

STEFAN CACOŃ
Akademia Rolnicza, Wrocław

**PROBLEM WIARYGODNOŚCI GEODEZYJNYCH POMIARÓW
DEFORMACJI OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH W RELACJI
OBIEKT-GÓROTWÓR**

1. WSTĘP

W wyniku prac inwestycyjnych oraz eksploatacji dużych obiektów inżynierskich następują zakłócenia w ustalonym stanie naprężeń w górotworze pod obiektem oraz w jego otoczeniu (Lazzarini T. i inni 1977). Reakcje środowiska geologiczno-tektonicznego (przyrody nieożywionej), na zasadzie sprzężenia zwrotnego, objawiają się w postaci osuwisk, osiadań, tapnięć, a także przemieszczeń i odkształceń obiektów inżynierskich. W publikacjach oraz poufnych raportach analizujących katastrofy obiektów inżynierskich wskazuje się na przyczyny ich powstania. W niektórych pozycjach dostrzega się błędy w obsłudze eksploatacyjnej tych obiektów, obarczając m.in. służby geodezyjne niewłaściwym prowadzeniem procesu pomiaru deformacji. Problem nie w pełni wiarygodnego pozyskiwania danych geodezyjnych do specjalistycznych interpretacji tkwi najczęściej w usterkach organizacyjnych procesu monitorowania deformacji. Dotyczy to z reguły kilku czynników reprezentujących przestrzeń i czas (Cacoń S. 1989). Najwięcej zastrzeżeń związanych jest z lokalizacją punktów sieci badawczej i stałością układu odniesienia, które reprezentują „przestrzeń”. Spośród czynników „czasowych” najwięcej uwag krytycznych dotyczy momentu rozpoczynania pomiarów deformacji. Jeśli przedmiotowe obserwacje rozpoczyna się na obiekcie inżynierskim już zrealizowanym, wówczas pozyskane dane ilościowe mogą być interpretowane jedynie w aspekcie skutkowym, a nie przyczynowo-skutkowym. Jest to związane m.in. z brakiem odniesienia tych danych do nienaruszonego stanu otaczającego górotworu.

2. CHARAKTERYSTYKA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA WIARYGODNOŚĆ POMIARÓW DEFORMACJI ORAZ JEJ OCENA

Deformacje obiektów inżynierskich (odkształcenia, przemieszczenia) mogą być spowodowane różnymi czynnikami, wśród których najczęściej wymieniane są: nadmierne obciążenie, ukryte wady materiałów, zmiana naprężeń górotworu, nierozpoznane nieregularności podłoża, usterki w procesie budowy, wpływ reakcji środowiska na obiekt. Na wielkość wyznaczonych parametrów deformacji wpływ mają czynniki związane z procesem pomiarowym. Jeśli wpływ „zakłóceń pomiarowych” ma charakter błędów systematycznych, wówczas wyznaczone wielkości deformacji mogą różnić się od rzeczywistych.

Jak wiadomo, istota pomiarów deformacji związana jest z czasoprzestrzenią. Do czynników reprezentujących „przestrzeń” Cacoń (Cacoń S. 1989) zaliczył: lokalizację punktów badawczych, stabilizację znaków, stałość układu odniesienia i dokładność obserwacji okresowych. Czynniki „czasowe” to: moment rozpoczęcia pomiarów, interwał czasowy między pomiarami, czasokres wykonywania pomiarów i czasokres opracowania wyników. Stosowanie nowoczesnych instrumentów pomiarowych oraz komputerów powoduje, że dwa ostatnie czynniki „czasowe” można wyeliminować z przedmiotowych rozważań.

Problem lokalizacji punktów sieci badawczych oraz ich markowanie (stabilizacja), poza techniczną realizacją, a także moment rozpoczynania pomiarów i interwał czasowy często mają drugorzędne znaczenie dla geodety. Podejście takie jest uzasadnione, jeśli sprawy te rozwiązywane są przy czynnym współdziałaniu innych specjalistów (geolog, geotechnik, budowlaniec, hydrotechnik, mechanik i inni). Zdarzają się jednak przypadki, kiedy geodeta zbyt często opiera się na własnej intuicji, unikając kontaktów z tymi specjalistami, bądź specjaliści ci nie są w stanie wnieść do sprawy nic konkretnego.

