

ISBN 83-916216-9-3

INSTYTUT GEODEZJI KARTOGRAFII

SERIA MONOGRAFICZNA NR 9

JERZY JANUSZ
WOJCIECH JANUSZ

**METODYKA BADANIA PODATNOŚCI
BUDOWLI PIĘTRZĄCYCH WODĘ
NA ZMIANY OBCIĄŻENIA**

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji
w latach 2003–2005 w ramach projektu badawczego 5T12E 021 25
zaś w części dotyczącej budowli wlotowej
w ramach tematu statutowego S/3.4/04

Warszawa 2004



Rada Wydawnicza
przy Instytucie Geodezji i Kartografii
Editorial Council
at the Institute of Geodesy and Cartography

Adam Linsenbarth (przewodniczący, chairman),
Andrzej Ciołkosz (zastępca przewodniczącego, deputy chairman),
Teresa Baranowska, Stanisław Białousz (Wydział Geodezji i Kartografii PW),
Wojciech Janusz, Jan R. Olędzki (Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW),
Andrzej Sas-Uhrynowski,
Janusz Zieliński (Centrum Badań Kosmicznych),
Hanna Ciołkosz (sekretarz, secretary)

Redaktor naukowy wydawnictwa
Scientific Editor
Adam Linsenbarth

Zastępca redaktora naukowego wydawnictwa
Deputy Scientific Editor
Andrzej Ciołkosz

Zespół redakcyjny
Editorial Staff
Wojciech Janusz,
Andrzej Sas-Uhrynowski,
Edyta Jurczak

Adres Redakcji
Instytut Geodezji i Kartografii
02-679 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27
Address of the Editorial Board:
Institute of Geodesy and Cartography
02-679 Warsaw, Modzelewskiego 27 Str.
Poland
e-mail: boi@igik.edu.pl

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISBN 83-916216-9-3
IGiK, Warszawa 2004 r.
Skład komputerowy i druk: IGiK

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie.....	10
2. Obiekt badań i zasady jego pracy.....	19
3. Obowiązujące dotychczas pomiary kontrolne obiektu badań.....	24
4. Badania dynamiki pracy obiektu badań poprzedzające niniejszy projekt.....	25
5. Badania dynamiki pracy obiektu związane z niniejszym projektem badawczym.....	27
5.1. Hipoteza dotycząca zachowania się podłoża i obwałowania zbiornika górnego pod wpływem zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku, cel badań w ramach projektu.....	29
5.2. Program prac niezbędnych do wyznaczania wskaźników podatności budowli.....	31
5.2.1. Program wyznaczania przemieszczeń poziomych i jednostkowych wskaźników podatności w_{Pj}	31
5.2.2. Program wyznaczania przemieszczeń pionowych i jednostkowych wskaźników podatności w_{Hj}	36
5.2.3. Program pomiarów zmian nachylenia i wyznaczania jednostkowych wskaźników podatności $w_{\phi j}$	38
5.2.4. Ustalenie zredukowanej różnicy poziomów piętrzenia wody w zbiorniku.....	39
5.3. Badanie zachowania się obwałowania zbiornika górnego pod wpływem zmian obciążenia – przykład pomiarów i obliczeń na podstawie wyników eksperymentu z roku 2003.....	40
5.3.1. Pomiary i obliczenie przemieszczeń poziomych i jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania w_{Pj}	40
5.3.2. Pomiary i obliczenie przemieszczeń pionowych i jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania w_{Hj} ...	50
5.3.3. Pomiary i obliczenie jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania $w_{\phi j}$	53
5.4. Badanie trendu zachowania się korony obwałowania pod wpływem zmian obciążenia.....	56
5.4.1. Przemieszczenia i deformacje poziome korony obwałowania.....	56
5.4.2. Przemieszczenia i deformacje pionowe korony obwałowania.....	59

5.5. Badanie reakcji budowli wlotowej na zmiany poziomu piętrzenia wody.....	62
5.5.1. Konstrukcja budowli wlotowej i rozmieszczenie punktów kontrolowanych.....	62
5.5.2. Wyniki pomiarów przemieszczeń budowli wlotowej w latach 2002, 2003.....	65
5.5.3. Wyniki pomiarów przemieszczeń budowli wlotowej w roku 2004.....	68
5.6. Badanie reakcji skarpy naturalnej na zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku górnym.....	72
5.7. Ocena wyników eksperymentów i wnioski.....	75
5.7.1. Korona obwałowania.....	75
5.7.2. Budowla wlotowa.....	77
5.7.3. Skarpa naturalna.....	80
Ważniejsze oznaczenia użyte w tekście.....	82
Literatura.....	83
Streszczenie (w języku angielskim).....	85

JERZY JANUSZ

WOJCIECH JANUSZ

**METHODOLOGY OF STUDIES ON TRACTABILITY
OF DAMS TO CHANGES OF LOADING**

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction.....	10
2. Object of studies and principles of its work	19
3. Control measurements of the object of studies procured until present...	24
4. Dynamics of work of the object of studies preceding the presented research project	25
5. Dynamics of work of the object related to the presented research project	27
5.1. Hypothesis concerning the reactions of base and embankment of the upper reservoir to changes of water level in the reservoir, goal of studies of the project	29
5.2. Program of tasks necessary to determine indices of tractability of construction	31
5.2.1. Program of determining horizontal displacements and unit indices of tractability w_{pj}	31
5.2.2. Program of determining vertical displacements and unit indices of tractability w_{Hj}	36
5.2.3. Program of measuring changes of inclinations and determining unit indices of tractability $w_{\phi j}$	38
5.2.4. Determination of the reduced difference of water level in reservoir	39
5.3. Analysis of the reaction of upper reservoir embankment to changes of loading – example of measurements and calculations of 2003 data	40
5.3.1. Measurements and calculation of horizontal displacements and unit index of tractability of embankment w_{pj}	40
5.3.2. Measurements and calculation of vertical displacements and unit index of tractability of embankment w_{Hj}	50
5.3.3. Measurements and calculation of unit index of tractability of embankment $w_{\phi j}$	53
5.4. Analysis of the trend of changes of the top of embankment due to changes of loading	56

INSTITUTE OF GEODESY AND CARTOGRAPHY

Monographic Series No 9

5.4.1. Displacements and horizontal deformations of the top of embankment	56
5.4.2. Displacements and vertical deformations of the top of embankment	59
5.5. Analysis of the reaction of intake construction to changes of water level	62
5.5.1. Intake construction and distribution of controlled points	62
5.5.2. Results of measurements of displacements of intake construction in 2002-2003	65
5.5.3. Results of measurements of displacements of intake construction in 2004	68
5.6. Analysis of the reaction of natural escarpment to changes of water level in upper reservoir	72
5.7. Evaluation of the results of experiments and Conclusions	75
5.7.1. Top of embankment	75
5.7.2. Intake construction.....	77
5.7.3. Natural slope.....	80
Symbols of major importance used in the text.....	82
References.....	83
Summary (in English).....	85

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Adam Żurowski

Słowa kluczowe: *elektrownia wodna szczytowo-pompowa, bezpieczeństwo budowli*
piętrzących, pomiary przemieszczeń, geometryczne wskaźniki podatności
budowli na obciążenia

ZARYS TREŚCI: Omówiono problem wyznaczania zmian geometrycznych (przemieszczeń i odkształceń) budowli piętrzącej i jej podłoża pod wpływem zmian obciążenia. Problem ten zilustrowano na przykładzie wyznaczania przemieszczeń i odkształceń obwałowania i ujęcia wody górnego zbiornika szczytowo-pompowej Elektrowni Wodnej „Żarnowiec”, a także skarpy naturalnej graniczącej ze zbiornikiem, pod wpływem dużych zmian poziomu piętrzenia wody. Przedstawiono metodykę pomiarów i obliczeń przemieszczeń oraz jednostkowych wskaźników charakteryzujących syntetycznie podatność geometryczną badanej budowli na zmiany jej obciążenia. Przedstawiono wyniki badań podatności obwałowania i górnego ujęcia EW „Żarnowiec” oparte na wynikach pomiarów przeprowadzonych przez Zakład Geodezji Stosowanej Instytutu Geodezji i Kartografii w latach 2001–2004.

PODZIĘKOWANIA

Wykonanie tej pracy było możliwe dzięki wykorzystaniu wyników pomiarów *in situ*, przeprowadzanych przez zespół pracowników Instytutu Geodezji i Kartografii w składzie: mgr inż. Andrzej Kaliński, inż. Mieczysław Kołodziejczyk, mgr inż. Andrzej Toruński, dr inż. Jan Wasilewski i pracowników przedsiębiorstwa Geonord pod kierownictwem mgr. inż. Bogdana Huka. Autorzy składają wszystkim tym Osobom serdeczne podziękowanie, mając we wdzięcznej pamięci, że prace terenowe wymagały wielkiego wysiłku i samozaparcia, zwłaszcza wobec konieczności ich wykonywania w trudnych warunkach terenowych, a niejednokrotnie również w trudnych i uciążliwych warunkach atmosferycznych.

Istotnym warunkiem umożliwiającym wykonanie tej pracy było też okazane zainteresowanie i pomoc ze strony Zarządu Elektrowni Wodnej Żarnowiec S.A., wyrażające się udostępnieniem obiektów Elektrowni do pomiarów, jak też czasowym dostosowaniem reżimu jej pracy do wymagań stawianych badaniom dynamicznym. Serdecznie dziękujemy Zarządowi EWŻ za tą pomoc.

Szczególne podziękowania pragniemy skierować do Pani mgr inż. Ireny Kłudki, specjalisty hydrotechnika, odpowiedzialnej z ramienia Kierownictwa Elektrowni Wodnej Żarnowiec za prowadzenie badań stanu bezpieczeństwa obiektów elektrowni. Jej pomoc konsultacyjna była dla nas nieoceniona merytorycznie, zaś przychyłność i pomoc organizacyjna w zabezpieczaniu potrzeb zespołów wykonujących prace terenowe stała się ważnym elementem ich powodzenia.

1. WPROWADZENIE

Obwałowania i dna zbiorników piętrzących wodę oraz składowisk: osadów flotacyjnych, surowców mineralnych, popiołu w elektrowniach, śmieci i innych mediów podlegają w miarę ich napełniania wzrastającym obciążeniom wywołującym przemieszczenia i deformacje, wymagające szczególnie skrupulatnej kontroli dla uzyskiwania bieżącej informacji o stanie bezpieczeństwa. Ewentualna awaria lub katastrofa tych budowli może powodować zagrożenie życia ludzi zamieszkujących i pracujących w strefie ich wpływu, a także ogromne straty materialne w zakresie infrastruktury istniejącej w tej strefie. Szczególnie duże zagrożenie mogą stwarzać górne zbiorniki w elektrowniach szczytowo-pompowych, które są napełniane wodą i opróżniane w cyklu dobowym, co powoduje przemienne zmiany obciążenia ich obwałowań i dna z dynamicznym oddziaływaniem i możliwością niebezpiecznej filtracji wody przez obwałowanie, dno i podłoże. Przedmiotem bacznej uwagi muszą być również zbiorniki osadów flotacyjnych, które ze względu na swą wielką objętość powodują znaczne obciążenie i deformacje podłoża pod zbiornikiem oraz na terenie otaczającym zbiornik, gdzie oddziałują niekorzystnie na fundamenty istniejących budowli.

Tego rodzaju obiekty piętrzące podlegają geodezyjnym pomiarom służącym do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń, które są źródłem informacji o ich zmianach geometrycznych.

Wykonywanie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń i odkształceń takich obiektów jest połączone z wieloma trudnościami natury technicznej i organizacyjnej, a ich wyniki niekiedy zawierają poważne usterki i budzą wątpliwości co do wiarygodności i przydatności do interpretacji stanu bezpieczeństwa. Wątpliwości te wynikają z kilku różnych przyczyn o charakterze obiektywnym i subiektywnym, wśród których można wymienić zdarzające się niekiedy:

- a) posługiwanie się sprzętem pomiarowym, którego parametry metrologiczne nie zawsze są kontrolowane, a jak wskazują wyniki pomiarów, podlegają zapewne wraz z upływem czasu zmianom, wywołującym błędy systematyczne wyznaczanych przemieszczeń, często o wartościach zbliżonych do wielkości przemieszczeń;
- b) konieczność wykonywania pomiarów geodezyjnych w trudnych warunkach atmosferycznych, w strefie drgań podłoża;

- c) nienadążanie z wykonywaniem pomiarów w czasie ustabilizowanych stanów obciążeń obiektu (szczególnie w przypadkach, gdy zmiany obciążeń następują często i szybko, a jednocześnie towarzyszy im opóźnienie reakcji obiektu i podłoża na zmiany obciążeń);
- d) posługiwanie się nie zawsze właściwie dobranymi algorytmami i programami obliczeń;
- e) projektowanie i wykonywanie pomiarów w zakresie ograniczonym do samego obiektu, bez próby określenia zasięgu występowania i wielkości przemieszczeń oraz deformacji podłoża na terenie otaczającym obiekt;
- f) przedstawianie wyników pomiarów w formie ograniczonej – „surowej”, bez przetworzenia umożliwiającego uzyskiwanie pogłębionych informacji, nie tylko o przemieszczeniach poszczególnych punktów kontrolowanych, ale również o zachodzących przemieszczeniach i deformacjach całego obiektu badań lub wybranych jego fragmentów. Przedstawianie wyników w takiej formie przyczynia się niekiedy do błędnego ich odczytania przy interpretowaniu zachowania się kontrolowanego obiektu.

Niniejsze opracowanie zawiera przykładową ilustrację opracowanych i zastosowanych rozwiązań metodycznych i technologicznych, eliminujących lub ograniczających wyżej wymienione usterki procesu wyznaczania przemieszczeń punktów kontrolowanych. Ilustracja ta została dokonana na przykładzie pomiarów i obliczeń dotyczących obwałowania i ujęcia wody górnego zbiornika elektrowni szczytowo-pompowej w Żarnowcu. W opracowaniu tym nie ograniczamy się do problematyki jakości techniki i organizacji prac pomiarowych oraz obliczeniowych, ale staramy się, aby wyniki tych prac były bardziej „czytelne” dla odbiorców zajmujących się oceną stanu bezpieczeństwa budowli.

Przy wykonywaniu tych prac skupiono uwagę na działaniach uwzględniających wymienione problemy, a mianowicie:

1. W zakresie stosowanego sprzętu pomiarowego utworzono system realnej kontroli dalmierzy elektromagnetycznych i łat do niwelacji precyzyjnej w laboratorium komparacyjnym IGiK, wspomagany systemem kontroli terenowej, dokonywanej w miejscach pomiarów.

Według poglądów rozpowszechnionych wśród wykonawców pomiarów, kontrola taka nie ma istotnego znaczenia, chociaż

analiza uzyskiwanych wyników **wyraźnie wskazuje na pojawianie się niekiedy bardzo dużych błędów systematycznych wyznaczanych przemieszczeń, mających źródło w zmianach stanu przyrządów pomiarowych**, nawet kilkakrotnie większych od błędów przypadkowych, **osiągających wartości zbliżone do wyznaczanych przemieszczeń.**

2. Źródłem dużych błędów o charakterze systematycznym mogą też być różnice parametrów meteorologicznych środowiska w czasie wykonywania powtarzanych pomiarów. Z tego powodu ważnym czynnikiem, wymagającym lepszego niż dotychczas uwzględnienia przy precyzyjnych pomiarach przemieszczeń, są redukcje wyników pomiarów ze względu na zmienność warunków atmosferycznych. Na przykład aktualnie istniejące precyzyjne tachimetry elektroniczne osiągnęły już tak wysoką dokładność, że jest ona często niweczona przez brak dostatecznie dobrego rozpoznania i zredukowania wyników pomiarów ze względu na różnice warunków atmosferycznych, głównie temperatury i wilgotności. **Niekiedy obliczane wartości poprawek ze względu na zmiany warunków atmosferycznych są tego samego rzędu, co wyznaczane przemieszczenia** i dlatego nie można poprzestawać na staraniach o wysoką precyzję wykonywania pomiarów geodezyjnych. Trzeba także dbać o właściwe mierzenie parametrów meteorologicznych i redukowanie wyników pomiarów geodezyjnych ze względu na różnice warunków meteorologicznych środowiska pomiarów. Należy też dążyć do tego, by okresowe pomiary do wyznaczania przemieszczeń były wykonywane w zbliżonych warunkach atmosferycznych. Wówczas wpływ błędów systematycznych (poprawek redukcyjnych) na wynik obliczonego przemieszczenia jest zminimalizowany. Oczywiście postulat ten może być spełniany tylko wówczas, gdy zamawiający nie stawia warunków uniemożliwiających jego realizację. Trzeba bowiem pamiętać, że w wielu przypadkach konieczność wykonania pomiarów w określonym terminie, niezależnie od panujących warunków atmosferycznych, jest podyktowana nadrzędną potrzebą kontrolowania obiektu budowlanego przy określonym jego stanie technicznym lub stanie obciążenia.

Doświadczenia związane z wprowadzaniem do praktyki nowoczesnych instrumentów pomiarowych, zwłaszcza niwelatorów kompensacyjnych wskazują, że złe warunki

środowiska w postaci drgań podłoża i drgań instrumentu powodowanych przez wiatr znacznie ograniczają możliwość ich stosowania i zmuszają wykonawców do powracania do instrumentów libelowych, uniemożliwiających automatyzowanie prac polowych i pozyskiwanie danych w formatach cyfrowych. Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, jak poradzić sobie z tym problemem, niewątpliwie jednak trzeba poszukiwać w tym zakresie rozwiązań. Jednym z nich może być zastępowanie metody precyzyjnej niwelacji geometrycznej odpowiednio zmodyfikowaną niwelacją trygonometryczną, która umożliwia oddalanie stanowisk instrumentu od stref drgań (Janusz J. 2002b).

3. Często odbiorcy wyników pomiarów i ich wykonawcy niezupełnie sobie zdają sprawę z tego, że dokładność wyznaczania przemieszczeń zależy nie tylko od dokładności pomiarów geodezyjnych, ale i od wielkości ruchów punktów kontrolowanych występujących w czasie trwania każdego pomiaru. Ma to szczególnie duże znaczenie w okresach szybkich zmian stanu obciążenia kontrolowanego obiektu. W zasadzie każdy pomiar powinien odbywać się w okresie ustabilizowanego stanu obciążenia obiektu badań, przy czym ze względu na histerezę odkształceń pomiary powinny rozpoczynać się po odczekaniu na ustabilizowanie po okresie zaistniałej zmiany obciążenia. Jest to postulat ważny, ale jednocześnie często nierealny, zwłaszcza wówczas, gdy okresy ustabilizowanych obciążeń są krótkie w stosunku do niezbędnego czasu wykonania cyklu pomiarów. Aby uzyskać dokładność wyznaczania przemieszczeń nie gorszą od możliwej do osiągnięcia w warunkach nieruchomości obiektu trzeba dążyć do zatrudnienia kilku (wielu) zespołów pomiarowych, wykonujących równocześnie pomiary uzgodnionych fragmentów sieci kontrolnej. Może się to okazać niemożliwe do zrealizowania ze względów organizacyjnych jak również niekorzystne z uwagi na konieczność pomiaru fragmentów sieci różnymi egzemplarzami instrumentów, nieidentycznymi pod względem parametrów metrologicznych; wówczas wchodzi również w grę wpływ zróżnicowanych błędów osobowych kilku (wielu) obserwatorów.

Trzeba więc brać pod uwagę inne rozwiązanie, możliwe do stosowania w przypadkach, gdy z warunków eksploatacji obiektu wynikają szybkozmienne, lecz jednakowe, cykliczne i często powtarzające się zmiany jego obciążeń. Na przykład w sytuacji

powtarzających się każdego dnia jednakowych zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku, jak to ma miejsce w przypadku elektrowni szczytowo-pompowych, może okazać się konieczne wykonywanie cyklu pomiaru w podziale czasowym dostosowanym do okresów uzyskiwania takich samych poziomów piętrzenia. Wówczas cały cykl pomiarowy trwa kilka dni, a fragmenty cyklu pomiarowego wykonywane przy wymaganym obciążeniu zajmują każdego dnia w najlepszym przypadku tylko kilka godzin.

Żadne rozwiązanie w tej kwestii nie jest idealne i w pełni skuteczne, trzeba jednak zdecydować się na jedno z nich w zależności od posiadanych środków i warunków.

Tu trzeba dodać, że pojawiają się prace badawcze np. (Kwaśniak M. 1987), (Woźniak M. 2001) traktujące cykl pomiarowy, w czasie którego następują przemieszczenia punktów sieci, jako „dynamiczny”, z redukowaniem wszystkich wykonywanych pomiarów do pewnej epoki. Jest to bardzo interesujący kierunek badań, jednak wydaje się, że w praktyce mamy zazwyczaj zbyt mało danych do określenia dostatecznie wiernego modelu, według którego powinno następować redukovanie, a ponadto zbieranie danych do takich redukcji jest zazwyczaj zbyt kosztowne w stosunku do kosztu całego zadania pomiarowego.

4. W toku analizy wyników wykonywanych obliczeń stwierdziliśmy, że w praktyce wykorzystywany jest niekiedy opracowany kilkadziesiąt lat temu sposób identyfikowania punktów stałych i obliczania poziomych przemieszczeń punktów kontrolowanych, nadający się do stosowanych wówczas sieci bez mierzonych elementów liniowych, który jednak nie jest prawidłowy do obliczeń w coraz częściej stosowanych sieciach liniowo-kątowych i liniowych. Konsekwencje takiego postępowania wykazano w (Janusz J. 2002a) na przykładzie sieci, w której wskutek tego nie obliczano dotychczas całkowitych wartości przemieszczeń, a jedynie części przemieszczeń zredukowane o zaistniałą, niedostrzeżoną zmianę skali, bez wyjaśnienia, czy jest ona spowodowana przez zmiany stanu przyrządów pomiarowych, czy przez systematyczny charakter deformacji obiektu badań, ponadto błędnie, zbyt optymistycznie oceniano dokładność wyznaczanych przemieszczeń. Wprowadzone korekty

stosowanego wcześniej sposobu obliczania przemieszczeń przyniosły pozytywne efekty uwidocznione w punkcie 5.3.

5. Obiekty piętrzące wodę lub inne media podlegają przemieszczeniom i deformacjom **wraz z podłożem zajmowanego przez nie i otaczającego je terenu**. Podobnie dzieje się z obiektami wykonywanymi w głębokich wykopach, w których otoczeniu rozciąga się strefa możliwych przemieszczeń i deformacji podłoża, stanowiąca potencjalne zagrożenie dla istniejących w niej obiektów.

Wykraczanie przemieszczeń poza sam kontrolowany obiekt budowlany trzeba rozpatrywać w dwóch, niżej omówionych aspektach.

- a) Powoduje ono znaczne utrudnienie dla geodetów, polegające na tym, że nie ma sprecyzowanych zasad ustalania, w jak dużej odległości od kontrolowanego obiektu i w jakim położeniu w stosunku do kierunków sił działających na obiekt można stabilizować stałe punkty odniesienia. **Poglądy w tym zakresie są bardzo rozbieżne, bowiem nie są one podbudowane odpowiednio dokładnymi, planowymi badaniami *in situ***. W otoczeniu wielu obiektów wymagających wyznaczania ich przemieszczeń prawdopodobnie w ogóle nie ma miejsc nadających się do zastabilizowania punktów spełniających warunek całkowitej, wzajemnej nieruchomości, nadających się do odniesienia przemieszczeń „bezwzględnych” przy wykorzystaniu naziemnych sieci geodezyjnych. Świadectwem tego jest stwierdzany fakt, że przy identyfikacji punktów wzajemnie stałych uzyskuje się zazwyczaj błędy dostosowania znacznie większe od błędów osiąganych z wyrównań sieci swobodnych i w rezultacie dokładność wyznaczenia przemieszczeń jest mniejsza od uzyskiwanej dokładności pomiarów. Z tego powodu popularnym obecnie kierunkiem poszukiwania rozwiązania problemu jest stosowanie znacznie oddalonych od obiektu punktów układu referencyjnego, znajdujących się niekiedy poza zasięgiem widoczności z kontrolowanego obiektu, w stosunku do których proponuje się wyznaczanie przemieszczeń punktów badanego obiektu przy użyciu metody satelitarnej GPS.

Jest to idea bardzo obiecująca, choć doświadczenie wskazuje, że aktualnie barierą w jej stosowaniu są

ograniczone możliwości determinowania i redukcji błędów obserwacji satelitarnych w krótkotrwałych, konkurencyjnych ekonomicznie sesjach obserwacyjnych. Krótkotrwałość sesji jest dyktowana słusznym dążeniem do uniknięcia błędów systematycznych wynikających z dużej szybkości przemieszczania się tych punktów układu obserwacyjnego GPS, które zlokalizowane są bezpośrednio na kontrolowanym obiekcie. Jednocześnie jednak ta krótkotrwałość sesji uniemożliwia osiąganie wymaganych dokładności.

Licząc się z szybkim postępem rozwoju pomiarów satelitarnych, ich zastosowanie w pomiarach przemieszczeń należy uznać za obiecujące. W programie badań należy jednak dążyć do osiągnięcia optimum kosztów i efektów ich stosowania. Wydaje się, że w chwili obecnej można to osiągnąć przez wyznaczanie metodą satelitarną w stosunku do znacznie oddalonych punktów referencyjnych, szczytkowych przemieszczeń punktów potencjalnie stałych, zlokalizowanych na terenie otaczającym kontrolowany obiekt, w pobliżu granic zasięgu jego wpływu na przemieszczenia. Przy takim postępowaniu, ze względu na oczekiwane znacznie mniejsze, szczytkowe przemieszczenia punktów potencjalnie stałych, znajdujących się w pobliżu granicy zasięgu wpływu przemieszczeń i deformacji obiektu, niż przemieszczenia punktów na obiekcie, można by zastosować dłużej trwające sesje obserwacji satelitarnych, zwiększające dokładność wyznaczeń.

