

Adam Bałut*

WSTĘPNA ANALIZA PRZEMIESZCZEŃ PUNKTÓW OSNOWY POZIOMEJ
ESP ŻAR**

1. Osnowa klasyczna ESP Żar

Osnowa geodezyjna Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żar w dolinie Soły jest objęta programem cyklicznych obserwacji geodezyjnych od rozpoczęcia prac budowlanych w 1971 roku. Prace pomiarowe, prowadzone nieprzerwanie przez OPGK Kraków, obejmują niwelację precyzyjną reperów osnowy wysokościowej wraz z reperami na obiektach zapory oraz klasyczną osnowę poziomą w postaci sieci kątowno-liniowej i poligonowej [4]. Od 2001 roku, stosując się do zaleceń Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW, do programu pomiarowego włączono obserwacje GPS, prowadzone we współpracy z Wydziałem Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH.

Zaporę ziemną omawianej elektrowni szczytowo-pompowej zbudowano na splantowanym wierzchołku góry Żar. Obwałowania o obwodzie 1700 m i maksymalnej wysokości 34 m, uszczelnione ekranem asfaltobetonowym, otaczają zbiornik o pojemności 2,40 mln m³ i powierzchni 16 ha. Poza linią górskiego grzbietu obwałowania przechodzą wprost w strome stoki Żaru [2].

Zasadniczą osnowę poziomą stanowi osiem punktów:

- sześć punktów stabilizowanych podpowierzchniowo w koronie zapory;
- dwa filary obserwacyjne - 2010 (OP-X, na dachu budynku dawnej szkoły szybownictwa) i OP-III, które tworzą bazę o długości 1400 m, bliską i w przybliżeniu równoległą do osi podłużnej zbiornika.

Stabilność punktów bazy była kontrolowana przez nawiązanie kątowno-liniowe do filarów obserwacyjnych tworzących zewnętrzny układ odniesienia. Wskutek zabudowy otoczenia punktu 2010 i wzrostu lasu, przy równoczesnym całkowitym braku troski gospodarza obiektu o przecinki, utracono szereg celowych. Aktualnie punkt 2010 jest kontrolowany przez dwa filary, 3005 i 3034, obydwa oddalone o ponad 2 km, z kolei punkt OP-III jest kon-

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

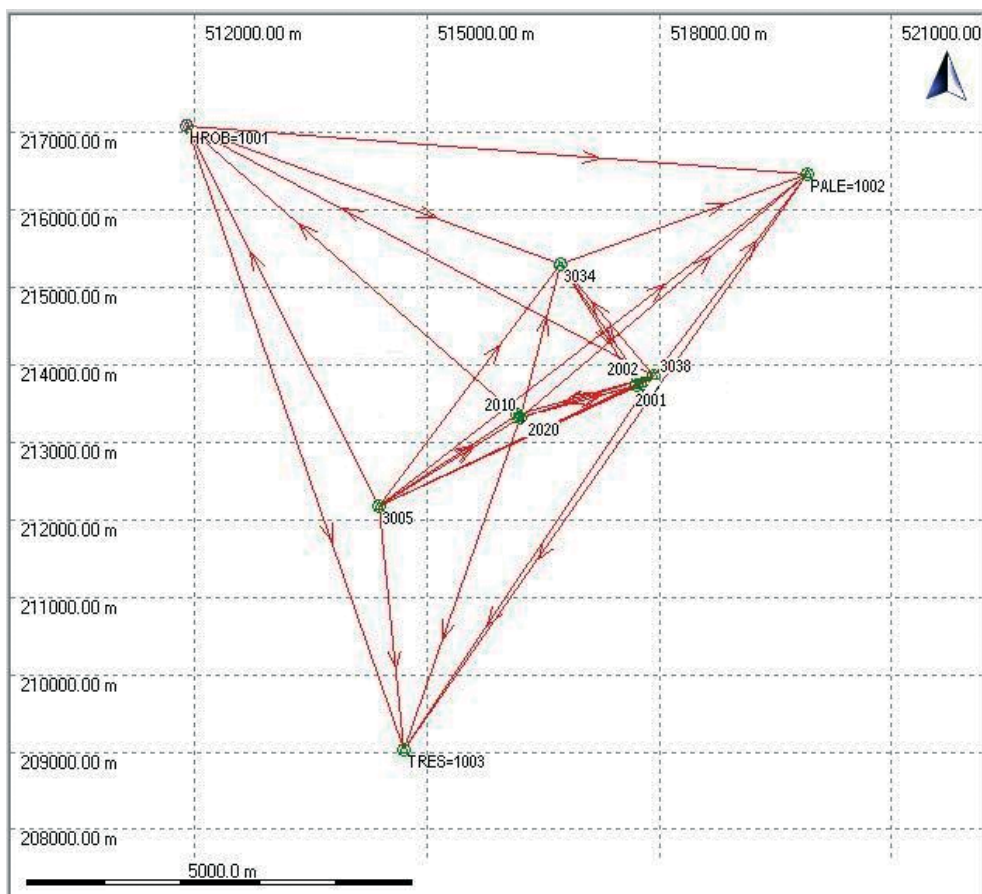
** Pracę zrealizowano w ramach zadania badawczego 11.11.150.512