Znane są katastrofy obiektów inżynierskich na świecie i w Polsce (większość znanych z literatury dotyczy zapór wodnych i odpadów flotacyjnych), których można było uniknąć, bądź zmniejszyć straty, gdyby użytkownik bardziej troszczył się o obiekt, zaś analizowane czynniki cechowały się spójnością.

Ocenę wiarygodności pomiarów deformacji w ujęciu ilościowym oparto na teorii niezawodności (Praca zbiorowa 1982). Poszczególne czynniki (δ_{ij}) jako elementy układu uznano za zdarzenia losowe, a prawdopodobieństwo spełnienia warunków wiarygodności stanowi charakterystykę probabilistyczną układu.

Wiarygodność W_i każdego elementu (czynnika) układu wyraża się prawdopodobieństwem P nieprzekroczenia przez δ_i dopuszczalnej wartości δ_{igr} , a zatem

$$W_i = P|\delta_i \leq \delta_{igr}| = \int_0^{\delta_{igr}} \varphi_i(\delta_i) d\delta_i \quad (1)$$

gdzie: $\varphi_i(\delta_i)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej δ_i .

Całkowitą wiarygodność W_c układu kontrolno-pomiarowego można obliczyć ze wzoru:

$$W_c = \prod_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

gdzie: n – liczba elementów układu.

Problem podstawowy obliczeń tkwi w określeniu prawdopodobieństwa α nieprzekroczenia wartości granicznych. Zagadnienie to ma związek z określeniem wymogów bezpieczeństwa danego obiektu. Wiąże się to z przyjęciem funkcji gęstości prawdopodobieństwa φ_i dla poszczególnych zmiennych losowych δ_i . Jeśli założymy, że zmienna ta ma rozkład normalny, wówczas wiarygodność całkowitą W_c można wyrazić wzorem:

$$W_c = \prod_{i=1}^n [P|\delta_i \leq t_\alpha \sigma \delta_i| = \alpha] \quad (3)$$

Ocenę wiarygodności czynników δ_i można określić przy zastosowaniu wartości granicznych t_α równych $\approx 3, 2, 1$.

Powyższe założenia powodują:

$$W_i(3) = [P|\delta_i \leq 3\sigma\delta_i| \cong 0,99]$$

$$W_i(2) = [P|\delta_i \leq 2\sigma\delta_i| \cong 0,95]$$

$$W_i(1) = [P|\delta_i \leq \sigma\delta_i| \cong 0,67]$$

Zaproponowano (Cacoń S. 1989) następujące mierniki wiarygodności W_c pomiarów deformacji:

$$\begin{aligned} W_c > 0,85 & - \text{wiarygodność duża,} \\ 0,85 > W_c > 0,70 & - \text{wiarygodność średnia,} \\ W_c < 0,70 & - \text{wiarygodność mała.} \end{aligned}$$