Istnieją zatem duże potencjalne możliwości łączenia w sieci obserwacji klasycznych i satelitarnych. W przypadku zastosowania metody hybrydowej należy wnikliwie dobrać miejsca łączenia obserwacji i sposób obliczeń. Można oczywiście stosować również bezpośrednie wyznaczanie metodą satelitarną szybkozmiennych przemieszczeń punktów kontrolowanego obiektu względem znacznie oddalonych punktów referencyjnych, jednak tylko na nielicznych punktach obiektu, zaopatrzonych w stacje GPS pracujące permanentnie, a więc znacznie droższe od stacji przenośnych ze względu na konieczność ciągłej eksploatacji i ochrony.

- b) Drugi istotny (a nawet ważniejszy od wyżej omówionego) aspekt zachodzenia przemieszczeń podłoża na terenie otaczającym kontrolowany obiekt to wpływ tych

przemieszczeń na bezpieczeństwo obiektu badań i obiektów istniejących w otoczeniu. Zasięg strefy przemieszczeń podłoża w otoczeniu kontrolowanego obiektu oraz wielkości przemieszczeń podłoża są niewątpliwie interesujące nie tylko z punktu widzenia określenia miejsc stabilizowania stałych punktów odniesienia, ale głównie z tego powodu, że **ocena bezpieczeństwa obiektu nie może abstrahować od stopnia stabilności podłoża pod obiektem i w jego otoczeniu**. Dotyczy to zwłaszcza obiektów piętrzących wznoszonych na wyniosłościach terenu, jak to ma miejsce w EW „Żarnowiec”, gdzie zbiornik górny ma objętość użytkową 13,8 mln m³, a w jeszcze większym stopniu w EW „Porąbka-Żar”, gdzie obwałowania zbiornika górnego, mającego objętość 2 mln m³, usytuowane są na bardziej stromych i z tego powodu zagrożonych tendencjami zsuwowymi zboczach góry Żar. W przypadku zbiorników osadów flotacyjnych, których objętość jest znacznie większa (np. zbiornik „Żelazny Most” w Rudnej będzie miał docelowo objętość 600 mln m³), znaczne obciążenie ma wpływ na deformacje podłoża sięgające na zewnątrz daleko poza obwałowanie, obejmujące teren zabudowany.

Śledząc nadal i analizując te zmiany na punktach rozmieszczonych w terenie, wokół badanego obiektu, jesteśmy w stanie doprowadzić do opisu przemieszczeń i deformacji badanego obiektu i podłoża w jego otoczeniu, a także określić granice ich zasięgu.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że jak wykazały wyniki pomiarów, strefa deformacji podłoża podczas okresowych pomiarów wykonywanych przy tych samych, maksymalnych poziomach piętrzenia wody jest znacznie węższa aniżeli strefa, w której wyczuwalne są przemieszczenia pod wpływem różnic obciążeń obwałowania wywołanych opróżnianiem i ponownym napełnianiem zbiornika.

6. W środowisku geodezyjnym utarła się dosyć powszechnie stosowana nazwa „geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli”, mimo że w rzeczywistości geodeta zazwyczaj ogranicza się do wyznaczania przemieszczeń punktów kontrolowanych, oznaczonych na tej budowli. Od wielu lat w środowisku geodezyjnym trwa dyskusja nad problemem, jak dalece geodeta

„ma prawo” poważnie traktować cytowaną wyżej, stosowaną w praktyce nazwę.

Z przemieszczeń poszczególnych punktów kontrolowanego obiektu można wysnuć, przy odpowiednim ich analizowaniu, wnioski na temat zmian geometrycznych, jakim podlega cały obiekt (lub jego poszczególne fragmenty wykazujące różnice w stosunku do całego obiektu). Analiza taka, dokonywana przez geodetę, powinna ograniczać się do **cech geometrycznych** obiektu, nie wkraczając w zasadzie w sferę **przyczyn i skutków** zmian wartości tych cech, których ocena znajduje się w sferze kompetencji konstruktora i hydrotechnika, tj. specjalistów zajmujących się oceną stanu i bezpieczeństwa obiektu. Jednocześnie jednak taka analiza o charakterze geometrycznym może być bardzo pożyteczna, bowiem pokazuje tendencje, jakim podlega obiekt badań i **ułatwia zauważenie** związków między przemieszczeniami i deformacjami obiektu a zmianami jego obciążeń.

Wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń może następować zgodnie z życzeniem zamawiającego:

- przy jednakowych lub zbliżonych stanach obciążenia obiektu,
- przy zmieniających się obciążeniach obiektu.

W niniejszej pracy skupiamy uwagę na wyznaczaniu przemieszczeń i odkształceń w warunkach zmieniających się obciążeń obiektu, z myślą o pokazaniu związku między przemieszczeniami i odkształceniami a wielkościami zmian obciążenia. Dla jasności znaczenia uzyskiwanych wyników, w szczególności istotne może okazać się obliczanie **wskaźników jednostkowych, określających w sposób syntetyczny stosunki wartości przemieszczeń i odkształceń do wywołujących je zmian stanu napełnienia zbiornika powodujących zmiany obciążenia.**

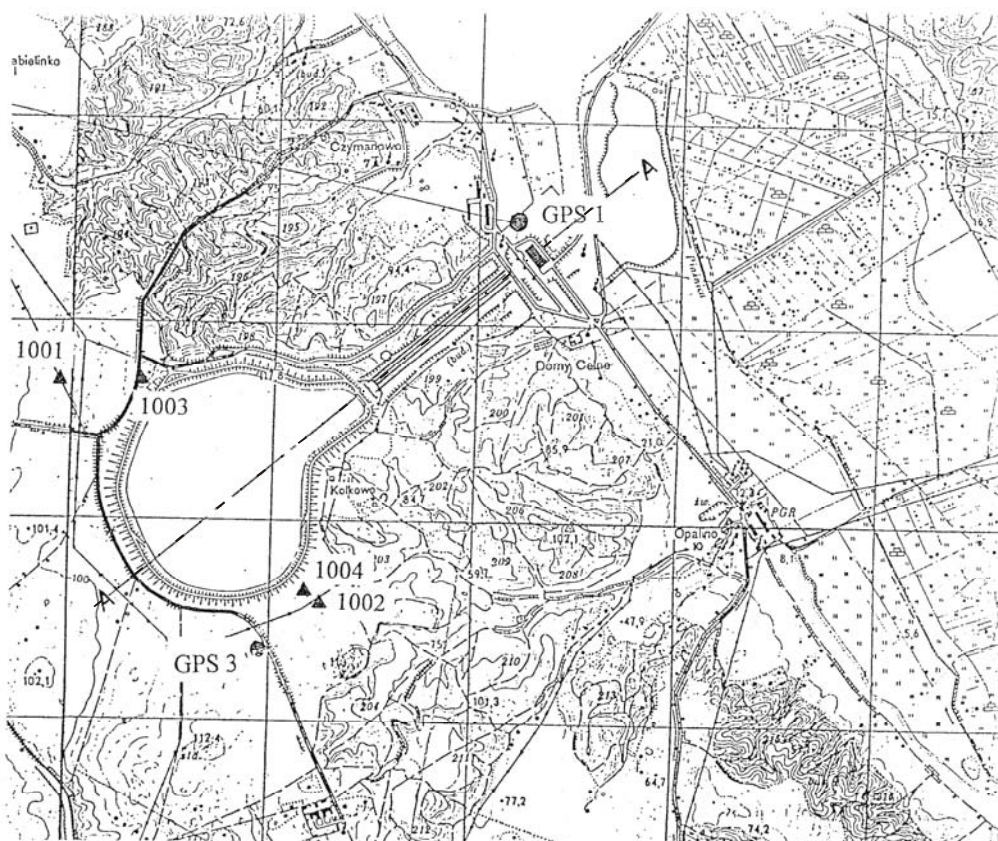
Wskaźniki takie mogą być przydatne do oceny, czy w toku wieloletniej eksploatacji zachowana jest niezmienna podatność obiektu na obciążenia, czy też z czasem podatność ta ulega powiększeniu, wskazującemu na ogół na obniżenie poziomu bezpieczeństwa obiektu. Mogą one również służyć do identyfikowania fragmentów badanego obiektu o zmniejszonej i zwiększonej podatności na zmiany obciążenia.

2. OBIEKT BADAŃ I ZASADY JEGO PRACY

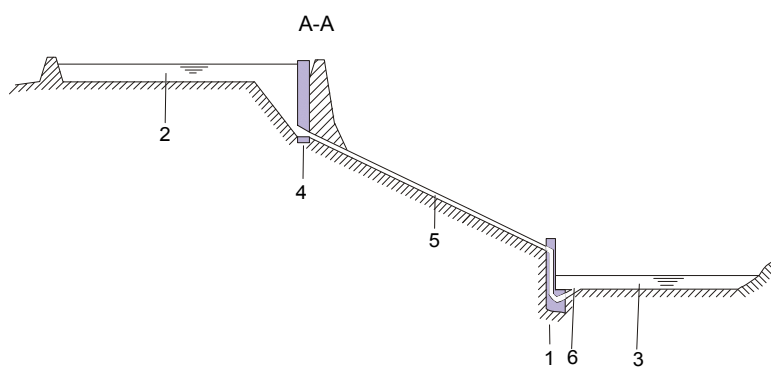
Obiektem badań w ramach niniejszej pracy jest obwałowanie ziemne i żelbetowe ujęcie wody górnego zbiornika elektrowni szczytowo-pompowej „ŻARNOWIEC”. Budowle te są posadowione na płaskim wierzchołku wzgórza stanowiącego fragment pleistocenijskiej wysoczyzny morenowej. Wzgórze to graniczy z naturalnym jeziorem rynnowym, stanowiącym zbiornik dolny elektrowni. W podłożu bezpośrednio pod żelbetowym ujęciem wody znajdują się przepuszczalne utwory piaszczysto-żwirowe (Prospekt informacyjny-Elektrownia Wodna Żarnowiec), (Malinowski R. 1998). Obwałowanie i ujęcie są reprezentatywne dla celu badań, bowiem są to obiekty podlegające w toku swej pracy przemianom, dużym zmianom obciążenia, wynikającym z codziennego napełniania i opróżniania, polegającego na podnoszeniu i obniżaniu poziomu wody w zbiorniku w granicach kilkunastu metrów, to jest zmian jej objętości w granicach około 14 mln m³ (maksymalna objętość zbiornika wynosi 16,5 mln m³). Następują przy tym zmiany obciążenia podłoża rzędu 1,5 kG/cm² (zmniejszenie obciążenia dna przy całkowitym opróżnieniu zbiornika może wahać się od 1,5 kG/cm² w rejonie krawędzi dna do 3 kG/cm² w niecce przy budowli wlotowej).

Lokalizacja elektrowni pokazana jest na rysunku 1a stanowiącym wycinek mapy topograficznej w skali 1:25 000 (tu zmniejszonej). Górny zbiornik tej największej w Polsce elektrowni szczytowo-pompowej o generacyjnej mocy 716 MW utworzony jest na płaskowyżu przez otoczenie go obwałowaniem ziemnym o długości rzędu 4 km, wysokości 20 m, w bezpośrednim sąsiedztwie silnie zerodowanej skarpy naturalnej, mieszczącej się po północnej stronie zbiornika. Zbiornik ten znajduje się ponad 100 m wyżej niż budynek siłowni, otaczające osiedla i rejon, w którym zlokalizowana jest produkcja przemysłowa, magazyny i hurtownie. Ewentualny niekontrolowany wypływ wody ze zbiornika do podłoża pod dnem lub przez przerwane obwałowanie grozi nieobliczalnymi stratami.

Elektrownia Wodna „Żarnowiec” składa się z następujących, zasadniczych obiektów: siłownia (1), zbiornik górny (2), naturalny zbiornik dolny (3), budowla wlotowa (4), rurociągi ciśnieniowe (5), kanał odpływowy (6), pokazanych na rysunku 1b – przekroju A-A wzdłuż osi derywacji (rurociągów ciśnieniowych). Ogólny widok elektrowni pokazany jest na rysunku 1c.



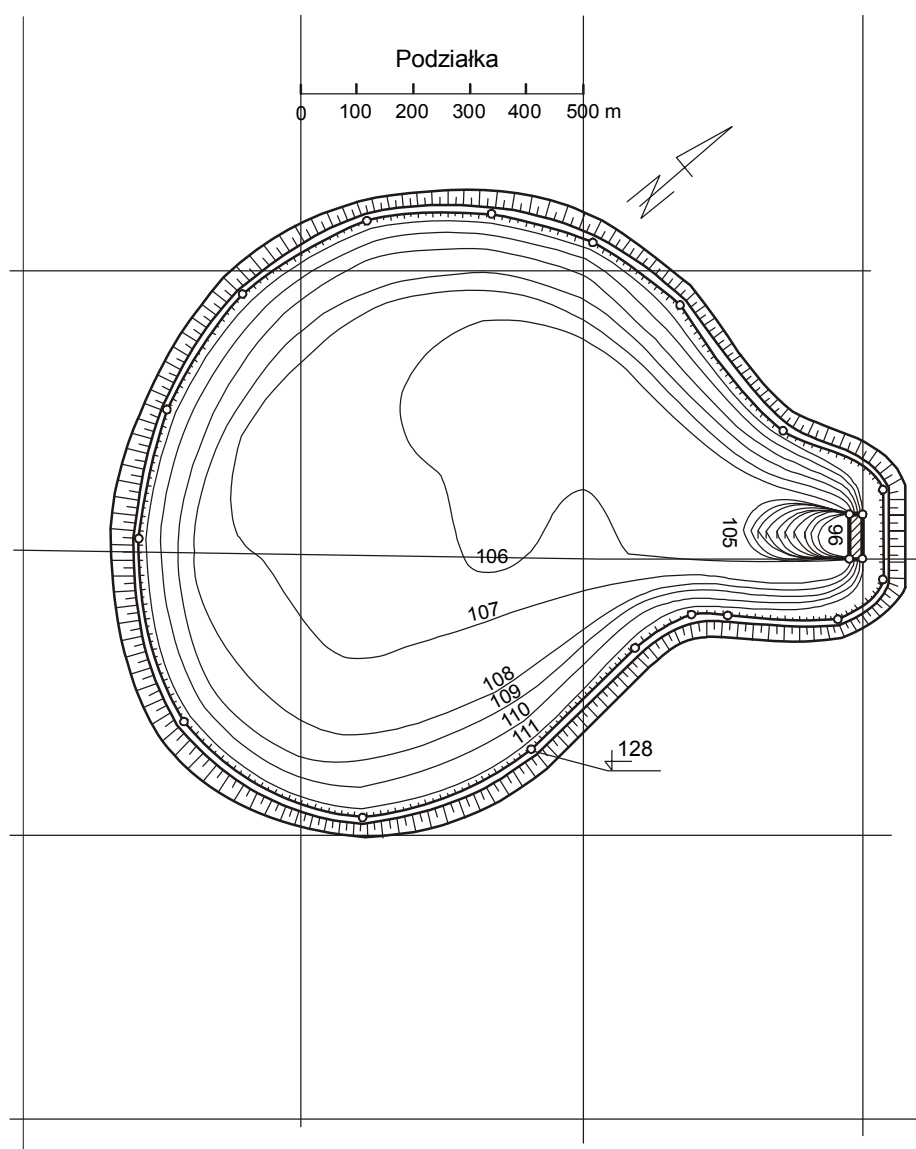
Rys. 1a



Rys. 1b



Rys. 1c



Rys. 2. Ukształtowanie dna zbiornika (warstwice co 1 m)

Dno zbiornika, uwidocznione na rysunku 2, ukształtowane jest jako powierzchnia w przybliżeniu pozioma, zawierająca się w przedziale wysokości 105–111 m n.p.m, zaś niecka przy budowli wlotowej zawiera się w przedziale wysokości 96–105 m n.p.m).

Na przekroju A-A (rys. 1b) pokazana jest żelbetowa budowla wlotowa (4), łącząca zbiornik górny (2) z czterema rurociągami ciśnieniowymi (5), ułożonymi na podporach żelbetowych osadzonych w zboczu. Rurociągi te prowadzą wodę w cyklu produkowania energii ze zbiornika górnego do czterech turbin rewersyjnych, znajdujących się w budynku siłowni (1).

Podczas produkowania energii, w okresie szczytowego zapotrzebowania na nią, następuje opróżnianie zbiornika górnego. Woda po przejściu przez turbiny i nadaniu im ruchu obrotowego zostaje odprowadzona kanałem odpływowym do zbiornika dolnego (3), tj. naturalnego Jeziora Żarnowieckiego, w którym poziom wody waha się w granicach 1–2 m n.p.m.

W cyklu „ładowania” elektrowni, pełniącej w systemie energetycznym rolę akumulatora, następującym poza okresem szczytowego zapotrzebowania na energię, woda jest pompowana przez turbiny przestawione do pozycji rewersyjnej, ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego, dzięki czemu następuje ponowne jego napełnienie, umożliwiające wyprodukowanie energii w kolejnym cyklu szczytowego zapotrzebowania.

3. OBOWIĄZUJĄCE DOTYCHCZAS POMIARY KONTROLNE OBIEKTU BADAŃ

W celu uzyskiwania informacji o stanie bezpieczeństwa obiektów elektrowni obowiązuje od ponad 20 lat jej istnienia wykonywanie **przy napelnionym zbiorniku górnym**:

- okresowych, raz lub dwa razy w ciągu roku, pomiarów osiadań około 860 reperów, w tym: 35 reperów osadzonych na żelbetowych brzegach kanału odpływowego oraz na i w budynku siłowni, 680 reperów na podporach rurociągów ciśnieniowych, 32 reperów na murze oporowym, w galerii kontrolnej i na górnej powierzchni budowli wlotowej, 54 reperów przy zewnętrznej krawędzi korony obwałowania zbiornika górnego i na półkach zewnętrznej skarpy obwałowania zbiornika górnego, 17 reperów na powierzchni skarpy naturalnej, z którą po stronie północnej graniczy obwałowanie zbiornika górnego;
- okresowych, raz lub dwa razy w ciągu roku, pomiarów poziomych przemieszczeń 17 punktów osadzonych przy zewnętrznej krawędzi korony obwałowania zbiornika górnego, 4 punktów osadzonych na górnej powierzchni budowli wlotowej oraz 8 punktów osadzonych na terenie otaczającym obwałowanie – głównie w rejonie skarpy naturalnej;
- okresowych, raz w miesiącu, pomiarów przemieszczeń względnych na 21 stanowiskach szczelinomierza i pomiarów zmian nachyleń na 10 stanowiskach pochyłomierza, zainstalowanych na i w obiektach elektrowni.

Ponadto obowiązuje wykonywanie **przy opróżnionym zbiorniku górnym** okresowych pomiarów osiadań około 1500 reperów osadzonych: w dnie zbiornika górnego, na powierzchni niecki zbiornika górnego, na dylatacjach między budowlą wlotową i niecką oraz skarpami obwałowania zbiornika górnego, na skarpie wewnętrznej zbiornika górnego nad drenażem podskarpowym.

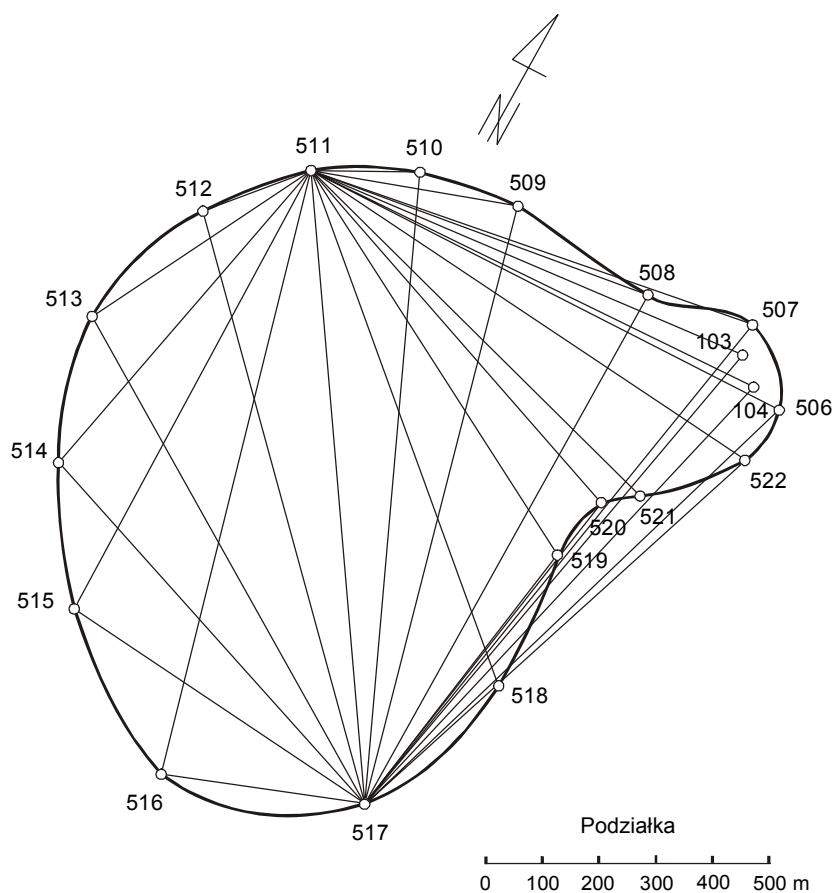
Wszystkie te pomiary były prowadzone do roku 1997 przez Gdański oddział Geoprojektu, następnie do roku 2000 przez OPGK-Gdańsk, a od roku 2001 prowadzone są w kooperacji z Przedsiębiorstwem GEONORD przez Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie (ZGS IGiK). Przejęcie tych prac przez ZGS IGiK nastąpiło wobec stwierdzenia przez kierownictwo EW „Żarnowiec”, że prace te ze względu na swą złożoność i przeznaczenie do oceny stanu bezpieczeństwa nie mają charakteru czysto produkcyjnego, lecz mają charakter kontrolny, z wieloma elementami o charakterze badawczym.

4. BADANIA DYNAMIKI PRACY OBIEKTU BADAŃ POPZEDZAJĄCE NINIEJSZY PROJEKT

W roku 1998 Zarząd Elektrowni Wodnej „Żarnowiec” S.A. podjął decyzję o przeprowadzeniu pomiarów eksperymentalnych, mających na celu sprawdzenie, w jaki sposób obwałowanie zbiornika górnego reaguje na jego napelnianie i opróżnianie. W związku z tym w latach 1999, 2000 zespół pracowników Instytutu Geodezji Gospodarczej na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej (IGG PW) przeprowadził w trakcie opróżniania zbiornika eksperymentalne pomiary poziomych przemieszczeń punktów 507–522 zastabilizowanych przy zewnętrznej krawędzi korony obwałowania zbiornika górnego i punktów 103,104 zastabilizowanych na górnej powierzchni budowli wlotowej. Rozmieszczenie tych punktów i zastosowaną konstrukcję sieci pomiarowej pokazano na rysunku 3. Pomiary były wykonywane metodą liniowych wcięć w przód z przemieszczających się punktów 511 i 517. W celu przyspieszenia prac pomiarowych wykonywano je bez nawiązania do stałych punktów odniesienia, oraz wprowadzono założenie, że punkty 511 i 517 mogą podlegać jedynie przemieszczeniom wzdłuż odcinka 511–517, mającym jednakowe wartości i odmienne zwroty. Taka sieć nie spełnia wymagań dotyczących niezbędnego poziomu niezawodności, sformułowanych między innymi w (Prószyński W. 2001). Pomiary prowadzono synchronicznie dwoma tachimetrami precyzyjnymi klasy TC 2002 w odstępach co kilka godzin, wyznaczając w rezultacie względne przemieszczenia poziome punktów.

