

Nowa mapa współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski – artykuł recenzowany

# CAŁY KRAJ SIĘ OBSUWA

Do wyznaczenia modelu pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski wykorzystano dane z trzeciej i czwartej kampanii niwelacji precyzyjnej oraz dane ze stacji mareograficznych we Władysławowie, Ustce, Kołobrzegu i Świnoujściu. Okazało się, że w Polsce nie występują ruchy dodatnie. Największe ujemne ruchy pionowe, przekraczające -5 mm/rok, stwierdzono w okolicach Inowrocławia i Rzeszowa.

KAMIL KOWALCZYK

Trwają obecnie prace nad realizacją drugiego etapu unifikacji sieci niwelacyjnych w Europie, tj. nad kinematycznym wyrównaniem sieci UELN-95 (rezolucja nr 5 sympozjum EUREF, Praga 1999 r.). Do wykonania takiego wyrównania konieczny jest model ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Europy.

Dla obszaru Polski ruchy takie dwukrotnie wyznaczał Tadeusz Wyrzykowski z Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie, ostatnio blisko 20 lat temu. Ukończenie kolejnej, czwartej kampanii niwelacji precyzyjnej oraz zgromadzenie pokaźnego zbioru danych mareograficznych pozwoliło na podjęcie próby ponownego wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski i opracowania ich modelu. W pierwszym etapie wyznaczono względne ruchy pionowe skorupy ziemskiej odniesione do mareografu we Władysławowie. Następnie wyznaczono ruchy pionowe ma-

reografu we Władysławowie względem średniego poziomu Morza Bałtyckiego. Do wyznaczenia ruchów mareografu wykorzystano elementy analizy statystycznej: średnią ruchomą oraz regresję liniową. Ostatecznie wyznaczono ruchy pionowe reperów sieci względem średniego poziomu morza. Do opracowania modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski zastosowano interpolację metodą kolokacji.

Opracowany model jest dla geodetów, geofizyków i geologów źródłem cennych informacji o zachowywaniu się skorupy ziemskiej. Model ten powinien również umożliwić stworzenie kinematycznej sieci wysokościowej w Polsce.

## ● PRZYCZYNY RUCHÓW PIONOWYCH

Jak wiadomo, ruchy pionowe są wywołane procesami geofizycznymi, a także procesami wynikającymi z działalności człowieka [Vaniček, Krakiwsky, 1986]. Procesy geofizyczne (rys. 1) to ruchy skorupy ziemskiej spowodowane czynnikami zewnętrznymi i wewnętrznymi,

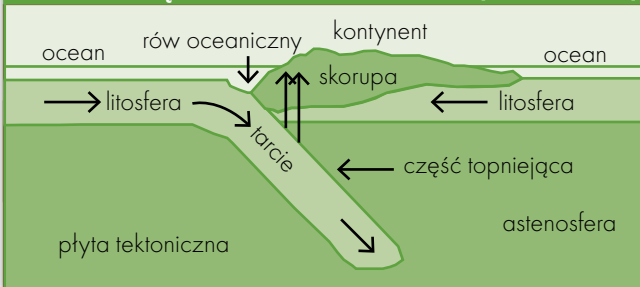
takimi jak powstawanie i znikanie lodolodów, zmiany ilości wód w zbiornikach, sedymentacja, erozja, zwiększanie obciążenia skorupy w rezultacie ruchów górotwórczych, a także zmiany minerałów zachodzące w litosferze oraz prądy konwekcyjne w płaszczu Ziemi.

Sztuczne procesy (rys. 2) wywołujące ruchy pionowe skorupy ziemskiej związane są z działalnością człowieka, taką jak wydobywanie surowców, osuszanie bądź nawadnianie terenu, komunikacja, a także testy broni atomowej.