trołowany przez ciąg filarów 2001, 2002, 2038, tworzących przedłużenie bazy i usytuowanych nie dalej niż 500 m (przy czym brak bezpośredniej celowej 2002-3038), oraz dwukilometrową celową do filara 3034.

Długość celowej bazowej i słabość aktualnej konstrukcji odniesienia były przesłankami do włączenia obserwacji GPS.

2. Osnowa GPS

Wykonany wiosną 2001 roku wywiad terenowy pozwolił wybrać punkty nadające się do prowadzenia obserwacji satelitarnych. Okazało się, że mimo położenia na grzbietach górskich tylko punkt 3034 jest bezwarunkowo przydatny dla GPS (rys. 1).



Rys. 1. Sieć pomiarowa GPS w otoczeniu ESP Żar

Punkt bazowy 2010 znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie (< 20 m) masztu przekaznika telekomunikacyjnego. Drugi punkt bazowy, OP-III, jest całkowicie nieprzydatny z powodu usytuowania pod rozłożystym bukiem. Z kolei punkty 2001, 2002 i 3038 znajdują się w pobliżu kęp drzew lub lasu, a punkt 3005 – wśród zabudowań.

Drugą przesłanką określającą kształt sieci GPS były dane geologiczne i neotektoniczne. Dolina Soły przebiega wzdłuż głębokiego uskoku tektonicznego, o którego aktywności świadczą między innymi morfologia terenu [2, 5, 8].

W tej sytuacji postanowiono włączyć do sieci dodatkowo punkty:

- 1001 na podszczytowej polanie Hrobaczej Łąki (punkt triangulacyjny I kl. na wierzchołku jest całkowicie nieprzydatny dla GPS z powodu lasu);
- 1002 na podszczytowej polanie Palenicy (punkt triangulacyjny II kl. na wierzchołku jest również nieprzydatny z powodu usytuowania w dorodnym lesie);
- 1003 – jest to filar obserwacyjny w osi zapory wodnej Tresna,

tworzące w przybliżeniu równoboczny trójkąt o średniej długości boku ok. 8,5 km. Bok 1001–1003, usytuowany po zachodniej stronie uskoku, stanowi (prawdopodobnie wraz z punktem 3005) układ odniesienia dla pozostałych punktów, usytuowanych wraz ze zbiornikiem po wschodniej stronie uskoku.

Istotną cechą tak zaprojektowanej sieci, ważną ze względu na wpływ troposfery, jest usytuowanie wszystkich punktów praktycznie na dwóch poziomach:

- punkty 1003 i 3005 leżą w dolinie Soły, na wysokościach odpowiednio 450 m i 405 m,
- pozostałe punkty leżą na grzbietach w pasie wysokości 756÷868 m (za wyjątkiem 3034 o wysokości 595 m).