Pomiary te wykazały, że pod wpływem opróżniania zbiornika następują przemieszczenia względne punktów o wektorach skierowanych na zewnątrz obwałowania, wskazujące na stopniowe powiększanie się figury utworzonej przez te punkty w miarę obniżania się poziomu wody w zbiorniku. Stwierdzono, że całkowitemu opróżnieniu zbiornika odpowiadają przemieszczenia względne punktów o wartościach mieszczących się w przedziale od 3 mm do 8 mm. Stwierdzono też, że wartości przemieszczeń nie odpowiadają ściśle aktualnym w momentach pomiarów zmianom poziomu wody w zbiorniku, lecz zachodzą z pewnymi opóźnieniami, mającymi zapewne związek z histerezą odprężen podłoża i obwałowania. Wyniki te potwierdziły oczekiwania hydrotechników analizujących zachowanie się obiektów EW „Żarnowiec”, dotyczące charakteru zmian

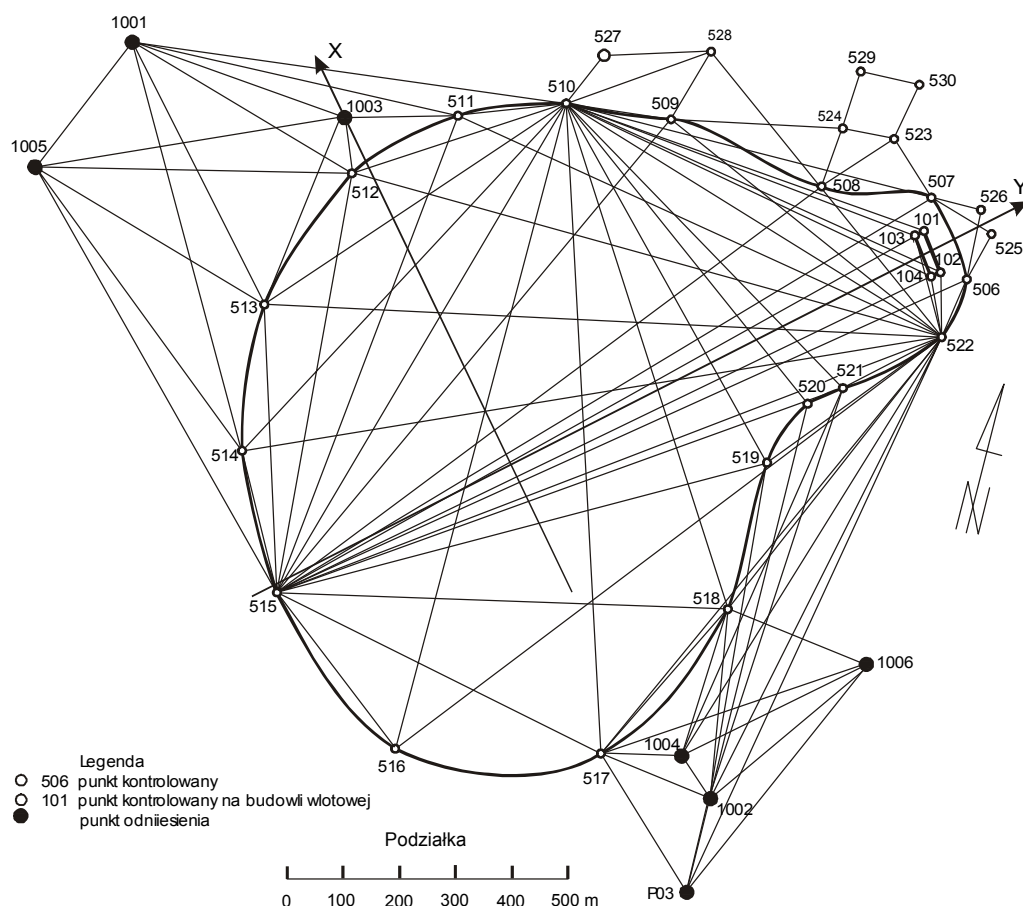
geometrycznych, jakim podlega obwałowanie pod wpływem zmian obciążenia. Wyniki badań przeprowadzonych przez Instytut Geodezji Gospodarczej Politechniki Warszawskiej zostały opublikowane w pracach (Walo J. i in. 1999), (Woźniak M. 2001), (Szpunar R. i in. 2003), (Woźniak M. i in. 2003).



Rys. 3

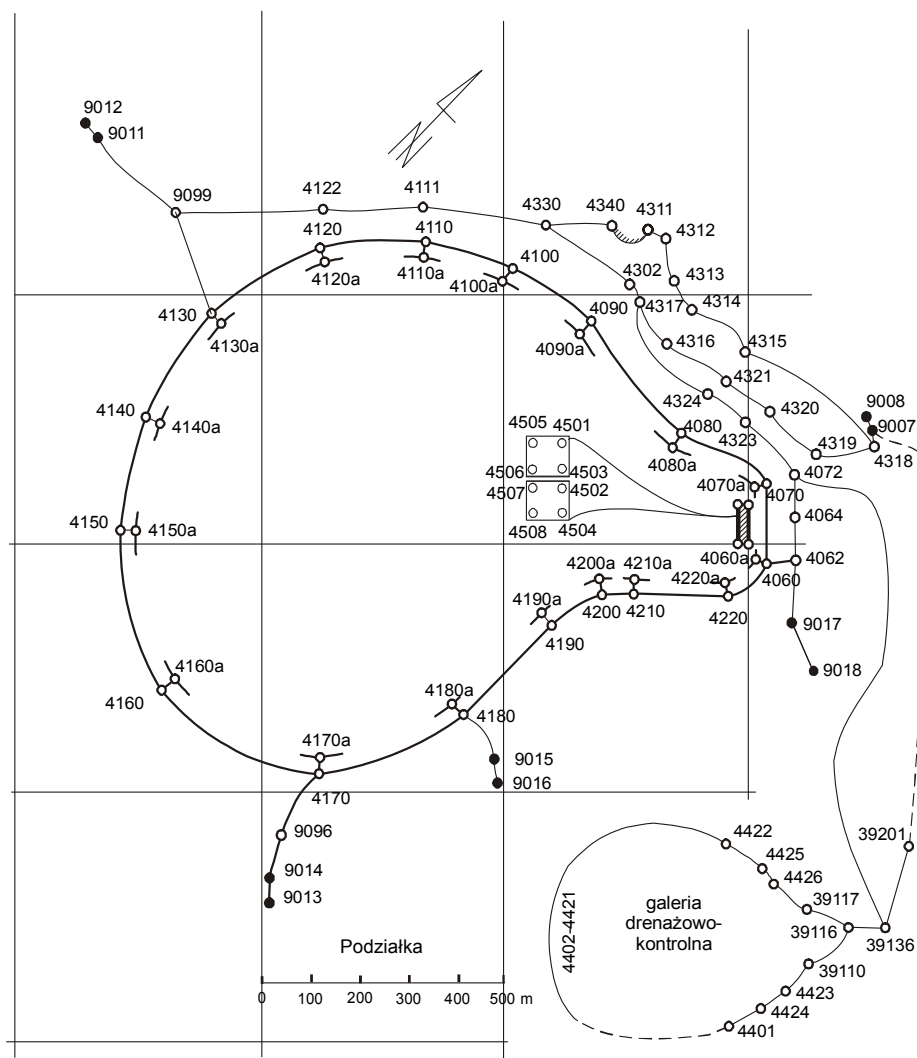
5. BADANIA DYNAMIKI PRACY OBIEKTU ZWIĄZANE Z NINIEJSZYM PROJEKTEM BADAWCZYM

W celu uzyskania bliższego opisu zmian geometrycznych, jakim podlega obwałowanie i podłoże w otoczeniu zbiornika górnego pod wpływem różnic poziomu piętrzenia wody, w roku 2001 Zakład Geodezji Stosowanej Instytutu Geodezji i Kartografii (ZGS IGiK) podjął dalsze, rozszerzone badania dotyczące dynamiki pracy obiektu. W ramach tych badań w kolejnych latach wykonano pomiary przemieszczeń spowodowanych przez różnicę obciążenia obwałowania wynikłą z dużej zmiany poziomu wody w zbiorniku, odpowiadającą jego prawie całkowitemu opróżnieniu lub napełnieniu.



Rys. 4

- W zakres tych prac wchodziło w latach 2001–2002 wykonanie:
- pomiaru przemieszczeń poziomych 17 punktów przy zewnętrznej krawędzi korony, 4 punktów na górnej powierzchni budowli wlotowej oraz 8 punktów usytuowanych w rejonie skarpy naturalnej i górnego ujęcia wody,
 - pomiaru osiadań 17 reperów przy zewnętrznej krawędzi korony i 7 reperów na górnej powierzchni budowli wlotowej.



Rys. 5

Do wyznaczania przemieszczeń poziomych zastosowano sieć liniowo-kątową, ze znaczną przewagą liczby elementów liniowych, o konstrukcji pokazanej na rysunku 4, nawiązaną do 7 potencjalnie stałych punktów odniesienia, zlokalizowanych poza obiektem badań (w latach 2001–2002 sieć ta nie zawierała jeszcze punktu odniesienia P03 i punktów 1005, 1006, które zostały zastabilizowane w roku 2003). Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych posłużyły jako baza danych do eksperymentalnego obliczania wskaźników skalarnych deformacji poziomych obwałowania, opisanego w pracach (Janusz J. 2002c), (Janusz J. 2003a,b).

Do wyznaczania osiadań wykorzystano fragment sieci niwelacji precyzyjnej, zawierającej 10 potencjalnie stałych reperów odniesienia, pokazanej na rysunku 5.

W latach 2003–2004 ZGS IGiK wykonał kolejne pomiary przemieszczeń i odkształceń o zakresie rozszerzonym o:

- wyznaczanie zmian nachylenia korony obwałowania,
- wyznaczanie przemieszczeń i zmian nachylenia korpusu budowli wlotowej,
- wyznaczanie przemieszczeń punktów na skarpie naturalnej.

5.1. Hipoteza dotycząca zachowania się podłoża i obwałowania zbiornika górnego pod wpływem zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku, cel badań w ramach projektu

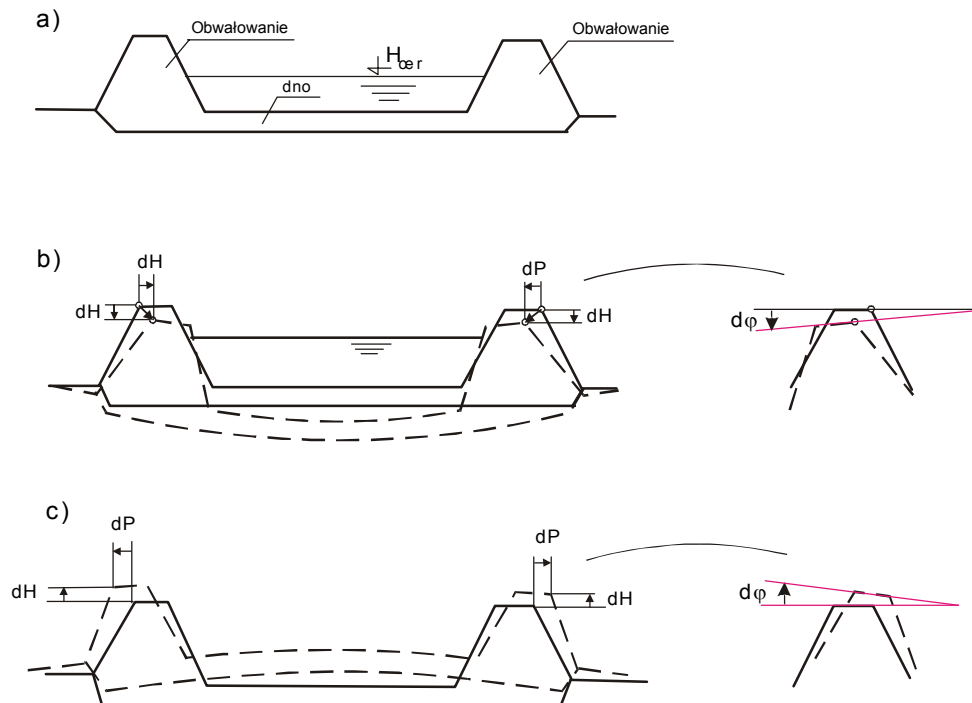
Wyniki wyżej wspomnianych pomiarów przemieszczeń punktów obwałowania pod wpływem zmian obciążenia, spowodowanych przez zmiany poziomu piętrzenia wody, wykonanych w latach 2001 i 2002, przyczyniły się do wysunięcia hipotezy, w myśl której przemieszczenia i deformacje podłoża oraz dna i obwałowania zbiornika mogą kształtować się według modelu pokazanego schematycznie na rysunku 6. Hipoteza ta ma również podstawy w znanym geotechnikom i hydrotechnikom zjawisku zachodzenia odprężeń i uwypukleń podłoża pod wpływem głębinienia wykopu budowlanego i zachodzenia odprężeń i naprężeń oraz przemiennych ugięć podłoża pod wpływem zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku.

Na rysunku 6a pokazano schematycznie ukształtowanie obwałowania i dna zbiornika przy średnim poziomie napełnienia H_{sr} . Zgodnie z rysunkiem 6b można oczekiwać, że pod wpływem zwiększenia obciążenia dna i obwałowania zbiornika wywołanego podniesieniem poziomu wody od początkowego poziomu H_{sr} , nastąpi

ugięcie podłoża, które na przekroju zbiornika wyrazi się schematycznie wklęsłą krzywą oznaczoną linią przerywaną, w związku z czym korona obwałowania ulegnie osiadaniu dH , przemieszczeniu dP ze zwrotem **do zbiornika** i zmianie nachylenia $d\varphi$ ze zwrotem **do zbiornika**. Można też oczekiwać, że pod wpływem działania odwrotnego, tj. zmniejszenia obciążenia spowodowanego przez obniżenie poziomu wody w zbiorniku od początkowego poziomu H_{sr} , nastąpi uwypuklenie krzywej ugięcia jak na rysunku 6c, któremu towarzyszyć będzie uniesienie korony obwałowania dH , jego „rozchylenie” **na zewnątrz zbiornika** dP i zmiana nachylenia $d\varphi$ ze zwrotem **na zewnątrz zbiornika**.

Cele badań w ramach niniejszego projektu to:

- wyznaczenie przemieszczeń podłoża i obwałowania zbiornika w warunkach obciążeń eksploatacyjnych,
- wyznaczenie wskaźników podatności rozpatrywanego obwałowania na zmiany jego obciążenia,
- zbadanie przesłanek świadczących o zasadności powyższej hipotezy.



Rys. 6

Wyznaczane wskaźniki podatności mogą być w dłuższym okresie eksploatacji obiektu i systematycznych badań stanu jego bezpieczeństwa istotnym elementem umożliwiającym odróżnianie normalnie występujących przemieszczeń i odkształceń, uzasadnionych różnicami obciążeń, od zmian nadzwyczajnych, które mogą być kwalifikowane zgodnie z (Ciesielski R. 2001) jako symptomy stanów przedawaryjnych, wymagających interwencji.

5.2. Program prac niezbędnych do wyznaczania wskaźników podatności budowli

Program obejmuje prace pomiarowe i obliczeniowe związane z wyznaczaniem wskaźników podatności na:

- przemieszczenia poziome,
- przemieszczenia pionowe,
- zmiany nachylenia.

Program minimum obejmuje 2 pomiary wykonane przed i po zaistnieniu zmiany poziomu wody w zbiorniku, natomiast pełny program powinien przewidywać 5 pomiarów wykonanych:

- przy zbiorniku napełnionym,
- bezpośrednio po opróżnieniu zbiornika,
- po ustalonym okresie pozostawania zbiornika w stanie opróżnionym,
- bezpośrednio po ponownym napełnieniu,
- po ustalonym okresie pozostawania zbiornika w stanie napełnionym.

W niniejszym opracowaniu mamy do czynienia z realizacją programu minimum z powodu ograniczonych środków finansowych na przeprowadzenie badań.

5.2.1. Program wyznaczenia przemieszczeń poziomych i jednostkowych wskaźników podatności w_{Pj}

Pomiary

Przed zmianą poziomu wody w zbiorniku (przy zbiorniku napełnionym do możliwie jak najwyższego poziomu lub przy zbiorniku opróżnionym), po kilku dniach pozostawania zbiornika bez zmian poziomu piętrzenia, należy wykonać **wyjściowy** pomiar liniowo-kątowej sieci kontrolnej pokazanej na rysunku 4. W sieci tej niezbędne jest wykonanie pomiaru około 120 odległości poziomych oraz pomiaru

około 25 kątów poziomych, służących do wyznaczenia przemieszczeń poziomych punktów 506–522 przy krawędzi korony obwałowania, punktów 101–104 na górnej powierzchni budowli wlotowej i punktów 523–530 rozmieszczonych w sąsiadującym terenie, w rejonie skarpy naturalnej, względem punktów odniesienia wybranych spośród punktów 1001–1006, P03. Pomiary kątowe są potrzebne do wyznaczenia pozycji punktów sieci 523–530 w rejonie skarpy naturalnej, natomiast wzajemne powiązanie pozostałych punktów sieci wymaga wykonania tylko obserwacji odległości poziomych. Liczba obserwacji i dobór wariantu wzajemnego powiązania punktów sieci obserwacjami mogą się nieco różnić w czasie wykonywania kolejnych pomiarów sieci, są bowiem uzależnione od aktualnego stanu widoczności związanego z wegetacją roślinności na obszarze pomiarów.

Po opróżnieniu zbiornika napełnionego (lub napełnieniu zbiornika opróżnionego) i odczekaniu przez kilka dni bez zmian poziomu piętrzenia, należy wykonać **aktualny** pomiar tej samej sieci.

W okresie wykonywania pomiarów poziom wody w zbiorniku powinien być w miarę możliwości niezmienny w granicach ± 1 m. W tej sprawie należy osiągnąć porozumienie z dyspozytorem mocy, tak aby w okresie pomiarów można było ograniczyć pracę elektrowni.

Przedmiotem wyznaczeń mają być przemieszczenia punktów, które były stabilizowane w różnych okresach eksploatacji elektrowni:

- Punkty 506–522 przy zewnętrznej krawędzi korony obwałowania zostały zastabilizowane ponad 20 lat temu, przy końcu okresu budowy elektrowni, zgodnie z projektem koncepcyjnym zawartym w (Janusz W. 1974), jako słupy z tulejami do mechanicznego centrowania teodolitu/dalmierza oraz reflektora dalmierczego i tarczy celowniczej.
- Punkt P03 został zastabilizowany w roku 1998, według projektu IGG PW, jako stały *a priori*, z przeznaczeniem do obserwacji przy użyciu odbiorników GPS i jest zaopatrzony w tuleję do centrowania mechanicznego.
- Punkty 1001–1004 zostały zastabilizowane przez ZGS IGiK w lipcu 2001 roku z przeznaczeniem na stałe *a priori* punkty odniesienia poziomej sieci kontrolnej. Są one zaopatrzone w rury inklinometryczne i płyty przejściowe, służące do centrowania mechanicznego.
- Punkty 1005–1006 zostały dostabilizowane przez ZGS IGiK w marcu 2003 roku jako słupy z mechanicznym centrowaniem,

w celu wzmocnienia grupy stałych *a priori* punktów odniesienia poziomej sieci kontrolnej.

- Punkty 523–526 w rejonie górnego ujęcia wody i skarpy naturalnej zostały zastabilizowane jako słupy z mechanicznym centrowaniem przed rokiem 1998.
- Punkty 527–530 w rejonie skarpy naturalnej zostały zastabilizowane przez ZGS IGiK jako słupy z mechanicznym centrowaniem w marcu 2003 roku zamiast pobliskich, wcześniej stosowanych punktów poligonowych, umieszczonych w studzienkach i wymagających centrowania optycznego. Są one przeznaczone do kontroli przemieszczeń skarpy naturalnej.
- Punkty 101–104 na górnej powierzchni budowli wlotowej zaopatrzone w tuleje do mechanicznego centrowania zostały zastabilizowane przed rokiem 1998.

Pomiary sieci należy wykonywać przy użyciu stacji totalnej TC 2002 lub TC 2003 i reflektora precyzyjnego, mierząc jednocześnie na stanowisku pomiarowym i na stanowiskach reflektora temperaturę i wilgotność powietrza w celu obliczenia redukcji wyników pomiarów odległości. Pomiary powinny być w miarę możliwości wykonane w sprzyjających warunkach atmosferycznych, tj. przy lekkim wietrze i zachmurzeniu, lecz bez opadów. Do redukcji wyników pomiarów odległości należy jednorazowo zmierzyć przewyższenia między punktem początkowym i końcowym (na odcinkach o dużym nachyleniu może się okazać konieczne powtarzanie pomiarów przewyższeń w przypadku wystąpienia dużych różnic osiadania). Pomiary odległości należy wykonywać skomparowaną stacją totalną przy użyciu stale tego samego reflektora precyzyjnego.

Odstęp czasu między pomiarem wyjściowym i aktualnym, wykonywanymi w celu zbadania wpływu zmian obciążenia, nie powinien być zbyt duży, aby wyznaczane przemieszczenia można było traktować jako wywołane głównie wpływem zmiany obciążenia obiektu, z małym tylko udziałem wpływu zmian stanu technicznego obiektu i ograniczonym udziałem wpływu sezonowych zmian stanu podłoża i zmian warunków atmosferycznych. Z tego też powodu pomiar wyjściowy i aktualny powinny być wykonane w okresie, w którym obwałowanie zbiornika górnego nie ulega niekorzystnym zmianom stanu technicznego, wywołującym konieczność dokonywania jego napraw. Różnice między warunkami atmosferycznymi wykonywania tych pomiarów nie powinny być zbyt duże, aby nie

stwarzać podstawy do wątpliwości, czy redukcje wyników pomiarów nie są obciążone błędami systematycznymi o różnych wartościach.

Obliczenia

Ze względu na możliwe różnice między strukturą sieci z pomiaru wyjściowego i aktualnego, dotyczące głównie doboru obserwacji, przyjmuje się, że obliczenia przemieszczeń będą wykonywane **metodą różnic niezależnie wyznaczanych współrzędnych punktów sieci aktualnej i wyjściowej**.

W celu obliczenia przemieszczeń punktów sieci kontrolnej odniesionych do punktów stałych należy wykonać:

- Wyrównania swobodne zredukowanych obserwacji sieci kontrolnej z pomiaru wyjściowego i aktualnego przy dostosowaniu sieci do punktu 1001 i kierunku 1001–1002, obliczając obserwacje wyrównane i poprawki wszystkich obserwacji oraz współrzędne X , Y sieci wyjściowej i współrzędne X' , Y' sieci aktualnej, oraz błędy współrzędnych i elementy elips błędów wszystkich punktów sieci wyjściowej i aktualnej.

W sieci tej, w zależności od liczby wykonanych obserwacji występują 64–72 obserwacje nadliczbowe i każdy punkt jest wyznaczony względem punktów sąsiadujących z co najmniej trzema elementami (średnio z ponad 7 elementami).

- Transformacje poszukiwawcze lub sprawdzające, służące do ustalenia, które z punktów stałych *a priori* rzeczywiście wykazują *a posteriori* stałość wzajemnego położenia. Należy je przeprowadzić przy użyciu 3-parametrowej transformacji izometrycznej współrzędnych X , Y z pomiaru wyjściowego do układu współrzędnych X' , Y' z pomiaru aktualnego, służącej do obliczenia współrzędnych $\underline{x}$, $\underline{y}$ i składowych dx , dy przemieszczeń tych punktów (por. zestawienie oznaczeń użytych w tekście). Może być do tego celu użyta również 4-parametrowa transformacja konforemna, służąca do obliczenia składowych dx , dy przemieszczeń tych punktów i do obliczenia współczynnika s w celu sprawdzenia, czy nie występuje nadmierna zmiana skali sieci aktualnej w stosunku do rozmiarów sieci wyjściowej, spowodowana ewentualną zmianą parametrów metrologicznych dalmierza (jest to dodatkowe sprawdzenie, którego wynik należy konfrontować z wynikami powtarzanych wzorcowań dalmierza).

- Obliczenie składowych przemieszczeń dx , dy wszystkich punktów sieci kontrolnej przy dostosowaniu do punktów stałych *a posteriori* przy użyciu 3-parametrycznej transformacji izometrycznej współrzędnych.

Z dotychczasowych doświadczeń zebranych w latach 2001–2002 wynika, że można oczekiwać zachowania stałości *a posteriori* przez 5 z 7 stałych *a priori* punktów odniesienia (przemieszczenia, na poziomie nieznacznie przekraczającym błąd średni wyznaczenia, wykazywały przy dużej zmianie poziomu wody w zbiorniku punkty nr 1003, 1004, znajdujące się stosunkowo blisko zewnętrznej krawędzi obwałowania). Można dodać, że przy okresowych pomiarach wykonywanych przy zbiorniku napełnionym punkty 1003, 1004 również zachowują stałość *a posteriori*.

W celu obliczenia współczynnika s zmiany skali pod wpływem skalarnych, poziomych odkształceń obwałowania i do obliczenia lokalnych przemieszczeń punktów obwałowania spowodowanych przez postaciowe jego odkształcenia poziome należy wykonać konforemną transformację 4-parametrową współrzędnych X , Y , a do obliczenia przemieszczeń wynikających ze skalarnych deformacji poziomych obwałowania 3-parametrową transformację izometryczną współrzędnych X , Y do układu współrzędnych X' , Y' , **przy dostosowaniu do wszystkich punktów 506–522 usytuowanych przy krawędzi korony obwałowania.**

- W rezultacie tak wykonanej transformacji 3-parametrowej otrzymujemy składowe dx_w , dy_w względnych przemieszczeń tych punktów.
- W rezultacie tak wykonanej transformacji 4-parametrowej otrzymujemy:
 - składowe dx_w , dy_w względnych przemieszczeń wywołane jedynie poziomymi, postaciowymi deformacjami obwałowania,
 - współczynnik $s - I$ zmiany skali spowodowany poziomymi deformacjami skalarnymi obwałowania.

Wszystkie obliczenia można wykonywać przy użyciu programów z pakietu GEONET (Kadaj R. 1995), których przydatność do tego celu została sprawdzona w latach 2001–2002.

Wskaźnik jednostkowy przemieszczenia poziomego, charakteryzujący podatność poziomą obwałowania na zmianę

obciążenia z powodu zmiany poziomu piętrzenia wody, obliczamy ze wzoru:

$$w_{Pj} = (s - l)/h_{w\ red}$$

(sposób wyznaczenia $h_{w\ red}$ podano w 5.2.4.).

5.2.2. Program wyznaczenia przemieszczeń pionowych i jednostkowych wskaźników podatności w_{Hj}

Pomiary

Przed zmianą poziomu wody w zbiorniku należy wykonać metodą niwelacji precyzyjnej pomiar **wyjściowy** fragmentu sieci kontrolnej pokazanej na rysunku 5. W sieci tej wyznacza się rzędne H wysokości reperów 4060–4220 znajdujących się przy zewnętrznej krawędzi korony obwałowania (osadzonych w bocznych powierzchniach słupów 506–522) i reperów 4502–4508 na górnej powierzchni budowli wlotowej w stosunku do trzech grup reperów stałych: 9011–9012, 9013–9014, 9015–9016. Po zmianie poziomu wody w zbiorniku należy wykonać metodą niwelacji precyzyjnej **aktualny** pomiar tej sieci, wyznaczając aktualne rzędne H' reperów.

