

STEFAN CACOŃ
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

**SYSTEM KONTROLNO-POMIAROWY
JAKO PODSTAWA GEODYNAMICZNYCH BADAŃ
REGIONALNYCH I LOKALNYCH W SUDETACH
I NA BLOKU PRZEDSUDECKIM**

ZARYS TREŚCI: Autor przedstawia w pracy rezultaty geodezyjnych badań geodynamicznych prowadzonych w Sudetach i na Bloku PrzedSUDECKIM, bazując na powtarzanych pomiarach różnymi technikami zespolonymi w kompleksowym systemie kontrolno-pomiarowym. Obejmują one wyniki badań regionalnych w sieci GEOSUD oraz lokalnych na poligonach geodynamicznych. Scharakteryzowano zasady lokalizacji i stabilizacji punktów sieci badawczych, podano ogólne informacje dotyczące pomiarów satelitarnych GPS i innych. Zobrazowano postęp w zakresie dokładności pozycjonowania punktów z zastosowaniem obserwacji GPS w okresie 1996–2003 oraz wektory prędkości poziomych punktów sieci GEOSUD. Podjęto próbę interpretacji uzyskanych wyników w rejonie sudeckiego uskoku brzeżnego.

Rezultaty badań lokalnych zaprezentowano na przykładzie trzech poligonów geodynamicznych. Stwierdzone istotne przemieszczenia punktów, którym towarzyszą również zmiany grawitacji, dotyczą szczególnie Rowu Paczkowa.

Życzliwie krytyczna recenzja pracy „Wybrane zagadnienia dotyczące sieci geodezyjnych do badania ruchów skorupy ziemskiej” (Cacoń S., 1980) wykonana przez Czcigodnego Jubilata – Profesora Bogdana Neya, stała się zachętą do realizacji prac badawczych w geodezyjnym środowisku wrocławskim, związanych ze współczesną geodynamiką Polski południowo-zachodniej.

1. WSTĘP

Obszar Sudetów i bloku przedsudeckiego, stanowiący obrzeżenie prekambryjskiego Masywu Czeskiego, w czasie orogenezy alpejskiej stanowił strefę oporową dla fałdujących się Karpat. Kompresyjne naciski generowane z rozwijających się płaszczowin w Karpatach powodowały intensywne spękania tektoniczne, tworząc blokową strukturę tego regionu. Aktualna sytuacja geologiczno-tektoniczna tego obszaru to efekt ruchów tektonicznych młodotrzeciorzędowych z okresu miocenu i pliocenu. Współczesne badania geologiczne, sejsmiczne, geodezyjne, satelitarne GPS i grawimetryczne wykazują, że ruchy te nie zostały jeszcze zakończone. Aktywność niektórych uskoków tektonicznych w Sudetach i ich otoczeniu związana jest również z wpływami technogennymi (Cacoń S., Dyjor S., 2002).

Na początku lat 90. XX w. rozpoczęto kompleksowe badania geodynamiczne tego regionu. Podstawę tych badań stanowi system kontrolno-pomiarowy własnej koncepcji. Obejmuje on geodynamiczne badania regionalne całego obszaru Sudetów i Bloku Przedsudeckiego oraz lokalne, zorganizowane w różnych okresach, jako poligony geodynamiczne na sześciu obiektach. Badawcza sieć regionalna GEOSUD (Cacoń S., 2001) łączy lokalne poligony geodynamiczne: Masyw Śnieżnika, Góry Stołowe, Rów Paczkowa, Karkonosze, Dobromierz i Janowice.

W pracy przedstawiono charakterystykę systemu kontrolno-pomiarowego i schemat obliczeniowy oraz rezultaty badań geodynamicznych analizowanego obszaru. Dotyczą one badań regionalnych oraz lokalnych na wybranych poligonach geodynamicznych.

2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU KONTROLNO-POMIAROWO-OBLICZENIOWEGO

Koncepcja trójsegmentowego systemu kontrolno-pomiarowego (Cacoń S., 1980) powstała w celu realizacji badań deformacji bloków skalnych masywu Szczelińca w Górach Stołowych. Zastosowane wówczas klasyczne techniki pomiarowe w latach 90. XX w. wzbogacono techniką satelitarną GPS (Cacoń S., Kontny B., 1994). Ponadto trzy segmenty „geometryczne” systemu rozszerzono o segment IV „dynamiczny”, bazujący na pomiarach grawimetrycznych (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka systemu kontrolno-pomiarowego

	SEGMENT I	SEGMENT II	SEGMENT III	SEGMENT IV
Obserwacje (instrumentarium)	GPS stacja totalna niwelacja precyzyjna	GPS stacja totalna niwelacja precyzyjna	ekstensometr szczelinomierz inklinometr	grawimetr
Częstotliwość obserwacji	1–5 lat	3–12 miesięcy	1–30 dni lub ciągle	1–5 lat
Dokładność wyznaczenia przemieszczeń	0.5–5 mm	0.5–2 mm	0.01–0.1 mm 0.1 mm/1 m	(12–20) μ Gal

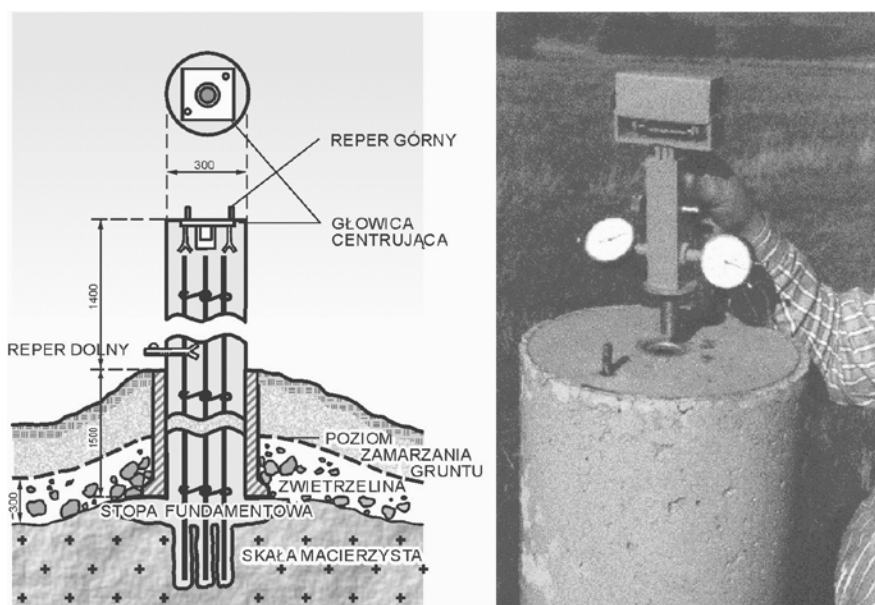
Segmenty I i II są związane pomiarami „bezwzględny”, przy czym zasięg pomiarów w sieci badawczej obejmującej segment I, dzięki obserwacjom GPS, może być praktycznie nieograniczony. Nawiazane pomiary segmentu II obejmują sieci lokalne zorganizowane na poligonach geodynamicznych. Pomiary względne (segment III), systemowo powiązane z segmentami I i II, wzbogacają geodynamiczne obserwacje „bezwzględne” dzięki dokładnościom pomiarów (np. szczelinomierzem, ekstensometrem, pochyłomierzem) o jeden, a nawet dwa rzędy wyższym. Do realizacji pomiarów w segmentach I, II i IV zaproponowano odpowiednią konstrukcję znaku pomiarowego w postaci słupa betonowego z głowicą do wymuszonego centrowania instrumentów oraz dwoma reperami (górnym i dolnym) – rysunek 1. Tuleja głowicy służy jednocześnie do wprowadzania bolca pochyłomierza nasadkowego (fot.), pozwalającego na wykrywanie ewentualnych ruchów własnych słupa betonowego (Cacoń S., Ćmielewski K., 1992).

