

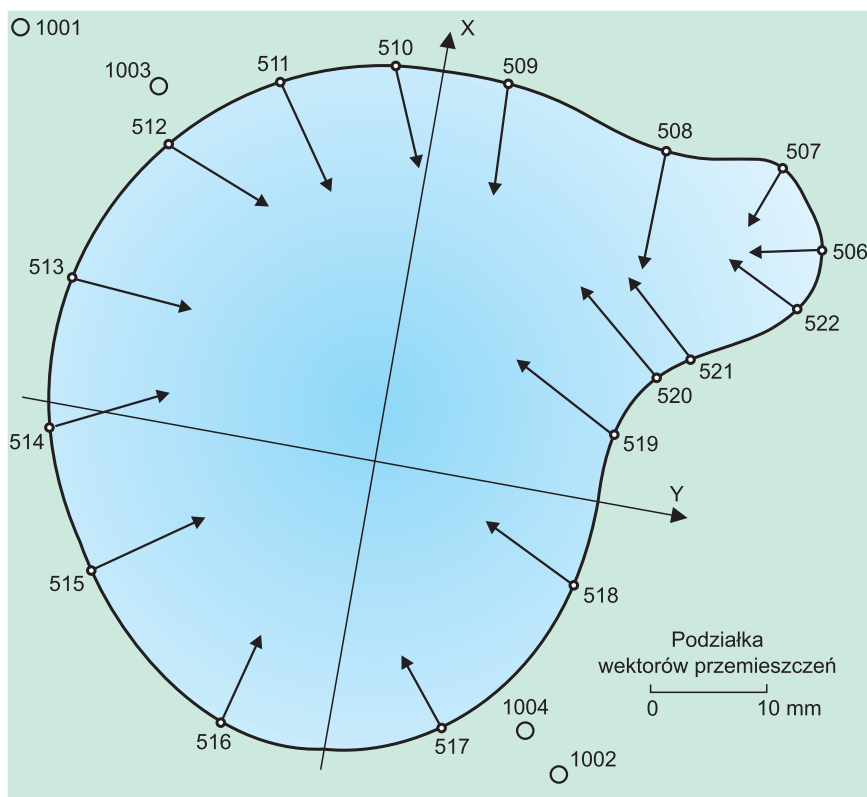
Analiza poziomych deformacji obwałowania zbiornika wodnego

Więcej niż zwykła geodezja

JERZY JANUSZ

Geodetę zajmującego się pomiarami i obliczaniem przemieszczeń punktów obiektów inżynierskich często trapi pytanie, czy wystarczy poprzestać na podaniu zleceniodawcy wyznaczonych wartości przemieszczeń pojedynczych punktów, czy może uzyskane wyniki powinny być opatrzone komentarzem objaśniającym zauważone korelacje między przemieszczeniami zespołu obserwowanych punktów.

Niepokój ten wynika z obawy, by nie wkroczyć w sferę interpretacji wyników pomiarów zastrzeżoną dla osób profesjonalnie przygotowanych do oceny przyczyn i skutków wyznaczonych przemieszczeń. Z drugiej jednak strony, wyniki pomiarów podane bez komentarza dotyczącego zauważonych zmian geometrycznych mogą być nie całkiem czytelne dla odbiorcy i w rezultacie dokonywana przezeń ocena zachowania się obiektu może nie wykorzystywać w pełni tych wyników. Jestem zdania, że dobra współpraca między geodetą a geotechnikiem i konstruktorem powinna polegać na możliwie jak najlepszym wzajemnym informowaniu się o wymaganiach dotyczących pomiarów i celu ich wykonywania, jak również o znaczeniu uzyskiwanych rezultatów. Geodeta, który pragnie być traktowany jako partner, nie powinien poprzestawać na przekazaniu surowych informacji, lecz w miarę możliwości dołączyć rezultaty ich dodatkowego przetworzenia, dokonanego w ramach analizy o charakterze geometrycznym. Oczywiście analizy takie mają charakter wykraczający poza pojęcie „czystej produkcji geodezyjnej”, lecz geodezyjne pomiary przemieszczeń i tak są zazwyczaj częścią działań interdyscyplinarnych o charakterze ekspertyzowym, a niekiedy nawet badawczym, mających związek z oceną i zagwarantowaniem poprawności funkcjonowania i stanu bezpieczeństwa obiektów inżynierskich. Geode-



