

## **Badania geodynamiczne w Pieninach przed i po zbudowaniu zbiorników wodnych w rejonie Czorsztyna**

Geodynamical investigations in the Pieniny Mountains before and after construction of water reservoirs in the Czorsztyn region

ANDRZEJ PACHUTA, MARCIN BARLIK, TOMASZ OLSZAK, DOMINIK PRÓCHNIEWICZ,  
RYSZARD SZPUNAR, JANUSZ WALO

*Politechnika Warszawska, Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej, a.pachuta@gik.pw.edu.pl*

**Abstract.** Geodynamical investigations in the Pieniny Mountains have been carried out since the 1960s. They focused on leveling, gravimetric measurements, geodetic measurements of horizontal network and GPS observations. The results have revealed vertical and horizontal movements of the crust and periodic changes in gravity. In 2001, after six-year break, the investigations were revived and extended to aspect related to the erected water reservoir in Czorsztyn. This study yields 7 mm vertical displacement and changes in gravity (0.1 mGal over 30 years) after filling the reservoir in Czorsztyn. Observations of the horizontal network shows less than 1 mm/year linear trend in north-east direction.

**Key words:** geodynamical network; GNSS, gravimetric measurements

### WPROWADZENIE

Pieniński pas skałkowy (PPS) pod względem strukturalnym odpowiada jednej z głównych stref nieciągłości skorupy ziemskiej na granicy Karpat Wewnętrznych i Zewnętrznych (Birkenmajer 1974, 1986). Znajduje się na pograniczu dwóch wielkich jednostek strukturalnych: Karpat Zewnętrznych leżących na północy, z płaszczowiną magurską (PM) przylegającą bezpośrednio do pasa skałkowego i Karpat Wewnętrznych, na południu (Zuchiewicz 1995). Fenomen struktury pasa wynika ze skomplikowanej tektogenezy. Wyjątkowo skomplikowana jest jego tektonika, która wynika z procesów zachodzących w czasie orogenezy alpejskiej. Pas ten ma budowę fałdowo-zrębową. Osady pasa skałkowego powstały

głównie na przestrzeni jury i kredy w basenie oceanicznym będącym północną częścią Zachodniej Tetydy. Kompresja górnokredowa z południa spowodowała przełażdowanie, złuskowanie i zbudinażowanie struktur płaszczowinowych (Birkenmajer 1974).

Interesująca budowa geologiczna pasa skałkowego była od dawna przedmiotem zainteresowania naukowców zajmujących się badaniami geodynamicznymi. Intensywne badania geologiczne pasa skałkowego, w szczególności w rejonie Czorsztyna, rozpoczęto jeszcze przed II wojną światową. Badania te były związane przede wszystkim z pierwszymi planami wybudowania zapory wodnej na Dunajcu i utworzenia sztucznego zalewu w tym rejonie. W dalszej części publikacji przedstawione zostały badania

geodynamiczne prowadzone w rejonie pasa przed i po wybudowaniu zapory w Czorsztynie.

#### ZARYS BADAŃ GEODYNAMICZNYCH PRZED WYBUDOWANIEM ZAPORY W CZORSZTYNIE

Na początku lat 60. XX w. założono sieć znaków wysokościowych niwelacji precyzyjnej na obszarze planowanej inwestycji, w której Państwowe Przedsiębiorstwo Geodezyjne z Warszawy przez kilka lat wykonywało pomiary niwelacyjne trzy razy w roku. Na bazie założonej sieci niwelacyjnej, w 1969 r. powstał poligon geodynamiczny, a sieć niwelacyjną rozwinięto aż do wsi Kacwin przy granicy ze Słowacją tak, aby linia niwelacyjna przecinała południowy kontakt pienińskiego pasa skałkowego z fliszem podhalańskim (FP) (Czarnecka 1988, 1992).

Na początku lat 70. ubiegłego wieku na terenie pienińskiego poligonu geodynamicznego przeprowadzono dwie serie pomiarów niwelacyjnych, pomiary nachylenia tarasów Dunajca i jego dopływów, płytkie sejsmiczne sondowanie refrakcyjne oraz profilowanie elektrooporowe w celu wykrycia stref koncentracji naprężeń w podłożu i lokalizacji stref uskokowych. W latach 1978–1995 badania kontynuowali pracownicy ówczesnego Instytutu Geodezji i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej (Ząbek i in. 1988, 1993; Margański 1997). W ramach tych badań wykonano dziesięć epok obserwacji przewyższeń metodą niwelacji precyzyjnej w sieci wysokościowej, precyzyjne pomiary odległości w sieci poziomej oraz pomiary różnic natężenia siły ciężkości. Ponadto w latach 90. XX w. wykonano bezwzględne pomiary grawimetryczne na jednej stacji oraz pomiary satelitarne GPS we współpracy z Słowackim Uniwersytetem Technicznym w Bratysławie.