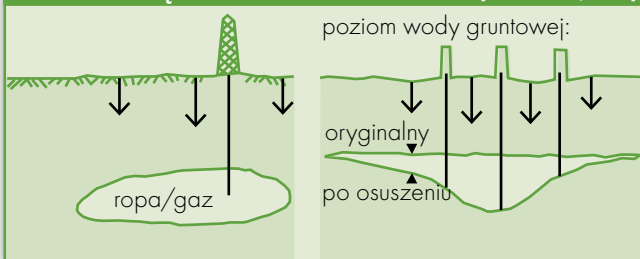
## ● OBSERWOWANE, „NIWELACYJNE” I ABSOLUTNE RUCHY PIONOWE

Jeśli w sieci niwelacyjnej przyjmiemy, że pewien reper jest stabilny i jego wysokość nie ulega zmianie w czasie, to ruchy pionowe  $v_r$  wyznaczone względem takiego reperu nazywamy ruchami względnymi. Jeśli ruchy pionowe zostaną wyznaczone względem średniego poziomu morza, to nazywamy je „obserwowanymi” [Kakkuri, 1987]. „Obserwowane” ruchy pionowe skorupy ziemskiej

## 1. PRZYKŁAD PROCESÓW GEOFIZYCZNYCH POWODUJĄCYCH RUCHY PIONOWE [LEONHARD, 1983]



## 2. PRZYKŁAD SZTUCZNYCH PROCESÓW POWODUJĄCYCH RUCHY PIONOWE [LEONHARD, 1983]



$v_o$  można wyznaczyć, dodając do ruchów względnych  $v_r$  (wyznaczonych z niwelacji) zmiany poziomu morza na stacjach mareograficznych:

$$v_o = v_r + v_m$$

gdzie:  $v_m$  – ruch pionowy łąty mareografu względem średniego poziomu morza.

W Polsce maksymalne „obserwowane” ruchy pionowe skorupy ziemskiej są oceniane na -4 mm/rok [Wyrzykowski, 1987]. Tak zdefiniowane ruchy pionowe skorupy ziemskiej są odniesione do średniego poziomu morza. Niestety, średni poziom morza nie jest stały. Globalne zmiany poziomu mórz i oceanów  $v_e$  zwane są zmianami eustatycznymi. W rejonie Bałtyku zmiany eustatyczne są szacowane na 0,8-1,1 mm/rok [Ekman, 1986; Lisitzin 1974].

Obserwowane ruchy pionowe skorupy ziemskiej poprawione o zmiany eustatyczne dają ruchy skorupy ziemskiej odniesione do geoidy. W niniejszej pracy ruchy te będą zwane „niwelacyjnymi” i oznaczone przez  $v$ . Ostatecznie mamy:

$$v = v_o + v_e$$

Należy spodziewać się, że w Polsce maksymalne „niwelacyjne” ruchy pionowe będą wynosić ok. -3,0 mm/rok. Niestety, geoida także ulega zmianom. Z powodu dążenia do równowagi masy w płaszczu ziemskim przemieszczają się,

a tym samym powierzchnia geoidy podnosi się lub opada. Szacuje się [Sjöberg, 1982], że zmiany jej powierzchni są, co najwyżej, dziesięć razy mniejsze niż zmiany wysokości skorupy ziemskiej. Oznacza to, że na terenie Polski maksymalne zmiany geoidy mogą stanowić 0,3 mm/rok, a w rejonie Zatoki Botnickiej – dochodzić do 1,0 mm/rok. Jeśli do ruchów „niwelacyjnych” dodamy ruchy pionowe geoidy  $v_g$ , to tak zdefiniowane ruchy skorupy ziemskiej będą odnosiły się do elipsoidy. Całkowity ruch pionowy skorupy ziemskiej  $v_a$ , zwany również absolutnym, można zdefiniować następującym wzorem:

$$v_a = v_o + v_e + v_g$$

gdzie:  $v_g$  – to ruch spowodowany podnoszeniem się lub opadaniem geoidy. Zmiany geoidy na obszarze Polski uznano za zaniedbywalne. W niniejszej pracy przyjęto, że ruchy pionowe odniesione do średniego poziomu morza są prawie takie same jak ruchy absolutne.

## • WCZEŚNIEJSZE WYZNACZENIA RUCHÓW PIONOWYCH NA OBSZARZE POLSKI

W roku 1960 J. Niewiarowski i T. Wyrzykowski dokonali pierwszego wyznaczenia względnych ruchów pionowych na obszarze Polski [Niewiarowski, Wyrzykowski, 1960]. Ruchy te zostały obliczone metodą przybliżoną z danych niwelacyjnych z lat 1952-58 (I i II klasa) i 1926-37 (I klasa). Metoda polegała na porównaniu wysokości wspólnych punktów obydwu wyrównanych sieci nawiązanych do tego samego punktu przyjętego jako stały.