Komputerowy system opracowania rezultatów okresowych pomiarów deformacji obrazuje schemat pokazany na rysunku 2.

3. GEODYNAMICZNE BADANIA REGIONALNE W SUDETACH I NA BLOKU PRZEDSUDECKIM – PROJEKT GEOSUD

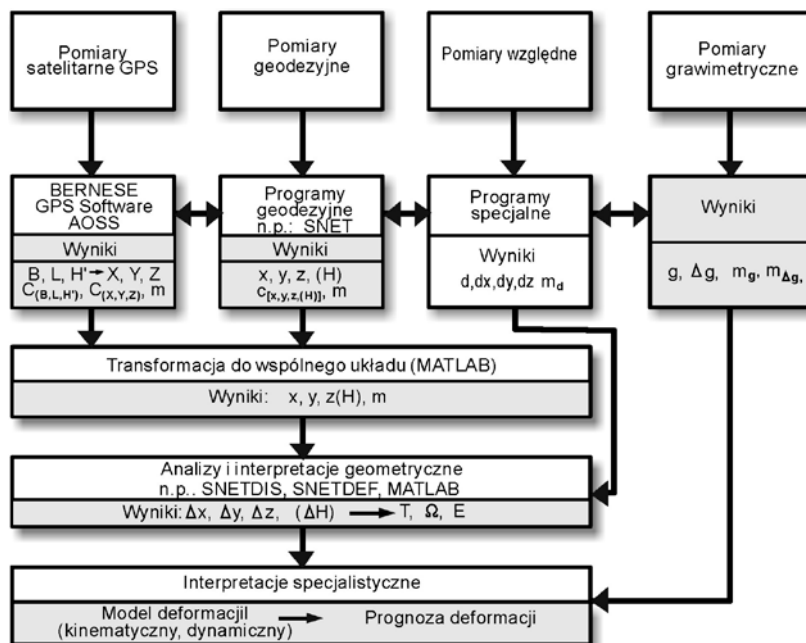
Sieć GEOSUD (GEOdynamika SUDetów) powstała w 1996 r. w celu zintegrowania w jeden system wcześniej założonych, lokalnych sieci geodynamicznych: Masyw Śnieżnika (1992 r.), Góry Stołowe (1993 r.), Rów Paczkowa (1993 r.). Utworzona została z reprezenta-

tywnych punktów sieci lokalnych, zlokalizowanych we wschodniej części badanego obszaru. W roku 2000 sieć tę, stanowiącą I segment systemu kontrolno-pomiarowego, rozszerzono na cały masyw Sudetów i Bloku Przedsuddeckiego (rys. 3). Lokalizację punktów sieci regionalnej podporządkowano warunkom geologiczno-tektonicznym, co przykładowo pokazano na kilku przekrojach geologicznych (rys. 4). Punkty sieci tworzą 9 profili badawczych przecinających główne struktury tektoniczne obszaru.

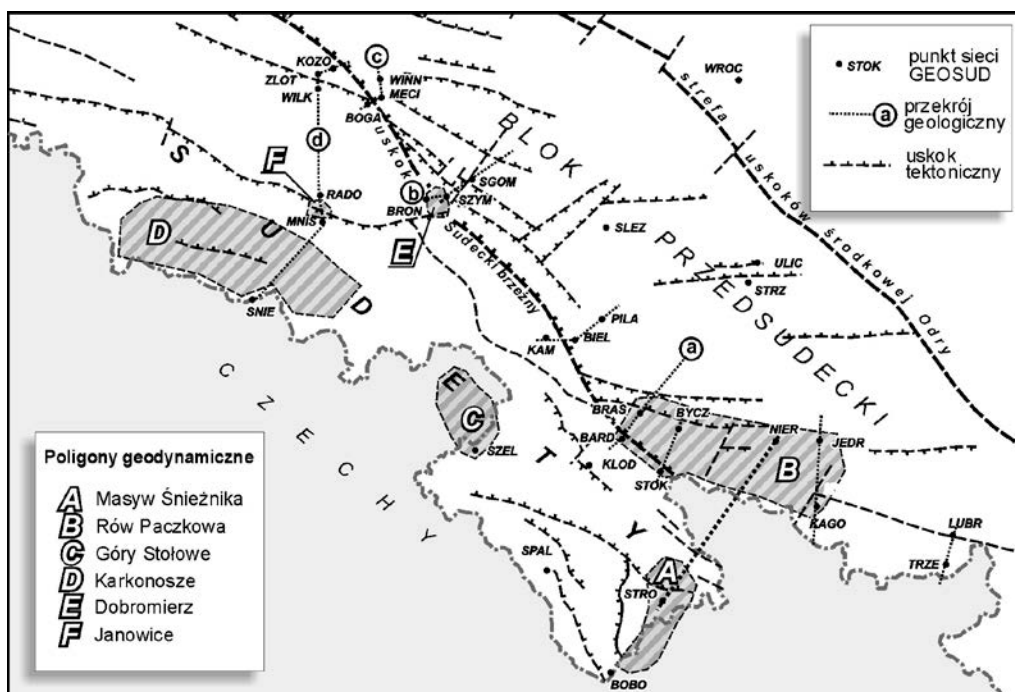


*Rys. 1. Schemat konstrukcji znaku pomiarowego.
Pochyłomierz nasadkowy w trakcie przygotowania do obserwacji (fot.)*