W wyniku tych prac badawczych (Ząbek i in. 1988, 1993; Margański 1997; Barlik 1998) wykryto zróżnicowane ruchy pionowe o blokowym charakterze, mające swoje źródło w głębokim podłożu południowego kontaktu pienińskiego pasa skałkowego z fliszem podhalańskim. Ruchy te wykazywały charakter oscylacyjny, a ich wielkość szacowana była na 0,5 do 1,5 mm/rok. Ruchy poziome były dalekie od regularności,

zmieniając zarówno wartość i kierunek z roku na rok. Maksymalne wartości tych ruchów w okresie 17 lat osiągnęły 10 mm, z niewielką tendencją przemieszczenia się pasa w kierunku wschodnim względem płaszczoyny magurskiej. Dodatkowo stwierdzono skracanie się odległości w południku pola badawczego. Badania grawimetryczne przeprowadzone w rejonie Czorsztyna i Niedzicy wskazywały na quasi-periodyczne zmiany przyspieszenia siły ciężkości rzędu 20  $\mu$ Gal. Na stacji Niedzica w kresie 17 lat wystąpiła natomiast zmiana wartości przyspieszenia o blisko 0,1 mGal.

#### BADANIA GEODYNAMICZNE PO WYBUDOWANIU ZAPORY W CZORSZTYNIE

W 2001 roku, po sześciu latach przerwy, wznowiono badania na pienińskim poligonie geodynamicznym. W międzyczasie powstała zaporą wodna na rzece Dunajec w okolicy zamku niedzickiego oraz utworzono sztuczny zalew (Zbiornik Czorsztyński) i dolny zbiornik w Sromowcach Wyżnych. Pojawił się zatem nowy ważny element w badaniach, związany z wpływem ruchów skorupy ziemskiej na bezpieczeństwo eksploatacji zapory wodnej. W badaniach należało więc uwzględnić wpływ mas wody w zbiornikach na wyniki pomiarów geodezyjnych wykorzystywanych w badaniach geodynamicznych.

W ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 9 T12 E 009 19 (Czarnecki 2004) pomierzono sieci kontrolne: wysokościową, poziomą i grawimetryczną. Ponowiono także badania geofizyczne tj. płytkie sondowania sejsmiczne i profilowanie elektrooporowe.

#### *Badania ruchów pionowych*

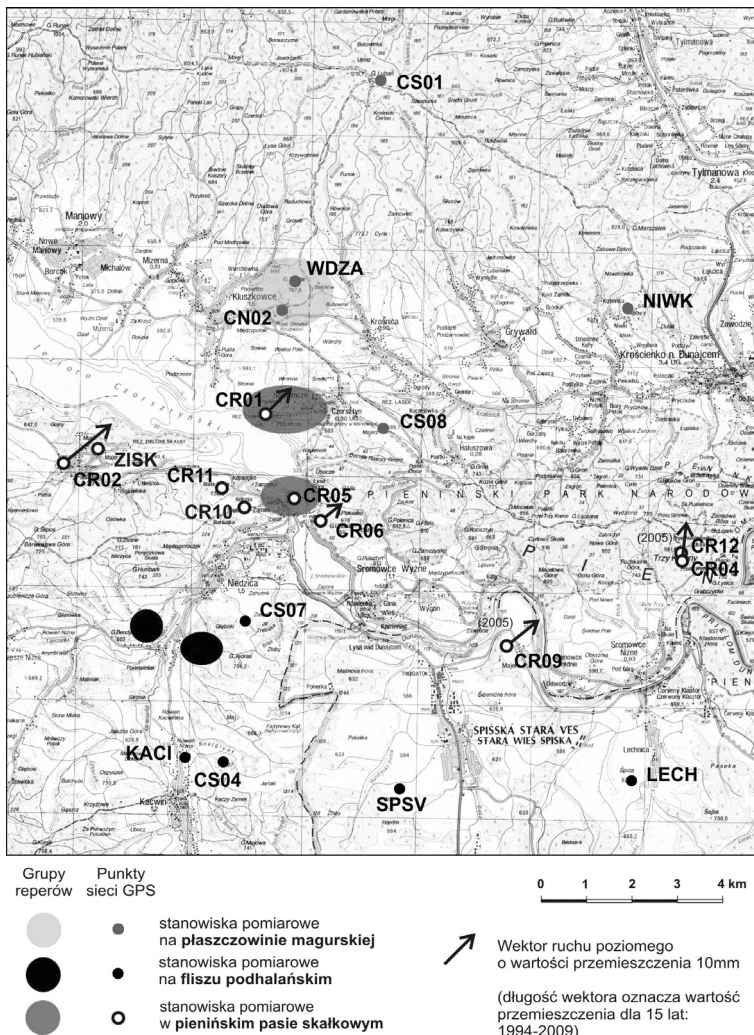
Sieć niwelacyjna służąca do badania ruchów pionowych w rejonie Czorsztyna po roku 2001 musiała być z konieczności nieco zmieniona w stosunku do sieci z lat 1978–1995. Do nowych badań zaadaptowano jedynie te linie niwelacyjne, które przebiegały z północy na południe, prostopadle do głównych stref nieciągłości tektonicznych.