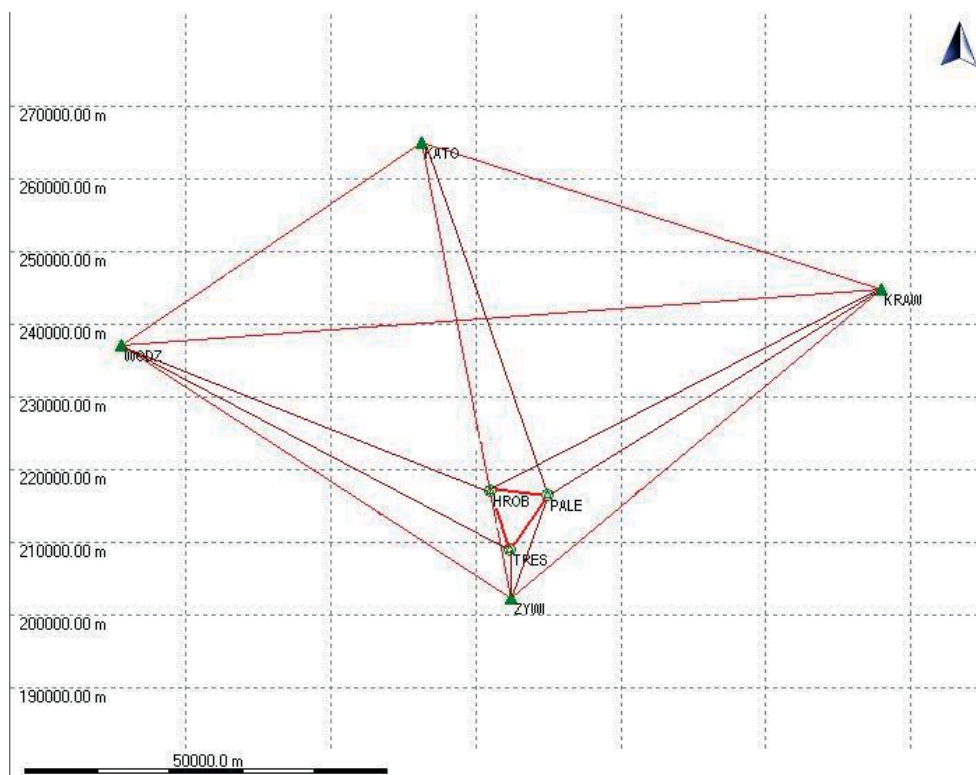
Względy logistyczne spowodowały, że obserwacje wektorów GPS były prowadzone w dwudniowych kampaniach (wyjątek: jeden dzień w 2002 r.). Obserwacje długich wektorów (2÷9 km) trwały 4–9 godzin, przy czym przynajmniej część z nich była obserwowana w każdej kampanii dwukrotnie. Wektory krótkie, do 2 km, obserwowano w sesjach 2–4-godzinnych, również z powtórzeniami. Obserwacje prowadzono przy pomocy geodezyjnych, dwuczęstotliwościowych odbiorników, z których od 2002 roku przynajmniej trzy były wyposażone w anteny typu *choke-ring*.

Wszystkie obliczenia wykonywano z wykorzystaniem efemeryd precyzyjnych i globalnych modeli jonosfery publikowanych przez uniwersytet berneński. W celu wyeliminowania wpływu troposfery korzystano z modelu Hopfield, niestety niezbyt dokładnie oddającego warunki panujące w Kotlinie Żywieckiej i w przełomie Soły.

Wykonywane w każdej kampanii dwukrotne pomiary niektórych wektorów posłużyły do oszacowania dokładności wyników. Po uśrednieniu wyników z pięciu kampanii (lata 2001–2005) ocenia się błąd średni wyznaczenia składowych N, E wektorów krótkich (do 2 km) na $\pm 2 \pm 3$ mm, zaś wektorów dłuższych (3÷9 km) na $\pm 3 \pm 4$ mm. W opracowaniu oceny odrzucono niektóre wektory mierzone do punktów 2010 (zakłócenia radiowe) i 2001 (drzewa). Błędy składowej wysokościowej są znacznie większe, a wynikają przede wszystkim z nieadekwatności dostępnego modelu troposfery.

W latach 2001–2002 korzystano z nawiązania do pobliskiego punktu II klasy (402), wyznaczonego w czasie kampanii Żywiec-wschód w 1996 roku. Natychmiast po uruchomieniu sieci stacji referencyjnych ASG-PL włączono do obliczeń wektory nawiązujące do najbliż-

szych stacji permanentnych: ZYWI, KATO, KRAW i WODZ (rys. 2). Ograniczony do co najwyżej dwóch 8-9-godzinnych sesji czas pomiaru, odległość do tych stacji oraz, niestety, znana niestabilność niektórych (np. stacja KRAW wykonuje roczne oscylacje sięgające 20 mm) nie pozwalają wykorzystać ich jako precyzyjnego układu odniesienia, a jedynie jako nawiązanie. Wszystkie podane w niniejszym opracowaniu współrzędne w układzie PUWG1992 wyznaczono właśnie w odniesieniu do stacji ASG.