Rys. 1. Wektory całkowitych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania

tom górniczym wyda się to zapewne truizmem. Ich działalność od dawna wykracza bowiem poza dostarczanie surowych wyników pomiarów i obejmuje oceny geometryczne zachowania się górotworu i obiektów

budowlanych w rejonach wpływu robót górniczych. Myślę, że ten kierunek działania powinien być rozwijany również w przypadku wykonywania pomiarów przemieszczeń punktów na innych obiektach.

Podstawy teoretyczne użytej tu metody analizowania deformacji znajdują się w pracach [1], [4] i [2] (ta ostatnia wyjaśnia znaczenie geometryczne przemieszczeń obliczanych transformacyjnie ze zmianą i bez zmiany skali). Przykładem wykorzystania metody analizy może być badanie poziomych deformacji górnego obwałowania zbiornika wody elektrowni szczytowo-pompowej. Zbiornik ten ma pojemność 14,5 mln m³ i jest w cyklu dobowym pracy elektrowni napełniany i opróżniany przeciętnie do poziomu niższego od maksymalnego o 16 m, natomiast do celów remontowych i do przeglądu technicznego stanu dna i skarpy wewnętrznej jest okresowo opróżniany całkowicie (obniżenie poziomu wody o 20 m). Na koronie tego obwałowania, którego kontur w rzucie poziomym pokazany jest na rysunku 1, znajdują się punkty sieci kontrolnej (w której okresowo mierzone są długości) niezbędnej do wyznaczania poziomych przemieszczeń tych punktów. Dla oceny odporności obwałowania na zmiany obciążenia pomiary są powtarzane przy zróżnicowanych poziomach napełnienia zbiornika wodą.

Należy podkreślić, że poprawność takiej analizy zależy od tego, czy powtarzane pomiary sieci liniowej, służącej do wyznaczenia poziomych przemieszczeń punktów rozmieszczonych na obwałowaniu, wykonane są komparowanym dalmierzem, a wyniki pomiarów są redukowane z uwzględnieniem poprawek instrumentalnych i atmosferycznych. Ponadto każdy pomiar powinien być przeprowadzany w możliwie krótkim czasie.

W niniejszym przykładzie dysponujemy dwoma kompletami współrzędnych punktów na koronie obwałowania zestawionymi w tabeli 1. Pierwszy komplet X, Y dotyczy współrzędnych ze swobodnego wyrównania sieci pomiarowej przy zbiorniku opróżnionym, zaś drugi komplet X', Y' – przy zbiorniku napełnionym. Obydwa wyrównania zostały wykonane przy dostosowaniu do tego samego stałego punktu i kierunku. W sieci zawierającej 25 punktów (w tym 4 punkty stałe, usytuowane na zewnątrz obwałowania) pomierzono 77 odległości, tj. 30 odległości nadliczbowych. W tabeli 1 podano błędy średnie m_x, m_y współrzędnych z wyrównań swobodnych obydwu pomiarów.

W wyniku transformacji współrzędnych X', Y' z drugiego pomiaru do układu współrzędnych X, Y z pierwszego pomiaru (3-parametrowa transformacja izometryczna płaska bez zmiany skali [3], przy dostosowaniu sieci do wszystkich punktów za-