Ze względu na zasięg zalewu niektóre fragmenty linii niwelacyjnych zostały częściowo zastąpione przęsłami precyzyjnej niwelacji

trygonometrycznej. Pomiarzy na niektórych liniach sieci pionowej, głównie tych przebiegających równolegle do stref nieciągłości, zostały zaniechane. Na podstawie analizy wcześniejszych wyników pomiarów niwelacyjnych na obszarze pienińskiego pasa skałkowego ostatecznie zdecydowano, że wytypowane zostaną cztery grupy reperów zastabilizowanych na różnych jednostkach tektonicznych: w wychodniach andezytowych góry Wdźar, na skałkach zamków czorsztyńskiego i niedzickiego oraz w wychodniach skalnych fliszu podhalańskiego (Ryc. 1).

Założenie grup reperów wynikało z faktu, że zmiany wysokości niektórych punktów mogą wynikać z lokalnych dyslokacji punktów (np. uszkodzenia lub niestabilności pojedynczych bloków skał), które powinny być wyeliminowane już na wstępnym etapie opracowania wyników. Kontrola wzajemnego położenia reperów w każdej grupie pozwala wyeliminować wpływ tych dyslokacji.

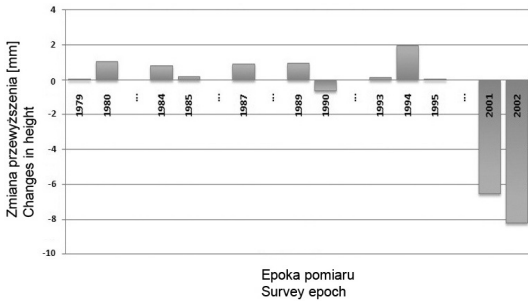
Z uwagi na koszty i czasochłonność pomiarów niwelacyjnych, badania ruchów pionowych przeprowadzono tylko dwukrotnie, w latach 2001



Ryc. 1. Wektory przemieszczeń na wybranych punktach pienińskiego pasa skałkowego. Velocity vectors at selected points in the Pieniny Klippan Belt.

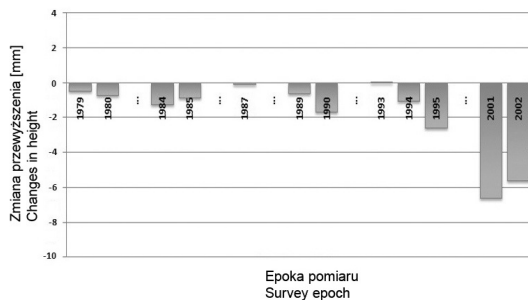
i 2002 (Olszak, Szpunar 2004). Pomiary wykonywane zostały za pomocą niwelatorów kodowych firmy Zeiss (Trimble) DiNi12 przy użyciu jednego kompletu inwarowych łąt precyzyjnych. Pomiary niwelacyjne przeprowadzano zawsze o tej samej porze roku na przełomie sierpnia i września. W sumie pomierzono 31 odcinków na liniach pomiarowych Wdżar – Czorsztyn i Kacwin – Niedzica z dokładnością przewidzianą dla I klasy niwelacji precyzyjnej.

Analiza wzajemnego położenia grup reperów, wykorzystująca obserwacje wykonane w poprzednich dziesięciu epokach pomiarowych, pozwala stwierdzić, że nastąpiły zauważalne zmiany wzajemnej wysokości pasa skałkowego w stosunku do fliszu podhalańskiego i płaszczowiny magurskiej.



**Ryc. 2.** Zmiany przewyższenia pomiędzy Wdżarem (PM) i Czorsztynem (PPS) w latach 1978–2002 (epoka odniesienia 1978).

Changes in height difference between Wdżar (PM) and Czorsztyn (PPS) over the period 1978–2002 (reference epoch 1978).



**Ryc. 3.** Zmiany przewyższenia pomiędzy Kacwinem (FP) i Niedzicą (PPS) w latach 1978–2002 (epoka odniesienia 1978).

Changes in height difference between Kacwin (FP) and Niedzica (PPS) over the period 1978–2002 (reference epoch 1978).

Do 1995 r. zmiany przewyższenia reperów na zamku w Czorsztynie i wokół zamku w Niedzicy względem reperów odniesienia (płaszczowina magurska i flisz podhalański) oscylowały w granicach 2 mm. Po napełnieniu zbiornika nastąpiło obniżenie Czorsztyna i Niedzicy o blisko 7 mm. Na ryc. 2 i 3 przedstawiono graficznie zmianę przewyższeń na ciągach Wdżar (PM) – Czorsztyn (PPS) oraz Kacwin (FP) – Niedzica (PPS) (Olszak i Szpunar 2004).

