad \sum_{i=1}^n a_i x_i = 0 \quad \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0$$

gdzie:

$$d_{ij}^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2$$

D_j – szukane przesunięcie współrzędnych

Powyższy model został zastosowany dwukrotnie: raz do określenia siatki przesunięć współrzędnej B i drugi raz dla L. Przyjęto zasadę, że wartości przesunięć współrzędnych w transformowanych punktach testowych zostają obliczone interpolacją biliniową [Osada 2005]:

$$f(P) \approx \frac{f(Q_{11})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y_2 - y) + \frac{f(Q_{21})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y_2 - y) +$$

$$\frac{f(Q_{12})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y - y_1) + \frac{f(Q_{22})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y - y_1)$$

gdzie:

$f(P)$ – szukana wartość przesunięcia współrzędnych B lub L (korekt lokalnych),

$f(Q_{ij})$ – wartości przesunięć w poszczególnych oczkach siatki,

x, y – współrzędne poszukiwanego punktu,

x_i, y_i – współrzędne oczek siatki.

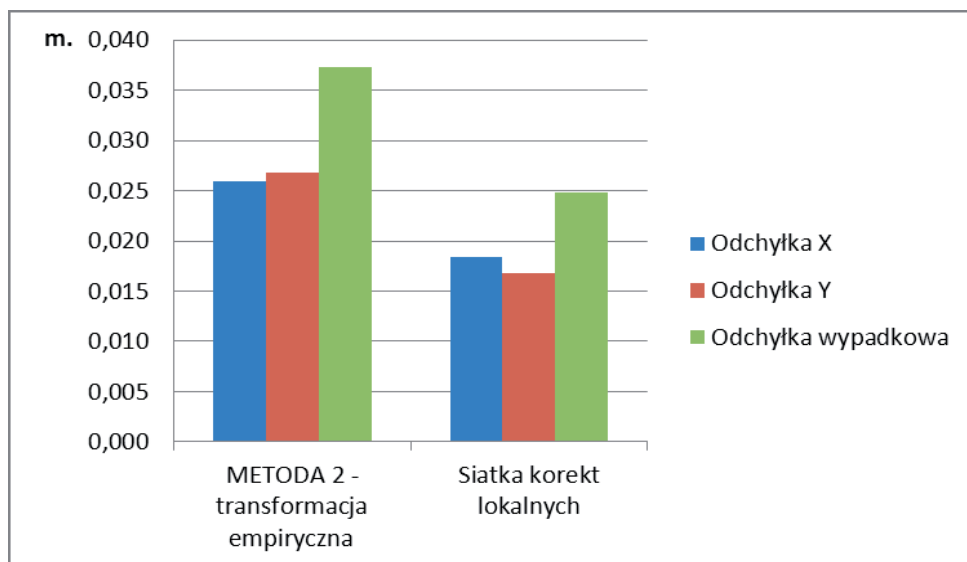
Przyjęto rozmiar oczka siatki 0.02 stopnia co odpowiada odległości około 1300-2200 metrów. Punkty testowe przetransformowano przy pomocy transformacji empirycznej i siatki korekt lokalnych. Otrzymane wyniki porównano ze współrzędnymi katalogowymi w układzie 1992. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.

B	L	dB	dL
51.10	18.88	-0.0003191990	-0.0017947126
51.10	18.90	-0.0003189164	-0.0017954564
51.10	18.92	-0.0003186605	-0.0017964408
51.10	18.94	-0.0003183854	-0.0017965080
51.10	18.96	-0.0003181231	-0.0017968760
51.10	18.98	-0.0003178281	-0.0017969692
51.10	19.00	-0.0003193815	-0.0017943523
51.12	15.80	-0.0003511480	-0.0018169868
51.12	15.82	-0.0003509381	-0.0018179397
51.12	15.84	-0.0003511963	-0.0018176020
51.12	15.86	-0.0003515899	-0.0018171519
51.12	15.88	-0.0003518973	-0.0018162777
51.12	15.90	-0.0003516542	-0.0018160615
51.12	15.92	-0.0003519020	-0.0018161088
51.12	15.94	-0.0003516875	-0.0018165249

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 3. Fragment siatki wygenerowanej dla terenu województwa wielkopolskiego