Pomiary należy wykonać w okresach pomiarów sieci poziomej przy użyciu niwelatora cyfrowego NA3003 firmy Leica i łąt GPCL2 (na koronie) oraz łąt GPCL3 (na ciągach dowiązujących, w których występują duże deniwelacje na stromych odcinkach). Przy obu pomiarach **należy używać skomparowane łąty** należące do EW „Żarnowiec”. Konieczność komparowania łąt wynika w szczególności z tego, że w sieci pokazanej na rysunku 5 stałe reperey odniesienia znajdują się na zbliżonych do siebie poziomach w granicach 101–110 m n.p.m., zaś reperey kontrolowane na koronie i na górnej powierzchni budowli wlotowej na poziomie 128 m n.p.m. Jeśliby więc w okresie między pomiarem wyjściowym a pomiarem aktualnym nastąpiła systematyczna zmiana długości podziału łąt, to ze względu na dużą różnicę wysokości położenia reperów kontrolowanych w stosunku do stałych reperów odniesienia (17–27 m), może ona znacząco wpływać na wyznaczane osiadania reperów kontrolowanych.

Obliczenia

Obliczanie przemieszczeń należy prowadzić **metodą różnic niezależnie wyznaczanych rzędnych wysokości**. Należy więc obliczyć rzędne wysokości H , H' reperów kontrolowanych z pomiaru

wyjściowego i pomiaru aktualnego. W tym celu należy wyrównać swobodnie obserwacje h sieci wyjściowej i obserwacje h' sieci aktualnej, przyjmując jako początkowy jeden z reperów odniesienia. Jeśli w okresie między pomiarem wyjściowym a pomiarem aktualnym nastąpiła istotna zmiana długości podziału łąt, stwierdzona w wyniku komparacji, to różnice wysokości zmierzone przy pomiarze aktualnym należy zredukować o stwierdzoną różnicę w celu doprowadzenia wyników do zgodności ze skalą pomiaru wyjściowego. Następnie należy obliczyć osiadania pozorne dH_{poz} i jako różnice rzędnych z wyrównań swobodnych i obliczyć średnie osiadanie pozorne stałych reperów odniesienia, po czym odjąć od osiadań pozornych wszystkich reperów średnie osiadanie pozorne stałych reperów odniesienia, uzyskując w rezultacie osiadania dH wszystkich reperów. Potwierdzeniem wzajemnej stałości reperów odniesienia jest uzyskanie ich osiadań pozornych zbliżonych do siebie w granicach dokładności wyznaczenia.

Błąd dostosowania należy obliczyć jako pierwiastek z sumy kwadratów osiadań dH reperów odniesienia, które zachowały wzajemną stałość *a posteriori*, podzielonej przez $n - 1$, gdzie n – liczba reperów odniesienia.

Należy obliczyć średnią wartość osiadania dH_{sr} reperów nr 4060–4220 na koronie obwałowania, a następnie obliczyć różnice $dH_w = dH - dH_{sr}$ reperów 4060–4220 i reperów 4502–4508 na górnej powierzchni budowli wlotowej. Różnice dH_w są równoznaczne z osiadaniami względnymi poszczególnych reperów w stosunku do średniego osiadania dH_{sr} , wskazującymi na mniejszą lub większą podatność poszczególnych miejsc obwałowania na zmiany wysokości pod wpływem zmian obciążenia. Miejsca obwałowania o zmniejszonej podatności na osiadania charakteryzują się ujemnymi wartościami dH_w , zaś miejsca o zwiększonej podatności wartościami dodatnimi.

Na podstawie dH_{sr} reperów 4060–4220 obliczamy wskaźnik jednostkowy średniego osiadania obwałowania, charakteryzujący podatność pionową obwałowania i podłoża pod obwałowaniem na zmianę obciążenia wynikającą ze zmiany poziomu piętrzenia wody

$$w_{Hj} = dH_{sr} / h_{w \text{ red}}$$

Wartości dH osiadań reperów na górnej powierzchni budowli wlotowej służą do oceny pionowych przemieszczeń i zmian nachylenia tej budowli, co stanowi przedmiot odrębnej analizy zawartej w punkcie

5.5. Do analizy tej niezbędne jest dodatkowo wyznaczenie wzajemnego, poziomego rozmieszczenia reperów na powierzchni budowli wlotowej, które może być wykonane z dokładnością rzędu 1 cm.

Analiza zachowania się górnej powierzchni budowli wlotowej dotyczy różnicy jej osiadania w stosunku do osiadania korony obwałowania oraz kierunków i wartości zmian nachylenia tej powierzchni.

5.2.3. Program pomiarów zmian nachylenia i wyznaczania jednostkowych wskaźników podatności $w_{\phi j}$

W miejscach punktów 4060–4220 możemy wyznaczać zmiany nachylenia korony obwałowania pod wpływem zmian obciążenia. Można to wykonać przy użyciu pochyłomierza ustawianego na płytach centrujących słupów 506–522 lub z wykorzystaniem wyników pomiarów niwelacyjnych. Ponieważ okazało się, iż powierzchnie płyt centrujących na słupach nie były przystosowane do jednoznacznego ustawiania pochyłomierza, zdecydowano, że przy wewnętrznej krawędzi korony zostaną zastabilizowane prowizorycznie dodatkowe repery tymczasowe 4060a–4220a, odpowiednio naprzeciw reperów 4060–4220, na kierunkach prostopadłych do osi korony (por. rys. 5). Trzeba się liczyć z tym, że repery te, służące wyłącznie do wyznaczania zmian nachylenia korony obwałowania pod wpływem zmian obciążenia, będą miały trwałość ograniczoną do krótkich okresów między pomiarem wyjściowym i aktualnym, przed i po zmianie poziomu wody w zbiorniku.

Zmiany nachylenia korony na kierunkach prostopadłych do jej osi wyznaczamy na podstawie pomiaru różnic wysokości między reperami 4060–4220 i odpowiednimi reperami 4060a–4220a zastabilizowanymi przy wewnętrznej krawędzi korony, w miejscach pokazanych na rysunku 5.

W tym celu przed zmianą poziomu wody w zbiorniku należy wykonać pomiar wyjściowy różnic wysokości h par reperów 4060–4060a, ... , 4220–4220a oraz pomiar odległości poziomych d między tymi reperami. Pomiar różnic wysokości należy wykonać niwelatorem NA3003 i łątami GPCL firmy Leica, zaś pomiar odległości poziomych może być dokonany ruletką z dokładnością rzędu 5 mm.

Po zmianie poziomu wody w zbiorniku należy wykonać pomiar aktualny różnic wysokości h' reperów 4060–4060a, ... , 4220–4220a.

Następnie należy obliczyć kąty zmiany nachylenia korony na odcinkach 4060–4060a, ... , 4220–4220a, wyrażone w mm/m, ze wzoru:

$$d\varphi = (h' -)h/d$$

Obliczenie wskaźnika jednostkowego zmian nachylenia następuje z wykorzystaniem średniej wartości $d\varphi_{sr}$:

$$w_{\varphi j} = [d\varphi] / n h_{w \text{ red}}$$

5.2.4. Ustalenie zredukowanej różnicy poziomów piętrzenia wody w zbiorniku $h_{w \text{ red}}$

Gdy pomiar wyjściowy i pomiar aktualny wykonane są przy poziomach piętrzenia wody w zbiorniku zawierających się między poziomem maksymalnym a poziomem $H_w = 111$ m n.p.m. to możemy przyjąć, że w tej strefie piętrzenia każda 1-metrowa warstwa wody ma taką samą objętość, równą powierzchni zbiornika pomnożonej przez 1 m (pomijamy tu objętość wody znajdującej się nad nachyloną skarpą odwodną obwałowania, która jest mniejsza od 1% objętości warstwy pokrywającej dno zbiornika). Wówczas obliczenie jednostkowego wskaźnika deformacji może polegać na podzieleniu wyznaczonego przemieszczenia poziomego, osiadania lub zmiany nachylenia, odpowiadającego zmianie poziomu piętrzenia o h_w bezpośrednio przez tę zmianę poziomu piętrzenia wyrażoną w metrach.

Jednak ze względów eksploatacyjnych nie jest możliwe zatrzymanie piętrzenia zbiornika na okres pomiaru na poziomie 111 m n.p.m., lecz konieczne jest wykonanie pomiaru przy zbiorniku opróżnionym, przy którym poziom wody może być obniżony do 96 m n.p.m. Ukształtowanie wysokościowe dna i niecki zbiornika przedstawione na rysunku 2 wskazuje, że w strefie piętrzenia między 96 a 111 m poszczególnym, 1-metrowym warstwom odpowiadają różne powierzchnie zalewu dna i niecki. W związku z tym objętość wody w tych warstwach jest zróżnicowana. Z tego powodu, korzystając z wyniku planimetrowania powierzchni ograniczonych poszczególnymi warstwicami dna i niecki obliczono, że całkowita objętość wody w strefie piętrzenia $\Delta h_w = 111$ m – 96 m n.p.m. odpowiada warstwie $\Delta h_{w \text{ red}} = 3,2$ m wody pokrywającej całe dno. Jeśli więc po wykonaniu pomiaru wyjściowego przy piętrzeniu H_{max} następuje całkowite

opróżnienie zbiornika, to jednostkowy wskaźnik deformacji obliczamy, dzieląc wyznaczone przemieszczenie poziome, osiadanie lub zmianę nachylenia przez zredukowaną różnicę poziomu piętrzenia równą $h_{w\ red}$ obliczoną ze wzoru:

$$h_{w\ red} = H_{max} - 111\text{ m} + 3,2\text{ m} = H_{max} - 107,8\text{ m n.p.m.}$$

5.3. Badanie zachowania się obwałowania zbiornika górnego pod wpływem zmian obciążenia – przykład pomiarów i obliczeń na podstawie wyników eksperymentu z 2003 roku

5.3.1. Pomiary i obliczenie przemieszczeń poziomych i jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania w_{Pj}

Przy zbiorniku napełnionym do poziomu 123–125 m w kwietniu 2003 roku wykonano pomiar wyjściowy sieci poziomej pokazanej na rysunku 4. Zmierzono 122 odległości poziome i 25 kątów.

Należy wspomnieć, że w praktyce okazało się niemożliwe ze względów ekonomicznych spełnienie postulatu utrzymania w okresie pomiaru niezmiennego poziomu piętrzenia wody. W związku z kilkumetrowymi wahaniami jej poziomu pomiary wykonywano w ciągu kilku dni, każdego dnia tylko przy trwającym przez kilka godzin stanie napełnienia do poziomu 124 m. Z tego powodu wyniki i dokładności wyników mogą być obciążone w pewnym stopniu wpływem histerezy przemieszczeń.

Wyrównano swobodnie obserwacje sieci wyjściowej, wyznaczając współrzędne X , Y 40 punktów z 68 obserwacjami nadliczbowymi. Przy wyrównaniu tym dostosowano sieć do punktu 1001 i nadano sieci orientację przez wprowadzenie równania azymutu 1001–1002 z założonym błędem azymutu. Jest to postępowanie zastępcze, narzucone przez możliwości zastosowanego programu komputerowego. Zastępuje ono orientowanie sieci przez wyeliminowanie z układu równań jednej niewiadomej.

Przeciętny błąd średni położenia punktu wyniósł 0,7 mm, zaś błąd średni najslabiej wyznaczalnego punktu P03 wyniósł 1,2 mm. Współrzędne X , Y zestawiono w tabelicy 1 w kolumnie 2. Wykaz błędów współrzędnych i elips błędów średnich punktów znajduje się w tabelicy 2.

Tablica 1. Zestawienie współrzędnych i poziomych przemieszczeń punktów sieci kontrolnej pod wpływem opróżnienia zbiornika

Nr	X	Y	X'	Y'	3-par. $d\bar{x}$ $d\bar{y}$		4-par. dx dy		3-par. $d\bar{x}_w$ $d\bar{y}_w$		4-par. dx_{sw} dy_{sw}			
1	2		3		4		5		6		7			
	[m]		[m]		[mm]									
Punkty kontrolowane na koronie obwałowania														
506	2468,3439	2535,2183	,3411	,2224	-4,2	4,7	-4,2	5,8	-2,4	4,8	-0,7	-3,1		
507	2624,9436	2531,7022	,9361	,7066	1,1	5,2	1,3	6,3	2,8	4,9	2,6	-3,0		
508	2727,6751	2360,8191	,6829	,8234	6,4	5,1	6,7	6,0	8,0	4,6	6,4	-1,0		
509	2956,7656	2174,6274	,7724	,6321	5,3	5,4	5,9	6,1	6,5	4,5	2,0	1,3		
510	3059,9916	2019,4950	,0022	,4982	9,1	3,9	9,8	4,4	9,8	2,8	4,0	1,6		
511	3119,4643	1830,2282	,4736	,2287	7,7	1,2	8,5	1,5	8,8	-0,1	2,2	1,1		
512	3105,6340	1621,3228	,6423	,3186	6,7	-3,5	7,4	-3,4	7,6	-4,5	1,2	-0,6		
513	2970,2928	1392,0499	,3003	,0424	5,8	-6,8	6,4	-7,0	6,0	-7,4	1,3	-0,6		
514	2764,9114	1251,1007	,9155	,0908	2,4	-9,1	2,8	-9,5	2,2	-9,8	0,1	-1,2		
515	2525,8446	1201,3998	,8470	,3906	0,7	-8,4	0,8	-8,8	0,2	-8,4	1,2	0,9		
516	2198,7028	1281,7684	,6996	,7609	-4,9	-6,6	-5,2	-6,9	-5,4	-6,4	-0,2	1,9		
517	2032,7737	1611,0880	,7686	,0883	-6,7	1,2	-7,2	1,3	-7,4	1,9	-0,1	6,0		
518	2154,2591	1908,1236	,2551	,1260	-5,6	3,3	-5,9	3,7	-5,6	4,2	0,2	4,4		
519	2343,7073	2089,2019	,7006	,2053	-8,2	4,3	-8,3	4,9	-7,5	4,4	-4,2	2,3		
520	2401,9653	2191,1359	,9571	,1367	-9,7	1,6	-9,7	2,4	-8,7	1,7	-6,1	-1,7		
521	2401,7109	2260,5200	,7028	,5194	-9,6	0,2	-9,6	1,0	-8,5	0,2	-5,9	-4,1		
522	2395,3024	2456,0956	,2957	,0974	-8,1	2,7	-8,2	3,7	-6,4	2,7	-3,7	-4,1		
Przemieszczenie "środką ciężkości"					-0,7 0,3				6,9 5,2		3,4 2,8			
									$Mt_{3p} = 8,6$		$Mt_{4p} = 4,4$			
											$s-l=12,9ppm$			
Punkty kontrolowane na terenie otaczającym obwałowanie														
1003	3196,0681	1648,1760	,0715	,1743	1,8	-1,0	2,6	-0,9						
1004	1974,1013	1734,5027	,1024	,4987	-0,5	-3,0	-1,0	-2,8						
523	2738,9946	2518,2836	,9975	,2859	1,5	3,1	1,8	4,2						
524	2795,5988	2435,2489	,6035	,2523	3,3	4,2	3,7	5,1						
525	2523,9374	2610,4579	,9367	,4607	-2,1	3,6	-2,0	4,8						
526	2560,5546	2610,1993	,5563	,1992	0,3	0,7	0,5	1,9						
527	3144,3901	2089,4713	,3956	,4747	4,0	4,1	4,8	4,7						
528	3026,9096	2241,5161	,9135	,5188	2,4	3,4	3,1	4,2						
529	2832,6299	2452,2529	,6333	,2559	2,0	3,7	2,4	4,8						
530	2777,7436	2542,3376	,7444	,3397	-0,6	2,9	-0,2	4,0						
Punkty kontrolowane na budowli wlotowej														
101	2577,0900	2500,0064	,0928	,0133	1,4	7,7	1,5	8,8						
102	2499,9955	2500,0063	,9907	,0141	-6,2	8,6	-6,2	9,7						
103	2577,7988	2481,9274	,8027	,9321	2,5	5,5	2,6	6,6						
104	2500,3358	2481,8889	,3309	,8932	-6,3	5,1	-6,2	6,2						
Punkty odniesienia														
1001	3476,0304	1366,8198	,0304	,8198	-1,7	0,6	-0,5	0,4						
1002	1884,8620	1751,1621	,8632	,1618	-0,4	0,7	-1,0	0,9						
P03	1729,3079	1409,0681	,3114	,0668	1,8	-0,3	1,0	-0,4						
1005	3290,1282	1216,6863	,1294	,6853	-0,5	-0,4	0,4	-0,7						
1996	1820,2422	2011,8852	,2445	,8836	0,8	-0,6	0,1	-0,1						
					1,3 0,6		0,8 0,6							
					$Mt_{3p} = 1,4$		$Mt_{4p} = 1,0$							
							$S-l=-1,1ppm$							

Tablica 2. Wykaz błędów współrzędnych i elementów elips błędów średnich z wyrównań swobodnych sieci:

NRP	wyjściowej			aktualnej		
	Mx A	My B	Mp Fl	Mx A	My B	Mp Fl
P03	0.0010	0.0007	0.0012	0.0025	0.0017	0.0030
	0.0011	0.0004	166.424	0.0028	0.0011	167.312
1006	0.0007	0.0005	0.0008	0.0016	0.0013	0.0021
	0.0007	0.0005	30.481	0.0017	0.0011	30.633
521	0.0005	0.0004	0.0007	0.0013	0.0010	0.0017
	0.0005	0.0004	11.349	0.0013	0.0010	11.572
517	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0012	0.0018
	0.0006	0.0004	30.787	0.0014	0.0011	32.454
518	0.0005	0.0005	0.0007	0.0012	0.0013	0.0018
	0.0005	0.0005	129.054	0.0013	0.0012	118.174
1002	0.0005	0.0004	0.0006	0.0013	0.0009	0.0016
	0.0005	0.0004	184.912	0.0013	0.0009	184.912
522	0.0005	0.0004	0.0006	0.0011	0.0009	0.0015
	0.0005	0.0004	32.174	0.0012	0.0008	32.416
1004	0.0006	0.0005	0.0007	0.0014	0.0011	0.0018
	0.0006	0.0005	6.244	0.0014	0.0011	6.814
515	0.0003	0.0004	0.0005	0.0008	0.0009	0.0012
	0.0004	0.0003	116.287	0.0009	0.0008	115.982
510	0.0004	0.0004	0.0005	0.0010	0.0009	0.0013
	0.0004	0.0003	29.297	0.0010	0.0008	30.037
520	0.0006	0.0005	0.0007	0.0014	0.0012	0.0018
	0.0006	0.0005	19.039	0.0014	0.0011	19.448
519	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0012	0.0017
	0.0005	0.0005	9.470	0.0013	0.0011	10.669
516	0.0005	0.0006	0.0008	0.0012	0.0016	0.0019
	0.0006	0.0005	103.901	0.0016	0.0012	104.066
103	0.0005	0.0005	0.0008	0.0013	0.0012	0.0018
	0.0006	0.0005	41.079	0.0014	0.0012	37.841
104	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0012	0.0018
	0.0006	0.0004	44.025	0.0015	0.0010	43.440
511	0.0005	0.0004	0.0007	0.0013	0.0010	0.0017
	0.0006	0.0003	34.484	0.0015	0.0007	34.505
514	0.0003	0.0005	0.0006	0.0008	0.0013	0.0015
	0.0006	0.0003	106.797	0.0013	0.0008	106.820
102	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0012	0.0017
	0.0006	0.0004	38.824	0.0014	0.0011	38.537
512	0.0004	0.0004	0.0005	0.0009	0.0010	0.0013
	0.0005	0.0003	56.174	0.0011	0.0007	56.174
513	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007	0.0011	0.0013
	0.0005	0.0003	92.877	0.0011	0.0007	92.855
508	0.0006	0.0005	0.0008	0.0013	0.0012	0.0018
	0.0006	0.0004	46.547	0.0015	0.0010	45.590
509	0.0005	0.0005	0.0007	0.0012	0.0010	0.0016
	0.0006	0.0004	37.161	0.0012	0.0010	34.165
506	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0011	0.0017
	0.0006	0.0004	29.235	0.0014	0.0010	29.774
101	0.0006	0.0005	0.0008	0.0014	0.0013	0.0019
	0.0006	0.0005	38.860	0.0015	0.0011	38.062
1005	0.0003	0.0003	0.0004	0.0007	0.0008	0.0011
	0.0003	0.0003	113.641	0.0008	0.0007	113.661
507	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013	0.0011	0.0017
	0.0006	0.0005	29.178	0.0014	0.0010	24.712
527	0.0005	0.0005	0.0008	0.0012	0.0012	0.0017
	0.0006	0.0005	137.940	0.0012	0.0011	56.014
528	0.0006	0.0004	0.0007	0.0013	0.0010	0.0016
	0.0006	0.0004	15.452	0.0013	0.0010	14.039
1003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0010	0.0009	0.0013
	0.0005	0.0003	44.212	0.0011	0.0007	44.211
524	0.0007	0.0006	0.0009	0.0015	0.0013	0.0020
	0.0007	0.0005	40.157	0.0017	0.0011	35.727
523	0.0006	0.0006	0.0008	0.0015	0.0013	0.0019
	0.0007	0.0005	38.971	0.0016	0.0011	34.553
525	0.0007	0.0005	0.0009	0.0016	0.0012	0.0020
	0.0007	0.0005	17.887	0.0016	0.0011	25.613
526	0.0007	0.0005	0.0009	0.0015	0.0012	0.0020
	0.0007	0.0005	12.380	0.0016	0.0012	17.251
530	0.0008	0.0007	0.0010	0.0017	0.0014	0.0022
	0.0008	0.0007	197.448	0.0017	0.0013	14.087
529	0.0007	0.0008	0.0010	0.0016	0.0016	0.0023
	0.0008	0.0006	68.332	0.0019	0.0013	54.703
1001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Przy zbiorniku całkowicie opróżnionym w maju 2003 roku wykonano pomiar aktualny sieci z pominięciem wyznaczania punktów poligonowych nr 4, 54, 59, 61, których dalsze wykorzystywanie zostało zaniechane. Zmierzone 114 odległości poziomych i 19 kątów.

Wyrównano swobodnie obserwacje sieci aktualnej dostosowując sieć do punktu 1001 i wprowadzając równanie azymutu 1001–1002 z jego wartością i błędem identycznymi jak przy swobodnym wyrównaniu sieci wyjściowej. W rezultacie wyznaczono współrzędne X' , Y' 36 punktów z 62 obserwacjami nadliczbowymi. Przeciętny błąd średni położenia punktu wyniósł 1,7 mm, zaś błąd najslabiej wyznaczalnego punktu P03 wyniósł 3,0 mm. Współrzędne X' , Y' zestawiono w tablicy 1 w kolumnie 3. Wykaz błędów współrzędnych i elips błędów średnich punktów znajduje się w tablicy 2.

Zwraca uwagę różnica dokładności osiągniętych przy pomiarze wyjściowym i pomiarze aktualnym. Wydaje się, że przyczyną tej różnicy jest znaczne rozwinięcie się szaty roślinnej w czasie wykonywania pomiaru aktualnego, mające negatywny wpływ na celowe biegnące od punktów na koronie obwałowania do punktów odniesienia i do punktów kontrolowanych na skarpie naturalnej.

Wykonano 4-parametrową transformację konforemą współrzędnych X , Y potencjalnie stałych punktów dostosowania 1001, 1002, P03, 1005, 1006 do układu współrzędnych X' , Y' sieci aktualnej sprawdzając, czy punkty te zachowały *a posteriori* stałość wzajemnego położenia. Wynik tej transformacji przedstawiono w tablicy 1 w dolnej części kolumny 5, dotyczącej punktów odniesienia (obwiedzonej pogrubioną ramką). Otrzymano błąd transformacji $Mt_{4p} = 1,0$ mm, przy jednoczesnej zmianie skali $s - I = -1,1$ ppm. Wynik ten wskazuje na spełnienie przez rozpatrywaną grupę punktów warunku podobieństwa kształtu utworzonej przez nie figury, przy nieznacznej zmianie wymiarów liniowych tej figury. Wobec tego, że zmiana wymiarów figury $s - I$ osiągnęła wartość niezbyt dużą w stosunku do błędu różnicy odległości z pomiarów sieci wyjściowej i aktualnej, uzyskany wynik można uznać za wskazujący na zachowanie niezmienności wzajemnego położenia rozpatrywanych punktów odniesienia.

Stwierdzono, że punkty 1003, 1004 zastabilizowane jako stałe *a priori*, w rzeczywistości wykazały *a posteriori* przemieszczenia nieznacznie przekraczające błędy ich wyznaczenia, w związku z czym zostały potraktowane jako punkty kontrolowane. Wykonanie transformacji 4-parametrowej miało tu walor polegający na sprawdzeniu *post factum*, czy w obserwacjach odległości sieci

aktualnej nie pojawił się nadmierny błąd systematyczny w stosunku do wyników obserwacji sieci wyjściowej. Ewentualnym źródłem takiego błędu mogłaby być zmiana parametrów metrologicznych dalmierza, który był użyty do pomiarów, w okresie między pomiarem wyjściowym i aktualnym lub błąd systematyczny wyznaczania parametrów meteorologicznych, użytych do redukcji pomierzonych odległości. Uzyskana wartość $s - l$ świadczy, że praktycznie można ją uznać za zaniedbywalnie małą.