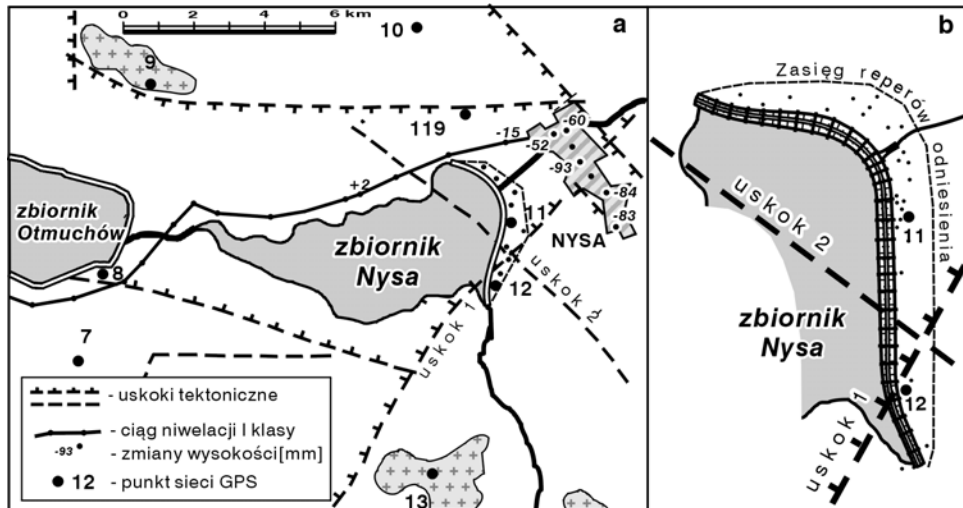
Podane kryteria klasyfikacji mierników wiarygodności dotyczą 6 czynników „przestrzennych” i „czasowych”. Jeśli liczba analizowanych czynników jest większa lub mniejsza, wartości tych mierników nie ulegają zasadniczym zmianom. Istotne jednak jest to, że jeśli wiarygodność jednego czynnika spada do poziomu 0,67, wówczas nawet przy statystycznej pewności ($W_i = 0,99$) pozostałych czynników wiarygodność całego „układu” jest mała.

Problem oceny wiarygodności pomiarów deformacji przybliżony zostanie na podstawie pomiarów deformacji dwóch różnych obiektów inżynierskich w Polsce (Cacoń S. 1998; Cacoń S., Deeb F. 1996; Cacoń S., Kaczarewski T. 1999).

3. ANALIZA WIARYGODNOŚCI POMIARU DEFORMACJI ZAPORY WODNEJ I OSUWISKA W KOPALNI ODKRYWKOWEJ

3.1. Analiza reakcji zapory Nysa na górotwór

Zaporę ziemną Nysa, przegradzającą dolinę rzeki Nysa Kłodzka w odległości około 3 km od centrum miasta Nysa, oddano do eksploatacji w 1971 roku. Zlokalizowano ją w młodym rowie tektonicznym Paczkowa, którego obniżenie znajduje się po kilka kilometrów na północ i południe od zapory. Standardowe (zgodnie z obowiązującymi instrukcjami) obserwacje przemieszczeń pionowych na zaporze (rozpoczęte w tym samym roku) prowadzone są przez IMGW, Oddział we Wrocławiu, w odniesieniu do reperów zlokalizowanych na jej przedpolu (rys. 1b). Na podstawie prac autora, a m.in. we współpracy z geologiem (Cacoń S., Dyjor S. 1993) wykazano nieprawidłowości w organizacji tych obserwacji. Stwierdzono to na podstawie analizy materiałów archiwalnych dotyczących rezultatów powtarzanych pomiarów (lata: 1926, 1953, 1975, 1994) w ciągu niwelacji precyzyjnej I klasy Paczków-Nysa przechodzących obok analizowanej zapory. Okazało się, że po rozpoczęciu eksploatacji zbiornika Nysa repery w tym ciągu, poniżej zapory, anormalnie osiadły. W centrum miasta Nysa osiągnęły – 92 mm w okresie 1953–1975 (Cacoń S., Deeb F. 1996), wykazując w okresie poprzedzającym (1926–1953) osiadania rzędu kilku milimetrów. Fakt ten wykazał również Wyrzykowski (Wyrzykowski T. 1985) na mapie współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej. Zarejestrowane zmiany wysokości reperów mają bezpośredni związek z reakcją otaczającego górotworu na jego obciążenie wodą zgromadzoną w zbiorniku i materiałem, z którego zbudowano zaporę. Skumulowane naprężenia w górotworze mogą „wyzwolić się” w postaci trzęsienia ziemi, w którego wyniku może zostać uszkodzona zapora.