### *Badania ruchów poziomych*

Pomiary geodezyjne mające na celu badanie poziomych ruchów w obrębie pienińskiego pasa skałkowego prowadzone są przez Politechnikę Warszawską od 1978 roku. Pierwszą sieć poziomą założono w celu badania zmian odległości, choć mierzono w niej także niektóre kąty w celach redukcyjnych. Składała się ona z ośmiu punktów zlokalizowanych tak, aby badać zmiany położenia stanowisk w pienińskim pasie względem fliszu podhalańskiego (Jędras) i płaszczowiny magurskiej (Frydman, Lubań, Wdżar).

W pienińskim pasie skałkowym zastabilizowano cztery punkty: Zielone Skałki, Czorsztyn, Niedzica i Trzy Korony. Od 1978 do 1989 r. wykonano siedem cykli pomiarowych. Nie zauważono wyraźnych trendów zmian długości i jedynie punkt Trzy Korony wykazywał niewielką tendencję ruchu w kierunku wschodnim rzędu 0,5 mm/rok (Ząbek i in. 1993).

W 1993 r., w związku z rozwojem technologii satelitarnych, postanowiono przeprojektować sieć poziomą tak, aby włączenie pomiarów satelitarnych do wyrównania sieci podniosło jej dokładność i niezawodność. Zastabilizowano kilka nowych punktów w PPS oraz punkty odniesienia w płaszczynie magurskiej i we fliszu podhalańskim. We współpracy ze Słowackim Uniwersytetem Technicznym w Bratysławie założono także trzy punkty po stronie słowackiej (Pachuta i in. 1995, Walo i in. 2003).

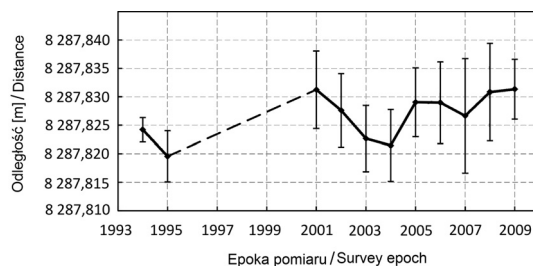
W 2001 r., po sześcioletniej przerwie, badania poziomych ruchów wznowiono. Sieć pozioma została nieco zmodernizowana pod kątem wykorzystania pomiarów satelitarnych GNSS, które stały się odciążeniem podstawową techniką pomiarową wykorzystywaną w badaniach ruchów poziomych

punktów pienińskiego poligonu geodynamicznego. W latach 2001 i 2002 wykonano co prawda również pomiary liniowe tachimetrem Leica TC 2002, ale uzyskane wyniki były na tyle zgodne z wynikami pomiarów satelitarnych, że w późniejszych latach pomiary liniowe dalmierzami (jako mniej dokładne dla dużych odległości i znacznie bardziej pracochłonne) nie były już wykonywane.

Od 2001 r., obserwacje satelitarne wykonywane są corocznie na początku września. Na wybranych punktach prowadzi się je w trzydobowych sesjach obserwacyjnych (punkty Wdżar i Niwki położone w obrębie struktury płaszczowiny magurskiej oraz punkty w Kacwinie i Spiskiej Starej Wsi, zastabilizowane na fliszu podhalańskim). Pozostałe punkty sieci poziomej pienińskiego poligonu geodynamicznego obserwowano w sześciogodzinnych sesjach. Współrzędne poziome punktów, wyznaczone w oparciu o obserwacje z jednej epoki pomiarowej, charakteryzują się błędami średnimi na poziomie  $\pm 2\text{--}3\text{mm}$ , co pozwala na wyznaczenie ruchów punktów pomiędzy kolejnymi epokami obserwacyjnymi z błędem średnim mniejszym niż  $\pm 5\text{mm}$ .

W celu wyznaczenia ruchów poziomych punktów PPS przyjęto za odniesienie grupy punktów usytuowane na strukturach tektonicznych płaszczowiny magurskiej (PM) oraz fliszu podhalańskiego (FP). W pierwszym etapie zbadano wzajemną stałość grupy punktów o obrębie danej struktury. Za kryterium stałości przyjęto nieprzekroczenie przez zmiany długości pomiędzy punktami w kolejnych epokach obserwacyjnych wartości potrójnego błędu średniego tej zmiany. Po weryfikacji stałości punktów odniesienia określono punkty średnie, które reprezentują jednostki tektoniczne płaszczowiny magurskiej oraz fliszu podhalańskiego. Zmiany odległości pomiędzy tymi jednostkami obliczone w odniesieniu do punktów średnich wraz z błędami ich wyznaczenia przedstawia ryc. 4.

Uzyskane wyniki pomiarów z 11 epok obserwacyjnych nie wykazują wyraźnych tendencji ruchów pomiędzy południową częścią płaszczowiny magurskiej i północną częścią fliszu podhalańskiego w obszarze wokół zbiorników. Zmiana odległości nie przekraczała wartości 1 cm, jednak



**Ryc. 4.** Zmiany odległości pomiędzy fliszem podhalańskim a płaszczowiną magurską w latach 1994–2009. Distance changes between Podhale Flysch and Magura Nappe over the period 1994–2009.