Wykonano 3-parametrową transformację izometryczną przy dostosowaniu sieci do punktów 1001, 1002, P03, 1005, 1006, której wyniki zawarte są w tablicy 1 w dolnej części kolumny 4, dotyczącej punktów odniesienia (obwiedzionej pogrubioną ramką). W wyniku tej transformacji okazało się, że nie wywołując zmiany skali figury przetransformowanej, otrzymaliśmy, zgodnie z oczekiwaniem, nieco większy błąd transformacji $Mt_{3p} = 1,4$ mm. Błąd Mt_{3p} z 3-parametrowej transformacji izometrycznej, mimo że nieco większy, stanowi realną i bardziej wiarygodną podstawę do oceny dokładności dostosowania aniżeli błąd Mt_{4p} , otrzymany z 4-parametrowej transformacji konforemnej. W porównaniu z błędami punktów uzyskanymi z wyrównań swobodnych wartość Mt_{3p} otrzymana z transformacji 3-parametrowej upoważnia do wniosku, że rozpatrywana grupa punktów zachowała w granicach dokładności wyznaczenia nie tylko podobieństwo kształtu, ale i zgodność (niezmiennność) wymiarów liniowych tworzonej przez nie figury.

W związku z tym wykonano 3-parametrową transformację izometryczną współrzędnych X, Y **wszystkich** punktów sieci z pomiaru wyjściowego do układu współrzędnych X', Y' współrzędnych punktów sieci z pomiaru aktualnego przy dostosowaniu do zidentyfikowanych punktów stałych 1001, 1002, P03, 1005, 1006. W wyniku tej transformacji otrzymaliśmy składowe dx, dy wektorów dP przemieszczeń zestawione w tablicy 1 w górnej części kolumny 4. Wykonano też transformację 4-parametrową współrzędnych wszystkich punktów sieci przy dostosowaniu do tych samych stałych punktów odniesienia, obliczając składowe dx, dy wektorów dP zestawione w tablicy 1 w górnej części kolumny 5. Uczyniono to jednak wyłącznie w celu pokazania uzyskanych różnic między wynikami transformacji 3-parametrowej i transformacji 4-parametrowej. **Do oceny zachowania się badanego obiektu właściwe jest korzystanie ze składowych dx, dy obliczonych metodą**

transformacji 3-parametrowej, czego uzasadnienie podane jest w (Janusz J. 2002a).

Dalszy ciąg obliczeń, których wyniki zawarte są w tablicy 1 w kolumnach 6 i 7, służy ocenie poziomych przemieszczeń i odkształceń **obwałowania** na podstawie wyznaczonych przemieszczeń kontrolowanych **punktów 506–522**.

Wykonano 3-parametrową transformację izometryczną współrzędnych sieci wyjściowej X, Y punktów 506–522, które traktujemy jako reprezentujące dyskretnie koronę obwałowania, do układu współrzędnych sieci aktualnej X', Y' **przy dostosowaniu do tych wszystkich ruchomych punktów!** Obliczone w rezultacie składowe względnych przemieszczeń dP_w są zawarte w tablicy 1 w kolumnie 6 (obwiedzionej pogrubioną ramką).

Porównanie wektorów dP zestawionych w tablicy 1 w kolumnie 4 i wektorów przemieszczeń względnych dP_w zestawionych w kolumnie 6 wskazuje, że praktycznie korona obwałowania jako obiekt wyrażany dyskretnie przez punkty 506–522 **nie uległa przemieszczeniu w stosunku do stałych punktów odniesienia** (różnice wektorów przemieszczeń punktów są małe w stosunku do wartości błędu średniego wyznaczenia). Składowe średniego przemieszczenia obwałowania, równoznacznego z przemieszczeniem „środka ciężkości” obliczonego ze współrzędnych punktów figury utworzonej przez punkty 506–522 podane w kolumnie 4, wyniosły $dx_{sr} = -0,7 \text{ mm}$, $dy_{sr} = 0,3 \text{ mm}$.

Wykonano 4-parametrową transformację współrzędnych X, Y punktów 506–522 sieci wyjściowej do układu współrzędnych X', Y' sieci aktualnej **przy dostosowaniu do ruchomych punktów 506–522**. Operacja ta może się wydać dziwna przy czysto „geodezyjnym” traktowaniu przeznaczenia metody transformacyjnej, lecz jest ona podyktowana chęcią dowiedzenia się, **jakiej zmiany wymiarów liniowych uległa figura utworzona przez punkty na koronie obwałowania pod wpływem zaistniałej zmiany obciążenia**. W rezultacie otrzymano wskaźnik zmiany skali $s - I = 12,9 \text{ ppm}$ oraz składowe wektorów przemieszczeń względnych dP_w pod wpływem lokalnych, postaciowych, poziomych odkształceń fragmentów obwałowania w miejscach rozpatrywanych punktów. Wartości składowych tych przemieszczeń zawarte są w tablicy 1 w kolumnie 7 (obwiedzionej pogrubioną ramką).

W tym miejscu **omówimy i podkreślimy** znaczenie powyższych, charakterystycznych dla niniejszej pracy założeń i uzyskanych

wyników dostosowania sieci do wszystkich ruchomych punktów obwałowania.

Wobec dostosowania sieci do poruszonych punktów 506–522 na koronie obwałowania, wartości błędów dostosowania M_t podane w kolumnach 6 i 7 tablicy 1 **nie wyrażają błędów transformacji spowodowanych przez same tylko błędy pomiarów, lecz stanowią miary wartości przemieszczeń punktów** zarówno pod wpływem błędów pomiarów, jak i pod wpływem poziomych odkształceń figury utworzonej przez punkty 506–522.

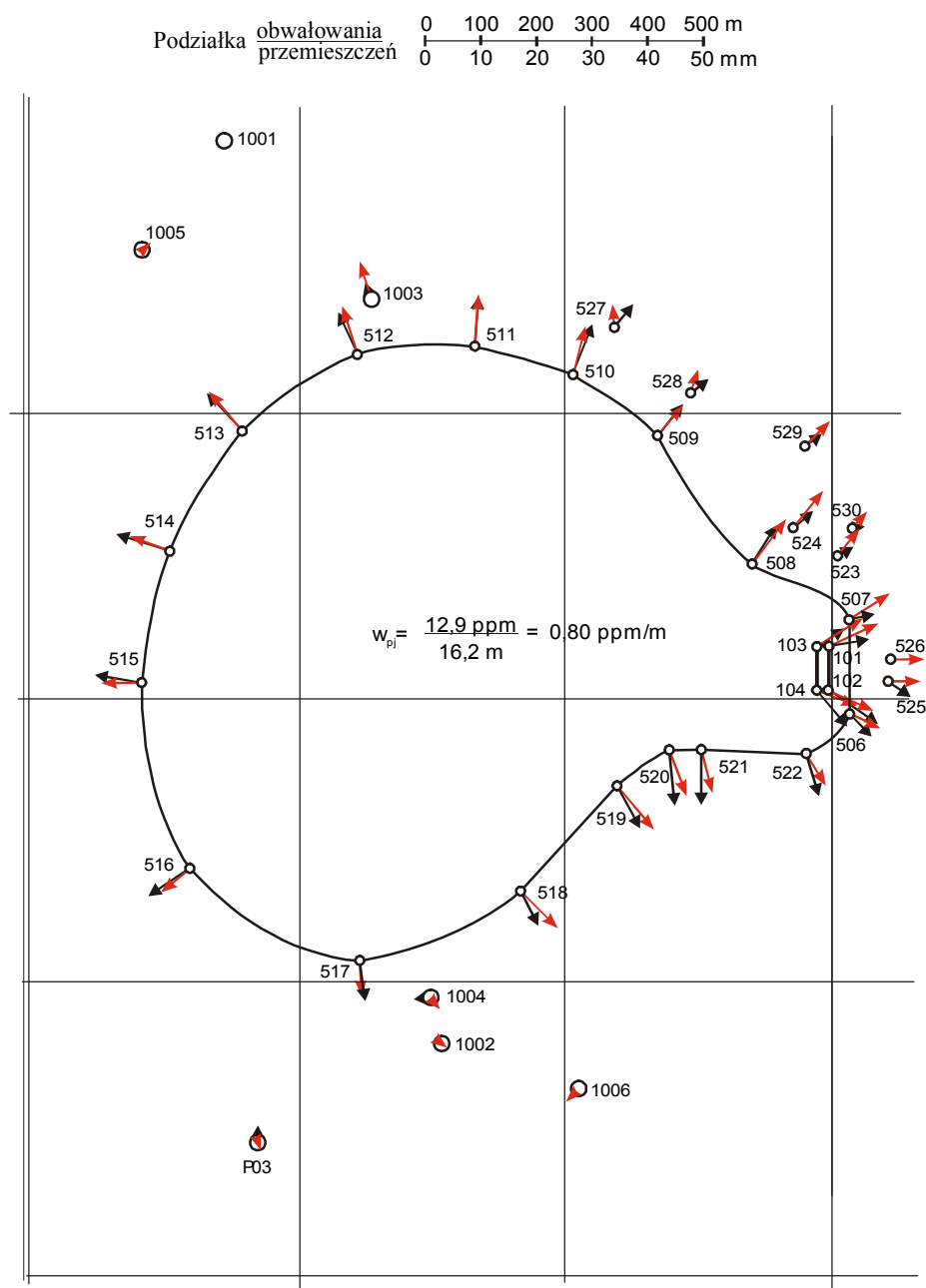
Wartość $M_{t_{3p}} = 8,6$ mm podana w kolumnie 6 charakteryzuje przeciętne przemieszczenie tych punktów pod wpływem **poziomego odkształcenia obwałowania polegającego na zmianie skali wymiarów** jego rzutu poziomego.

Wartość $M_{t_{4p}} = 4,4$ mm podana w kolumnie 7 charakteryzuje wartości przemieszczeń lokalnych tych punktów pod wpływem **poziomego odkształcenia postaciowego** jego rzutu poziomego. Konfrontacja wartości M_t z kolumn 6 i 7 umożliwia sformułowanie wniosku, że pod wpływem zmiany obciążenia obwałowania nastąpiło w przeważającym stopniu odkształcenie poziome obwałowania polegające na zmianie skali jego rzutu poziomego, natomiast poziome odkształcenie o charakterze postaciowym tego rzutu było w miejscach punktów 506–522 przeciętnie około 2-krotnie mniejsze.

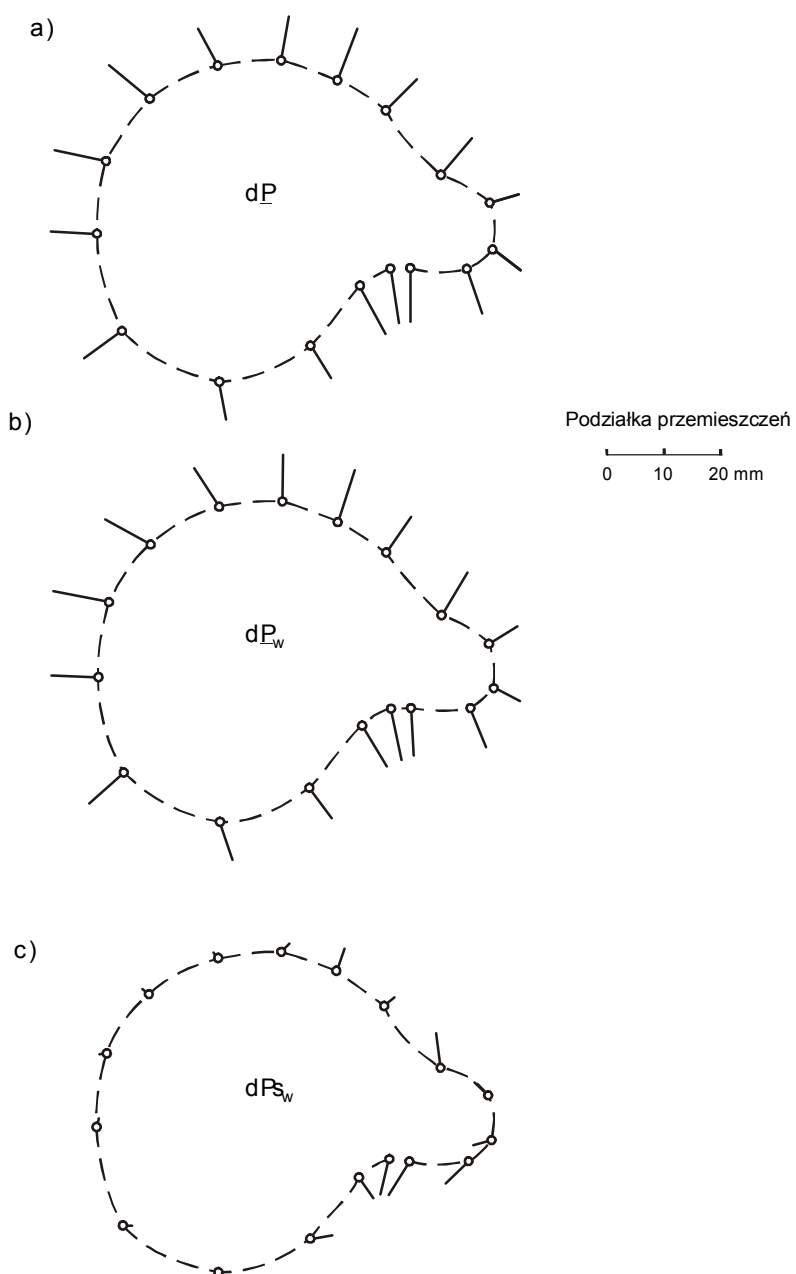
Należy też podkreślić, że obliczony wskaźnik $s - l = 12,9$ ppm określa jednoznacznie zmianę skali wymiarów rzutu poziomego obwałowania pod wpływem zmiany poziomu wody w zbiorniku. Na tej podstawie obliczamy wartość jednostkowego wskaźnika zmiany skali wymiarów rzutu poziomego obwałowania pod wpływem zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku o 1 m:

$$w_{Pj} = (s - l)/h_{w \text{ red}} = 12,9 \text{ ppm}/16,2 \text{ m} = 0,80 \text{ ppm/m}$$

Wektory wyznaczonych w roku 2003 przemieszczeń poziomych dP wszystkich kontrolowanych punktów na koronie obwałowania, na budowli wlotowej i w terenie wokół obwałowania pod wpływem opróżnienia zbiornika, których składowe zestawione są w tablicy 1 w kolumnie 4 pokazano na rysunku 7 (wektory w kolorze czarnym). Wskazują one wyraźnie na powiększenie się konturu rzutu poziomego obwałowania pod wpływem opróżnienia zbiornika i na podobne co do kierunków, lecz nieco mniejsze przemieszczenia podłoża w rejonie skarpy naturalnej. Przemieszczenia punktów na budowli wlotowej mają podobne kierunki jak przemieszczenia pobliskich punktów na koronie obwałowania.



Rys. 7. Wektory przemieszczeń punktów poziomej sieci kontrolnej obwałowania górnego zbiornika EW Żarnowiec pod wpływem opróżnienia zbiornika od początkowego poziomu piętrzenia 124 m npm wyznaczone:
w roku 2003 →, w roku 2004 →



Rys. 8

Na rysunku 8a pokazano ponownie wektory przemieszczeń $d\mathbf{P}$ z rysunku 7, dotyczące punktów kontrolowanych na koronie obwałowania. Wektory względnych przemieszczeń poziomych $d\mathbf{P}_w$ punktów na obwałowaniu, których składowe zestawione są w tablicy 1 w kolumnie 6, pokazano na rysunku 8b, natomiast wektory $d\mathbf{P}_{s_w}$, których składowe zestawione są w tablicy 1 w kolumnie 7, pokazano na rysunku 8c. Porównanie rysunków 8a i 8b potwierdza stwierdzoną wyżej dużą zgodność wyznaczonych wektorów przemieszczeń $d\mathbf{P}$ i wektorów przemieszczeń względnych $d\mathbf{P}_w$, świadczącą o niewielkim przemieszczeniu całego obwałowania względem stałych punktów odniesienia. Porównanie rysunków 8b i 8c potwierdza, że deformacje rzutu poziomego obwałowania mają w dominującym stopniu charakter odkształceń skalarnych i w znacznie mniejszym stopniu charakter odkształceń postaciowych.

W roku 2004 wykonano ponownie pomiary sieci poziomej przy zbiorniku napełnionym, a następnie opróżnionym, otrzymując wektory przemieszczeń pokazane na rysunku 7 kolorem czerwonym.

W tym miejscu należy poświęcić nieco uwagi ocenie dokładności wyznaczenia poziomych przemieszczeń punktów. Oczywiście błędy średnie wyznaczenia współrzędnych i elementy elips błędów zestawione w tablicy 2 mogą służyć do obliczenia błędów przemieszczeń jedynie jako materiał orientacyjny, bowiem dotyczą one oceny dokładności swobodnych wyrównań sieci dostosowanej do punktu 1001, znajdującego się na skraju sieci i do kierunku 1001–1002. Ponadto trzeba wspomnieć, że wykorzystywany program umożliwiał łatwe nadanie orientacji sieci swobodnej przez wprowadzenie do układu fikcyjnej obserwacji azymutu boku 1001–1002, co wykonano z minimalnym błędem $0,1^{\text{cc}}$ dla obserwacji wyjściowej i $0,3^{\text{cc}}$ dla obserwacji aktualnej. Spowodowało to, że obliczone wartości błędów współrzędnych z wyrównań swobodnych są nieco większe od rzeczywiście uzyskanych (składowa punktu 1002 prostopadła do boku 1001–1002 o długości 1663 m ma z tego tytułu w sieci aktualnej błąd średni 1 mm zamiast błędu równego 0 mm, jaki miałyby przy zorientowaniu sieci przez wyeliminowanie z układu jednej współrzędnej punktu 1002).

Do oceny dokładności przemieszczeń bardziej przydatne są błędy różnic współrzędnych przy dostosowaniu sieci do zidentyfikowanych stałych *a posteriori* punktów 1001, 1002, 1005, 1006, P03 obliczone przy odrzuceniu założenia bezbłędności punktów dostosowania. Jako błędy przemieszczeń punktów dostosowania można przyjąć wartości

M_t otrzymane z transformacji. Obliczenie takie przynosi błędy przemieszczeń wszystkich punktów sieci różniące się nieznacznie w stosunku do wykazanych w tablicy 1 błędów transformacji M_t dokonanej w odniesieniu do wyżej wymienionych pięciu punktów dostosowania. Błąd średni przemieszczenia najsłabiej wyznaczalnego punktu kontrolowanego sieci osiągnął wartość zbliżoną do 2 mm.

5.3.2. Pomiary i obliczenie przemieszczeń pionowych i jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania w_{Hj}

W wyniku wykonanego w kwietniu 2003 roku pomiaru wyjściowego przy napełnieniu zbiornika do poziomu 123–125 m i w wyniku wyrównania swobodnego sieci wysokościowej pokazanej na rysunku 5 otrzymano rzędne wysokości H podane w tablicy 3 w kolumnie 2. Pomiary wykonano niwelatorem cyfrowym NA3003 firmy Leica i dwoma kompletami skomparowanych łąt kodowych GPCL2 i GPCL3. Po wykonaniu w maju 2003 roku pomiaru aktualnego przy zbiorniku całkowicie opróżnionym i po wyrównaniu swobodnym sieci aktualnej oraz dostosowaniu jej do stałych reperów odniesienia, obliczono przemieszczenia pionowe dH reperów kontrolowanych zestawione w tablicy 3 w kolumnie 3. Dokonana identyfikacja potwierdziła, że repery dostosowania zachowały *a posteriori* (podczas pomiaru aktualnego w stosunku do pozycji przy pomiarze wyjściowym) stałość wzajemnego położenia z błędem o wartości mniejszej od 0,5 mm.

Przemieszczenia pionowe reperów na koronie obwałowania zestawione w kolumnie 3 tablicy 3 wykorzystano do obliczenia średniego przemieszczenia pionowego $dH_{sr} = 9,65$ mm oraz do obliczenia przemieszczeń względnych dH_w zestawionych w kolumnie 4 (stanowiących różnice między przemieszczeniami wyznaczonymi a przemieszczeniem średnim). Obliczona wartość dH_{sr} średniego przemieszczenia pionowego korony jest wyraźnie większa od błędu jej wyznaczenia, którego wartość można oszacować jako $m_{dH_{sr}} = 0,1$ mm. Różnice dH_w wielu reperów na koronie i budowli wlotowej osiągnęły również wartości znacznie większe od błędów średnich ich wyznaczenia, których wartość można oszacować na $m_{dH_w} = 0,5$ mm. Tym samym stwierdzone zostało, że pod wpływem opróżnienia zbiornika nastąpiła rzeczywiście zmiana wysokości położenia korony obwałowania, polegająca na jej uniesieniu średnio o 9,65 mm oraz zmiana wysokości położenia górnej powierzchni budowli wlotowej,

polegająca na jej uniesieniu średnio o 22,8 mm. Różnica wysokości poziomu wody w zbiorniku wywołana jego opróżnieniem wyniosła 16,2 m, w związku z czym możemy oszacować, że jednostkowy wskaźnik uniesienia korony osiągnął wartość:

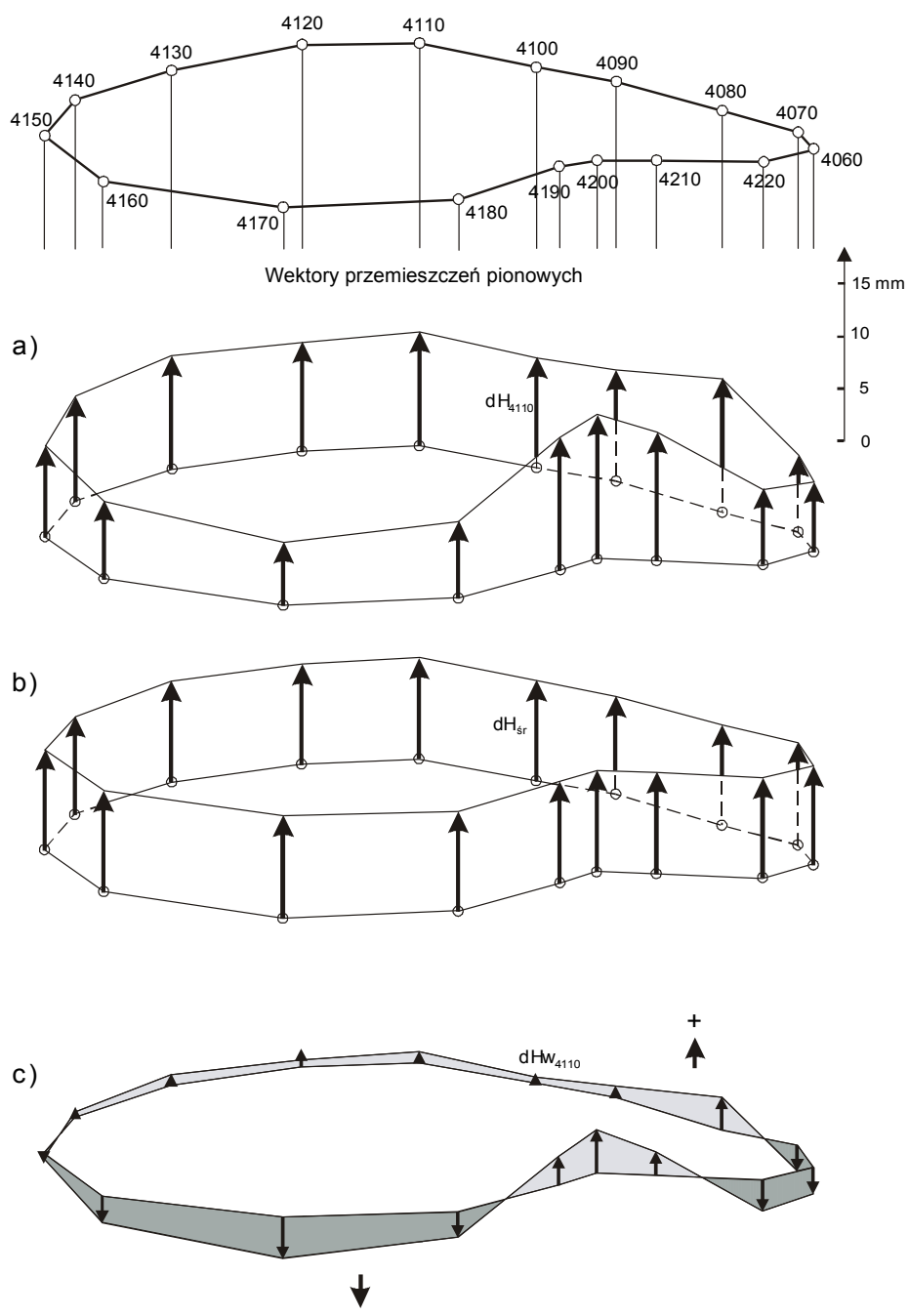
$$w_{Hj\ kor} = 9,65/16,2 = 0,60 \text{ mm/m}$$

Tablica 3. Zestawienie pionowych przemieszczeń reperów na koronie obwałowania i na górnej powierzchni budowli wlotowej pod wpływem opróżnienia zbiornika

	H	dH	dH_w
1	2	3	4
	m	mm	mm
korona obwałowania			
4060	127,85394	7,25	-2,40
4070	127,90130	7,06	-2,59
4080	128,03896	12,79	3,14
4090	128,09923	10,26	0,71
4100	128,10609	10,16	0,51
4110	128,12389	10,54	0,89
4120	127,94319	10,13	0,48
4130	127,92884	10,61	0,96
4140	127,89543	10,05	0,40
4150	128,05221	9,47	-0,18
4160	128,07453	7,25	-2,40
4170	127,32942	6,00	-3,65
4180	127,52418	7,46	-2,19
4190	128,01598	12,52	2,87
4200	127,96403	13,62	3,97
4210	128,02517	11,89	2,24
4220	127,79596	7,01	-2,64

	dH_{sr}	9,65	
Budowla wlotowa			
4502	127,69118	21,45	11,80
4503	127,73108	21,33	11,68
4504	127,68672	20,91	11,26
4505	127,68356	23,40	13,75
4506	127,68763	24,50	14,85
4507	127,69065	24,56	14,91
4508	127,68000	23,46	13,81

	dH_{sr}	22,80	



Rys. 9

a jednostkowy wskaźnik uniesienia górnej powierzchni budowli wlotowej osiągnął wartość:

$$w_{Hj \text{ b.wlot}} = 22,80/16,2 \text{ m} = 1,41 \text{ mm/m}$$

Wartości dH_w ze znakiem „+” świadczą o zwiększonej podatności obwałowania w miejscu reperu na uniesienie pod wpływem opróżnienia zbiornika, natomiast wartości dH_w ze znakiem „-” świadczą o podatności zmniejszonej w stosunku do podatności średniej.