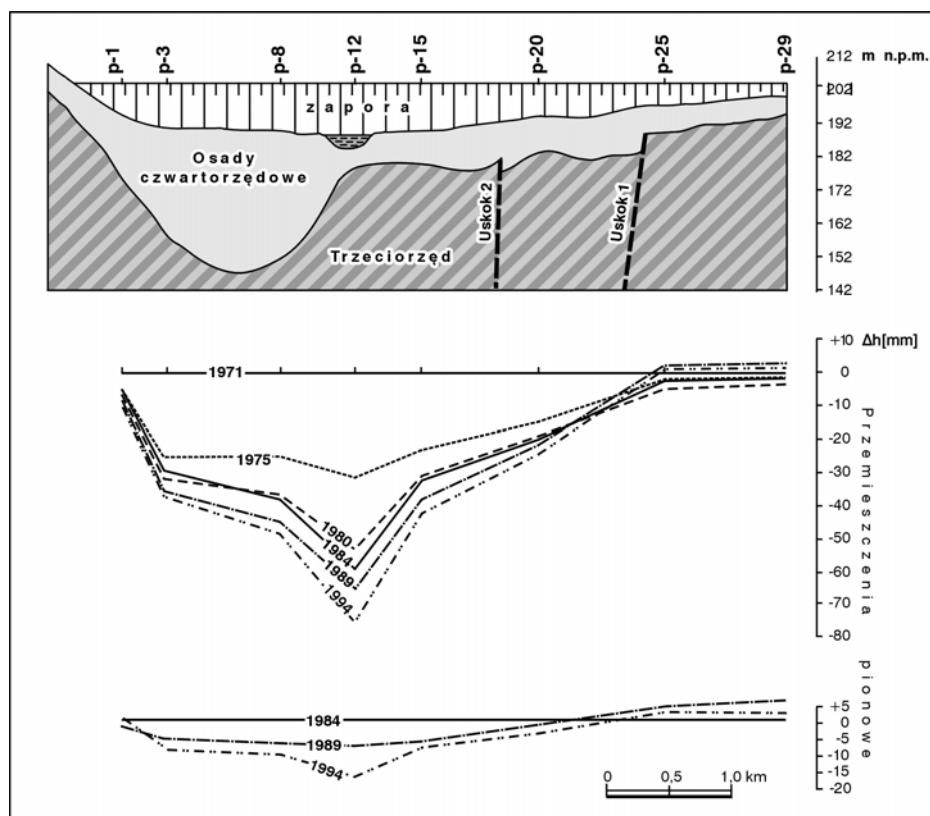
Rys. 1. Zapora Nysa z lokalizacją reperów odniesienia oraz badawczą siecią satelitarno-grawimetryczną

Należy zaznaczyć, że tego potencjalnego zagrożenia nie wykryto na podstawie standardowych, okresowych pomiarów przemieszczeń zapory. Szczegółowa analiza organizacji oraz wyników tych pomiarów w okresie od 1971 roku do 1994 roku oraz rezultaty badań geologiczno-tektonicznych otaczającego górotworu wykazały niskie ich wiarygodności ($W_c = 0,58$). Na tę ocenę złożyły się głównie błędy w stabilizacji (zbyt płytkiej) reperów odniesienia ($W_{stab} = 0,67$). Krytycznie należy ocenić także spóźniony moment rozpoczęcia obserwacji deformacji zapory wraz z jej otoczeniem (1971 r.), zamiast w okresie przygotowywania inwestycji (początek lat 60.). Ponadto wyniki badań geologicznych wykazały, iż zapora zlokalizowano (nieświadomie) na wiaźce trzeciorzędowych uskoku tektonicznych przykrytych osadami czwartorzędowymi o grubości 10–40 m.