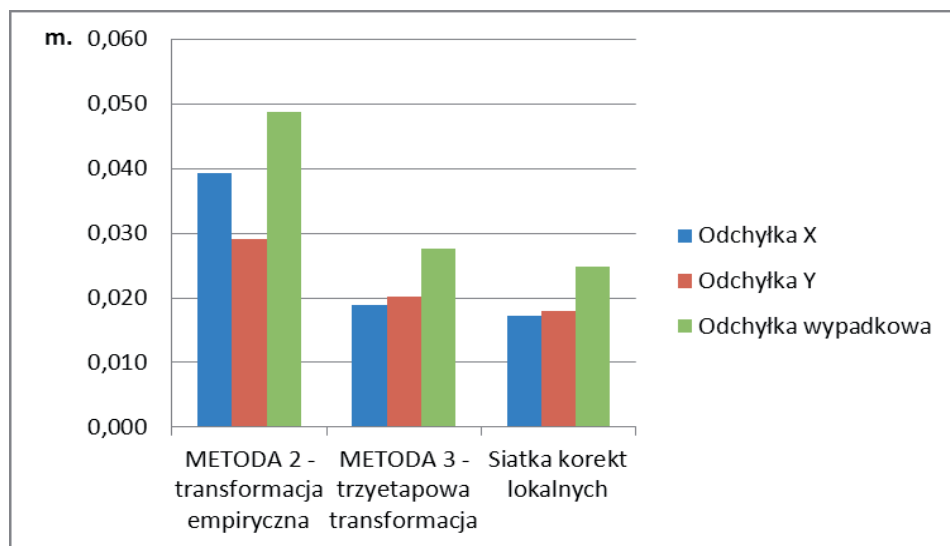
Rezultaty wskazują, że zastosowanie siatki korekt lokalnych znacznie lepiej modeluje deformacje układu 1965 niż dotychczas stosowane algorytmy. Odchyłka wypadkowa transformacji wykonanej przy pomocy siatki korekt nie przekracza 2.5 cm podczas gdy dla metody empirycznej to około 3.7 cm. Należy przy tym pamiętać, że punktami testowymi były tutaj jedynie punkty osnów podstawowych dlatego powyższe wyniki mówią bardziej o jakości modelowania deformacji układu 1965 na poziomie osnów podstawowych niż o rzeczywistej dokładności transformacji.



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 4. Porównanie wyników transformacji empirycznej i regularną siatką korekt na terenie województwa wielkopolskiego. Jako punkty testowe przyjęto punkty I i II klasy

W ramach kolejnego testu przygotowano siatkę w oparciu o punkty osnowy I, II i III klasy powiatu rzeszowskiego. Punkty osnowy III klasy posiadają współrzędne w układzie 2000 wyznaczone w oparciu o wyrównanie obserwacji archiwalnych. W chwili obecnej na terenie powiatu, do transformacji danych geodezyjnych stosowana jest trzyetapowa transformacja opierająca się o punkty osnowy szczegółowych (METODA 3). Podczas tworzenia siatki i interpolacji punktów wewnątrz oczka siatki zastosowano algorytmy identyczne jak w poprzednim teście. Jedyną różnicą to wielkość oczka: ze względu na większe zagęszczenie punktów, zdecydowano się przyjąć wielkość 0.005 stopnia. Podobnie jak w poprzednim teście przed utworzeniem siatki usunięto ze zbioru osnowy 100 losowych punktów, które następnie potraktowano jako punkty testowe. Następnie punkty transformowano przy pomocy opisanych wcześniej metod (empirycznej i trzyetapowej transformacji opartej o punkty osnowy szczegółowej) oraz siatki korekt lokalnych. Wyniki przedstawione na rysunku 5 wskazują, że transformacja przy pomocy siatki korekt lokalnych daje dokładności bardzo zbliżone do metod stosowanych w chwili obecnej na terenie powiatu, i znacznie lepsze od metody empirycznej.



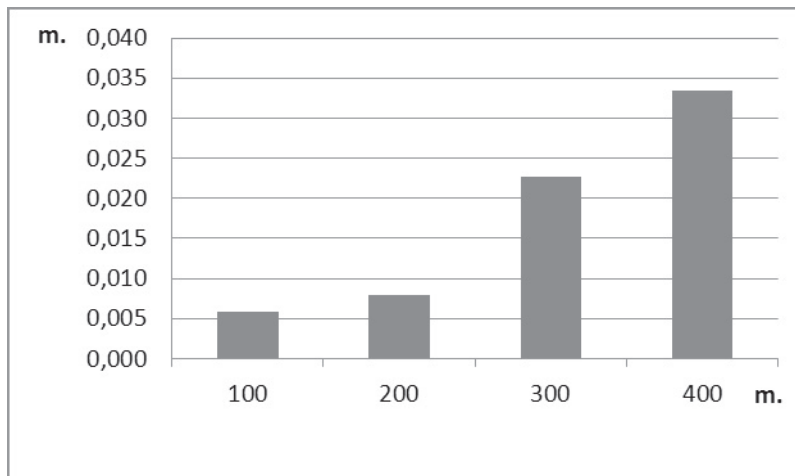
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5. Porównanie wyników transformacji na terenie powiatu rzeszowskiego. Jako punkty testowe przyjęto punkty I, II i III klasy