Na rysunku 9a pokazano wektory zestawionych w tablicy 3 przemieszczeń pionowych dH reperów na koronie obwałowania, na rysunku 9b średnie przemieszczenie dH_{sr} korony zaś na rysunku 9c przemieszczenia względne dH_w .

Na podstawie otrzymanych wartości dH_w zestawionych w tablicy 3 w kolumnie 4 stwierdzono, że korona obwałowania była najbardziej podatna na uniesienie pod wpływem opróżnienia zbiornika w rejonie reperów 4190–4210 oraz w rejonie reperu 4080 i najmniej podatna na uniesienie w rejonach reperów 4060, 4070, 4220 oraz reperów 4160–4180. Jest to widoczne na rysunku 9c. W miejscach pozostałych reperów wartości dH_w są mniejsze, bardziej zbliżone do wartości błędu średniego ich wyznaczenia, w związku z czym nie można ich uważać za stwierdzone.

5.3.3. Pomiary i obliczenie jednostkowego wskaźnika podatności obwałowania $w_{\phi j}$

Przy napełnionym zbiorniku w kwietniu 2003 roku wykonano pomiar wyjściowy różnic wysokości h między reperami 4060–4060a, ..., 4220–4220a na koronie obwałowania, a po opróżnieniu zbiornika w maju 2003 roku wykonano aktualny pomiar różnic wysokości h' . Pomiary wykonano niewelatorem cyfrowym NA3003 firmy Leica z wykorzystaniem jednej skomparowanej łąty kodowej z błędem średnim rzędu 0,03 mm. W 2 kolumnie tablicy 4 zestawiono zmiany $dh = h' - h$. Otrzymane wartości dh są na ogół znacznie większe od błędów ich wyznaczenia, co świadczy, że stwierdzono zmiany wzajemnych różnic wysokości par reperów. Okazało się, że z wyjątkiem różnicy wysokości na odcinku 4180–4180a wszystkie zmiany dh na pozostałych 17-tu odcinkach były dodatnie, co oznacza, że pod wpływem opróżnienia zbiornika w tych przekrojach poprzecznych nastąpiła zmiana nachylenia korony na zewnątrz

obwałowania. Jest to wynik zgodny z oczekiwaniem, mogący mieć związek z odprężeniem podłoża pod zbiornikiem na skutek zmniejszenia jego obciążenia wodą. W 3 kolumnie tablicy 4 zamieszczono odległości poziome d między reperami na przekrojach poprzecznych korony, zaś w 4 kolumnie wartości $dh/d = tg\varphi \cong d\varphi$ [mm/m] zmiany nachylenia korony. Średnia wartość tangensa kąta zmiany nachylenia, spowodowana obniżeniem poziomu wody w zbiorniku o 16 m, osiągnęła wartość 0,154 mm/m, tj. $d\varphi = 31,8''$ (wynik uzyskany w przekroju 4189–4180a uznano za omyłkowy i pominięto). Z tego wynika, że jednostkowy wskaźnik zmiany nachylenia korony osiągnął wartość:

$$w_{\varphi j} = 0,154/16,2 = 0,0095 \text{ mm/m/m (tj. } 1,96''/\text{m)}$$

Tablica 4. Zestawienie zmian nachylenia korony obwałowania w przekrojach prostopadłych do osi jezdni, pod wpływem opróżnienia zbiornika

W okresie	kwiecień–maj 2003 r.				kwiecień–maj 2004 r.	
Nr reperów	dh	d	$d\varphi$	$v_{d\varphi}$	$d\varphi$	$v_{d\varphi}$
1	2	3	4	5	6	7
	[mm]	[m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
4060–4060a	0,74	6,42	0,115	-0,039	0,151	0,001
4070–4070a	0,46	6,12	0,075	-0,079	0,167	0,017
4080–4080a	0,75	4,85	0,155	0,001	0,214	0,064
4090–4090a	0,94	4,90	0,192	0,038	0,165	0,015
4100–4100a	1,15	4,32	0,266	0,112	0,255	0,105
4110–4110a	1,25	5,66	0,221	0,067	0,208	0,058
4120–4120a	0,81	4,76	0,170	0,016	0,057	-0,093
4130–4130a	0,66	4,38	0,151	-0,003	0,100	-0,050
4140–4140a	0,73	4,50	0,162	0,008	0,191	0,041
4150–4150a	0,58	3,60	0,161	0,007	0,139	-0,011
4160–4160a	0,77	5,50	0,140	-0,014	0,111	-0,039
4170–4170a	0,73	8,28	0,088	-0,066	0,081	-0,069
4180–4180a	-0,44	7,40	-0,059	-----	0,114	-0,036
4190–4190a	0,86	5,23	0,164	0,010	0,130	-0,020
4200–4200a	0,66	4,11	0,161	0,007	0,153	0,003
4210–4210a	0,54	4,39	0,123	-0,031	0,173	0,023
4220–4220a	0,60	4,73	0,127	-0,027	0,140	-0,010
			-----	-----	-----	-----
			$0,154 \pm 0,012$	$m_{d\varphi} = 0,046$	$0,150 \pm 0,012$	$m_{d\varphi} = 0,050$

Zróznicowania wartości $d\varphi$ zestawionych w kolumnie 4 tablicy 4 mogłyby świadczyć o zróżnicowanych podatnościach korony obwałowania w poszczególnych przekrojach poprzecznych na zmiany nachylenia spowodowane zmianą obciążenia podłoża, wynikającą z opróżnienia zbiornika. W związku z tym obliczono odchyłki $v_{d\varphi}$ zestawione w kolumnie 5 tablicy 4, które mogłyby informować o miejscach obwałowania o mniejszej (przy znaku „-”) lub większej (przy znaku „+”) podatności na zmiany nachylenia. Należy jednak przypomnieć, że repery 4060a–4220a zostały zastabilizowane w sposób prowizoryczny jako kołki wstrzelone w nawierzchnię jezdni, a więc mogą być w większym stopniu podatne na drobne przemieszczenia własne względem korpusu obwałowania. Z tego względu uważamy, że nie ma podstawy do tak daleko posuniętego wnioskowania o stopniu podatności poszczególnych miejsc obwałowania na zmiany nachylenia, natomiast uzyskane odchyłki $v_{d\varphi}$ można użyć do oszacowania rozrzutu wartości zmian nachylenia w poszczególnych przekrojach poprzecznych obwałowania. Błąd średni obliczony na podstawie odchyłek $v_{d\varphi}$ osiągnął wartość 0,047 mm/m (9,7”), zaś amplituda rozrzutu osiągnęła wartość 0,191 mm/m (39,4”). Na ten rozrzut ma wpływ zarówno dokładność pomiaru różnic nachylenia, jak i lokalne zróżnicowania powodowane własnymi mikroruchami reperów prowizorycznych względem obwałowania i lokalnymi zróżnicowaniami podatności obwałowania na zmiany nachylenia pod wpływem opróżnienia zbiornika.

W tablicy 4 w kolumnach 6 i 7 zamieszczono wyniki takiego samego eksperymentu pomiarowego wykonanego w roku 2004. Uzyskane wyniki są zbliżone w granicach dokładności wyznaczenia do wyników z roku 2003. Warto zauważyć, że w roku 2004 uzyskano wszystkie zmiany nachylenia z jednym znakiem, co potwierdza, że wynik uzyskany na przekroju 4180 w roku 2003 był zapewne omyłkowy. Różnice wyników uzyskane w tych samych przekrojach potwierdzają wcześniejszy wniosek, że na podstawie tego materiału pomiarowego nie należy wyciągać wniosków co do większej lub mniejszej podatności obwałowania na zmiany nachylenia w poszczególnych jego rejonach, poprzestając na wykorzystaniu średnich zmian nachylenia korony całego obwałowania do obliczania wskaźnika $w_{\varphi j}$.

5.4. Badanie trendu zachowania się korony obwałowania pod wpływem zmian obciążenia

Z punktu widzenia oceny bezpieczeństwa obiektu piętrzącego ważne wydaje się sprawdzanie, czy w miarę upływu czasu eksploatacji jego podatność na zmiany obciążeń ulega dużym zmianom, pozostaje niezmienna, czy też zmienia się nieznacznie – stopniowo, w sposób umożliwiający przewidywanie rozwoju sytuacji w zakresie odporności obwałowania. W związku z tym autorzy postanowili zestawzić wyniki powtarzanych co roku pomiarów eksperymentalnych, towarzyszących dużym zmianom poziomu piętrzenia wody w zbiorniku i obliczyć wartości jednostkowych wskaźników podatności.

5.4.1. Przemieszczenia i deformacje poziome korony obwałowania

Jak już wspomniano w punkcie 4, w latach 1999, 2000 IGG PW wykonał 2-krotnie pomiary względnych poziomych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania. Wyniki tych pomiarów mogą nadawać się do obliczenia jednostkowych wskaźników w_{Pj} , pod warunkiem możliwości dotarcia do wartości zapisanych lub zarejestrowanych wyników pomiarów i redukcji oraz możliwości przeanalizowania ich, jednak autorzy nie czują się upoważnieni do wykorzystania tego materiału pomiarowego. W związku z tym poprzestajemy tu na wykorzystaniu wyników pomiarów własnych ZGS IGiK uzyskanych w latach 2001–2004.

Należy przypomnieć, że w pracach (Janusz J. 2002c), (Janusz J. 2003a, 2003b) podano wyniki obliczenia wskaźników poziomych deformacji obwałowania górnego zbiornika EW „Żarnowiec” z lat 2001, 2002, przy nieco uproszczonym założeniu, że w strefie wysokości 96–111 m n.p.m. 1-metrowe warstwy wody pokrywają całą powierzchnię dna ograniczoną przez warstwicę 111 m. Uwzględniając korektę wynikającą z obliczonej później (por. p. 5.2.4) wartości $\Delta h_{w\ red} = 3,2$ m, uzyskaliśmy skorygowane wartości jednostkowych wskaźników:

$$w_{Pj\ 2001} = -14,4/16,2 = -0,89\ \text{ppm/m}$$

$$w_{Pj\ 2002} = 10,8/15,0 = 0,72\ \text{ppm/m}$$

$$w_{Pj\ 2003} = 12,9/16,2 = 0,80\ \text{ppm/m}$$

$$w_{Pj\ 2004} = 12,9/16,2 = 0,80\ \text{ppm/m}$$

Podany ciąg liczbowy wartości wskaźnika w_{Pj} w ciągu 4 kolejnych lat pozostawał praktycznie niezmienny w granicach dokładności wyznaczenia, którą szacujemy jako równą 20% wartości wskaźnika. Ta

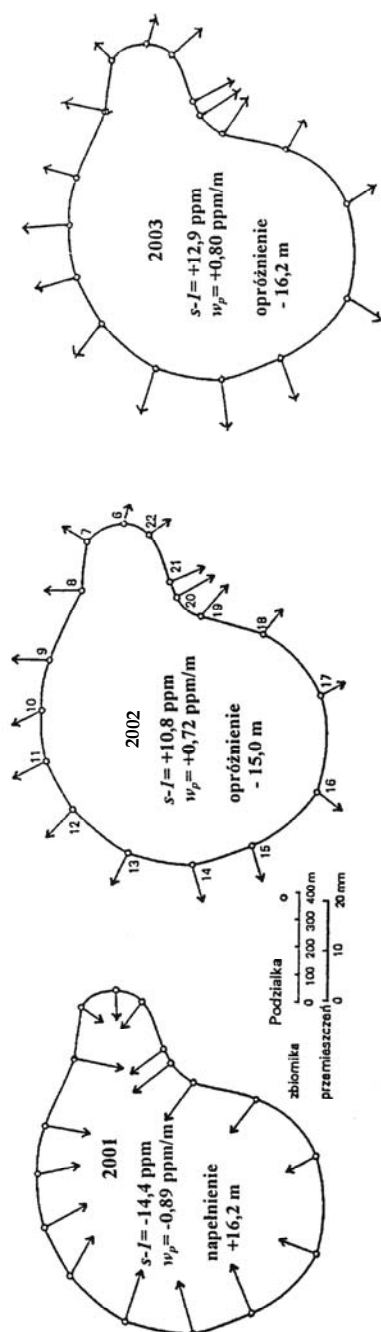
ocena dokładności jest z konieczności przybliżona, bowiem o dokładności wskaźnika decyduje nie tylko dokładność pomiarów, lecz w przeważającym stopniu nieuniknione wahania poziomu wody występujące podczas pomiaru przy zbiorniku napelnionym.

Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że jedno badanie (w roku 2001) było przeprowadzone przy napelnianiu zbiornika, zaś 3 badania w latach 2002–2004 – przy opróżnianiu zbiornika, co spowodowało zmianę znaku wskaźnika.

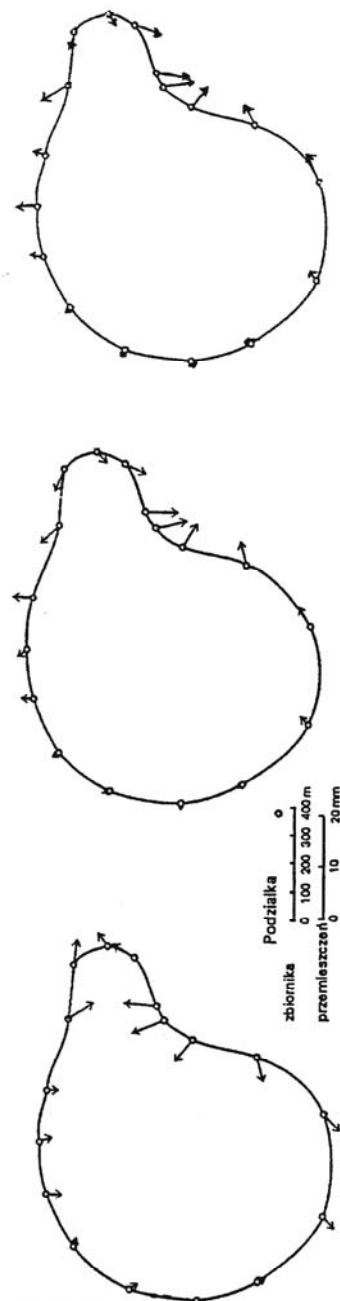
Ilustracją uzyskanych wyników jest rysunek 10, na którym pokazano wektory poziomych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania pod wpływem napelniania i opróżniania zbiornika, uzyskane w latach 2001–2003 oraz rysunek 7, na którym kolorem czerwonym zaznaczono wyniki z roku 2004. Zwraca uwagę fakt, że w kolejnych latach nie tylko wartości wskaźników jednostkowych zachowały praktycznie niezmiennosc, podobne są również bezwzględne wartości składowych lokalnych przemieszczeń punktów, widoczne na rysunku 10b. Świadczy to o zróżnicowaniu podatności obwałowania na zmiany obciążeń w poszczególnych jego miejscach, przy jednoczesnym zachowaniu ich małej zmienności w czasie.

Należy podkreślić, że wykorzystane tu materiały z pomiarów wcześniejszych (przed rokiem 2003) są wystarczająco wiarygodne do oszacowania podatności obwałowania na zmiany poziomu wody, choć mają nieco mniejszą dokładność. Wynika to głównie z faktu, że w latach 2001 i 2002 pozioma sieć kontrolna była odniesiona do nowo zastabilizowanych 4 punktów odniesienia nr 1001–1004, spośród których 2 punkty o numerach 1003 i 1004, posadowione stosunkowo blisko zewnętrznej krawędzi obwałowania, wykazywały śladowe przemieszczenia, nieznacznie przekraczające błędy średnie ich wyznaczenia. W roku 2003 dostabilizowano i wykorzystano 2 kolejne punkty nr 1005 i 1006 oraz włączono do grupy punktów odniesienia istniejący wcześniej punkt P03. W rezultacie od roku 2003 możliwe stało się obliczanie przemieszczeń wszystkich punktów poziomej sieci kontrolnej w odniesieniu do 5 punktów, wykazujących wzajemną stałość z nieco mniejszym błędem dostosowania, zaś punkty nr 1003 i 1004 traktowane są jako ruchome (badania wykazały, że w przypadku prowadzonych co rok pomiarów okresowych przy zbiorniku napelnionym, tj. przy minimalnych zmianach poziomu wody, punkty 1003 i 1004 również zachowują stałość i mogą być traktowane jako punkty odniesienia).

a) Przemieszczenia pod wpływem zmiany poziomu wody w zbiorniku



b) Przemieszczenia lokalne pod wpływem zmiany poziomu wody w zbiorniku



Rys. 10

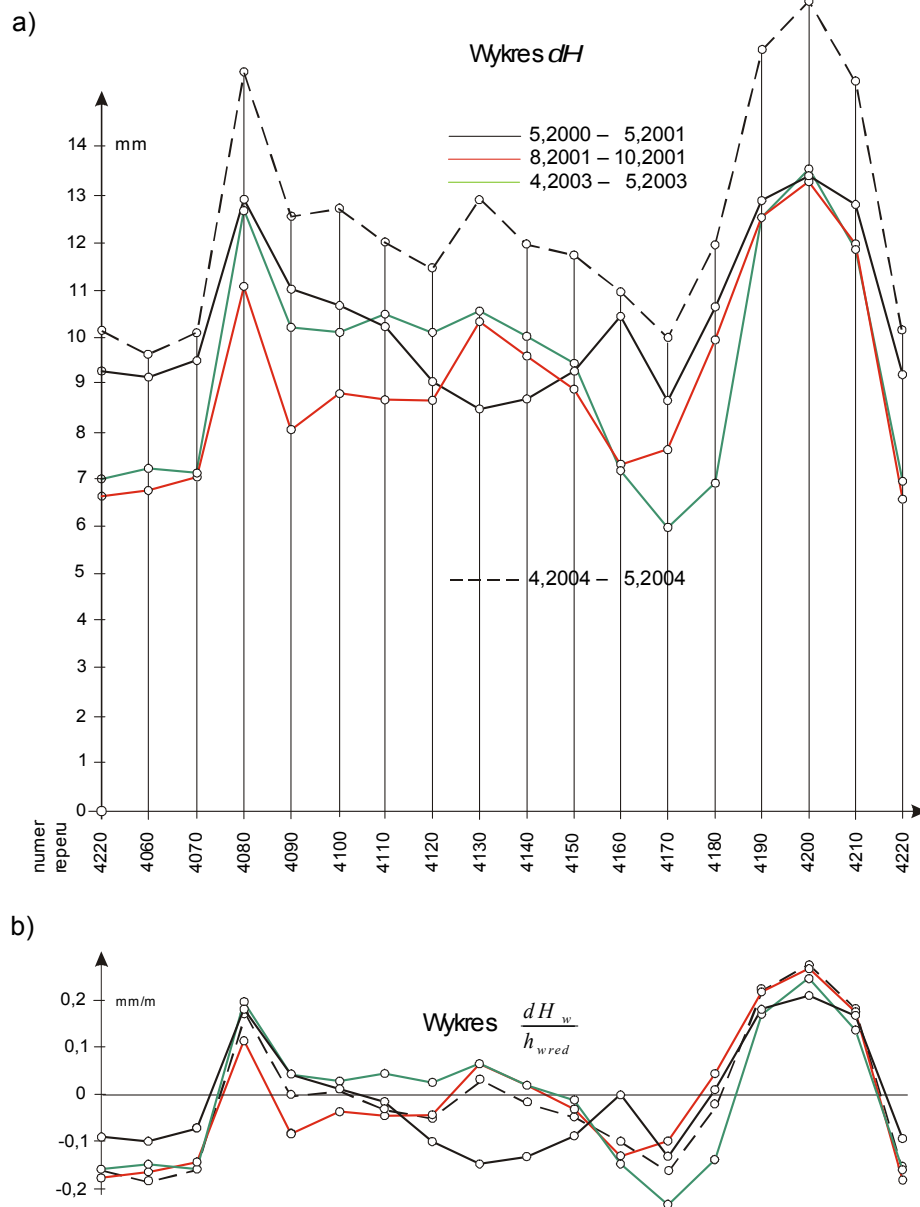
5.4.2. Przesunięcia i deformacje pionowe korony obwałowania

W maju 2000 roku OPGK-Gdańsk wykonało pomiar niwelacyjny reperów 4060–4220 przy zbiorniku napełnionym do poziomu 121,5 m, natomiast w maju 2001 roku ZGS IGiK wykonał pomiar niwelacyjny tych reperów przy zbiorniku opróżnionym do poziomu 106 m. Następnie w sierpniu 2001 roku ZGS wykonał pomiar niwelacyjny przy zbiorniku opróżnionym do poziomu 106 m i powtórzył pomiar w październiku 2001 roku po napełnieniu zbiornika do poziomu 123 m. Podobne eksperymenty pomiarowe wykonano w latach 2003 i 2004. W tablicy 5 podano wyznaczone z tych pomiarów przesunięcia pionowe dH reperów na koronie obwałowania oraz wartości lokalnych wskaźników $dH_w / h_{w\ red}$, zaś na rysunku 11a pokazano wykresy wartości zestawionych w tablicy 5.

Na podstawie tych danych obliczono jednostkowe wskaźniki średnich przesunięć pionowych korony obwałowania:

$$\begin{aligned} w_{Hj\ 2000/2001} &= 0,77\ \text{mm/m} \\ w_{Hj\ 200} &= 0,62\ \text{mm/m} \\ w_{Hj\ 2003} &= 0,60\ \text{mm/m} \\ w_{Hj\ 2004} &= 0,78\ \text{mm/m} \end{aligned}$$

Należy zwrócić uwagę, że wynik pierwszej z przedstawionych prób obarczony jest usterką polegającą na tym, że pomiary przed i po zmianie poziomu wody były wykonane w dużym odstępie roku, co mogło spowodować zmiany wyniku zależne nie tylko od różnicy piętrzenia wody w zbiorniku. Ponadto pomiary były wykonywane przez różne zespoły, zróżnicowanym sprzętem (zwłaszcza trzeba wspomnieć, że pomiary w roku 2000 były wykonane niekomparowanymi łatami). Pozostałe pomiary przed i po zmianie poziomu wody w zbiorniku były wykonywane przez ZGS IGiK w odstępach nie przekraczających 1,5 miesiąca, w związku z czym można przyjąć, że wyznaczone przesunięcia pionowe były spowodowane w głównej mierze przez zmiany obciążenia zbiornika. Na rysunku 11a wykres odpowiadający przesunięciom wyznaczonym w okresie sierpień–październik 2001 roku, w którym podnoszono poziom wody, naniesiono z odwrotnym znakiem w stosunku do wykresów odpowiadających opróżnianiu zbiornika w pozostałych próbach.



Rys. 11

Tablica 5

Data: pom.wyj. pom.akt.	5.2000 5.2001		8.2001 10.2001		4.2003 5.2003		4.2004 5.2004
Nr rep.	dH	$dH_w/13,6$	dH	$dH_w/15,1$	dH	$dH_w/16,2$	$dH_w^*/16,2$
	mm	mm/m	mm	mm/m	mm	mm/m	mm/m
4060	9,15	-0,097	-6,85	0,163	7,25	-0,148	-0,211
4070	9,58	-0,065	-7,11	0,145	7,06	-0,160	-0,186
4080	12,93	0,181	-11,14	-0,121	12,79	0,194	0,161
4090	11,10	0,046	-8,09	0,081	10,26	0,044	-0,014
4100	10,72	0,018	-8,86	0,030	10,16	0,032	0,002
4110	10,29	-0,013	-8,71	0,040	10,54	0,055	-0,024
4120	9,18	-0,095	-8,72	0,039	10,13	0,030	0,020
4130	8,53	-0,143	-10,39	-0,072	10,61	0,059	0,051
4140	8,74	-0,127	-9,65	-0,023	10,05	0,025	0,006
4150	9,35	-0,082	-8,92	0,026	9,47	-0,011	-0,031
4160	10,50	0,002	-7,38	0,128	7,25	-0,148	-0,016
4170	8,73	-0,128	-7,70	0,094	6,00	-0,225	-0,147
4180	10,73	0,019	-10,01	-0,046	7,46	-0,135	-0,014
4190	12,95	0,182	-12,68	-0,223	12,52	0,177	0,236
4200	13,44	0,218	-13,37	-0,269	13,62	0,245	0,281
4210	12,84	0,174	-11,99	-0,177	11,89	0,138	0,174
4220	9,26	-0,089	-6,62	0,178	7,01	0,163	-0,167

*Wartości dH z roku 2004 podane są w tablicy 8.

Na rysunku 11b pokazano wykresy jednostkowych, lokalnych przemieszczeń pionowych $dH_w / h_{w\text{red}}$ (odpowiadające zmianom poziomu wody o 1 m). Wykresy te wyraźnie wskazują na zróżnicowania podatności poszczególnych rejonów obwałowania na przemieszczenia pionowe pod wpływem zmian poziomu wody w zbiorniku, wykazujące dosyć dużą powtarzalność w latach 2000, 2001, 2003 i 2004. Na podstawie tych wykresów można wyraźnie stwierdzić, że pod wpływem zmian obciążenia następowały zwiększone w stosunku do średnich pionowe przemieszczenia jednostkowe korony obwałowania w rejonie reperów 4080, 4190–4210 i zmniejszone w stosunku do średnich przemieszczenia w rejonie reperów 4220–4070, 4160–4170.