Drugie wyznaczenie ruchów pionowych

skorupy ziemskiej na obszarze Polski wykonano w latach w 1977-87. Do obliczeń wykorzystano pomiary niwelacyjne z lat 1947-60 i 1974-79 [Wyrzykowski, 1987]. Efektem końcowym tych obliczeń jest mapa „obserwowanych” ruchów pionowych skorupy ziemskiej odniesionych do mareografu w Kronsztadzie przedstawiona na rys. 3.

## • DANE NIWELACYJNE

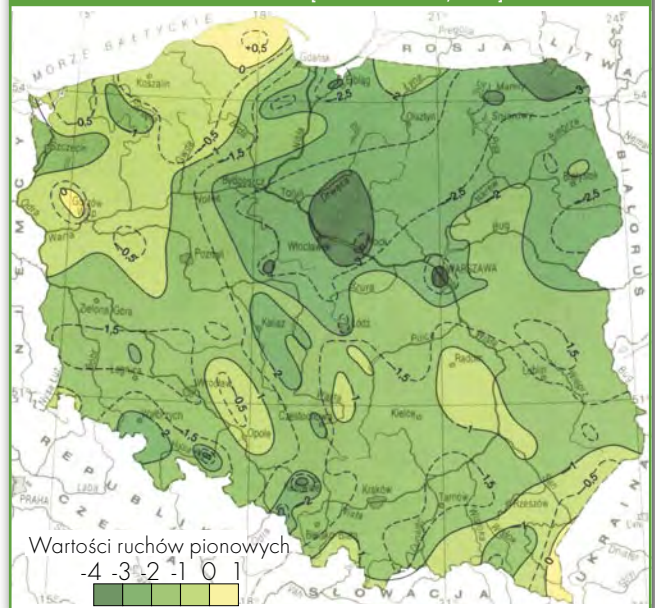
Obecnie do obliczeń wykorzystano dane niwelacyjne, bez poprawek normalnych, z dwóch ostatnich kampanii niwelacji precyzyjnej. Ostatnia, czwarta już, kampania niwelacyjna przeprowadzona w latach 1997-2003 objęła swoim zasięgiem cały kraj. Pomiar sieci niwelacyjnej odbywał się głównie po tych samych liniach niwelacyjnych, co pomiary w latach 1974-82 z niewielkimi zmianami. Z porównania kampanii z lat 1974-79 i 1997-2003 otrzymano 235 wspólnych reperów węzłowych.

## • DANE MAREOGRAFICZNE

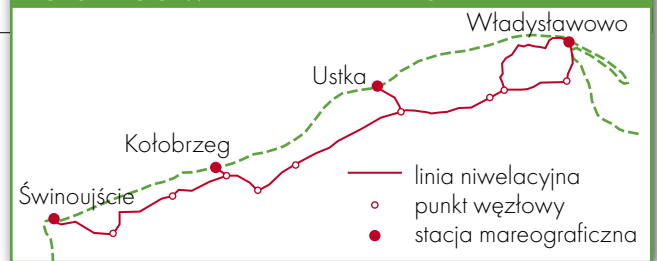
Przy wyznaczeniu ruchów pionowych wykorzystano dane z polskich stacji mareograficznych (rys. 4) w: Świnoujściu, Kołobrzegu, Ustce i Władysławowie. Dane te zgromadzone przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (oddział w Gdyni) są dostępne m.in. w bazie danych mareograficznych Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL). Dane te (okres obserwacji – co najmniej 50 lat) to roczne średnie wartości poziomu morza zredukowane do wspólnego poziomu odniesienia oraz przeanalizowane pod względem jakości przez PSMSL.