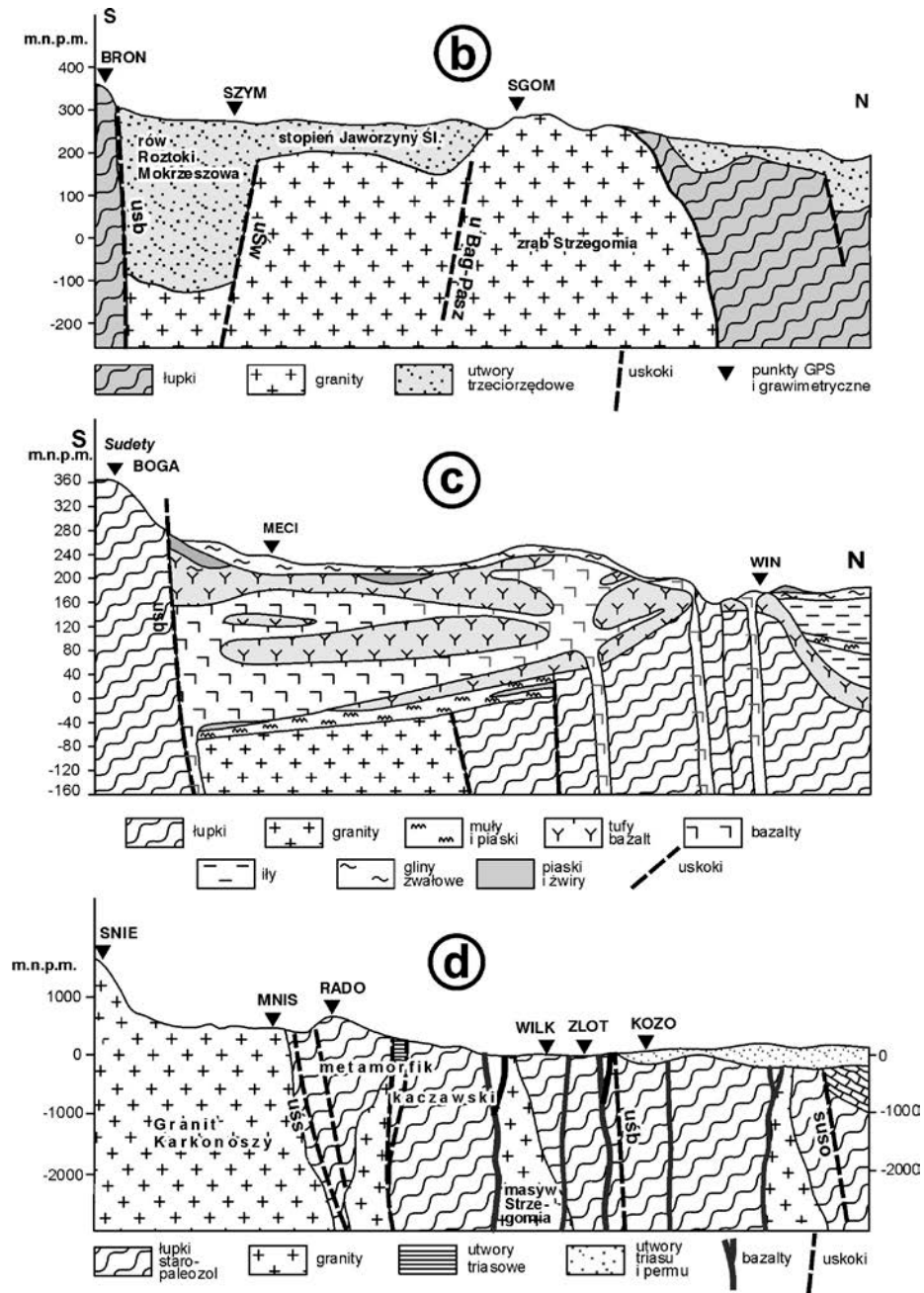
Powtarzane corocznie we wrześniu pomiary satelitarne GPS na punktach sieci GEOSUD realizowano początkowo (1996–1999) w sesjach 6–4 godzinnych, a od 2000 r. w sesjach 12–48 godzinnych. Wydłużenie obserwacji skutkowało podniesieniem dokładności (RMS) pozycjonowania punktów (N, E, W) w poszczególnych latach, co pokazano na rysunku 5.



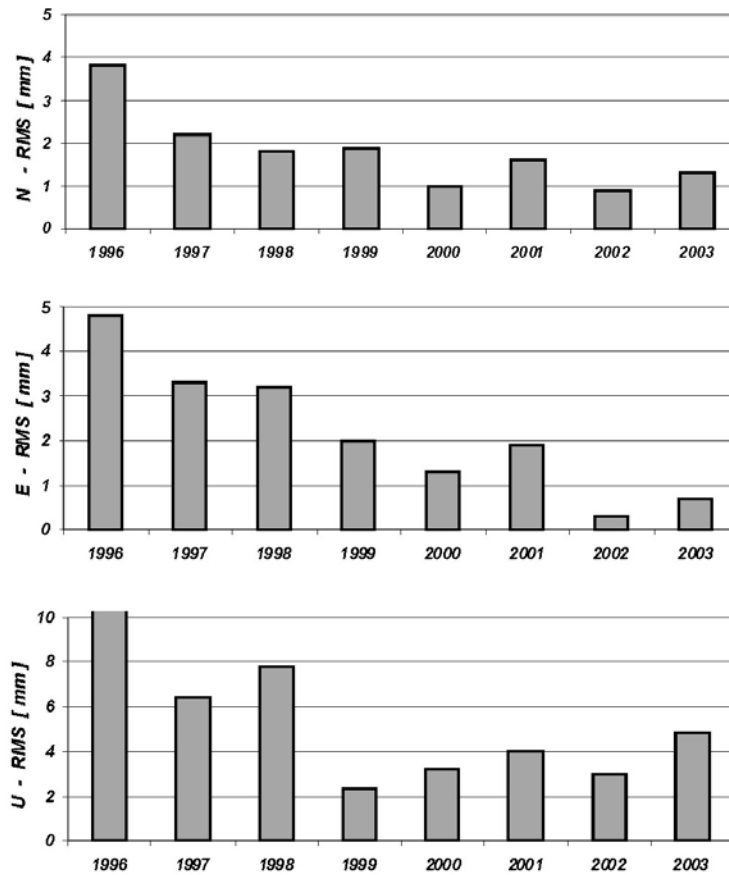
Rys. 2. Schemat systemu opracowania danych pomiarowych