Nr punktu	X [m]	Y [m]	X' [m]	Y' [m]	m_x [mm]	m_y [mm]
506	5482,9077	10683,1840	5482,9084	10683,1754	0,9	1,2
507	5607,2560	10587,9148	5607,2520	10587,9102	1,4	0,8
508	5589,3331	10389,3334	5589,3248	10389,3314	1,1	0,7
509	5664,3742	10103,8190	5664,3660	10103,8173	1,1	0,6
510	5656,1456	9917,6596	5656,1386	9917,6611	0,7	0,5
511	5592,4464	9729,7706	5592,4387	9729,7746	1,0	0,4
512	5457,9799	9569,2901	5457,9764	9569,2976	0,8	0,5
513	5213,4046	9464,0868	5213,4036	9464,0955	0,7	0,7
514	4964,4127	9471,5249	4964,4168	9471,5329	0,7	0,8
515	4742,0938	9572,5033	4742,1001	9572,5108	0,6	0,6
516	4525,4383	9830,4674	4525,4470	9830,4689	0,9	0,9
517	4585,8618	10194,2497	4585,8685	10194,2447	0,9	0,7
518	4859,2458	10362,3349	4859,2512	10362,3256	0,8	0,9
519	5119,0508	10396,6988	5119,0568	10396,6878	0,9	0,9
520	5226,2393	10444,5997	5226,2469	10444,5903	0,8	0,7
521	5266,9840	10500,7591	5266,9915	10500,7510	0,8	0,7
522	5377,2438	10662,4205	5377,2486	10662,4124	0,8	0,5
średnia	5231,2010	10110,6245				

Tab. 1. Zestawienie współrzędnych z wyrównań swobodnych

Nr punktu	x [m]	y [m]	d_x [mm]	d_y [mm]	m_{d_x} [mm]	m_{d_y} [mm]	dP/m_{dP}
506	5482,9064	10683,1776	-1,3	-6,5	1,3	1,7	3,1
507	5607,2501	10587,9125	-5,8	-2,3	1,9	1,1	2,8
508	5589,3233	10389,3337	-9,9	0,2	1,5	1,0	5,5
509	5664,3649	10103,8197	-9,4	0,7	1,5	0,9	5,5
510	5656,1379	9917,6635	-7,8	3,9	1,0	0,7	7,2
511	5592,4382	9729,7769	-8,2	6,3	1,4	0,6	6,9
512	5457,9762	9569,2997	-3,7	9,6	1,1	0,7	7,9
513	5213,4036	9464,0972	-1,0	10,4	1,0	1,0	7,4
514	4964,4167	9471,5342	4,1	9,3	1,0	1,1	6,8
515	4742,0999	9572,5118	6,1	8,5	0,9	0,9	8,1
516	4525,4464	9830,4695	8,1	2,1	1,2	1,3	4,7
517	4585,8673	10194,2453	5,5	-4,3	1,3	1,0	4,4
518	4859,2497	10362,3267	4,0	-8,1	1,1	1,2	5,6
519	5119,0553	10396,6893	4,5	-9,5	1,2	1,2	6,2
520	5226,2453	10444,592	6,1	-7,7	1,1	1,0	6,5
521	5266,9898	10500,7528	5,8	-6,4	1,1	1,0	5,7
522	5377,2467	10662,4144	2,8	-6,1	1,1	0,7	5,8