Dane mareograficzne (średnie roczne) zostały poddane wygładzeniu meto-

## 3. RUCHY PIONOWE SKORUPY ZIEMSKIEJ NA OBSZARZE POLSKI [WYRZYKOWSKI, 1987]



## 4. WYBRANE STACJE MAREOGRAFICZNE POLSKIEGO WYBRZEŻA BAŁTYKU



dą średniej ruchomej. Średnia ruchoma przewiduje wartości w okresie prognozy na podstawie średniej wartości zmiennej dla określonej liczby poprzednich okresów. W metodzie tej każdy element szeregu jest zastępowany przez średnią ważoną z elementów sąsiadujących. Liczba sąsiadujących elementów jest zdefiniowana przez „okno”. Wielkość okna powinna być równa najdłuższemu okresowi zjawiska fizycznego wpływającego na poziom morza. To sugeruje, że okno powinno wynosić około 20 lat (18,9 lat wynosi okres obiegu węzłów księżycy) [Łyszkowicz, 2003]. W przypadku okna „prostokątnego” wszystkie elementy mają jednakowe wagi.

Przykład danych mareograficznych podano na rys. 5. Pochodzą one ze stacji mareograficznej Władysławowo. Górny wykres przedstawia charakter zmian średniego poziomu morza przed wygładzeniem, natomiast dolny – po wygładzeniu. Jak widać, dane po wygładzeniu średnią ruchomą mają bardziej jednolity charakter.

### ● RUCHY PIONOWE NA WSPÓLNYCH REPERACH WĘZŁOWYCH

Ruchy pionowe na reperach węzłowych wyznaczono w trzech etapach. W etapie pierwszym wyznaczono ruchy pionowe na wspólnych liniach z obu wspomnianych kampanii według wzoru:

$$\Delta v = (\Delta h_2 - \Delta h_1) / \Delta t,$$

gdzie  $\Delta h_1$  oraz  $\Delta h_2$  są różnicami wysokości między tymi samymi reperami

mi z pierwszej i drugiej kampanii, a  $\Delta t$  jest okresem czasu między tymi dwoma pomiarami.

W drugim etapie wyznaczono względne ruchy pionowe reperów [Sandford, Holdahl, 1978], przyjmując jako stały reper węzłowy we Władysławowie. W trzecim etapie sieć względnych ruchów pionowych powiązано z ruchami pionowymi mareografu we Władysławowie, który zgodnie z literaturą [Łyszkowicz, Zieliński, 1994] spełnia wymagane kryteria. W rezultacie otrzymano obserwowane ruchy pionowe skorupy ziemskiej na obszarze Polski na reperach węzłowych (rys. 6).

### ● RUCHY PIONOWE NA STACJACH MAREOGRAFICZNYCH

Ruch pionowy stacji mareograficznej względem średniego poziomu morza – jeżeli założymy stabilność samej stacji – jest odwrotnością kierunku zmiany poziomu morza. Ruchy pionowe wyznaczone na czterech polskich stacjach mareograficznych kształtują się następująco w mm/rok: Świnoujście (-1,4), Kołobrzeg (-1,7), Ustka (-2,1), Władysławowo (-3,0). Ruch pionowy stacji mareograficznej we Władysławowie przyjęto jako średni

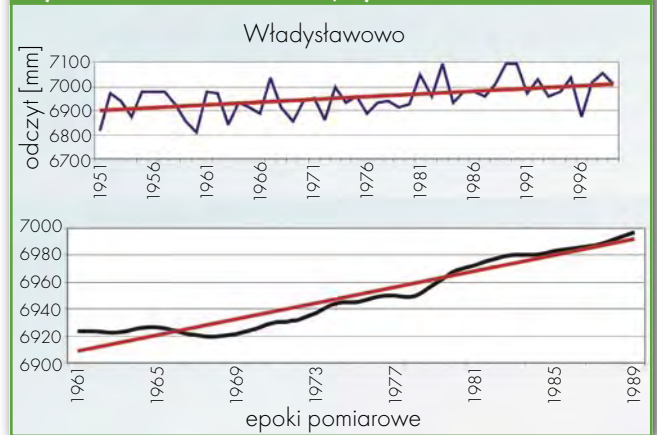
ruch pionowy z czterech stacji mareograficznych i wyniósł on -2 mm/rok.