Rys. 3. Lokalizacja punktów sieci badawczej GEOSUD na tle tektoniki obszaru

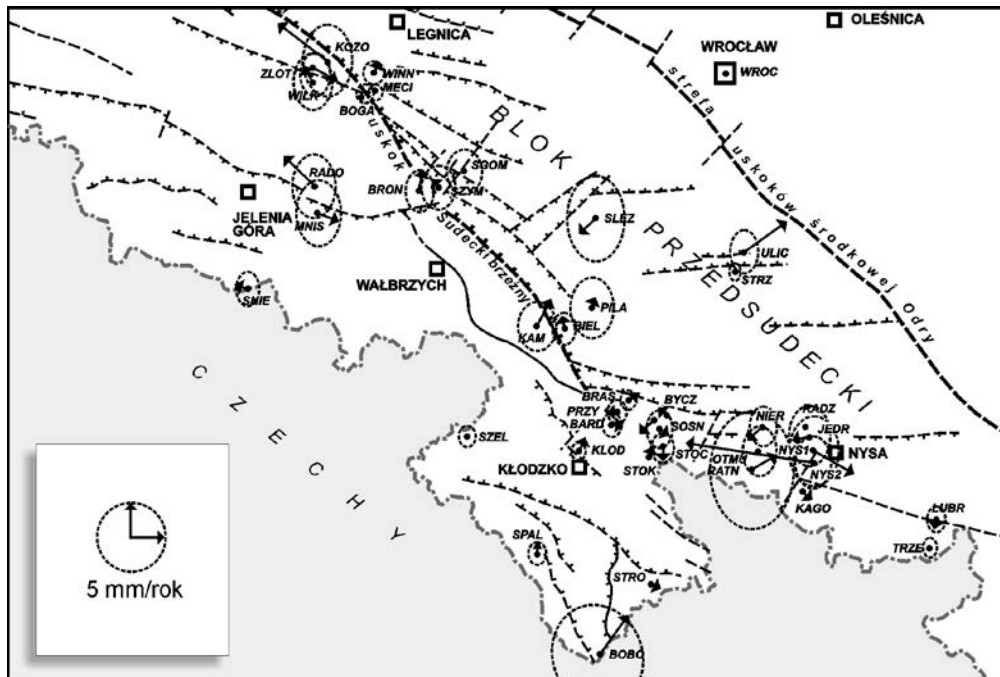


Rys. 4. Wybrane przekroje geologiczne w rejonie sudeckiego uskoku brzeżnego

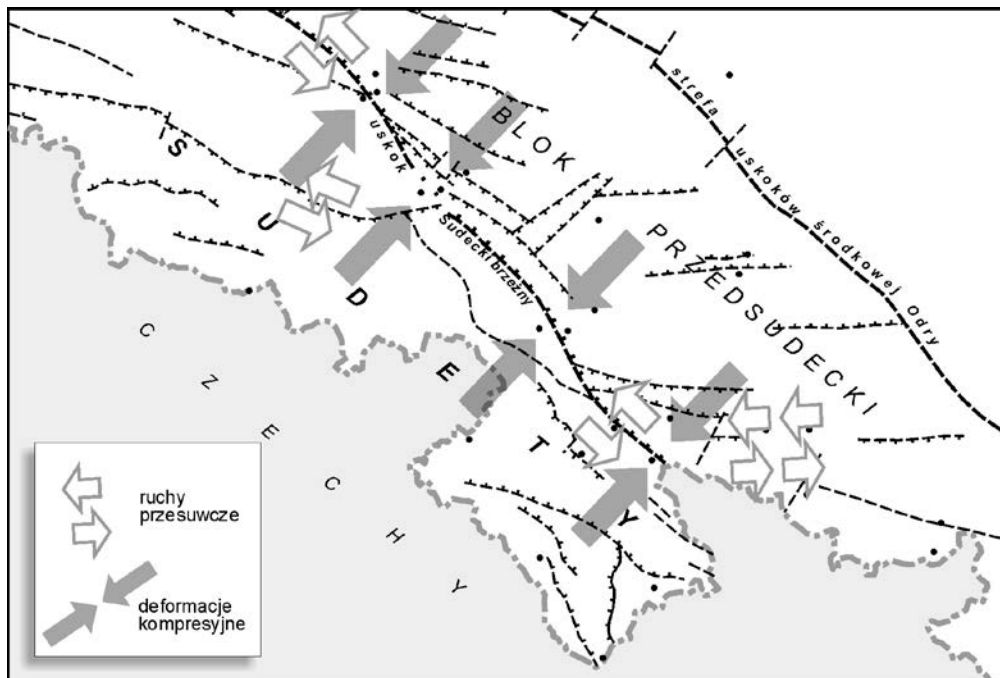


Rys. 5. Wartości średnich błędów współrzędnych sieci GEOSUD z rozwiązań epokowych 1996-2003

Szczegóły opracowania wyników obserwacji GPS w sieci GEOSUD przedstawiono w pracy B. Kontnego (2003). Zastosowano tu liniowy model ruchu punktów sieci oraz odporną na błędy grube metodę estymacji parametrów modelu (składowych prędkości punktów) z jednoczesną estymacją korekt składowych przesunięcia centrum fazowego użytych w pomiarach anten. Na rysunku 6 pokazano wektory poziomych prędkości ruchów punktów sieci GEOSUD oraz ich elipsy ufności obliczone na podstawie danych pomiarowych z lat 1996–2002 (Kontny B., 2003). Należy zaznaczyć, że w procesie opracowania obserwacji GPS sieć GEOSUD nawiązano do stacji permanentnych IGS/EPN: Borowiec (BOR1), Wetzell (WTZR), Pecny (GOPE), Penc (PENC).



Rys. 6. Wektory prędkości poziomych punktów sieci GEOSUD i ich elipsy ufności (Kontny B., 2003)

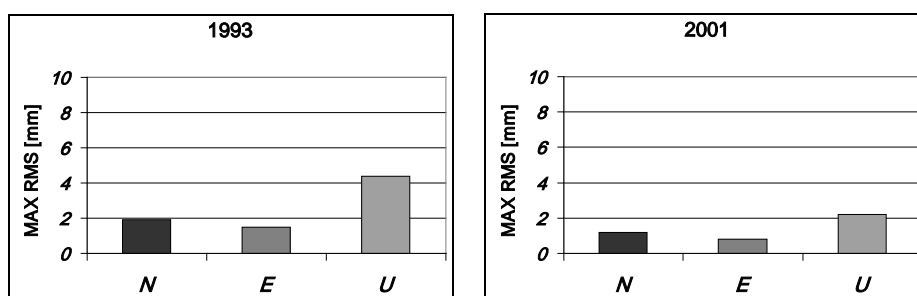


Rys. 7. Schemat prawdopodobnego charakteru deformacji powierzchniowych w rejonie sudeckiego uskoku brzeżnego (Kontny B., 2003)

Na podstawie stosunkowo krótkiego okresu powtarzanych pomiarów GPS w sieci GEOSUD (1996–2002 w części wschodniej sieci i 2000–2002 w części zachodniej) B. Kontny (2003) przedstawił hipotetyczny model deformacji w rejonie głównych uskoków na badanym obszarze z dominującymi odkształceniami o charakterze kompresyjnym i możliwymi lokalnymi ruchami przesuwczymi (rys. 7). Z uwagi na to, że obliczone wartości parametrów kinematyki obszaru w większości przypadków mieszczą się w ich przedziale ufności przedstawiony model należy traktować jedynie jako prawdopodobny i będzie zweryfikowany następnymi pomiarami.