Na rysunku 2 zobrazowano rezultaty pionowych przemieszczeń korony zapory Nysa w odniesieniu do budowy geologicznej i tektonicznej górotworu pod zaporą. Wyniki osiadań zapory rejestrowane w okresie 1971–1984 wykazują prawidłowość w stabilizowaniu utworów ziemnej konstrukcji tej budowli. Rezultaty te należy jednak traktować jako względne – odniesione do niestabilnych reperów na przedpolu zapory. Dopiero po tym okresie zauważa się reakcję struktur geologicznych pod zaporą w rejonie uskoku tektonicznego „1”. Świadczy o tym wypiętrzenie korony zapory na odcinku od przekroju 24 do 29.

Powyższe fakty potwierdzają uaktywnienie się uskoku tektonicznych po rozpoczęciu eksploatacji zbiornika Nysa. W efekcie użytkownik obiektu podjął odpowiednie działania zabezpieczające. Niezależnie zasugerowano mu

wprowadzenie korekt do procesu monitorowania przemieszczeń zapory. Dotyczą one przeniesienia reperów odniesienia poza uskoki brzeżne rowu Paczkowa. Inną możliwością stanowi propozycja założenia kilku reperów głębinowych na przedpolu zapory, posadowionych w utworach trzeciorzędowych na głębokości 11–40 m. Ponadto w ramach projektu badawczego KBN (1992–1995) nr 995179203 w rowie tektonicznym Paczkowa założono poligon geodynamiczny, na którym „Doskonalono system monitorowania, przetwarzania danych i prognozowania zmian w górnej warstwie litosfery na obiektach przyrodniczych i inżynierskich”. Fragment sieci badawczej w rejonie zbiorników Nysa i Otmuchów pokazano na rysunku 1a. Powtarzane obserwacje satelitarne GPS i grawimetryczne w tej części sieci, w okresie 1993–2000, potwierdzają współczesną mobilność w rejonie uskoków tektonicznych rowu Paczkowa. Fakt ten powoduje konieczność zachowania szczególnej troski w procesie monitorowania deformacji zapór zlokalizowanych na tym obszarze.



Rys. 2. Zmiany wysokości reperów kontrolnych na koronie zapory Nysa w okresie 1971–1994

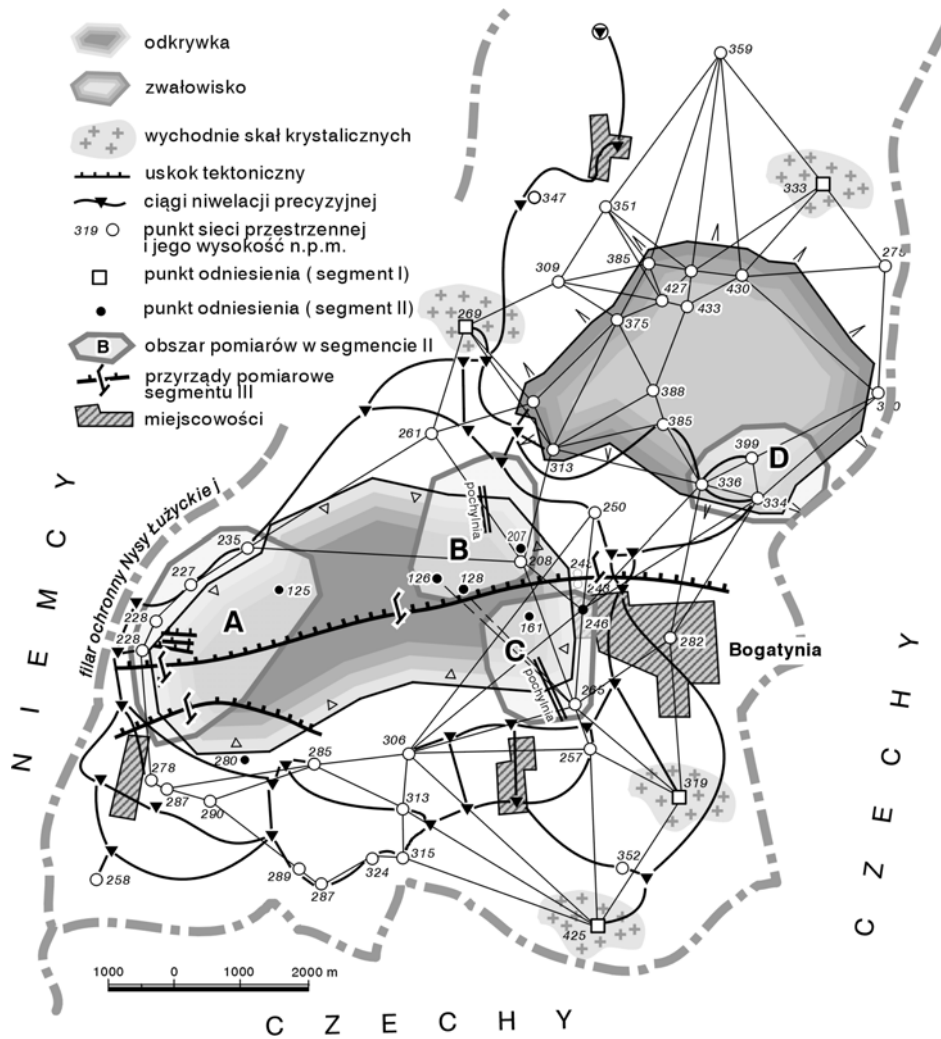
Problemy związane z niewiarygodnym monitorowaniem deformacji zapory Nysa autor prezentował również na kilku konferencjach technicznej kontroli zapór w Polsce. Zaowocowało to m.in. zobligowaniem projektantów i inwestorów tego typu obiektów do poprzedzających studiów z zakresu oceny warunków geologiczno-tektonicznych podłoża pod obiektem.