5.5. Badanie reakcji budowli wlotowej na zmiany poziomu piętrzenia wody

5.5.1. Konstrukcja komory wlotowej i rozmieszczenie punktów kontrolowanych

Komora wlotowa jest budowlą żelbetową łączącą górny zbiornik z rurociągami. Ma za zadanie płynnie wprowadzać pompowaną wodę do zbiornika górnego w cyklach akumulowania energii oraz płynnie wyprowadzać z niego grawitacyjnie wodę do rurociągów i dalej na turbiny w cyklach generowania energii.

Górna część komory wlotowej pokazana jest na rysunku 12a,b, zaś cała komora na schematycznym rysunku 13. Jest to konstrukcja złożona z dwu sekcji żelbetowych oddzielonych pionowo usytuowaną szczeliną dylatacyjną. Sekcja A znajduje się po północno-zachodniej stronie w stosunku do płaszczyzny dylatacji (osi derywacji), zaś sekcja B po stronie południowo-wschodniej. W każdej sekcji znajdują się wloty do dwu rurociągów zaopatrzone w: kraty z prowadnicami, zastawki remontowe z prowadnicami, zasuwę szybkoopadającą z prowadnicami i podnośnikami hydraulicznymi. Budowla wlotowa została wzniesiona wewnątrz obwałowania zbiornika w wykopie o głębokości około 24 m. W dolnej części budowli wlotowej znajduje się galeria drenażowo-kontrolna usytuowana w przybliżeniu poziomo na poziomie 95 m n.p.m. i mająca wyjścia na powierzchnię terenu na poziomie 92 m n.p.m. Górna powierzchnia budowli wlotowej znajduje się na poziomie 127,6 m n.p.m. Asfaltowy ekran szczelny wewnętrznej skarpy obwałowania styka się z pionowymi ścianami budowli wlotowej. Od strony wlotów budowla wlotowa styka się z żelbetową niecką utworzoną w dnie zbiornika.

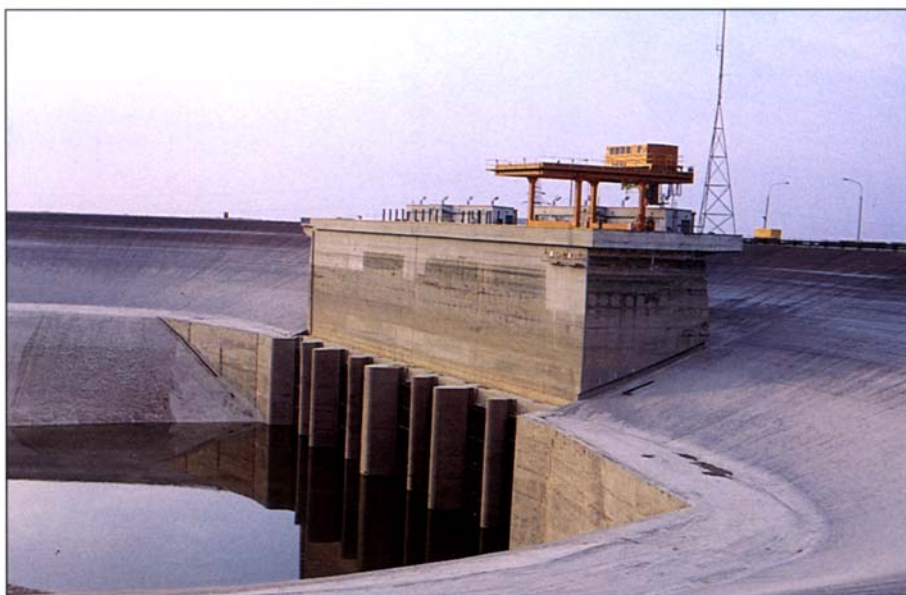
Na górnej powierzchni budowli wlotowej, zastabilizowane są:

- 4 punkty poziomej sieci kontrolnej nr 101–104,
- 7 reperów wysokościowej sieci kontrolnej nr 4502–4508,
- 2 stanowiska pochyłomierza PN 31 konstrukcji IGiK nr BP1-11, BP1-12, służące do pomiarów zmian nachylenia w dwu kierunkach równoległych do krawędzi rzutu poziomego budowli,
- 2 stanowiska szczelinomierza XYZ konstrukcji IGiK nr BS-16, BS-17, służące do wyznaczania 3 składowych wzajemnych względnych przemieszczeń bloków budowli oddzielonych dylatacją.

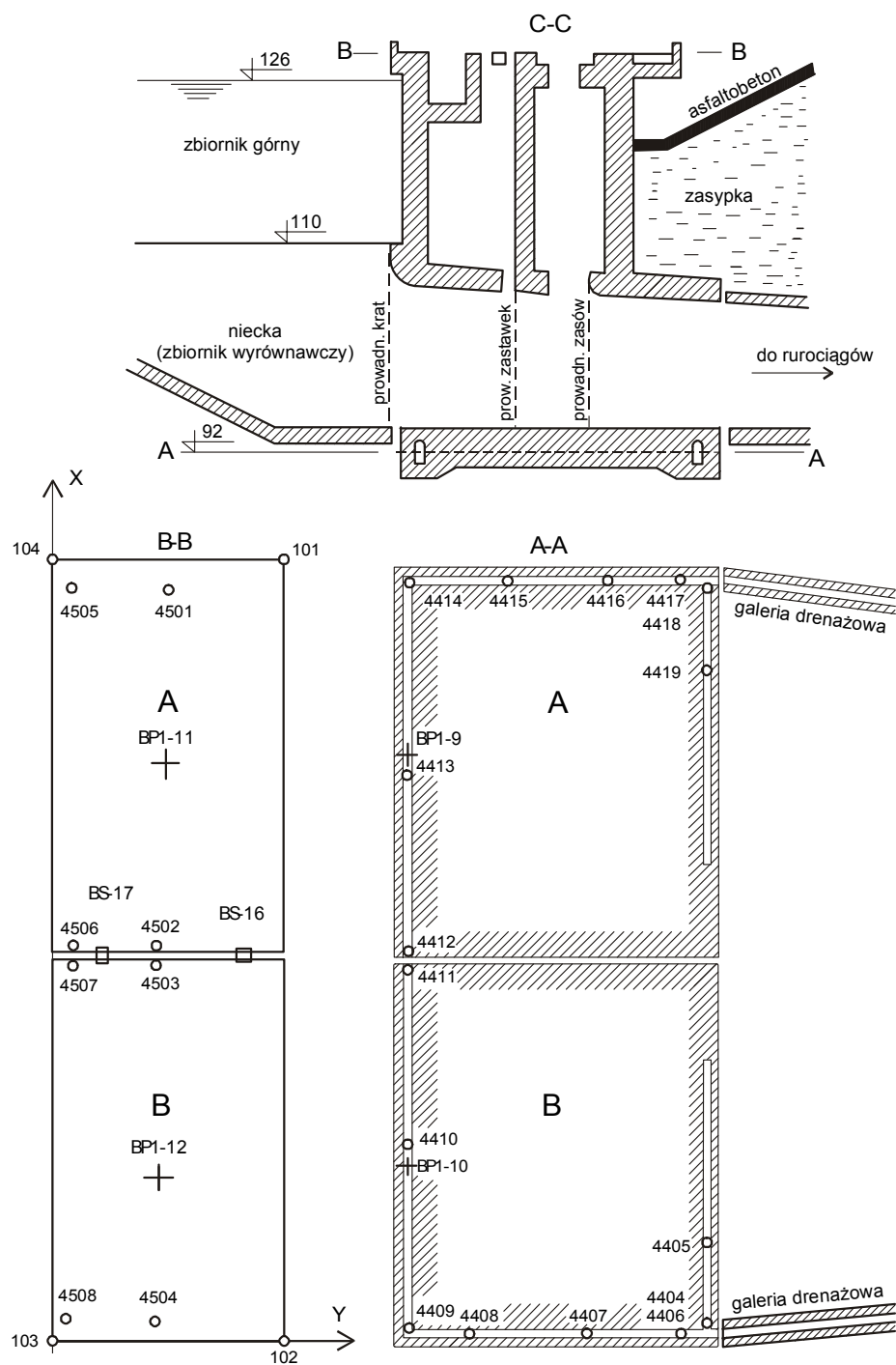
a)



b)



Rys. 12



Rys. 13

Wewnątrz budowli wlotowej, w galerii kontrolnej, na poziomie 91,7–95 m n.p.m. zastabilizowano:

- 16 reperów wysokościowej sieci kontrolnej nr 4404–4419; w północno-zachodniej galerii kontrolnej poza obrysem rzutu poziomego budowli wlotowej zastabilizowano 5 reperów nr 4420, 4421, 4422, 4425 i 4426, zaś w południowo-wschodniej galerii kontrolnej poza obrysem budowli wlotowej 5 reperów nr 4403, 4402, 4401, 4424 i 4423; wydzielony fragment kontrolnej sieci wysokościowej, służącej do wyznaczania pionowych przemieszczeń reperów w galerii drenażowo-kontrolnej, pokazano na rysunku 5,
- 2 stanowiska pochyłomierza PN 31 nr BP1-9 i BP1-10,
- 1 stanowisko szczelinomierza XYZ nr BS2-R1 na dylatacji między blokami budowli.

Rozmieszczenie wymienionych punktów i stanowisk w budowli wlotowej pokazane jest w rzucie poziomym na rysunku 13 (przekroje A-A, B-B). Odległości d reperów w galeriach poza obrysem budowli wlotowej od tej budowli są podane w tablicy 6. Punkty poziomej sieci kontrolnej i repery sieci wysokościowej zastabilizowane zostały na budowli wlotowej z przeznaczeniem głównie do pomiarów okresowych przy napełnionym zbiorniku górnym, które były prowadzone w odstępach co pół roku lub co rok. Od czasu rozpoczęcia badań dynamicznych, dotyczących zachowania się budowli wlotowej pod wpływem zmian poziomu wody w zbiorniku górnym, punkty 101–104 i repery 4502–4508 na górnej powierzchni budowli wlotowej są wykorzystywane przez ZGS IGiK również do tego celu, natomiast repery w galerii w roku 2003 nie były jeszcze wykorzystywane przy badaniach dynamicznych.

Stanowiska szczelinomierza i pochyłomierza były dotychczas stosowane głównie do pomiarów okresowych w ustalonych odstępach czasu (aktualnie co 1 miesiąc).

5.5.2. Wyniki pomiarów przemieszczeń budowli wlotowej w latach 2002 i 2003

Na podstawie wyników pomiarów dotyczących budowli wlotowej, zestawionych w punkcie 5.3 (tablice 1 i 3) można stwierdzić, że przy dużej zmianie poziomu wody:

- Punkty 101–104 na górnej powierzchni budowli wlotowej uległy w roku 2003 przemieszczeniom poziomym pokazanym na rysunkach 7a, 14b, podobnym co do kierunków z przemiesz-

czeniami pobliskich punktów 506 i 507 na koronie obwałowania (por. rys. 7a). Przemieszczenia te mogłyby świadczyć, że pod wpływem opróżnienia zbiornika nastąpiło rozszerzenie dylatacji między blokami budowli wlotowej oraz nieznaczne co do wartości wydłużenie poziomych, górnych krawędzi budowli, mogące mieć charakter zmiany termicznej.

- Repery 4502–4508 uległy w roku 2003 uniesieniu średnio 2,4 razy większemu od uniesienia reperów na koronie obwałowania oraz 3,2 razy większemu od uniesienia najbliższych reperów 4060 i 4070 na koronie obwałowania. Bezwzględna różnica uniesienia górnej powierzchni budowli wlotowej i najbliższych reperów na koronie, znajdujących się na tym samym poziomie 127,6 m n.p.m. wyniosła 15,6 mm.
- Różnice wzajemnych osiadań reperów 4502-4508 umożliwiły obliczenie na zasadzie podanej w (Janusz W. 1969)¹ zmian nachylenia górnych powierzchni obu bloków budowli wlotowej, których wartości i kierunki wyznaczone w roku 2003 pokazano na rysunku 14b. Kierunki zmian nachyleń są zbliżone do kierunków przemieszczeń poziomych punktów 101–104, zaś nachylenia ze zwrotem nazewnątrz zbiornika osiągnęły wartości 0,31 mm/m i 0,30 mm/m. Jednocześnie stwierdzono, że deformacje pionowe tych powierzchni v w miejscach poszczególnych reperów mieszczą się w granicach dokładności wyznaczenia. Można więc stwierdzić, że górne powierzchnie sekcji budowli wlotowej uległy pod wpływem opróżnienia zbiornika zmianom nachylenia podobnym co do kierunku i około 2 razy większym co do wartości w stosunku do zmiany nachylenia korony obwałowania (por. tabl. 4).

¹ Zmiany nachylenia $d\varphi$ i średnie osiadania dH_o górnych powierzchni obu sekcji obliczono przez rozwiązanie układów równań liniowych pseudoobserwacji, tj. wyznaczonych osiadań dH reperów typu:

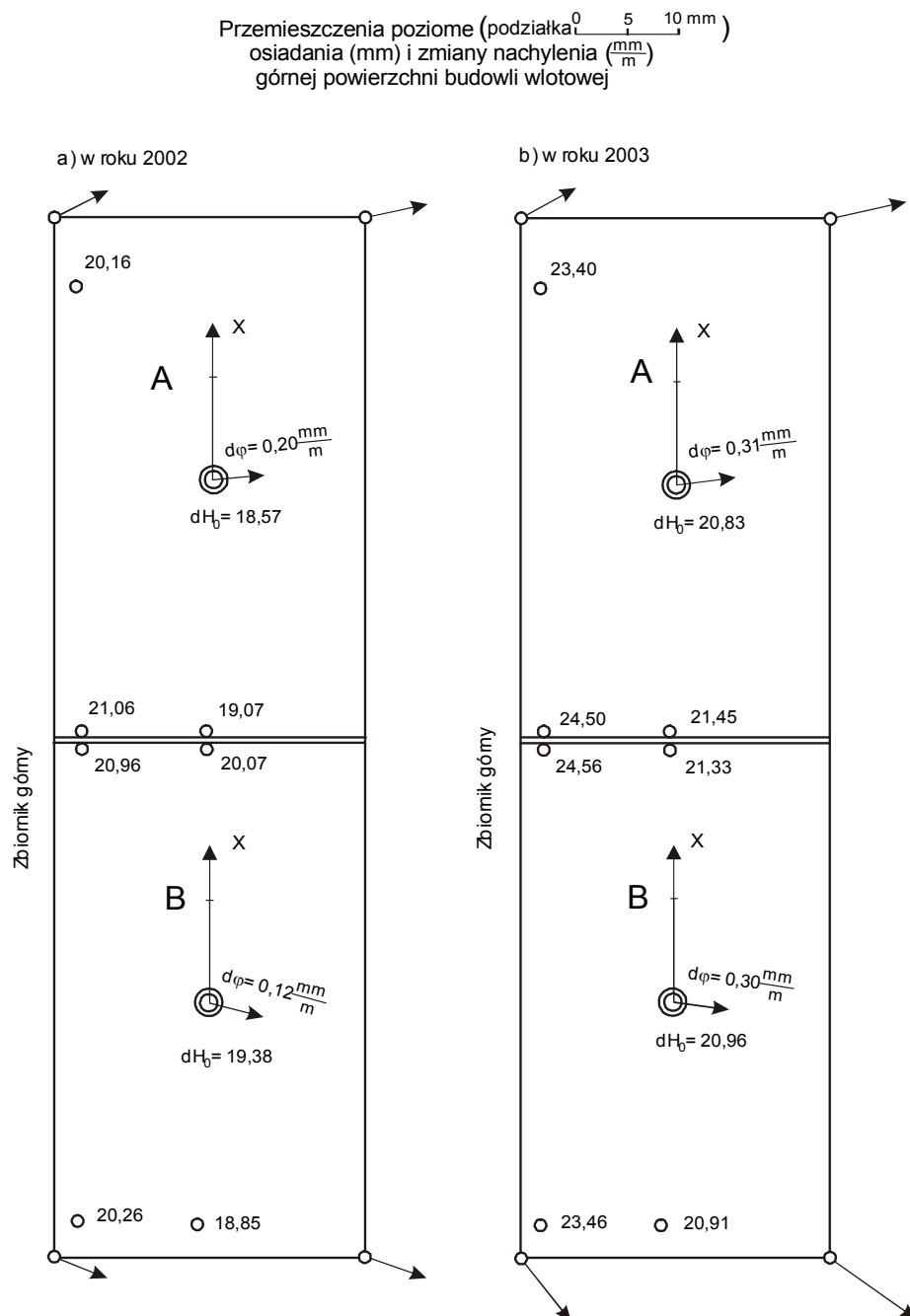
$$dH + v = -x d\varphi_x - y d\varphi_y + dH_o$$

gdzie: $d\varphi_x, d\varphi_y$ – składowe zmiany nachylenia wzdłuż osi x, y układu współrzędnych,

$d\varphi$ – zmiana nachylenia ($d\varphi^2 = d\varphi_x^2 + d\varphi_y^2$),

α – azymut kierunku zmiany nachylenia ($\alpha = \arctg d\varphi_x/d\varphi_y$)

dH_o – średnia zmiana wysokości badanej powierzchni (przemieszczenie pionowe przyjętego początku lokalnego układu współrzędnych x, y).



Rys.14

- Przeszacowania poziome i zmiany nachylenia górnej powierzchni budowli wlotowej korespondują ze sobą w tym sensie, że mogą świadczyć o zmianach nachylenia obu sekcji budowli wlotowej z obrotem wokół osi poziomych znajdujących się na poziomie zbliżonym do poziomu stopy fundamentowej. Dla upewnienia się co do zasadności tego wniosku brakuje w badaniach przeprowadzonych w latach 2002 i 2003 wyników pomiarów osiadań reperów w galerii.

Wyniki podobnych badań opartych na rezultatach pomiarów z roku 2002 pokazano na rysunku 14a.

5.5.3. Wyniki pomiarów przeszacowań komory wlotowej w 2004 roku

Jak wspomniano w punkcie 5.5.2, do lepszego rozpoznania zachowania się budowli wlotowej w latach 2002 i 2003 brakowało pomiarów pionowych przeszacowań reperów osadzonych w galerii drenażowo-kontrolnej. W kwietniu 2004 roku przy zbiorniku napełnionym do poziomu 124 m n.p.m., a następnie w maju przy zbiorniku opróżnionym wykonano pomiary i obliczenia dotyczące punktów i reperów na budowli wlotowej oraz w galeriach drenażowo-kontrolnych i u wylotu tych galerii na powierzchni terenu, otrzymując rezultaty podane w tablicy 6.

Wyznaczone w roku 2004 przeszacowania poziome, przeszacowania pionowe i zmiany nachylenia budowli wlotowej i galerii pod wpływem opróżnienia zbiornika pokazano na rysunku 15. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki dotyczące pomiarów wykonanych w galerii, zaś kolorem niebieskim wyniki pomiarów na górnej powierzchni budowli wlotowej.

Wyznaczone w roku 2004 przeszacowania poziome punktów na koronie obwałowania i na górnej powierzchni budowli wlotowej pokazano też kolorem czerwonym na rysunku 7.

Przeszacowania pionowe reperów osadzonych na górnej powierzchni i w galerii budowli wlotowej poddano dodatkowej analizie, zakładając, że budowla ta stanowi monolit nie podzielony dylatacją. W tablicy 7 zamieszczono układy równań pseudoobserwacji – przeszacowań dH reperów i wyznaczone na podstawie ich rozwiązania wartości dH_o , $d\phi_x$, $d\phi_y$ i deformacji v_{dH} powierzchni w miejscach poszczególnych reperów.

Tablica 6

Przesunięcia

Sekcja A					Sekcja B				
a) Przesunięcia poziome punktów na górnej powierzchni budowli wlotowej									
Nr pktu	$d\bar{x}$	$d\bar{y}$	$d\bar{P}$	α_{dP}	Nr pktu	$d\bar{x}$	$d\bar{y}$	$d\bar{P}$	α_{dP}
	[mm]			[°]		[mm]			[°]
101	4,3	8,9	9,9	71,3	102	-3,3	8,0	8,7	124,9
103	5,4	7,5	9,2	60,3	104	-2,6	7,6	8,0	121,0
b) Przesunięcia pionowe reperów									
Górna powierzchnia budowli wlotowej									
Nr rep.	dH	x	y	v_{dH}	Nr rep.	dH	x	y	v_{dH}
	[mm]	[m]	[m]	[mm]		[mm]	[m]	[m]	[mm]
4502	24,85	-19,60	0,00	0,00	4503	26,23	19,60	0,00	0,02
4505	27,32	15,40	-10,00	0,00	4504	24,93	-16,80	-0,80	0,03
4506	28,85	-19,60	-10,00	0,00	4507	28,94	19,60	-10,00	-0,03
					4508	27,32	-16,80	-10,00	0,03
dHo	$d\varphi_x$	$d\varphi_y$	$d\varphi$	$\alpha_{d\varphi}$	dHo	$d\varphi_x$	$d\varphi_y$	$d\varphi$	$\alpha_{d\varphi}$
[mm]	[mm/m]			[°]	[mm]	[mm/m]			[°]
23,94	0,05	0,41	0,41	92,3	25,42	-0,04	0,27	0,27	109,4
Galeria drenażowo-kontrolna w budowli wlotowej									
Nr rep.	dH	x	y	v_{dH}	Nr rep.	dH	x	y	v_{dH}
	[mm]	[m]	[m]	[mm]		[mm]	[m]	[m]	[mm]
4412	25,82	-21,20	-9,70	0,05	4404	17,15	-20,00	20,28	-0,01
4413	25,03	-2,77	-9,70	-0,04	4405	17,60	-5,45	21,53	-0,23
4414	23,83	20,64	-9,68	0,02	4406	17,29	-21,10	17,83	0,38
4415	22,16	20,83	-1,70	-0,10	4407	20,10	-20,60	8,15	-0,11
4416	19,64	20,36	8,65	0,12	4408	22,45	-21,08	-1,70	-0,14
4417	17,70	20,59	18,20	-0,10	4409	24,08	-20,44	-9,70	0,14
4418	17,03	19,36	20,30	0,16	4410	25,34	2,80	-9,70	-0,28
4419	17,68	5,71	21,52	-0,10	4411	25,49	21,59	-9,70	0,24
dHo	$d\varphi_x$	$d\varphi_y$	$d\varphi$	$\alpha_{d\varphi}$	dHo	$d\varphi_x$	$d\varphi_y$	$d\varphi$	$\alpha_{d\varphi}$
[mm]	[mm/m]			[°]	[mm]	[mm/m]			[°]
22,68	0,05	0,22	0,23	85,8	22,66	-0,04	0,24	0,24	110,5
Galeria drenażowo-kontrolna za budowlą wlotową									
Nr rep.	dH	d	$d\varphi$		Nr rep.	dH	d	$d\varphi$	
	[mm]	[m]	[mm/m]			[mm]	[m]	[mm/m]	
4418		0,00	0,21		4404		0,00	0,24	
4420	10,20	32,00	0,10		4403	8,86	34,55	0,08	
4421	6,99	62,55	0,07		4402	10,20	64,95	0,07	
4422	4,72	92,10	0,04		4401	4,59	93,13	0,02	
4425	4,55	96,95			4424	4,53	96,73		
4426	4,73	97,15			4423	4,78	97,83		

Mur oporowy – Reper nr 39136, $dH = 3,55$ mmPierwsza podpora stała rurociągów – Repery 39110–39117, $dH_{sr} = 4,11$ mm



Tablica 7

Nr rep.	$d\varphi_x$	$d\varphi_y$	dH_o	dH	v_{dH}
Górna powierzchnia budowli wlotowej					
4502	0,00	0,00	1,00	25,06	-0,50
4505	-35,00	10,00	1,00	27,53	-1,03
4506	0,00	10,00	1,00	29,16	0,82
4503	0,00	0,00	1,00	26,44	0,88
4504	36,40	0,80	1,00	25,14	-0,41
4507	0,00	10,00	1,00	29,15	0,81
4508	36,40	10,00	1,00	27,53	-0,58
	-0,0063	0,2776	25,56		
Galeria drenażowo-kontrolna w budowli wlotowej					
4412	0,00	9,70	1,00	25,82	1,06
4413	-18,43	9,70	1,00	25,03	0,29
4414	-41,84	9,68	1,00	23,83	-0,89
4415	-42,03	1,70	1,00	22,16	-0,55
4416	-41,56	-8,65	1,00	19,64	-0,47
4417	-41,79	-18,20	1,00	17,70	-0,08
4418	-40,56	-20,30	1,00	17,03	-0,15
4419	-26,91	-21,52	1,00	17,68	0,80
4404	41,59	-20,28	1,00	17,15	-0,11
4405	27,04	-21,53	1,00	17,60	0,67
4406	42,69	-17,83	1,00	17,29	-0,59
4407	42,19	-8,15	1,00	20,10	-0,21
4408	42,67	1,70	1,00	22,45	-0,34
4409	42,03	9,70	1,00	24,08	-0,72
4410	18,79	9,70	1,00	25,34	0,56
4411	0,00	9,70	1,00	25,49	0,73
	-0,0009	0,2515	22,32		

Otrzymane wyniki wskazują, że:

- górna powierzchnia budowli wlotowej traktowanej jako monolit pod wpływem opróżnienia zbiornika uległa uniesieniu o $dH_o = 25,6$ mm i zmianie nachylenia $d\varphi = 0,28$ mm/m w kierunku $\alpha = 101,44^\circ$ ze zwrotem do budynku siłowni; jednocześnie powierzchnia ta uległa deformacjom pionowym charakteryzowanym w miejscach poszczególnych reperów przez wartości v_{dH} podane w tablicy 7 i ogólnie przez wartość $m_o = 0,99$ mm;

- powierzchnia podstawy budowli wlotowej traktowanej jako monolit, utożsamiana tu z galerią drenażowo kontrolną, pod wpływem opróżnienia zbiornika uległa uniesieniu o $dH_o = 22,3$ mm i zmianie nachylenia $d\varphi = 0,25$ mm/m w kierunku $\alpha = 100,23^\circ$ ze zwrotem do budynku siłowni. Jednocześnie powierzchnia ta uległa deformacjom pionowym charakteryzowanym w miejscach poszczególnych reperów przez wartości v_{dH} i ogólnie przez wartość $m_o = 0,65$ mm.