4. GEODYNAMICZNE BADANIA LOKALNE W SUDETACH I NA BLOKU PRZEDSUDECKIM

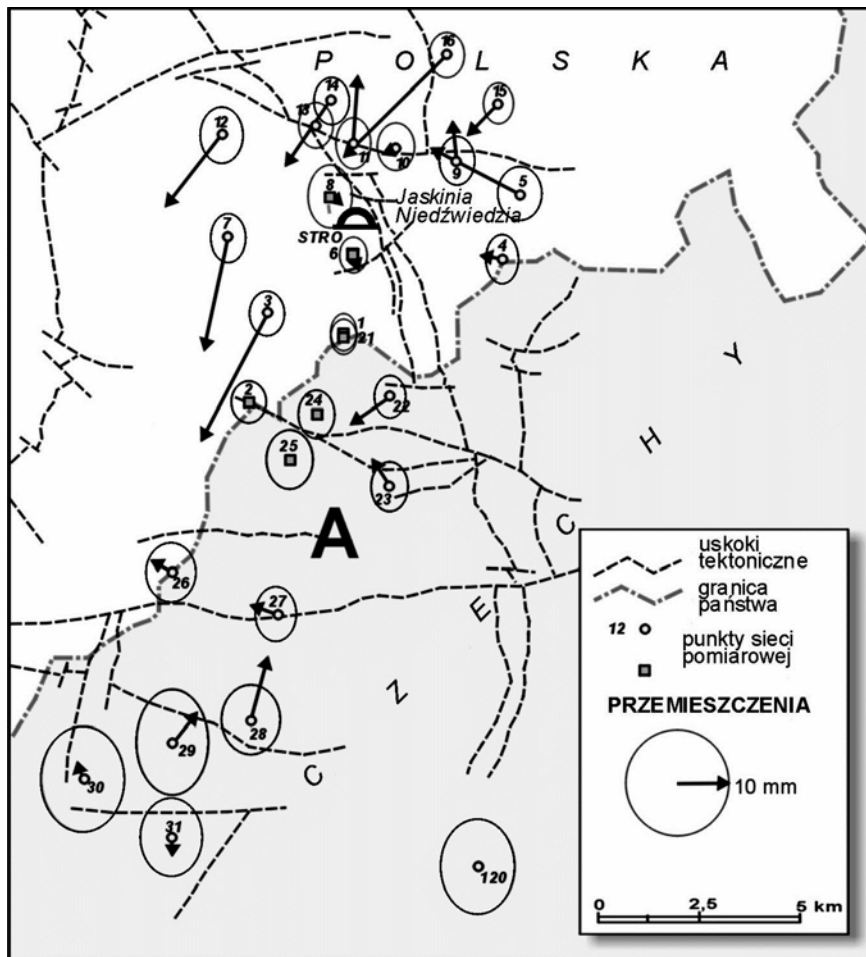
Przedmiotowe prace badawcze prowadzone są na sześciu poligonach geodynamicznych zorganizowanych w latach 1992 i 1993 oraz w 2000 r. Rezultaty badań geodynamicznych na tych poligonach przedstawiono w kilku pracach (m.in. Cacoń S. et al., 2004). Geodezyjne sieci badawcze stanowią II i IV segment systemu kontrolno-pomiarowego. Na czterech obiektach prowadzone są również obserwacje względnych ruchów struktur (bloków) geologicznych, stanowiące III segment systemu. Dokładność obserwacji GPS, wykonywanych w lokalnych sieciach badawczych w różnych cyklach czasowych w okresie 1993–2003 wzrosła dwukrotnie, co pokazano na przykładzie sieci „Rów Paczkowa” (rys. 8).



Rys. 8. Dokładność obserwacji GPS w Rowie Paczkowa w latach 1993 i 2001

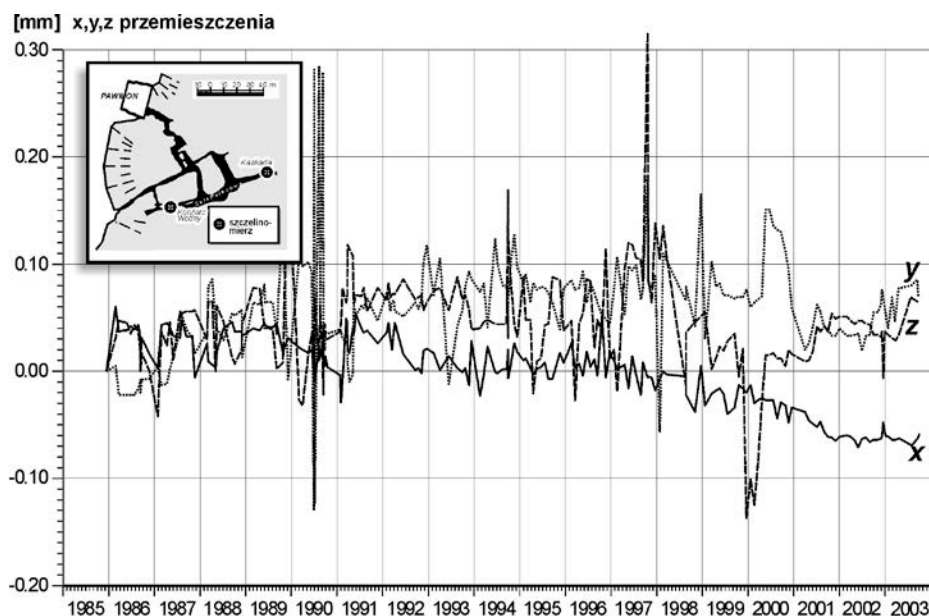
4.1. Poligon geodynamiczny Masyw Śnieżnika

Poligon założono w 1992 r. na polskiej i czeskiej części Masywu Śnieżnika na obszarze ponad 150 km². W sieci badawczej składającej się z 27 punktów (16 po polskiej i 11 po czeskiej stronie) realizowane są pomiary satelitarne GPS, geodezyjne (niwelacja precyzyjna), względne (szczelinomierz, pochyłomierz nasadkowy) oraz grawimetryczne.