3.2. Problem monitorowania deformacji górotworu kopalni węgla brunatnego „Turów”

Intensyfikacja eksploatacji węgla brunatnego w KWB „Turów” objawia się zagrożeniami osuwiskowymi na skarpach odkrywki i zwałowiska zewnętrznego, a także innymi w różnych rejonach kopalni (rys. 3). Pomiary deformacji na tym obiekcie wymagają zapewnienia im najwyższej wiarygodności. Rejony największych zagrożeń to filar rzeki Nysa Łużycka na granicy z Niemcami (obiekt A) oraz południowo-zachodnia część zwałowiska zewnętrznego na granicy z Czechami (obiekt D). Podstawowym problemem okazało się zapewnienie stałości układu odniesienia dla okresowych pomiarów deformacji górotworu w różnych rejonach obszaru górniczego o powierzchni ponad 100 km².

Niemożliwe było i jest wykorzystanie do tego celu punktów odniesienia na sąsiednich terenach Niemiec i Czech. Najbardziej odpowiednie pod względem geologicznym cztery rejony kopalni zlokalizowano poza bezpośrednim oddziaływaniem robót eksploatacyjnych, jednakże w znacznych odległościach od zagrożonych obiektów (A i D).

Dzięki technice satelitarnej GPS, którą w kopalni wykorzystuje się od 1993 roku, zmniejszono pracochłonność i wyeliminowano uciążliwość w klasycznym (sieć kątowno-liniowa) nawiązywaniu stanowisk obserwacyjnych na obiektach A, B, C, D do odległych punktów stałych. W latach 1993–1995 opracowano i wdrożono system kontrolno-pomiarowy składający się z trzech segmentów, oparty na obserwacjach satelitarnych, geodezyjnych i pomiarach względnych (Cacoń S. 1998; Cacoń S., Kaczarewski T. 1999). Ogólną charakterystykę systemu przedstawiono w tabeli 1, a niektóre informacje graficzne związane z lokalizacją poszczególnych jego elementów pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Lokalizacja punktów sieci I i II segmentu, urządzeń pomiarowych (III segment) oraz zagrożonych obiektów deformacjami górotworu na terenie KWB „Turów”

Tabela 1. Ogólna charakterystyka systemu kontrolno-pomiarowego KWB „Turów”