W pewnych wypadkach, istotnym powodem przemawiającym przeciwko stosowaniu siatki, może być brak idealnej zgodności współrzędnych z wynikami algorytmów stosowanymi dotychczas. Dotyczy to szczególnie sytuacji w których mapa numeryczna została już przetransformowana do układu 2000 innym algorytmem. Nawet niewielkie niespójności mogą generować uciążliwe błędy w topologii mapy. Oczywiście nie jest możliwym takie przygotowanie siatki korekt lokalnych aby współrzędne transformowane zgadzały się idealnie z jakimkolwiek innym algorytmem, niemniej jednak wiele programów wykorzystywanych do prowadzenia mapy numerycznej zaokrągla współrzędne do 1 cm. Oznacza to, że gdyby udało się wytworzyć siatkę, która "symulowałaby" na pewnym obszarze inny algorytm z dokładnością do centymetra, nie powinien pojawić się problem niezgodności topologicznej. Można by korzystać z wszystkich zalet siatki korekt bez obaw o niespójność z wcześniej stosowanymi algorytmami.

Aby uzyskać taką siatkę, należy przede wszystkim obliczyć wartości korekt w poszczególnych oczkach bazując nie na punktach osnowy i modelu minimalnej krzywizny (jak w poprzednich testach) ale wprost przy wykorzystaniu symulowanego algorytmu transformacji. Przy takim podejściu, stopień zgodności dwóch algorytmów zależy jedynie od wielkości oczka w siatce. Im mniejsze oczko, tym większa spójność algorytmów. Testy przeprowadzone dla siatek o różnych rozmiarach oczek na terenie powiatu rzeszowskiego (rys. 6)

wskazują, że aby różnica wyników nie przekraczała 1 centymetra należy zastosować oczko siatki o rozmiarze nie większym niż 200 m. Utworzenie siatki o takiej gęstości dla terenu całej Polski może być trudne, chociaż nie jest niemożliwe (sam plik z tak olbrzymim gridem zawierającym przesunięcia współrzędnych B i L miałby objętość ok. 200MB). Sensownym wydawałoby się raczej znalezienie innego rozwiązania, np. utworzenie siatki o zmiennej gęstości.



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6. Maksymalne rozbieżności na transformowanych punktach testowych pomiędzy algorytmem opartym o osnowy szczegółowe a siatką korekt lokalnych

WNIOSKI

Przeprowadzone powyżej rozważania i testy wskazują, że zasadne byłoby opracowanie jednej siatki korekt lokalnych układu 1965 dla terenu całej Polski. Dotychczas stosowane, różnorodne algorytmy transformacji z układu 1965 do 2000 i 1992 rodzą pewne problemy związane ze spójnością i wygodą użytkownika. Zaprezentowana metoda transformacji, posiada istotne zalety, z których najważniejsze to: jednolitość na terenie całego kraju, niezależność od stref układu 1965, wygoda użytkownika, dokładność zdecydowanie wyższa od często stosowanej metody empirycznej i porównywalna z metodami opartymi o osnowy szczegółowe oraz możliwość połączenia w ramach jednej metody danych pochodzących z różnych źródeł. Pomimo pewnych wad (nieidealna spójność z dotychczas stosowanymi algorytmami) wydaje się, że opracowana siatka korekt znalazłaby wiele zastosowań zarówno w geodezji jak i w innych dziedzinach wymagających przeliczenia współrzędnych pomiędzy układami z wysoka dokładnością.

BIBLIOGRAFIA

- Dewhurst W. T. *NOAA Technical Memorandum NOS NGS-50*, National Geodetic Center 1990
Institut Geographique National *Grille de parametres de transformation de coordonnees* 1997
Junkins D.R., Farley S.A. *National Transformation Version 2*, Geodetic Survey Division Geomatics Canada 1995
Osada E. *Geodezja* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002
Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, Dz. Ust. Nr 70, Warszawa 2000
Świętoń T. *Analiza wybranych algorytmów określenia korekt lokalnych układu 1965*. Infrastruktura I Ekologia Terenów Wiejskich nr 12/2010, Polska Akademia Nauk, oddział w Krakowie, Kraków 2010

Mgr inż. Tomasz Świętoń
Wyższa Szkoła Inżynieryjno-Ekonomiczna
ul. Miłocińska 40
35-232 Rzeszów
tel. 660594380
geonet@geonet.net.pl