Rys. 9. Wektory przemieszczeń poziomych w sieci Masyw Śnieżnika w okresie 1993–2003

Rezultaty powtarzanych pomiarów GPS, obejmujące okres 1993–2003 (Cacoń S. et al., 2004) pokazano na rysunku 9. Wektory istotnych przemieszczeń punktów badawczych, szczególnie w części polskiej Masywu Śnieżnika, potwierdzają współczesną mobilność tektonicznych struktur tego obiektu. Interesujące są również wyniki obserwacji względnych ruchów bloków skorupowych we wnętrzu Jaskini Niedźwiedziej. Na rysunku 10 pokazano zarejestrowane zmiany w kierunkach x, y, z na jednym z dwóch szczelinomierzy TM-71 zainstalowanych w Korytarzu Wodnym jaskini. Interpretację tych rezultatów przedstawiono w pracy (Košťák B., Cacoń S., 1999). Zmianom poziomym i pionowym punktów towarzyszą również zmiany grawitacji, które w okresie 1993–2003 osiągają istotne wartości od 27 do 64 μGal (Barlik M. et al., 2004).

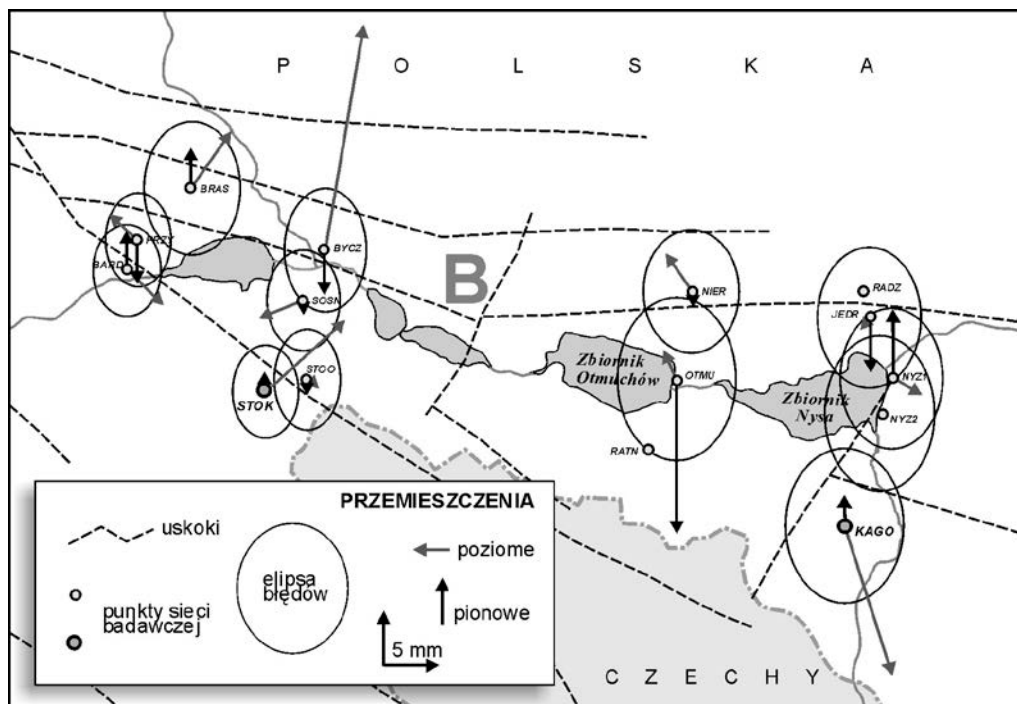


Rys. 10. Względne ruchy bloków skalnych w Korytarzu Wodnym Jaskini Niedźwiedziej

4.2. Poligon geodynamiczny Rów Paczkowa

Obszar poligonu obejmuje ponad 500 km² i należy do najbardziej aktywnych tektonicznie w Polsce. Ruchy pionowe górnej warstwy litosfery w okresie 1926–1953–1975, dochodzące do –6 mm/rok (Wyrzykowski T., 1985), są wypadkową zmian endo- i egzogenicznych. Przez obszar ten przepływa Nysa Kłodzka, na której wybudowano dwie zapory: Otmuchów (1935 r.) i Nysa (1972 r.), a trzy kolejne są w budowie.

Poligon geodynamiczny zorganizowany w 1993 r. tworzy sieć 15 punktów zlokalizowanych na wychodniach skał krystalicznych oraz w pobliżu zapór wodnych. Wyniki powtarzanych w okresie 1993–2003 pomiarów satelitarnych GPS, geodezyjnych i grawimetrycznych wykazują, że wcześniej rejestrowanym ruchom pionowym towarzyszą również zmiany poziome powierzchni skorupy ziemskiej oraz zmiany grawitacji. Na rysunku 11 przedstawiono wektory przemieszczeń poziomych i pionowych punktów w sieci Rów Paczkowa w okresie 1993–2001 (Cacoń S. et al., 2004). Zmiany grawitacji¹ na punktach sieci badawczej Rów Paczkowa, rejestrowane przy zastosowaniu grawimetrów La Coste & Romberg, model G oraz Scintrex Autograv CG-3M, podano w tabeli 2.



Rys. 11. Wektory przemieszczeń poziomych i pionowych w punktach sieci Rów Paczkowa w okresie 1993–2001

¹ Pomiary wykonywał zespół Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej (na zlecenie) pod kierunkiem prof. M. Barlika.