### ● MODEL WSPÓŁCZESNYCH RUCHÓW PIONOWYCH SKORUPY ZIEMSKIEJ NA OBSZARZE POLSKI

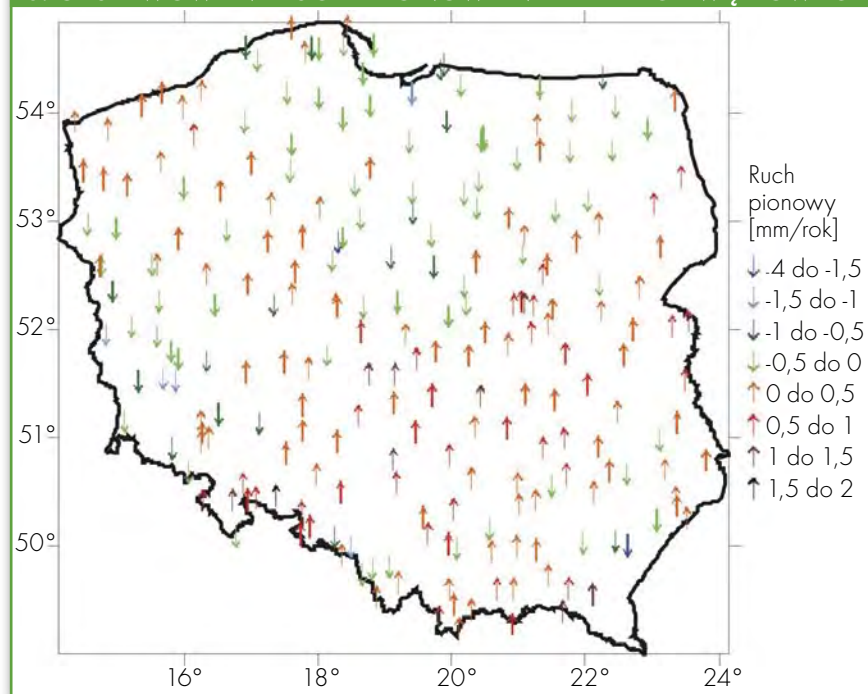
Niestety, ze względu na rozmieszczenie reperów (nie pokrywają równomiernie i wystarczająco gęsto całego obszaru kraju), otrzymane obserwowane ruchy pionowe na reperach węzłowych należało poddać zagęszczeniu, wykorzystując interpolację i ekstrapolację ruchów pionowych. Do tego celu zastosowano interpolację metodą kolokacji. Metoda kolokacji zaproponowana przez T. Krrarupa w latach 50. ubiegłego stulecia, upowszechniona przez H. Moritza, znalazła przede wszystkim szerokie zastosowanie w geodezji fizycznej, ale z powodzeniem może być wykorzystywana do wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej. W metodzie kolokacji istotny jest dobór właściwej funkcji kowariancji. Zaproponowano dwie analityczne funkcje, tj. funkcję Hirvonena oraz funkcję Markowa (rys. 7).

Po analizach zdecydowano się wykorzystać analityczną funkcję Hirvonena, gdyż jest ona lepiej dopasowana do empirycznej funkcji kowariancji. Interpolację ruchów pionowych dokonano na punktach przecięcia siatki południków i równoleżników w odstępach co 20', wykorzystując

## 5. LINIA REGRESJI Z DANYCH STACJI MAREOGRAFICZNEJ WŁADYSŁAWOWO A) NIEWYGŁADZONYCH; B) WYGŁADZONYCH



## 6. OBSERWOWANE RUCHY PIONOWE NA REPERACH WĘZŁOWYCH



## 7. WYKRES EMPIRYCZNEJ FUNKCJI KOWARIANCJI OBLICZONEJ NA PODSTAWIE REPERÓW WĘZŁOWYCH



### Literatura

- Ekman M., 1986: A Reinvestigation of the World's Second Longest Series of Sea Level Observations: Stockholm 1774-1984, Tekniska skrifter, Professional Papers, (4), National Land Survey, Gävle;
- Kakkuri J., 1987: Character of the Fennoscandian land uplift in the 20th century, Geological Survey of Finland, Special Paper 2, Helsinki;

its Implications on the Geoid in Fennoscandia, Rep. 14., University of Uppsala, Institute of Geophysics, Department of Geodesy;

- Vaníček P., Krakiwsky E., 1982: Geodesy: the concepts, North-Holland;
- Wyrzykowski T., 1987: Nowe wyznaczenie prędkości współczesnych pionowych ruchów powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski, Prace IGiK, tom XXXIV, zeszyt 1(78).

autorskie oprogramowanie. Otrzymany w ten sposób model współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przedstawiono na rys. 8. Model ten stworzono w dwóch wariantach: jako numeryczny zbiór wyinterpolowanych ruchów pionowych w punktach siatki południków i równoleżników oraz jako analogową mapę ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski [Kowalczyk 2006].