Rys. 2. Nawiązanie sieci pomiarowej GPS ESP Żar do sieci ASG

3. Wyniki pomiarów GPS

W celu porównania współrzędnych obserwowanych punktów, wyznaczonych w kolejnych kampaniach, oraz w celu wykrycia ewentualnych niestabilności niektórych z nich przeprowadzono szereg transformacji poszukiwawczych pomiędzy wynikami z kolejnych lat. Przyjęto taki tryb postępowania, by wykorzystać korelacje sprzętowe, gdyż w ciągu tych pięciu lat następowała stopniowa wymiana wykorzystywanych odbiorników sygnałów satelitarnych GPS i anten. Szukano grup punktów, które w wyżej podanych granicach dokładności pomiaru zachowały wzajemną stabilność. Te punkty stawały się punktami do-

stosowania dla transformacji ostatecznej pomiędzy wynikami kolejnych kampanii. Korzystano z transformacji jednokładnej (zachowującej skalę pomiaru aktualnego) Helmerta w ujęciu Ryšavego [3]. Tak więc dla każdego pomiaru zachowano oryginalną skalę wyznaczoną techniką GPS, lecz, kierując się doświadczeniem z podobnych sieci, dopuszczono zmianę orientacji. Wyznaczone zmiany orientacji wahały się w granicach $-0,22 \pm +0,44$ ppm (odpowiednio $-0,14^{\text{cc}} \pm +0,28^{\text{cc}}$), jednakże sumaryczna zmiana orientacji dla okresu 2001–2005 wyniosła zaledwie $+0,09$ ppm ($+0,06^{\text{cc}}$). W celu wykrycia ewentualnych błędów systematycznych dla każdej pary pomiarów obliczano dodatkowo transformację czteroparametrową, zachowującą podobieństwo figur. W żadnym przypadku pula punktów dostosowania nie uległa zmianie.

Wykaz współrzędnych otrzymanych w wyniku kolejnych transformacji ostatecznych zawiera tabela 1.

W tabeli 2 zawarto różnice ostatecznych współrzędnych wyznaczonych w wyniku kolejnych transformacji oraz różnice w odniesieniu do roku 2001.

Zwraca uwagę:

- trwała stabilność linii 2010-2002, zastępującej w pomiarach GPS bazę pomiarów klasycznych: 2010 - OP-III; wyznaczona w pięciu kampaniach GPS długość średnia tej linii wynosi (w układzie PUWG1992) 1663,8758 m $\pm 1,1$ mm (czyli $\pm 0,65$ ppm, wartość praktycznie nieosiągalna dla klasycznych technik pomiarowych (za wyjątkiem dalmierzy multispektralnych), przy czym odchyłki zawarły się w przedziale $(-1,4 \text{ mm} \div +1,1 \text{ mm})$; azymut tejże linii, obliczony jako średnia z wyników pięciu kampanii, zarówno z surowych współrzędnych jak i transformowanych, wynosi w układzie PUWG1992 84,00806G $\pm 1,3^{\text{cc}}$ ($\pm 2,1$ ppm), przy odchyłkach nieprzekraczających $\pm 1,7^{\text{cc}}$;
- stabilność w latach 2002–2005 układu punktów 3005–2010–2002;
- stabilność w latach 2003–2005 układu punktów 3005–2010–2002–3034; punkty te stanowią podstawowy układ odniesienia dla osnowy zapory;
- stabilność linii 1001–1003 (poza okresem 2003–2004). Ewidentny ruch punktu 1002 względem tej bazy może być przejawem neotektoniki;
- niestabilność punktu 2001, która jest najprawdopodobniej artefaktem spowodowanym przez szybko rosnące w otoczeniu punktu drzewa i krzewy;
- niestabilność bardzo ważnego dla osnowy zapory filara 3038 po 2003 roku, która również jest najprawdopodobniej artefaktem spowodowanym bardzo bliskim sąsiedztwem lasu.

Wykazana powyżej niestabilność istotnych filarów obserwacyjnych jest najprawdopodobniej pozorna i wynika z narastających przesłoneń horyzontu i odbić sygnałów satelitarnych przez otaczające drzewa i krzewy. Zastosowanie anten *choke-ring* nie pomogło, a doświadczenie z innych obiektów wskazuje, że również przedłużenie sesji obserwacyjnych do 12 czy 24 godzin nie pozwoli na osiągnięcie na tych punktach dokładności wyznaczenia pozycji lepszej niż ± 3 mm. W tej sytuacji pozostaje tylko apelować do nadzoru ESP Żar o oczyszczenie celowych między filarami obserwacyjnymi i horyzontów na tychże filarach. Jest to podstawowy wymóg dla bezpieczeństwa obiektu.