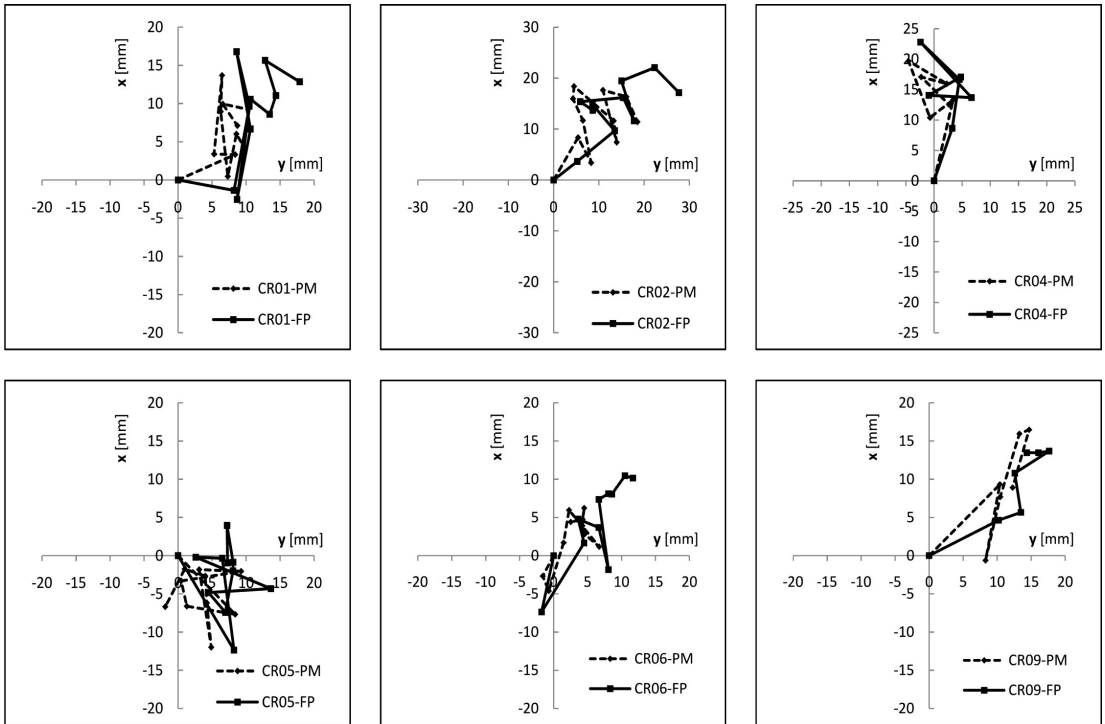
mając na uwadze, że pomiędzy epokami pomiarowymi 1995 i 2001 został napełniony zbiornik na Dunajcu, można postawić hipotezę, że spowodowało to przejściowe wzajemne oddalenie się płaszczowiny magurskiej od fliszu podhalańskiego.

Zmiana położenia punktów w obrębie PPS wyznaczono w odniesieniu do punktów średnich położonych w obszarze PM i FP. Wykresy (Ryc. 5) przedstawia zmiany współrzędnych punktów w kolejnych epokach pomiarowych, dla których obserwacje wykonywane były w latach 1994–2009.

Na wykresach (Ryc. 5) i rysunku (Ryc. 1) można zauważyć pewną tendencję zmiany położenia punktów w kierunku północnym i północno-wschodnim, które w okresie 15 lat osiągają wartość rzędu 15–20 mm. Jedynie punkt CR05 (wieża zamku w Niedzicy) nie wykazuje żadnej tendencji zmian, a jego współrzędne oscylują w granicach  $\pm 10\text{mm}$ . Taki efekt może być spowodowany stabilizacją punktu. Na wykresach przedstawiono tylko zmiany tych punktów, dla który okres pomiaru obejmował co najmniej pięć kolejnych epok pomiarowych.

#### *Prace grawimetryczne*

W 1978 r. do badań geodynamicznych włączono pomiary natężenia siły ciężkości (Ząbek i in. 1988, 1993). Zastabilizowano wtedy cztery stanowiska usytuowane w pobliżu reperów niwelacyjnych badawczej sieci monitorującej ruchy pionowe: na wychodni skalnej w obrębie murów obronnych zamku w Czorszynie, na Zielonych Skalkach, na półce skalnej w pobliżu zamku w Niedzicy oraz u podnóża góry Wdżar.



**Ryc. 5.** Zmiany położenia punktów w obrębie pienińskiego pasa skałkowego.  
Points movements within the Pieniny Klippen Belt.