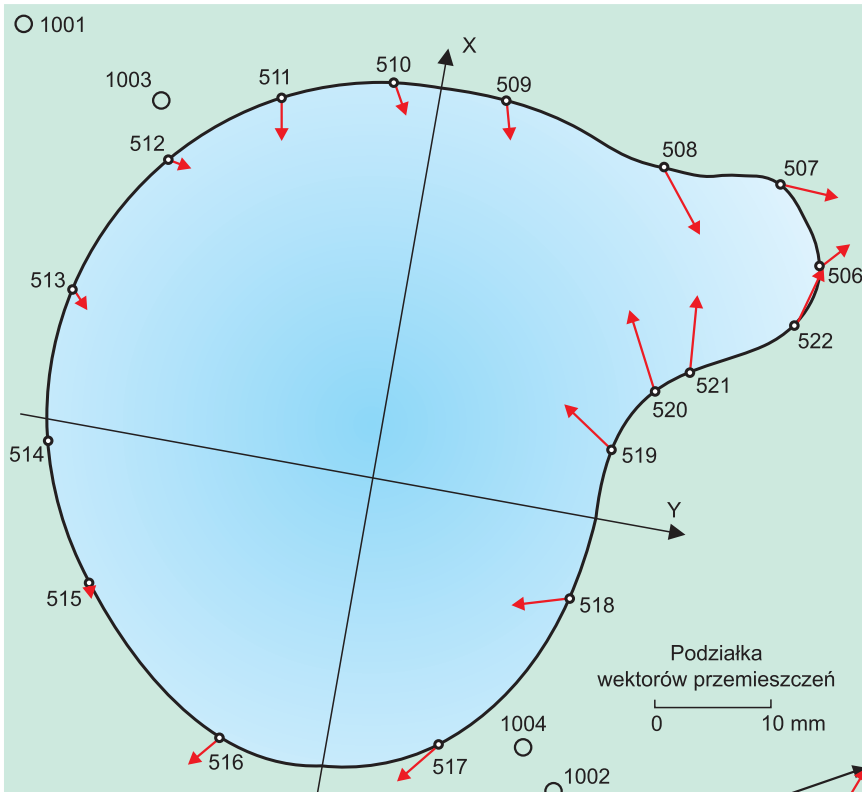
$(1 - q) = -14,39$ ppm

Tab. 2. Zestawienie wyników transformacji bez zmiany skali (składowych przemieszczeń całkowitych)

obserwowanych na koronie obwałowania) otrzymano współrzędne x, y tych punktów zestawione w tabeli 2. Podano w niej również składowe d_x, d_y całkowitych przemieszczeń względnych obliczone jako różnice odpowiadających sobie składowych zbioru współrzędnych x, y i zbioru współrzędnych X, Y . W tabeli 2 podane są błędy składowych przemieszczeń m_{d_x}, m_{d_y} obliczone na podstawie m_x, m_y z tabeli 1 oraz proporcje wyznaczonych przemieszczeń do ich błędów średnich. Duże wartości tych proporcji wyraźnie wskazują, że w wyniku pomiarów i obliczeń stwierdzono wystąpienie przemieszczeń. Wektory tak obliczonych przemieszczeń zostały pokazane na rysunku 1, z którego wynika, że pod wpływem obciążenia obwałowania wynikłego z na-

pełnienia zbiornika wodą figura utworzona przez punkty kontrolowane na jego koronie uległa zmniejszeniu.

Powstaje pytanie: czy zaistniała zmiana geometryczna polega wyłącznie na zmniejszeniu figury bez zmiany jej kształtu, czy też niektóre punkty podlegają w pewnej części przemieszczeniom wskazującym na lokalne deformacje obwałowania, zmieniające kształt tej figury? Odpowiedź ma znaczenie dla oceny odporności obwałowania. Może ona na przykład wspomagać poszukiwanie miejsc obwałowania mniej i bardziej podatnych na zmiany obciążenia. Ponadto, przy wielokrotnym powtarzaniu takich par pomiarów odpowiadających różnym obciążeniom obwałowania, można wy-



Rys. 2. Wektory lokalnych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania

Rys. 3. Sposób utworzenia wektora wypadkowego dP



jaśnić, czy wraz z upływem czasu eksploatacji zbiornika nie następuje zwiększenie podatności jego obwałowania na przykładane obciążenia.

Aby uzyskać tę odpowiedź, trzeba wykonać ponowną transformację współrzędnych X', Y' , otrzymanych z wyrównania drugiego pomiaru do układu współrzędnych X, Y z pierwszego pomiaru (tym razem będzie to 4-parametrowa transformacja konforemna płaska [3] przy dostosowaniu sieci do wszystkich punktów zaobserwowanych na koronie obwałowania). Wyniki takiej transformacji zawarte są w tabeli 3. W naszym przykładzie są nimi współrzędne x, y sieci z drugiego pomiaru przetransformowanej do układu sieci z pierwszego pomiaru, współczynnik zmiany skali q oraz składowe dx, dy lokalnych przemieszczeń wszystkich punktów (obliczone jako $x - X, y - Y$), które są zredukowane o części składowych przemieszczeń, spowodowane średnią zmianą skali figury. Tak obliczone przemieszczenia punktów na koronie obwałowania pokazano na rysunku 2. Składowe dx, dy , charakteryzujące przemieszczenia lokalne, są rezultatem miejscowych anomalii przemieszczeń wynikających wyłącznie ze zmian kształtu figury utworzonej przez punkty