Tabela 1. Współrzędne punktów osnowy ESP Żar wyznaczone w PUWG1992 (zredukowane, w metrach)

Rok	2001		2002		2003		2004		2005	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1001	17089,9152	1898,9199	17089,9146	1898,9219	17089,9177	1898,9195	17089,9100	1898,9250	17089,9098	1898,9227
1002	16460,5719	9901,9340	16460,5678	9901,9221	16460,5638	9901,9283	16460,5647	9901,9318	16460,5600	9901,9291
1003	9027,4015	4705,6757	9027,4052	4705,6776	9027,4034	4705,6756	9027,4006	4705,6778	9027,4022	4705,6767
2001	13743,3482	7699,9134	-	-	13743,3366	7699,9043	13743,3503	7699,9163	13743,3341	7699,9014
2002	13765,1369	7780,7607	13765,1368	7780,7592	13765,1373	7780,7607	13765,1350	7780,7594	13765,1359	7780,7602
2010	13351,5560	6169,1040	13351,5529	6169,1050	13351,5503	6169,1061	13351,5498	6169,1064	13351,5480	6169,1065
2020	-	-	-	-	-	-	13312,6214	6207,7106	13312,6186	6207,7117
3005	12180,7028	4369,7532	12180,7077	4369,7478	12180,7063	4369,7508	12180,7082	4369,7475	12180,7104	4369,7484
3034	15307,6597	6721,1688	15307,6606	6721,1626	15307,6544	6721,1692	15307,6571	6721,1678	15307,6572	6721,1681
3038	13862,9183	7929,6201	13862,9184	7929,6168	13862,9205	7929,6155	13862,9242	7929,6199	13862,9154	7929,6180

Zastosowano redukcję współrzędnych: $x = X - 200000,0$ m, $y = Y - 5100000,0$ m

Tabela 2. Wyniki badania stałości i wyznaczenie przemieszczeń punktów osnowy GPS ESP Żar (w milimetrach)

Okres	2001-2002 $\sigma_i = \pm 2,1$			2002-2003 $\sigma_i = \pm 2,0$			2003-2004 $\sigma_i = \pm 2,2$			2004-2005 $\sigma_i = \pm 1,4$			2001-2003			2001-2004			2001-2005			
	dx	dy	dr	dx	dy	dr	dx	dy	dr	dx	dy	dr	dx	dy	dr	dx	dy	dr	dx	dy	dr	
1001	-0,6	2,0	2,1*	3,1	-2,4	3,9*	-7,7	5,5	9,5	9,5	-2	-2,3	2,3*	2,5	-0,4	2,5	-5,2	5,1	7,3	-5,4	2,8	6,1
1002	-4,1	-11,9	12,6	-4,0	6,2	7,4	0,9	3,5	3,6*	4,7	-2,7	5,4	5,4	-8,1	-5,7	9,9	-7,2	-2,2	7,5	-11,9	-4,9	12,9
1003	3,7	1,9	4,2*	-1,8	-2,0	2,7*	-2,8	2,2	3,6*	1,6	-1,1	1,9*	1,9*	1,9	-0,1	1,9	-0,9	2,1	2,3	0,7	1,0	1,2
2001	-	-	-	-	-	-	13,7	12,0	18,2	-16,2	-14,9	22,0	-11,6	-9,1	14,7	2,1	2,9	3,6	-14,1	-12,0	-	18,5
2002	-0,1	-1,5	1,5*	0,5	1,5	1,6*	-2,3	-1,3	2,6*	0,9	0,8	1,2*	1,2*	0,4	0,0	0,4	-1,9	-1,3	2,3	-1,0	-0,5	1,1
2010	-3,1	1,0	3,3*	-2,6	1,1	2,8*	-0,5	0,3	0,6*	-1,8	0,1	1,8*	1,8*	-5,7	2,1	6,1	-6,2	2,4	6,6	-8,0	2,5	8,4
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,8	1,1	3,0*	3,0*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3005	4,9	-5,4	7,3	-1,4	3,0	3,3*	1,9	-3,3	3,8*	2,2	0,9	2,4*	2,4*	3,5	-2,4	4,2	5,4	-5,7	7,9	7,6	-4,8	9,0
3034	0,9	-6,2	6,3	-6,2	6,6	9,1	2,7	-1,4	3,0*	0,1	0,3	0,3*	0,3*	-5,3	0,4	5,3	-2,6	-1,0	2,8	-2,5	-0,7	2,6
3038	0,1	-3,3	3,3*	2,1	-1,3	2,5*	3,7	4,4	5,7	-8,8	-1,9	9,0	9,0	2,2	-4,6	5,1	5,9	-0,2	5,9	-2,9	-2,1	3,6