Punkty odniesienia wybrano tak, aby znalazły się w różnych jednostkach tektonicznych, w odległości do 30 km od poligonu. Wybrano stanowiska Podstawowej Osnowy Grawimetrycznej Kraju w Łącku i Krościenku, punkt w Kacwinie na fliszu podhalańskim oraz stanowisko Grawimetrycznej Bazy Krajowej w Nowym Targu. W kolejnych latach badania grawimetryczne były rozwijane i podzielić można je na cztery okresy: 1978–1990 (osiem cykli pomiarowych), 1993–1995 (trzy cykle pomiarowe na przełomie czerwca i lipca – Barlik, Knap 1993; Barlik 1998), 2001–2003 (trzy cykle pomiarowe, w pierwszej połowie września) oraz 2007–2009 (pomiaru absolutne wartości przyspieszenia siły ciężkości w trzech punktach).

Wszystkie pomiary względne wykonywano grawimetrami statycznymi, najpierw grawimetrem Worden, a następnie grawimetrem LaCoste & Romberg (Pachuta 2003). Najmniejszym zmianom grawitacja ulegała na stanowiskach Zielone Skałki i Wdżar. Stała tendencja

zmian ciężkości pojawiła się na stanowisku Niedzica. Osiągnęła ona tam 0,127 mGal w przeciągu ostatnich 15 lat, jednak większa część tej wartości wyniknęła z wpływu mas ziemnej zapory i wody w zbiornikach górnym i dolnym na Dunajcu.



**Fot. 1.** Grawimetr absolutny FG5 na punkcie pomiarowym w Niedzicy.  
FG5 absolute gravimeter at Niedzica station.

**Tabela I.** Wartości przyspieszenia siły ciężkości na punktach pienińskiego poligonu geodynamicznego: PPS – pieniński pas skałkowy, PM – płaszczowina magurska, FP – flisz podhalański.

The gravity at points of the geodynamic test field in Pieniny: PPS – Pieniny Klippen Belt, PM – Magura Nappe, FP – Podhale Flysh.

Nazwa punktu Point name	Data Date	Gradient Gradient [ $\mu\text{Gal}/\text{m}$ ]	Wysokość Height [m]	Przyspieszenie Gravity [ $\mu\text{Gal}$ ]
Niedzica (PPS)	26.05.2008	268,1 $\pm$ 1,2	1,288	<b>980855669,0<math>\pm</math>2,3</b>
Łącko (PM)	27.05.2008	219,6 $\pm$ 2,8	1,288	<b>980892800,2<math>\pm</math>4,0</b>
Kacwin (FP)	25.05.2008	263,6 $\pm$ 1,8	1,290	<b>980843150,3<math>\pm</math>2,9</b>

W 2008 r. trzy punkty poligonu włączono do jednolitego układu grawimetrycznego odniesienia, tworzonego dla polskich poligonów geodynamicznych (Szpunar i in. 2010). W ramach wykonanych prac wybrano lokalizacje i zastabilizowano betonowymi słupami dwa punkty leżące poza pienińskim pasem skałkowym. Pierwszy punkt zastabilizowano w miejscowości Łącko (obszar PM), a drugi w Kacwinie (obszar FP). Na obszarze PPS wybrano jeden już istniejący punkt w Niedzicy, na którym wykonywano wcześniej pomiary aparatem bezwzględny – balistycznym ZZG (Ząbek i in. 1993). Na wszystkich punktach wykonano obserwacje absolutne grawimetrem FG-5 nr 230 w dobowej sesji obserwacyjnej (Fot. 1).

Tabela I zawiera uzyskane wartości przyspieszenia siły ciężkości zredukowane do poziomu punktu obserwacyjnego. Wartości przyspieszeń siły ciężkości wyznaczone metodą absolutną stanowią cenny materiał wyjściowy do dalszych badań i ułatwią interpretacje zmian przyspieszenia.

### *Badania geofizyczne*

W badaniach geofizycznych dla celów geodynamicznych najlepsze rezultaty osiąga się poprzez zastosowanie dwóch niezależnych metod badawczych, które pozwalają na korelację uzyskiwanych wyników i ich tektoniczną interpretację. W obszarze zbiorników na Dunajcu przeprowadzono profilowanie elektrooporowe i sejsmiczne profilowanie refrakcyjne.

W latach 1980 i 2002 wykonano profilowanie elektrooporowe na odcinku poligonu (11.480 m) pomiędzy Wdżarem i Kacwinem, poprzecznie w stosunku do PPS i jego stref przykontaktowych.

Natomiast sejsmiczne profilowanie refrakcyjne wykonano na wybranych odcinkach tej trasy, ograniczając się do stref przykontaktowych. W opracowanej na tej podstawie geologiczno-inżynierskiej charakterystyce skał płytkiego podłoża określono ilościowe związki między prędkością fali sejsmicznej i elektrycznym oporem właściwym, w celu wyodrębnienia miejsc ekstremów prędkości i spadków oporu właściwego.

Rezultaty badań geofizycznych (Czarnecki 2004) umożliwiły określenie litologii płytkiego podłoża, podział na „bloki” i wydzielenie stref zagęszczonych spękań. Uzyskano również informacje dotyczące głębokości zalegania i rzeźby nie zwietrzałego podłoża skalnego. Wyraźne zmniejszenie prędkości fal sejsmicznych przy południowym kontakcie PPS koreluje się ze stwierdzonym geodezyjnie wydłużeniem (tensją) o ok. 1 cm między Kacwinem (FP) i Niedzicą (PPS).