Tabela 2. Zmiany grawitacji na wybranych punktach sieci Rów Paczkowa

Punkt	Zmiany grawitacji Δg (μGal)								
	1993-1994	1994-1996	1996-1997	1997-1998	1998-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	1993-2003
BARD	-50	-31	+48	-10	-30	+8	+21	0	-44
BYCZ	-20	-28	-22	-44	-4	+4	-4	-13	-131
STOK	-40	-19	-107	+65	-37	+42	-52	+29	-119
NIER	+10	+10	-95	+24	-24	+24	-36	–	-87
KAGO	-60	+58	-104	-22	+2	-8	+8	-5	-131

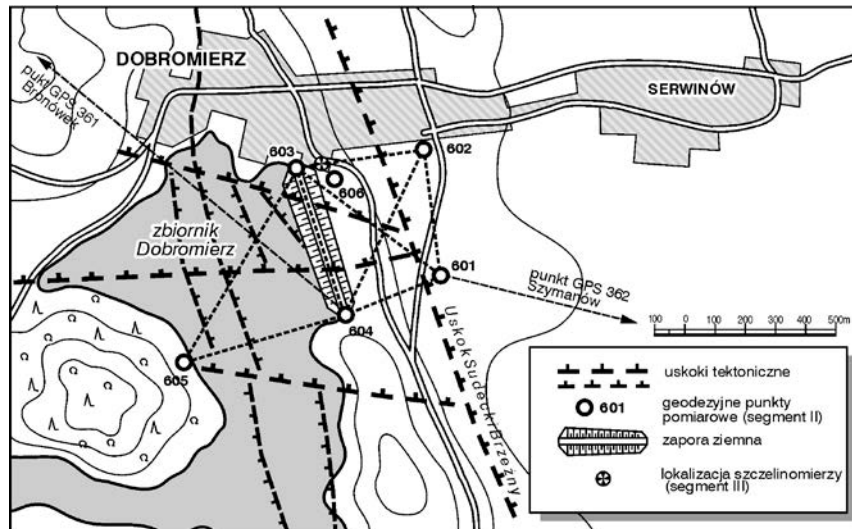
Zmiany istotne $\Delta g \geq \pm 2m_{\Delta g}$ (z prawdopodobieństwem $\alpha = 95\%$) pogrubiono

Największe zmiany grawitacji zarejestrowano w okresie 1996–1998. Miały one związek z katastrofalną powodzią w lipcu 1997 r. Godny podkreślenia jest fakt, że w okresie 1993-2003 zmiany te osiągnęły głównie wartości ujemne (od $-44 \mu\text{Gal}$ do $-131 \mu\text{Gal}$). Wskazuje to na tendencje do podnoszenia się Rowu Paczkowa oraz jego współczesną mobilność tektoniczną.

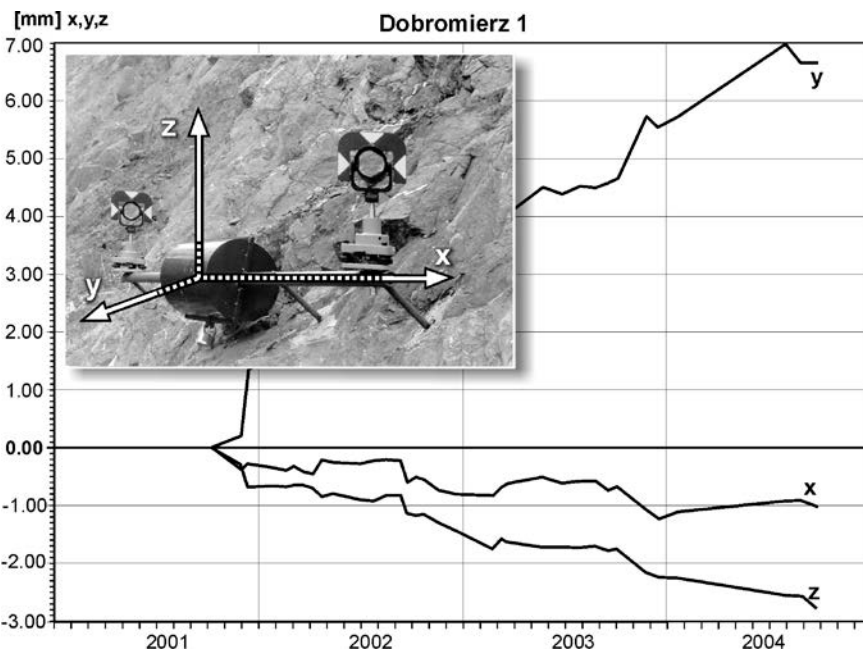
4.3. Poligon geodynamiczny Dobromierz

Poligon zorganizowano w 2000 r. w strefie sudeckiego uskoku brzeżnego w nawiązaniu do punktów regionalnej sieci GEOSUD (rys. 3) w profilu b (punkty: BRON, SZYM, SGOM). Aspekt użytkowy badań geodynamicznych na poligonie związany jest z bezpieczeństwem eksploatacji zapory wodnej Dobromierz, zlokalizowanej w bezpośrednim kontakcie z sudeckim uskokiem brzeżnym (rys. 12).

Satelitarno-geodezyjno-grawimetryczna sieć badawcza składa się z sześciu punktów zastabilizowanych blokami betonowymi. Pomiarów tej sieci w nawiązaniu do punktów sieci GEOSUD realizowane są w segmentach I, II i IV systemu kontrolno-pomiarowego (tab. 1). W pobliżu lewego przyczółka zapory na uskoku strefy brzeżnej Sudetów oraz w galerii zapory zainstalowano dwa szczelinomierze TM-71, które w ramach segmentu III realizują obserwacje względne struktur geologicznych. Godny podkreślenia jest fakt, że konsole szczelinomierza zlokalizowanego na przyczółku zapory można obserwować również geodezyjnie (stacja totalna Leica TCA 2003). Stanowi to podstawę do pełnego zintegrowania pomiarów deformacji we wszystkich segmentach systemu kontrolno-pomiarowego oraz wzajemną weryfikację względnych obserwacji szczelinomierzem oraz „bezwzględnych” – metodami geodezyjnymi (rys. 13).

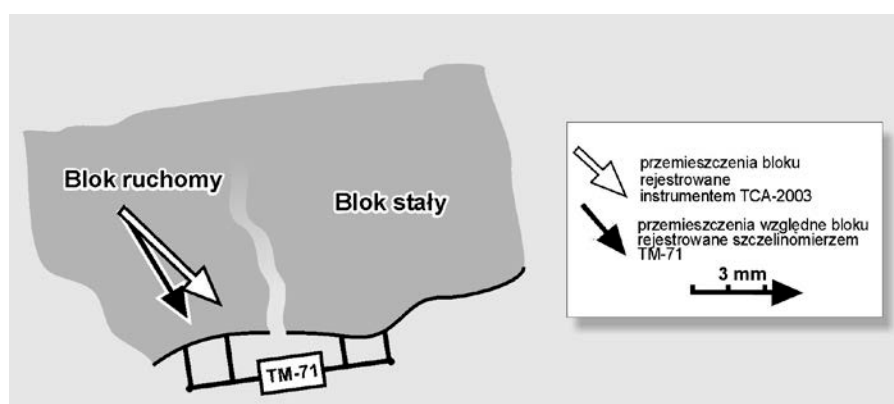


Rys. 12. Poligon geodynamiczny Dobromierz



Rys. 13. Względne ruchy bloków skorupowych rejestrowane szczelinomierzem TM-71

Pomiary realizowane w latach 2001–2003 potwierdziły dużą zgodność rezultatów uzyskanych obiema metodami. Pokazano to w postaci wektorów poziomych charakteryzujących zmiany względne i „bezwzględne” (rys. 14). Należy zaznaczyć, że rejestrowane przemieszczenia wskazują na ruch lewego bloku skorupowego względem prawego, uznanego *a priori* za stabilny.