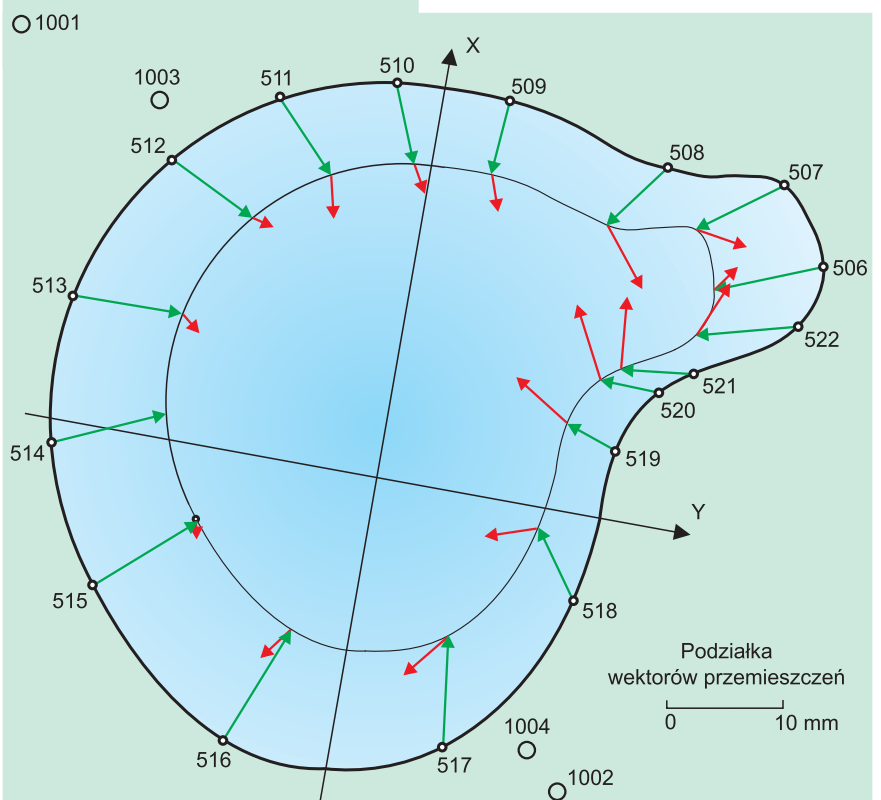
na koronie obwałowania (dotychczas często mylono je ze składowymi całkowitych przemieszczeń punktów, pokazanych na rysunku 1). W ostatniej kolumnie tabeli 3 zestawiono wartości proporcji przemieszczeń lokalnych do błędów średnich ich wyznaczenia. Wskazują one, że w wielu punktach przemieszczenia lokalne osiągnęły wartości w granicach dokładności wyznaczenia, co oznacza, że dominujący wpływ na całkowite przemieszczenia punktów miała zmiana skali obwałowania. Natomiast zdecydowanie wystąpienie przemieszczeń lokalnych stwierdzono na punktach o numerach 508 i 517-522.

Na wektor dP całkowitego przemieszczenia każdego punktu, opisany wartościami dx, dy (rys. 3), składają się:

- wektor dPs przemieszczenia cząstkowego (dxs, dys) spowodowanego samą tylko zmianą skali figury utworzonej przez wszystkie punkty przyjęte jako punkty dostosowania,

- wektor dP lokalnego przemieszczenia cząstkowego (dx, dy) spowodowanego lokalną zmianą kształtu figury utworzonej przez wszystkie punkty przyjęte jako punkty dostosowania,

Dysponując składowymi dx, dy przemieszczeń całkowitych oraz składowymi dx, dy części przemieszczeń tych samych punk-



Rys. 4. Wektory skalarnych (linia zielona) i lokalnych (linia czerwona) przemieszczeń punktów na koronie obwałowania zbiornika wody

tów, spowodowanych przez lokalne zmiany kształtu figury tworzonej przez punkty kontrolowane, możemy obliczyć składowe d_x , d_y części przemieszczeń spowodowanych przez samą tylko zmianę skali figury:

$$d_x = d\tilde{x} - dx$$

$$d_y = d\tilde{y} - dy$$

Wartości te zestawione są w tabeli 4. Na ich podstawie możemy obliczyć długości wektorów dP jako pierwiastki z sum kwadratów składowych d_x , d_y lub mnożąc współczynnik $(1-q)$ przez odległości punktów sieci (506-522) od punktu o średnich współrzędnych, podanych w ostatnim wierszu tabeli 1. Wektory dP s skierowane są wzdłuż kierunków od poszczególnych punktów sieci do punktu o średnich współrzędnych.