Wzrost prędkości fali (wzrost naprężeń) przy północnym kontakcie PPS odpowiada skróceniu (kompresji) pomiędzy Czorsztynem a Wdżarem (Czarnecki 2004). Taki obraz deformacji można tłumaczyć przechyleniem się jednostek skałkowych pasa pienińskiego Czorsztyna i Niedzicy w kierunku północnym. Są to przejawy współczesnej aktywności tektonicznej obszaru objętego badaniami geodynamicznymi. Obniżenie się okolic i dna Zbiornika Czorsztyńskiego o ok. 7 mm od momentu napełnienia, spowodowane było procesami geologiczno-inżynierskimi, uaktywnionymi pod wpływem obciążenia terenu pod masami wody, które w powiązaniu z sukcesywnymi wstrząsami wywołanymi pracą turbin w zaporze zintensyfikowały procesy osiadania i kolmatacji dna zbiornika.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej wyniki badań geodynamicznych wskazują, że pieniński pas skałkowy wykazuje neotektoniczną aktywność, która przejawia się wyraźnie zauważalnymi zmianami wysokości i współrzędnych poziomych. Udokumentowano również zmiany grawitacji w dwóch kompleksach geologicznych.

Do badania współczesnej aktywności geodynamicznej Karpat, w szczególności pienińskiego pasa skałkowego, autorzy proponują ich kontynuację:

- w trzech stanowiskach w celu wyznaczenia absolutnych wartości przyspieszenia siły ciężkości (Łącko, Niedzica i Kacwin), po jednym w obrębie ważnych struktur geologicznych,

- w dotychczasowych punktach obserwacji satelitarnych GNSS,

- wzdłuż jednej linii niwelacji precyzyjnej, zorientowanej poprzecznie w stosunku do stref kontaktowych PPS.

Na podstawie przedstawionych wyników badań zjawisk geodynamicznych autorzy postulują powtarzanie obserwacji w tym rejonie co 3 do 5 lat. Pozwoliłoby to na ciągłe śledzenie i pełniejszą interpretację zjawisk geodynamicznych zachodzących w rejonie PPS. Jako wniosek podsumowujący 30-letni okres badań należy podkreślić, że dotychczas zarejestrowane przejawy geodynamiczne nie powinny wpływać na konstrukcję zapory. Zgromadzone masy wody wpłynęły na zmianę przyspieszenia na punktach sieci grawimetrycznej, co jest zgodne z teoretycznymi wyliczeniami. Zmiany wysokości punktów sięgające 7 mm wynikają z oddziaływania olbrzymich mas wody, a nie z naturalnych współczesnych ruchów tektonicznych. Poziome ruchy pienińskiego pasa skałkowego w kierunku północno-wschodnim są mniejsze od 1 mm/rok i ich wyjaśnienie wymaga dalszych badań.

Oddany do użytku w 1997 r. zespół sztucznych zbiorników wodnych nie wpłynął znacząco na przemieszczanie się wzajemne sąsiednich struktur geologicznych. Zaobserwowane ruchy nie powinny grozić bezpieczeństwu zapory. Podkreślenia wymaga jednak fakt, że żaden z naszych punktów badawczych nie był założony na koronie

zapory, a wnioski nie dotyczą stałości konstrukcji obiektów hydrotechnicznych. Badaniami ewentualnych dyslokacji obiektu hydrotechnicznego zajmują się odpowiednie, specjalnie do tego powołane służby.