	Charakterystyka segmentów obserwacyjnych			
	segment I	segment II	segment III	
			obserwacje na powierzchni terenu	obserwacje wglębne
1	2	3	4	5
Obserwacje (instrumenty)	- pomiary satelitarne GPS - niwelacja precyzyjna	- pomiary satelitarne GPS - stacja totalna - niwelacja precyzyjna	- pochylomierz nasadkowy - ekstensometr	- inklinometr
Częstotliwość pomiarów	2 lata	3 miesiące	1 miesiąc lub permanentnie	
Dokładność pomiarów przemieszczeń	± (0,5-10) mm	± (0,5-2) mm	± (0,01-0,1) mm	± 0,1 mm/1m

Należy zaznaczyć, że obserwacje deformacji górotworu KWB „Turów” rozpoczęto w 1983 roku. Założono wówczas lokalną sieć przestrzenną ze stabilizacją punktów blokami betonowymi z głowicami do wymuszonego centrowania instrumentów. Przewidziano wówczas, że na skutek eksploatacji węgla brunatnego część tych punktów ulegnie zniszczeniu. Tym niemniej ponad 50% punktów nadal wykorzystuje się w przedmiotowych pracach pomiarowych. Wraz z nowymi punktami, zabudowywanymi w procesie modernizacji tej sieci, stanowią I segment systemu kontrolno-pomiarowego.

Dzięki systemowi kontrolno-pomiarowemu pozyskiwane dane ilościowe (geometryczne) stanowią wiarygodny zbiór informacji o zagrożeniach górotworu kopalni.

Godny podkreślenia jest fakt, że przy organizacji i wdrożeniu tego systemu w kopalni wykorzystywano doświadczenia i rezultaty z badań, które prowadzono w rowie tektonicznym Paczkowa wraz z zaporą Nysa i otaczającym ją górotworem. Wprowadzie oba obiekty różnią się pod względem inżynierskim, tym niemniej posiadają wiele cech wspólnych związanych z oddziaływaniem obiektu na górotwór i odwrotnie.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione rozważania, poparte konkretnymi przykładami, stanowią głos w dyskusji nad problemem wiarygodności rezultatów geodezyjnych pomiarów deformacji obiektów inżynierskich. Pogląd, że zadaniem geodety jest jedynie dostarczanie geometrycznych parametrów deformacji prowadzi niekiedy do błędów w organizacji procesu monitorowania. Problem ten staje się coraz bardziej istotny w świetle aktualnych tendencji do ograniczenia lub nawet eliminowania z programów studiów geodezyjnych przedmiotów z zakresu nauk o Ziemi. Jednocześnie, przesadne zafascynowanie najnowszymi osiągnięciami technik komputerowych i pomiarowych, szczególnie wśród młodszej generacji geodetów, może pogłębić te tendencje.

Zasadne jest, aby proces monitorowania deformacji odpowiedzialnych obiektów inżynierskich rozpoczynał się już na etapie projektowania inwestycji. Stworzy to jednocześnie możliwość prawidłowej realizacji geodezyjnych prac na budowie (Janusz W. 1975), szczególnie w strefie głębokich wykopów (Janusz J., Janusz W. 1998). Pozwoli to również na właściwą organizację pomiarów deformacji przyszłego obiektu inżynierskiego, uwzględniając wszystkie czynniki przestrzenne i czasowe decydujące o wiarygodnym pozyskiwaniu rezultatów. Stworzy to jednocześnie warunki do specjalistycznych interpretacji w aspekcie przyczynowo-skutkowym, a nie tylko skutkowym.