Rys. 14. Wektory poziomych przemieszczeń rejestrowane szczelinomierzem TM-71 i stacją totalną Leica TCA 2003

Ruch ten według wstępnych interdyscyplinarnych interpretacji ma charakter masowy, wynikający z prawdopodobnego odspajania tego bloku od podłoża. Uzyskane rezultaty mają znaczenie z punktu widzenia procesu doskonalenia metodyki pomiarów deformacji z zastosowaniem systemu kontrolno-pomiarowego.

Stosunkowo krótki okres badań geodynamicznych na poligonie nie pozwala jeszcze na wyciąganie wniosków o zmianach tektonicznych w jego obszarze.

5. PODSUMOWANIE

Prowadzone geodezyjne badania geodynamiczne w Sudetach i na Bloku Przedśudeckim są zgodne z kierunkami badań rekomendowanymi przez Komitet Geodezji PAN (Ney B., 1998; Kołaczek B., Barlik M., 1998). Badania te prowadzone są od początku lat 90. XX w. z zastosowaniem kompleksowego systemu kontrolno-pomiarowego własnej koncepcji. Zespolono w nim pomiary technikami: satelitarną GPS,

geodezyjną (GPS, stacja totalna, niwelacja precyzyjna), grawimetryczną i względnych obserwacji (szczelinomierz, ekstensometr, pochyłomierz). Rezultaty badań wykazują współczesną mobilność struktur geologiczno-tektonicznych tego obszaru. Potwierdzają wyniki badań geologicznych, że ruchy tektoniczne, mające swą kulminację w neogenie, nie zostały jeszcze zakończone. Największe istotne zmiany na powierzchni górnej warstwy skorupy ziemskiej rejestrowane są w Rowie Paczkowa.

Oprócz poznawczego znaczenia prowadzonych badań uzyskiwane rezultaty mają również znaczenie użytkowe. Wiąże się to z oceną bezpiecznej eksploatacji licznych zapór wodnych i odpowiednich obiektów inżynierskich na Dolnym Śląsku, a m.in. zaporami: Otmuchów, Nysa, Dobromierz. Dotychczasowe badania i pozyskane rezultaty uzasadniają celowość kontynuowania przedmiotowych prac.

PODZIĘKOWANIA

Prezentowane w pracy rezultaty uzyskano dzięki badaniom finansowanym w ramach projektów KBN: 607789101/P5 (1992–1994), 995179303 (1993–1995), 9T12E00510 (1996–1999), 9T12E02918 (2001–2003). Wykorzystano również wyniki badań realizowanych w projekcie COST 625 „3D Monitoring of Active Tectonic Structures”.

Autor składa podziękowania Zespołom uczestniczącym w realizacji okresowych obserwacji GPS i grawimetrycznych w sieci GEO-SUD oraz na poligonach geodynamicznych z: Katedry Geodezji i Fotogrametrii Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej, Oddziału Dolnośląskiego Państwowego Instytutu Geologicznego, Instytutu Geodezji Politechniki Brno (Czechy), Instytutu Mechaniki i Struktury Górnotworu Cz.A.N. w Pradze (Czechy) i Parku Krajobrazowego (CHKO) Broumovsko (Czechy).

LITERATURA

- Barlik M., Olszak T., Pachuta A., 2004, *Ten years of gravimetric monitoring on the points of a geodynamic network in the Sudety Mts.*, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 1, No. 3 (135), pp. 91–95.
- Cacoń S., 1980, *Wybrane zagadnienia dotyczące sieci geodezyjnych do badania ruchów skorupy ziemskiej*, Zesz. Nauk. AR Wrocław, Rozprawy 25, s. 74.

- Cacoń S., 2001, *Recent earth movements in the Sudety Mts. – GEOSUD project*, Proceed. of 10th Int. FIG Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, 19–22.03.2001, pp. 20–30.
- Cacoń S., Bosy J., Kontny B., 2004, *Recent tectonic activity in the Eastern Sudetes and on the Fore-Sudetic Block on the basis of 1993–2003 investigations*, Reports on Geodesy, No. 2 (69), pp. 197–212.
- Cacoń S., Ćmielewski K., 1992, *Pochyłomierz nasadkowy*, Biuletyn Urzędu Patentowego, 25, s. 5.
- Cacoń S., Dyjor S., 2002, *Recent Crustal Movements in Late Tertiary Tectonic Zones of the Sudetes and Northern Sudetic Foreland, SW Poland*. Folia Quaternaria 73, Kraków, pp. 31–46.
- Cacoń S., Kontny B., 1994, *Measurement and monitoring system for deformation investigation of lithosphere of natural and engineering objects in Sudety Mountains*, Proceed. of. 1st Turkish Int. Symp. on Deformations, Istanbul, September 5–9, 1994, pp. 97–104.
- Cacoń S., Švábenský O., Kontny B., Weigel J., Jamroz O., Ćmielewski K., Bosy J., Kapłon J., Machotka R., 2004, *Deformation analysis of the upper part of the Earth crust in the Sněžnik massif (Polish and Czech sides between 1993 and 2003)*, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 1, No. 3 (135), pp. 59–67.
- Kończak B., Barlik M., 1998, *Geodynamic investigations on the threshold of XXI century*, Geod. i Kartogr., t. XLVI, z. 1–2, s. 41–57.
- Kontny B., 2003, *Geodezyjne badania współczesnej kinematyki głównych struktur tektonicznych polskich Sudetów i Bloku Przedsuddeckiego na podstawie pomiarów GPS*, Zesz. Nauk. AR Wrocław, 468, s. Rozprawy CCII, 146 stron.
- Košťák B., Cacoń S., 1999, *The role of relative observation in multi-segment geodynamic research system in Sudeten*, EGRSE, Vol. 2, 99, pp. 17–22.
- Ney B., 1998, *Geodesy and cartography on the threshold of the XXI'st century*, Geod. i Kartogr., t. XLVII, z. 1–2, s. 7–22.
- Wyrzykowski T., 1985, *Mapa współczesnych bezwzględnych prędkości pionowych ruchów powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski w skali 1:2 500 000*, Wyd. IGIK, Warszawa.