## PIŚMIENNICTWO

- Barlik M., Knap T. 1993. Grawimetryczne badania lokalnych zjawisk geodynamicznych w Pienińskim Pasie Skałkowym. — *Przegląd Geodezyjny*, **65**(3): 7–9.
- Barlik M. 1998. Geodynamiczne badania grawimetryczne w pienińskim pasie skałkowym. — *Przegląd Geodezyjny*, **11**: 3–8.
- Birkenmajer K. 1974. Carpathian Mountains. [W:] M. Spencer (red.) *Mesozoic – Cenozoic Orogenic Belts – data for Orogenic Studies*. — *Geological Society Special Publications*, **4**: 127–157.
- Birkenmajer K. 1986. Stages of the structural evolution of the Pieniny klippen belt, Carpathians. — *Studia Geologica Polonica*, **88**: 7–32.
- Czarnecka K. 1988. Interpretation of vertical tectonic movements supported by structural geophysical prospecting. — *Journal of Geodynamics*, **9**(2–4): 343–348.
- Czarnecka K. 1992. Local aspects, models and monitoring of recent crustal movements in Central Europe. — *Journal of Geodynamics*, **18**(1–4): 101–106.
- Czarnecki K., Barlik M., Czarnecka K., Pachuta A. 2001. The test-field of the Pieniny Klippen Belt. — *Reports of Geodesy*, **2/57**: 125–127.
- Czarnecki Kazimierz (red.) 2004. Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skałkowego w rejonie Czorsztyna. Monografia. — *Politechnika Warszawska, Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej, Warszawa*, 101 s.
- Margański S. 1997. Poligon badań geodynamicznych w Pienińskim Pasie Skałkowym. — *Przegląd Geodezyjny*, **8**: 10–13.
- Pachuta A., Walo J., Malarski R. 1995. Łączne opracowanie pomiarów satelitarnych i klasycznych w badaniach geodynamicznych na poligonie w Pieninach. Seminarium „Zastosowanie technik satelitarnych w geodezji i geodynamice”, Grybów, 22–24 maj 1995.
- Pachuta A. 2003. Automation of the static gravity meters calibration. — *Reports on Geodesy*, **4/67**: 75–82.
- Olszak T., Szpunar R. 2004. Badania ruchów pionowych na pienińskim poligonie geodynamicznym metodą niwelacji precyzyjnej w latach 2001–2002. [W:] K. Czarnecki (red.) *Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skałkowego*. Monografia. — *Warszawa*, ss. 13–30.
- Szpunar R., Pachuta A., Próchniewicz D. 2010. Absolutne pomiary grawimetryczne na obszarze pienińskiego poligonu geodynamicznego. [W:] J. Walo (red.) *Jednolity*



- system grawimetrycznego odniesienia polskich stacji permanentnych GNSS i poligonów geodynamicznych. — *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, ss. 81–86.
- Walo J., Pachuta A., Szpunar R., Olszak T. 2003. Movements of the control points after filling the artificial water reservoir in Pieniny Mts. — *Reports on Geodesy*, 1/64: 103–109.
- Ząbek Z., Barlik M., Margański S., Pachuta A. 1988. Geodynamical investigations in the Pieniny klippen belt, Poland, from 1978 to 1985. — *Acta Geophysica Polonica*, 36(2): 115–137.
- Ząbek Z., Barlik M., Knap T., Margański S., Pachuta A. 1993. Continuation of geodynamic investigations in the Pieniny klippen belt, Poland, from 1985 to 1990. — *Acta Geophysica Polonica*, 41(2): 131–150.
- Zuchiewicz W. (red.) 1995. Selected aspects of neotectonics of the Polish Carpathians. — *Folia Quaternaria*, 66: 145–204.

## SUMMARY

The geological structure of the Pieniny Klippen Belt is rather complicated, as a result of tectonic processes during the Alpine orogeny. Because of that, geodynamical investigations have been carried out since the 1960s. In 1969, the Faculty of Geodesy and Cartography Warsaw University of Technology established a geodynamic network around the Pieniny Klippen Belt. Since then, there have been carried out leveling, gravimetric measurements and distance observations in horizontal network. Besides, in 1990s there were performed GPS observations and absolute gravimetric measurements at one point. These investigations showed periodic vertical movements (0.5–1.5 mm per year) correlated with the interaction between the geological structures of the Magura Nappe and the Podhale Flysh. The direction and velocity of the horizontal movements have changed in irregular manner (max 10 mm over 17 years). Gravimetric measurements have yielded quasi-periodic changes in gravity (20  $\mu$ Gal) within the area around Czorsztyn and Niedzica and 0,1 mGal change over 17 years at Niedzica station.

In 1990s, the Dunajec river dam and the water reservoirs in Czorsztyn and Sromowce Wyżne were built. This created a new aspect in investigations related to the effect of tectonic movements on the dam. Taking that into account, the study was revived in 2001.

The levelling was performed in 2001 and 2002 along the Wdźar – Czorsztyn line and the Kacwin – Niedzica line with the Trimble DiNi12 instrument. Changes in altitude are presented in Fig. 2 and 3. The analysis showed 7 mm vertical displacement after filling the Czorsztyn reservoir.

Since 2001, distance measurements between points of the geodynamical network have been carried out using GNSS technology. Comparison between distances performed before and after 2001 has reported less than 1 cm change (Fig. 4), which can be explained by the influence of the Czorsztyn reservoir. There is no movement of the geological structures of the Magura Nappe and the Podhale Flysh against each other; differences in distance does not present any linear trend (Fig. 5). In turn, there can be reported north-east linear displacement of almost all points (15–20 mm over 15 years). Velocity vectors are shown in Fig. 1.

Gravimetric measurements were carried out using a static gravimeter. Since 2008, absolute measurements have been performed with the FG5 absolute gravimeter. Fot. 1 presents the FG5 gravimeter at the measuring point in Niedzica. Table I presents the results of measurements at three absolute points. Changes in gravity at polygon points go back 0.1 mGal over 30 years. However, it is primarily the result of interaction of water masses.

To summarize, slight changes in position, height and gravity of the test points are caused by presence of water masses. Construction of the water reservoir in Czorsztyn does not affect the position of the geological structures of the Magura Nappe and the Podhale Flysh. Thus, it also does not have negative impact on the hydrological structure of the dam.