* punkt dostosowania ostatecznej transformacji poszukiwawczej
 σ_i – błąd ostatecznej transformacji poszukiwawczej (w milimetrach)

4. Neotektonika?

Pozostało pytanie, czy i w jakim stopniu ruch punktu 1002 względem bazy 1001-1003 jest przejawem neotektoniki sugerowanej w pracach [1, 5, 8]. Radialne przesunięcie względne w okresie 2001-2005, rzędu 12 mm, ewidentnie przekracza wartość błędu wyznaczenia wynikającą z podanych wyżej dokładności pomiaru wektorów GPS. Szukając odpowiedzi, posłużono się metodą opracowaną w latach 20. XX w. w Japonii, a przedstawioną szczegółowo m.in. w pracach [6, 7].

Wyznaczona z przemieszczeń punktów 1001, 1002, 1003 w okresie 2001-2005 (por. tab. 2) macierz deformacji E wynosi (współczynniki tej macierzy nie są deformowane przez zastosowaną wcześniej trójparametrową transformację)

$$E = \begin{bmatrix} -1,06858 & -1,01106 \\ -1,01106 & -0,97116 \end{bmatrix} \text{ ppm},$$

a jej wartości własne, czyli wartości ekstremalnych deformacji liniowych, oraz kierunki ich oddziaływania wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= -2,0321, & Az_{\lambda_{\max}} &= 43,6^\circ, \\ \lambda_{\min} &= -0,0076, & Az_{\lambda_{\min}} &= 133,6^\circ. \end{aligned}$$

Wartość $\lambda_{\max} = -2,03$ ppm wskazuje na występowanie ściskania rzędu 0,5 ppm/rok w kierunku NE-SW. Kierunek tego oddziaływania jest niesprzeczny z danymi zawartymi w pracy [8], wartości liczbowe nie są w literaturze podawane.

Wyznaczona równocześnie wartość odkształcenia postaciowego wyniosła $\gamma_{\text{extr.}} = 0,25$ ppm/rok.

Literatura

- [1] Bałut A.: *GPS monitoring of the Porąbka-Żar hydropower station*. [w:] IX International Scientific and Technical Symposium Geoinformation Monitoring of Environment: GPS and GIS Technologies, Lviv Astronomical and Geodetic Society, Lwów 2004
- [2] Binkiewicz E., Biliński W.: *Elektrownia wodna Porąbka-Żar pracuje już 20 lat*. Gospodarka Wodna, nr 9, 11, i 12, 1999
- [3] Lazzarini T. i in.: *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. Warszawa, PPWK
- [4] Lenczowski A., Czajkowska E., Czajkowski J., Lenczowska M., Sawa F., Żurek J.: *Projekt techniczny aparatury pomiarowo-kontrolnej dla zbiornika górnego elektrowni Porąbka-Żar*. Kraków, KOPM 1972
- [5] Rączkowski W., Wójcik A., Zuchiewicz W.: *Late Neogene-Quaternary tectonics of the Polish Carpathians in the light of neotectonic mapping*. Tectonophysics, nr 108, Elsevier - North Holland 1984, 51-69

-
- [6] Vaniček P., Krakiwsky E.J.: *Geodesy: the concepts, wyd. II.* Amsterdam, Elsevier Science Publishers 1987
 - [7] Vaniček P., Craymer M. R., Krakiwsky E.J.: *Robustness analysis of geodetic horizontal networks.* Journal of Geodesy, nr 75, Springer-Verlag 2001, 199-209
 - [8] Zuchiewicz W.: *Dorobek badań neotektonicznych w Polsce w latach 1970-1990: próba podsumowania.* Przegląd Geologiczny, nr 5 (481), Warszawa 1993, 360-370