LITERATURA

- [1] Cacoń S. 1989: *Zur Glaubwürdigkeit der Ergebnisse geodätischer Deformationsmessungen*. Vermessungstechnik nr 1 s. 17–19.
- [2] Cacoń S. 1998: *The measurements and monitoring system with GPS – the basis for reliable data on deformation of an engineering object*. Proceed. of FIG XXI Int. Congress, Brighton, 6 s. 530–540.
- [3] Cacoń S., Deeb F. 1996: *Deformacje obiektu hydrotechnicznego i otaczającego górotworu – sprzężenie zwrotne*. Mat. VII konf. technicznej kontroli zapór, Rytro, s. 59–65, także *Deformations of engineering objects and their effect on upper lithosphere layer in their vicinity – feedback*, Proceed. of 8th Int. Symp. FIG on Deformation Measurements, Hong Kong 1996 s. 345–350.
- [4] Cacoń S., Dyjor S. 1993: *Ogólna ocena zagrożeń zbiorników wodnych w młodym rowie tektonicznym na przedgórzu Sudetów Wschodnich*. Zesz. Nauk. AR Wrocław, Geodezja i Urz. Rolne XI, 231 s. 19–31.
- [5] Cacoń S., Kaczarewski T. 1999: *Technika satelitarna GPS w monitorowaniu deformacji górotworu i innych zastosowaniach w kopalni węgla brunatnego*. WUG nr 5 s. 10–15.
- [6] Janusz W. 1975: *Obsługa geodezyjna budowli i konstrukcji*. Warszawa PPWK.

- [7] Janusz J., Janusz W. 1998: *Problemy geodezyjnej kontroli bezpieczeństwa budynków znajdujących się w strefie wpływu głębokich wykopów*. Prace IGiK t. XLV z. 98.
- [8] Lazzarini T. i inni 1977: *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. Warszawa PPWK.
- [9] Wyrzykowski T. 1985: *Mapa prędkości współczesnych pionowych ruchów powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski 1:2 500 000*. Warszawa IGiK.
- [10] Praca zbiorowa 1982: *Zastosowanie rachunku prawdopodobieństwa w geotechnice*. Wrocław Ossolineum.

STEFAN CACON'

PROBLEM WIARYGODNOŚCI GEODEZYJNYCH POMIARÓW
DEFORMACJI OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH W RELACJI
OBIEKT-GÓROTWÓR

S t r e s z c z e n i e

Geodezyjne pomiary deformacji obiektów i konstrukcji inżynierskich stanowią podstawę do oceny ich zagrożenia. Okazuje się, że nie zawsze wyniki tych pomiarów są w pełni wiarygodne do oceny zjawiska deformacji w aspekcie przyczynowo-skutkowym. W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę czynników mających wpływ na wiarygodność oraz propozycję jej mierników. Przedmiotową problematykę skomentowano na przykładzie dwóch obiektów inżynierskich: zapory ziemnej *Nysa* oraz kopalni odkrywkowej *Turów*.

Praca jest ilustrowana szkicami sytuacyjnymi.

STEFAN CACON'

PROBLEM OF RELIABILITY OF GEODETIC MEASUREMENTS OF
DEFORMATIONS OF ENGINEERING OBJECTS IN RELATION
OBJECT – ROCK MASS

A b s t r a c t

Geodetic measurements of engineering objects and constructions are the basis for assessing their hazards. It was proved, that results of these measurements are not always fully reliable, as far as assessment of deforma-

tion in cause-effect aspect is concerned. General characteristics of factors influencing reliability was presented, as well as proposal of its estimation was given. The problem was discussed on the example of two engineering objects: earth dam *Nysa* and strip mine *Turów*.

The work is illustrated with field sketches.

Translation: Zbigniew Bochenek

СТЕФАН ЦАЦОНЬ

ПРОБЛЕМА ДОСТОВЕРНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЕФОРМАЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕЛЯЦИИ
ОБЪЕКТ – ГОРНАЯ ПОРОДА

Р е з ю м е

Геодезические измерения деформаций инженерных объектов и конструкций являются основой для оценки угрожающей им опасности. Оказывается, что не всегда результаты этих измерений вполне достоверны для оценки явления деформации в причинно-следственном аспекте. В работе представлена общая характеристика факторов, имеющих влияние на достоверность, а также дано предложение её измерителей. Проблематика этого предмета комментирована на примере двух инженерных объектов: земляной плотины *Nysa* и карьера *Turów*.

Работа иллюстрирована ситуационными эскизами.

Перевод: Роза Толстикова