Na podstawie modelu numerycznego można interpolować ruchy pionowe w dowolnym miejscu Polski. Pierwsze testy przeprowadzone przez prof. Adama Łyszkowicza wskazują poprawność modelu.

DR KAMIL KOWALCZYK

pracuje w Katedrze Geodezji Szczegółowej na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie

Recenzent: PROF. ADAM ŁYSZKOWICZ

- Kowalczyk K., 2006: Wyznaczenie modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski, rozprawa doktorska UWM w Olsztynie;
- Leonhard Th., Niemeier W., Pelzer R., 1983: Determination of vertical crustal movements from different regional levellings - concept of the computing centre, Workshop on Precise Levelling, March 16-18, Dümmler Verlag;
- Lisitzin E., 1974: Sea Level Changes, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York;
- Łyszkowicz A., Zieliński J.B., 1994: State of the Vertical Datum in Poland as an Example From Eastern and Central Europe, Proceedings of the International Symposium on Marine Positioning INSMAP 1994, Hanover, Printed by PIP PRINTING USA;
- Łyszkowicz A., 1995: Relative Mean Surface Topography Along the Southern Part of Baltic Sea, Artificial Satellites, Planetary Geodesy - No 25;
- Łyszkowicz A., 2003: Raport z realizacji zadania badawczego, Analiza jakościowa i ilościowa istniejących danych mareograficznych, Olsztyn;
- Niewiarowski J., Wyrzykowski T., 1961: Wyznaczenie współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przez porównanie wyników powtarzanych niwelacji precyzyjnych, Prace IGiK tom VII, zeszyt 1(17);
- Sandford H., Holdahl (in Ed. I. Mueller), 1978: Models for extracting vertical crustal movements from leveling data, Reports of the Department of Geodetic Science, The Ohio State University, Report 280;
- Sjöberg L., 1982: Studies on the Land Uplift and

## MODEL RUCHÓW PIONOWYCH SKORUPY ZIEMSKIEJ DLA POLSKI - WNIOSKI

- Do opracowania modelu współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Polski wykorzystano dane niwelacyjne z lat: 1974-82 oraz 1997-2003. Model ten odniesiono do średniego poziomu południowego wybrzeża Morza Bałtyckiego. Model opracowany jest jako numeryczny zbiór wyinterpolowanych wartości ruchów pionowych w punktach przecięcia siatki południków i równoleżników oraz jako analogowa mapa ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze kraju.

- W Polsce nie występują ruchy dodatnie. Największe ujemne ruchy pionowe stwierdzone w okolicach Inowrocławia i Rzeszowa (poniżej -5 mm/rok), oba obszary leżą w tzw. strefie ruchów tektonicznych T-T. W okolicach Warszawy ruchy pionowe osiągają wartości od -1 mm/rok do -3 mm/rok. Na większości obszaru Polski wahają się one od -1,5 mm/rok do -3 mm/rok. Ruchy pionowe przekraczające -3 mm/rok występują w okolicach Elbląga (Żuławy Wiślane), Płocka, Torunia i Włocławka (granica strefy T-T) oraz na obszarze zachodniej Polski: od Wrocławia do Legnicy przez Zieloną Górę do Gorzowa Wielkopolskiego (jest to obszar warwiscydów na granicy z masywem czeskim). Najmniejsze ruchy ujemne zanotowano w okolicach południowych Bieszczadów (Karpaty).

- Na podstawie danych z numerycznego zbioru ruchów pionowych można wyinterpolować ruchy pionowe skorupy ziemskiej w dowolnym punkcie kraju.

- Pierwsze testy modelu wskazują na jego poprawność. Istnieje jednak konieczność dalszego weryfikowania opracowanego modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

- Model ten po przetestowaniu może stanowić cenny wkład do kinematycznego opracowania sieci UELN.

## 8. MODEL RUCHÓW PIONOWYCH SKORUPY ZIEMSKIEJ NA OBSZARZE POLSKI [KOWALCZYK, 2006] SKALA ORYGINAŁU 1:3 000 000