Na rysunku 4 pokazane są wektory dP s części przemieszczeń wywołanych wyłącznie zmianą skali figury utworzonej przez kontrolowane punkty sieci, znajdujące się na koronie obwałowania (linie zielone) oraz wektory dP części przemieszczeń wywołanych lokalnymi zmianami kształtu figury (linie czerwone). Suma tych wektorów pokazuje końce nieoznaczonych na rysunku wektorów przemieszczeń całkowitych dP . Uzyskane wektory przemieszczeń cząstkowych i całkowitych wyraźnie pokazują, że w strefie obwałowania od punktu 509 do 516 dominujący wpływ na przemieszczenia całkowite ma zmniejszenie figury, natomiast miejscowe jej zniekształcenia są relatywnie niewielkie. Inaczej rzecz przedstawia się w okolicach obwałowania od punktu 517 do 522 i dalej w strefie punktu 508, gdzie części wektorów wyrażające tylko zmianę skali są tego samego rzędu co części wektorów wyrażające miejscowe zmiany kształtu figury, a jednocześnie ich kierunki są na ogół zróżnicowane. Zróżnicowanie kierunków jest tu w pewnym stopniu uwarunkowane kształtem rzutu poziomego konturu obwałowania.

Baczej uwagi wymaga fakt, że przemieszczenia cząstkowe punktów 519, 520 i 521 powodowane przez zmianę skali i zmianę kształtu nie mają dużych odchyleń kierunkowych (ich suma wyraźnie zwiększa całkowitą wyznaczoną wartość przemieszczenia). W tej strefie obwałowania wystąpiły w sposób niewątpliwy przemieszczenia lokalne, związane ze zmianami kształtu figury utworzonej przez punkty kontrolowane, czego potwierdzeniem mogą być duże wartości proporcji przemieszczeń dP i błędów średnich ich wyznaczenia, zestawione w ostatniej kolumnie tabeli 3. Może to mieć pewien związek ze

Nr punktu	x [m]	y [m]	d_x [mm]	d_y [mm]	m_{d_x} [mm]	m_{d_y} [mm]	dP/m_{dP}
506	5482,9101	10683,1858	2,3	1,8	1,3	1,7	1,4
507	5607,2556	10587,9194	-0,4	4,5	1,9	1,1	2,0
508	5589,3284	10389,3377	-4,7	4,3	1,5	1,0	3,6
509	5664,3711	10103,8196	-3,1	0,6	1,5	0,9	1,9
510	5656,1440	9917,6608	-1,6	1,2	1,0	0,7	1,7
511	5592,4434	9729,7714	-3,0	0,8	1,4	0,6	2,1
512	5457,9795	9569,2919	-0,4	1,8	1,1	0,7	1,4
513	5213,4034	9464,0879	-1,3	1,1	1,0	1,0	1,2
514	4964,4129	9471,5250	0,2	0,1	1,0	1,1	0,1
515	4742,0929	9572,5040	-0,9	0,7	0,9	0,9	0,8
516	4525,4363	9830,4655	-2,1	-1,9	1,2	1,3	1,6
517	4585,8580	10194,2465	-3,8	-3,1	1,3	1,0	3,1
518	4859,2444	10362,3303	-1,4	-4,5	1,1	0,2	2,9
519	5119,0537	10396,6934	2,9	-5,4	1,2	1,2	3,6
520	5226,2453	10444,5968	6,0	-2,9	1,1	1,0	4,5
521	5266,9904	10500,7584	6,4	-0,7	1,1	1,0	4,3
522	5377,2488	10662,4223	4,9	1,8	1,1	0,7	4,0

Tab. 3. Zestawienie wyników transformacji ze zmianą skali (składowych przemieszczeń lokalnych)

zwiększoną w tym rejonie podatnością obwałowania na zmiany obciążenia, zauważoną na podstawie innych, nie omawianych tu przesłanek.

Istotne jest również, że części przemieszczeń spowodowane wyłącznie przez zmianę skali są wyznaczone ze znacznie mniejszym błędem niż przemieszczenia całkowite i części przemieszczeń spowodowane miejscowymi zmianami kształtu figury (por. błędy średnie wektorów dP s podane w kolumnie 5 tabeli 4). Ma to istotne znaczenie, bowiem dzięki temu zmiana skali figury może być w bardzo lapidarny, a jednocześnie wiarygodny sposób, wyrażona za pomocą jednego tylko parametru, tj. współczynnika zmiany skali $(1-q)$. W zademonstrowanym przykładzie współczynnik ten osiągnął wartość $-14,4$ ppm (mm/km) wyznaczoną z dziesięciokrotnie mniejszym błędem średnim (1,3 ppm), wskazując, że pod wpływem napełnienia zbiornika jego obwałowanie zmniejszyło średnicę.

To stwierdzone pomiarami zmniejszenie średnicy obwałowania pod wpływem zwiększonego parcia wody na pozór wydaje się wbrew potocznym wyobrażeniom, lecz ma logiczne podstawy w analizie pracy podłoża zbiornika pod jego obciążeniem.

Gdyby przy wielokrotnym powtarzaniu pomiarów sieci, przy tak samo zmieniających się obciążeniach obwałowania, bezwzględna wartość współczynnika $(1-q)$, zmieniała się z tendencją wzrostową, to mogłoby to wskazywać na postępujące w czasie zwiększanie się podatności obwałowania na przykładane obciążenia. Z tego wynika postulat, aby okresowo, przez cały czas eksploatacji zbiornika, przeprowadzać pomiary przemieszczeń punk-

Nr punktu	d_x [mm]	d_y [mm]	dP s [mm]	m_{dPs} [mm]	dPs/m_{dPs}
506	-3,6	-8,3	9,0	0,8	11,2
507	-5,4	-6,8	8,7	0,8	10,9
508	-5,2	-4,1	6,6	0,6	11,0
509	-6,3	0,1	6,3	0,5	12,6
510	-6,2	2,7	6,8	0,6	11,3
511	-5,2	5,5	7,6	0,7	10,8
512	-3,3	7,8	8,5	0,8	10,6
513	0,3	9,3	9,3	0,9	10,3
514	3,9	9,2	10,0	0,9	11,1
515	7,0	7,8	10,5	0,9	11,7
516	10,2	4,0	11,0	1,0	11,0
517	9,3	-1,2	9,4	0,9	10,4
518	5,4	-3,6	6,5	0,6	10,8
519	1,6	-4,1	4,4	0,4	11,0
520	0,1	-4,8	4,8	0,4	12,0
521	-0,6	-5,7	5,7	0,5	11,4
522	-2,1	-7,9	8,2	0,7	11,7

Tab. 4. Zestawienie składowych przemieszczeń pod wpływem zmiany skali figury

tów na jego koronie przy zmieniających się poziomach napełnienia i analizować zmiany wartości wyznaczanych parametrów $(1-q)$, a także zmiany wartości przemieszczeń całkowitych dP i przemieszczeń lokalnych dP punktów kontrolowanych.

dr hab. **Jerzy Janusz** jest zatrudniony na stanowisku docenta w Instytucie Geodezji i Kartografii

Literatura:

1. Janusz W., *Transformacja współrzędnych bez zniekształceń*, „Przegląd Geodezyjny” nr 4/1976;
2. Janusz J., *Błędy skali w sieciach liniowych do wyznaczenia przemieszczeń poziomych*, Prace IGiK z. 2002;
3. Kadaj R., *GEONET – System obliczeń geodezyjnych. Opis funkcjonalny i zasady obsługi*, Rzeszów 1995;
4. Lazzarini T., *Geodezyjne pomiary odształceń i ich zastosowanie w budownictwie*, PPKW Warszawa, 1961.