Otrzymane wartości m_o wskazują na fakt większego zdeformowania powierzchni podstawy i górnej powierzchni budowli wlotowej traktowanej jako monolit, aniżeli przy traktowaniu jej jako składającej się z dwu niezależnie pracujących sekcji *A* i *B*, wykazujących większe sztywności, charakteryzowane w miejscach poszczególnych reperów wartościami v_{dH} wykazanymi w tablicy 6 i wartościami $m_{oA} = 0,12$ mm, $m_{oB} = 0,28$ mm. Jednocześnie wskazują one, że pod wpływem zmian poziomu wody w zbiorniku budowla wlotowa podlega zmianom nachylenia skierowanym praktycznie wzdłuż osi derywacji, przy odciążeniu ze zwrotem do budynku siłowni.

5.6. Badanie reakcji skarpy naturalnej na zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku

Wyznaczone w roku 2003 przemieszczenia poziome punktów 506–530 na koronie obwałowania i na skarpie naturalnej pod wpływem opróżnienia zbiornika od początkowego poziomu piętrzenia 124 m n.p.m. pokazano kolorem czarnym, zaś przemieszczenia poziome tych punktów wyznaczone w roku 2004 pokazano kolorem czerwonym na rysunku 7. Przemieszczenia poziome punktów na skarpie naturalnej mają kierunki zbliżone do kierunków przemieszczeń pobliskich punktów na koronie obwałowania i wartości około 2-krotnie mniejsze.

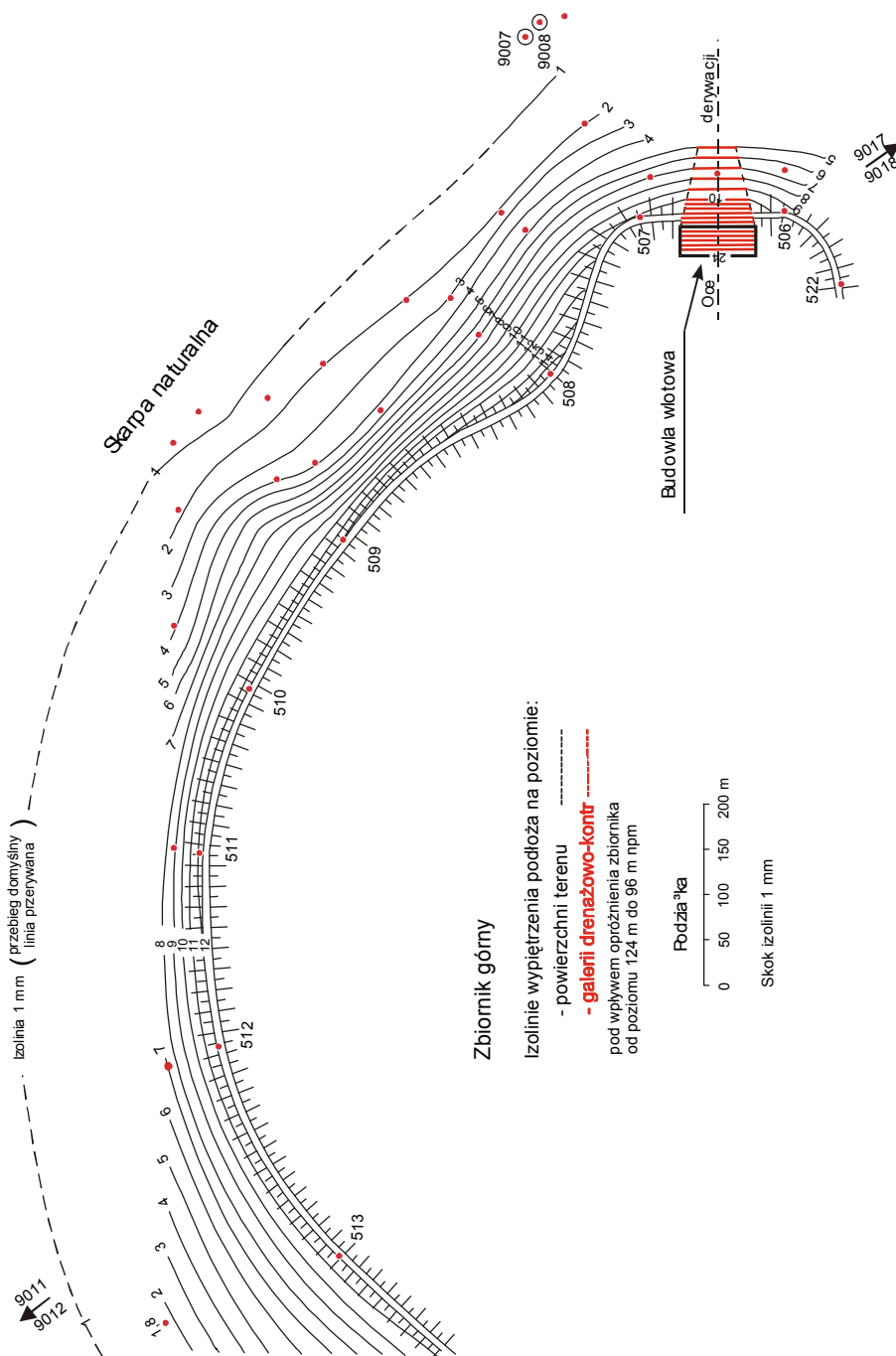
Wyznaczone w roku 2004 przemieszczenia pionowe punktów 506–522 na koronie obwałowania, punktów 523–530 i reperów na skarpie naturalnej pod wpływem opróżnienia zbiornika od początkowego poziomu piętrzenia 124 m n.p.m. zestawiono w tablicy 8.

Wyznaczone przemieszczenia pionowe wykorzystano do wyinterpolowania izolinii równych wypiętrzeń powierzchni terenu pod wpływem opróżnienia zbiornika, pokazanych na rysunku 16. Izolinie wypiętrzeń terenu w odstępach co 1 mm oznaczono kolorem czarnym, natomiast izolinie wyinterpolowane na podstawie wypiętrzeń reperów w galerii drenażowo-kontrolnej – kolorem czerwonym.

Tablica 8. Zestawienie przemieszczeń punktów i reperów na koronie obwałowania oraz na skarpie naturalnej pod wpływem opróżnienia zbiornika (obniżenia poziomu wody o 16,2 m) w okresie kwiecień 2004–maj 2004

Pkt./Rep. nr	$d\bar{x}$	$d\bar{y}$	H	dH
	[mm]		[m]	[mm]
Pkty./Rep. na koronie obwałowania				
506 (4060)	-2,4	5,8	127,9	9,59
507 (4070)	4,1	7,3	127,9	10,11
508 (4080)	8,6	6,7	128,1	15,61
509 (4090)	5,6	4,6	128,1	12,55
510 (4100)	8,7	2,1	128,1	12,67
511 (4110)	9,0	0,4	128,1	12,15
512 (4120)	9,3	-2,6	128,0	11,75
513 (4130)	7,3	-5,8	127,9	13,04
514 (4140)	2,6	-7,8	127,9	12,36
515 (4150)	0,0	-7,5	128,0	11,82
516 (4160)	-4,1	-5,3	128,1	11,07
517 (4170)	-6,2	0,4	127,3	9,98
518 (4180)	-6,4	5,8	127,5	12,17
519 (4190)	-7,8	6,3	128,0	16,27
520 (4200)	-8,1	3,0	128,0	17,14
521 (4210)	-7,8	2,0	128,0	15,57
522 (4220)	-5,8	3,3	127,8	10,15
Pkty/Rep. na skarpie naturalnej				
523 (4323)	4,7	3,8	114,2	5,01
524 (4324)	6,6	5,3	115,3	6,32
525	-0,6	5,4		
526	0,4	8,4		
527	4,8	-0,2		
528	4,2	1,2		
529 (43211)	4,9	4,6	102,7	2,85
530 (43201)	2,9	2,5	94,3	2,22

Rep. nr	x	y	H	dH
	[m]	[m]	[m]	[mm]
Rep. na skarpie naturalnej				
4062	2465	2577	110,9	6,57
4064	2542	2577	111,0	8,77
4072	2615	2573	113,3	6,62
4111	3147	1836	115,0	8,40
4122	3153	1601	110,3	7,22
4302	3030	2255	117,1	3,36
4304	2800	2444	114,3	5,72
4311	3140	2286	73,6	0,75
4312	3118	2322	74,9	0,06
4313	3040	2338	76,1	1,60
4314	2978	2378	77,7	1,92
4315	2885	2482	77,1	1,98
4316	2912	2324	113,7	4,23
4317	2991	2267	118,3	3,63
4318	2715	2754	74,6	0,80
4319	2687	2633	84,1	1,96
4320	2780	2544	94,3	2,07
4321	2833	2453	102,6	2,90
4330	3143	2089	114,9	3,58
4331	3127	2278	77,1	1,22
4332	3121	2271	79,6	1,46
4333	3122	2259	82,2	1,50
4334	3122	2252	84,7	1,64
4335	3120	2245	87,1	1,78
4336	3124	2240	89,7	1,79
4337	3125	2233	92,2	1,88
4338	3125	2227	94,6	1,89
4339	3130	2222	97,1	1,90
4340	3141	2220	99,8	1,73
9007	2737	2747	77,6	0,35
9008	2754	2737	79,0	0,36
9011	3315	1152	101,8	0,00
9012	3340	1126	102,8	-0,06
9017	2140	2664	110,4	1,05
9018	2120	2676	109,9	1,01
9099	3162	1309	108,6	1,80
43111	3135	2287	74,7	0,86
43121	3116	2323	75,0	0,30
43131	3033	2339	76,9	1,73
43141	2969	2386	77,7	2,27
43151	2887	2475	75,8	2,12
43181	2713	2752	74,2	0,38



Rys. 16

5.7. Ocena wyników eksperymentów i wnioski

5.7.1. Korona obwałowania

Przemieszczenia i wskaźniki obliczone w punktach 5.3–5.4 wskazują wyraźnie, że w latach 2001–2004 korona obwałowania w punktach sieci poziomej 508–522 (reperach 4060–4220) oraz na przekrojach poprzecznych (4060–4060a, ... , 4220–4220a) pod wpływem dużej zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku wykazywała zachowanie, które mogłoby wskazywać na zasadność hipotezy przedstawionej w punkcie 5.1.

Pod wpływem opróżnienia zbiornika od początkowego stanu napełnienia 124 m n.p.m. następowały poziome przemieszczenia punktów przy zewnętrznej krawędzi korony ze zwrotem na zewnątrz obwałowania o wartości przeciętnej 8,5 mm, uniesienia tych punktów przeciętnie o 9,6 mm i zmiany nachylenia korony na kierunkach prostopadłych do jej krawędzi skierowane na zewnątrz zbiornika o 0,15 mm/m. W poszczególnych rejonach obwałowania występowały pewne zróżnicowania wartości przemieszczeń, zwiększone zdecydowanie w rejonie punktów 509 i 520 i zmniejszone w rejonie punktów 506, 507, 516–518.

Obniżanie poziomu piętrzenia wody w zbiorniku o 1 m przynosiło w rezultacie **powiększenie** rzutu poziomego obwałowania o **0,8 ppm** i nieznaczne jego zdeformowanie o charakterze postaciowym rzędu **0,3 mm**, unoszenie się korony średnio o **0,7 mm** i zmianę nachylenia poprzecznego przekroju korony ze zwrotem **na zewnątrz** zbiornika średnio o **0,010 mm/m**.

Wyznaczenie tych wskaźników ma podwójne znaczenie użytkowe. Z jednej strony może służyć do oceny stanu podatności obwałowania na przykładane jednostkowe zmiany obciążenia, związane ze zmianami poziomu wody w zbiorniku, tj. do oceny poziomu bezpieczeństwa obiektu. Z drugiej zaś strony wskaźniki te mogą służyć do oceny zniekształceń wyników tych okresowych pomiarów przemieszczeń, które z założenia są prowadzone przy zbiorniku napełnionym, następujących wskutek nieuchronnych drobnych wahań poziomu piętrzenia wody w czasie wykonywania pomiarów.

Konfrontacja zmierzonych zmian nachylenia korony i zmierzonych poziomych przemieszczeń punktów na koronie nie daje jasnego do końca obrazu sytuacji, bowiem gdyby zmiany nachylenia

korony traktować jako reprezentatywne do oceny zmian nachylenia całego obwałowania, to wynikają z nich około 3 razy mniejsze przemieszczenia poziome aniżeli przemieszczenia zmierzone. Przy aktualnie możliwym zakresie badań trudno dociec, jaka jest przyczyna tej różnicy. Sprawa ta wymaga prowadzenia dalszych badań, być może z uwzględnieniem deformacji obwałowania w jego przekrojach poprzecznych oraz deformacji przypowierzchniowej warstwy obwałowania, w której osadzone są repery nr 4060a–4220a.

Duże zmiany poziomu piętrzenia wody wywoływały przemieszczenia i deformacje charakteryzowane wskaźnikami jednostkowymi, których wartości powtarzały się w kolejnych latach w granicach dokładności wyznaczenia. Oznacza to, że w tym czasie nie wystąpiły zmiany, które mogłyby wskazywać na trend (stopniowe powiększanie się lub zmniejszanie podatności obwałowania na zmiany obciążeń w funkcji czasu).

Można by pokusić się o sprawdzenie spełnienia hipotezy sformułowanej w p. 5.1, dotyczącej zachowania się obwałowania pod wpływem zmian obciążenia, przez wyznaczenie przemieszczeń innych punktów obwałowania, np. znajdujących się na powierzchni skarpy odpowietrznej, jednak program takiego sprawdzenia wymaga zaangażowania znacznie większych środków finansowych i sprzętu pomiarowego oraz większej liczby równocześnie pracujących zespołów pomiarowych. Na przykład pomiary pionowych przemieszczeń reperów rozmieszczonych na powierzchni skarpy odpowietrznej obwałowania są na tyle pracochłonne, że w wymaganym krótkim okresie wykonania pomiaru wyjściowego i aktualnego, przed i po zmianie poziomu piętrzenia, należałoby do tego celu zaangażować dodatkowo co najmniej 3 równocześnie pracujące zespoły pomiarowe. Pomiary poziomych przemieszczeń punktów na skarpie odpowietrznej nie są obecnie możliwe do wykonania z niezbędną dokładnością ze względu na brak koniecznych do tego słupów z płytami centrującymi.

Przeprowadzeniu prób wyznaczania przemieszczeń punktów znajdujących się w masywie obwałowania i podłożu pod obwałowaniem na przeszkodzie stoi brak możliwości zainstalowania w obwałowaniu rur inklinometrycznych i reperów wgłębnych. Zainstalowanie takich urządzeń jest możliwe praktycznie tylko w fazie budowy obwałowania ziemnego, natomiast obecnie, w fazie jego ponad 20-letniej eksploatacji byłoby to bardzo kosztowne i być może szkodliwe dla stabilności obwałowania, z uwagi na wytworzenie przy

ich instalowaniu dodatkowych dróg migracji wody w korpusie obwałowania.

Wobec ograniczonych środków przewidzianych na wykonanie niniejszego projektu, realizację szerzej traktowanego programu badań dynamicznych obwałowania trzeba odłożyć do czasu uzyskania większych środków finansowych, oraz wzniesienia kolejnego obiektu piętrzącego, na którym można by w czasie budowy zainstalować wspomniane urządzenia.

Ważne wydaje się stwierdzenie, że wartości przemieszczeń i wskaźników jednostkowych w okresie 4 lat badań nie wykazały wyraźnego trendu. Byłoby celowe w przyszłości powtarzanie tego rodzaju badań rozpatrywanego obiektu, chodzi bowiem o możliwość i potrzebę sprawdzenia, czy wskaźniki przemieszczeń jednostkowych obliczane na podstawie wyników powtarzanych pomiarów przemieszczeń będą nadal wykazywać niezmienną podatność obwałowania na zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku w długim, wieloletnim okresie eksploatacji. Stwierdzenie ewentualnych, postępujących zmian wartości wskaźników obrazujących podatność obiektu na przykładane zmienne obciążenia może być istotnym elementem oceny aktualnego stanu jego bezpieczeństwa.

5.7.2. Budowla (komora) wlotowa

Wyznaczone w latach 2002 i 2003 (omówione w p. 5.5) przemieszczenia poziome punktów 101–104 oraz przemieszczenia pionowe reperów 4502–4508 na górnej powierzchni żelbetowej budowli wlotowej wskazują na to, że pod wpływem opróżnienia zbiornika budowla ta ulegała zmianie nachylenia ze zwrotem na zewnątrz zbiornika (w kierunku siłowni). Konfrontacja poziomych i pionowych przemieszczeń punktów wskazuje, że zmiana nachylenia mogła być wynikiem obrotów obu sekcji budowli wlotowej wokół osi poziomych znajdujących się na poziomie zbliżonym do poziomu jej stopy fundamentowej. Jednocześnie jednak charakterystyczne jest, że jednostkowy wskaźnik osiadań reperów na górnej powierzchni budowli wlotowej jest ponad 2 razy większy od wskaźnika średnich osiadań korony ziemnego obwałowania zbiornika i ponad 3 razy większy od wskaźnika osiadań najbliższych punktów 506 i 507 na koronie obwałowania. Pewnym wyjaśnieniem ewentualnej przyczyny tego stanu są informacje zawarte w (Malinowski R. 1998) na temat

konstrukcji, sposobu posadowienia, rodzaju podłoża i naprężeń w podłożu pod tą budowlą.

W początkowej fazie badań nie było jasne, czy stwierdzone znacznie większe przemieszczenia pionowe górnej powierzchni budowli wlotowej aniżeli pobliskich punktów na koronie obwałowania są wynikiem większego przemieszczania całej budowli wlotowej, czy też są powodowane zmianami własnej wysokości tej budowli pod wpływem zmian termicznych. Z tego powodu w roku 2004 rozszerzono program badań dynamicznych o pomiary osiadań reperów w galerii drenazowo-kontrolnej. Konfrontacja wyników pomiarów w galerii i na górnej powierzchni budowli wlotowej wykazała, że podczas opróżniania zbiornika następuje nieznaczne tylko zwiększenie własnej wysokości budowli wlotowej, rzędu 2 mm.

Z pomiarów wykonanych w roku 2004 wynika, że:

- Podstawa sekcji A budowli wlotowej (utożsamiana tu z częścią galerii drenazowo-kontrolnej znajdującą się w tej sekcji) pod wpływem obniżenia poziomu wody od początkowego poziomu piętrzenia 124 m n.p.m. do 96 m n.p.m. uległa uniesieniu o 22,7 mm i zmianie nachylenia o 0,23 mm/m w kierunku poziomym $\alpha = 85,8^\circ$ (liczonym od osi x w prawo), zaś górna powierzchnia sekcji uległa uniesieniu o 24,0 mm i zmianie nachylenia o 0,41 mm/m w kierunku $92,3^\circ$. Wynik wyznaczenia zmiany nachylenia na poziomie galerii zasługuje na większe zaufanie, gdyż opiera się na wyznaczonych osiadaniach 8 reperów, tj. obliczeniu przemieszczenia i zmiany nachylenia z 5 pseudo-observacjami nadliczbowymi, natomiast wynik wyznaczenia na górnej powierzchni opiera się na wykorzystaniu tylko 3 istniejących tam reperów, tj. bez pseudo-observacji nadliczbowych. Nie stwierdzono znacznych deformacji pionowych korpusu sekcji w miejscach wykorzystanych reperów na poziomie galerii (największe względne przemieszczenie pionowe v_{dH} w miejscu reperu 4418 osiągnęło 0,16 mm). Sekcja uległa zwiększeniu własnej wysokości o 1,2 mm, tj. w granicach dokładności wyznaczenia.
- Średnie przemieszczenie poziome punktów 101 i 103 na górnej powierzchni sekcji A osiągnęło 9,5 mm w kierunku $\alpha = 65,8^\circ$. Wartość tego przemieszczenia wskazuje, że mogło ono być spowodowane zmianą nachylenia sekcji wokół osi poziomej na poziomie podstawy sekcji o kąt zgodny w przybliżeniu z kątem

zmiany nachylenia wyznaczonym z pionowych przemieszczeń reperów. Różnica kierunku wektora przemieszczenia poziomego w stosunku do kierunku zmiany nachylenia wyznaczonej z przemieszczeń pionowych może mieć źródło w nierównomiernym rozszerzeniu dylatacji między sekcjami i w różnicy zmian temperatury górnej i dolnej części sekcji. Wpływy termiczne są też zapewne przyczyną różnic wartości i kierunków przemieszczeń punktów 101 i 103. Nie stwierdzono przemieszczenia poziomego podstawy sekcji A.

- Podstawa sekcji B budowli wlotowej uległa uniesieniu o 22,7 mm i zmianie nachylenia o 0,24 mm/m w kierunku 110,5^g, zaś górna powierzchnia sekcji uległa uniesieniu o 25,4 mm i zmianie nachylenia o 0,27 mm/m w kierunku 109,4^g. Sekcja uległa więc zwiększeniu własnej wysokości o 2,7 mm. Deformacje pionowe korpusu sekcji w miejscach wykorzystanych reperów w galerii okazały się nieco większe niż w sekcji A (największa wartość $v_{dH} = 0,38$ mm wystąpiła w miejscu reperu 4406).
- Średnie przemieszczenie poziome punktów 102 i 104 na górnej powierzchni sekcji B osiągnęło 8,4 mm w kierunku 123,0^g. Wartość tego przemieszczenia wskazuje, że mogło ono być spowodowane zmianą nachylenia sekcji wokół osi poziomej na poziomie podstawy o 0,21 mm/m, zgodną w przybliżeniu ze zmianą nachylenia wyznaczoną z przemieszczeń pionowych reperów w galerii. Różnica poziomego kierunku wektora przemieszczenia poziomego w stosunku do kierunku zmiany nachylenia wyznaczonej z przemieszczeń pionowych może mieć również źródło w nierównomiernym rozszerzeniu dylatacji między sekcjami i różnicy zmian temperatury górnej i dolnej części sekcji. Nie stwierdzono przemieszczenia poziomego podstawy sekcji B.
- Północno-zachodni odcinek galerii drenażowo-kontrolnej poza sekcją A budowli wlotowej uległ zmianom nachylenia ze zwrotem ku siłowni; o wartości 0,21 mm/m przy budowlu wlotowej, zmniejszającej się stopniowo w miarę oddalania od zbiornika, do wartości 0,07 mm/m przy wyjściu na powierzchnię terenu.
- Południowo-wschodni odcinek galerii drenażowo-kontrolnej poza sekcją B budowli wlotowej uległ zmianom nachylenia również ze zwrotem ku siłowni; o wartości 0,24 mm/m przy budowlu wlotowej, zmniejszającej się stopniowo w miarę oddalania od

zbiornika, do wartości 0,07 mm/m przy wyjściu na powierzchnię terenu.

- Obie galerie w miejscach styków z budowlą wlotową uległy uniesieniu o 17,5 mm, zaś w miejscach wyjść obu galerii na powierzchnię terenu nastąpiło ich uniesienie o 4,5 mm.

Wykonane w roku 2004 pomiary przemieszczeń pionowych reperów w galerii wyjaśniły w pewnym stopniu zauważoną wcześniej dużą różnicę przemieszczeń pionowych górnej powierzchni budowli wlotowej i pobliskich reperów na koronie obwałowania. Okazało się mianowicie, że w częściach galerii biegnących od budowli wlotowej pod obwałowaniem, aż do wyjść na powierzchnię terenu, następują pod wpływem opróżnienia zbiornika stopniowo zmniejszające się uniesienia reperów i zmniejszające się zmiany nachylenia. Jest to wykazane w tablicy 6 i na rysunku 15. Wskazuje to, że uniesienie podłoża pod dnem, budowlą wlotową, obwałowaniem i podłoża na otaczającym terenie ma kształt czaszy wypukłej z wywiniętymi brzegami (podobnej do odwróconej miednicy). Promieniowy przekrój tej czaszy ma kształt krzywej, na której wypiętrzenia i zmiany nachylenia zmniejszają się stopniowo w miarę oddalania od zbiornika. Jest to wyraźnie widoczne na rysunku 16, gdzie w obszarze budowli wlotowej, posadowionej bliżej środka zbiornika, zmiany nachylenia (zagęszczenie izolinii wypiętrzeń) są znacznie większe, aniżeli w galeriach na zewnątrz korony.

Wyniki wykonanych pomiarów mogą wskazywać, że korona obwałowania na odcinku między galeriami drenażowo-kontrolnymi podlega większym zmianom wysokości położenia pod wpływem dużych zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku aniżeli zmiany w miejscach obserwowanych punktów 506 i 507. Z tego powodu wydaje się celowe zastabilizowanie na koronie 3 dodatkowych reperów, nad galeriami i na przecięciu korony z osią derywacji, i wyznaczanie ich przemieszczeń pionowych.

5.7.3. Skarpa naturalna

Przemieszczenia poziome pokazane na rysunku 7 oraz przemieszczenia pionowe wykorzystane do wyinterpolowania na rysunku 16 izolinii równych wypiętrzeń ilustrują zachowanie się skarpy naturalnej pod wpływem odciążenia dna zbiornika przez jego opróżnienie od początkowego poziomu piętrzenia 124 m n.p.m.

Z tablicy 8 wynika, że repery na zewnętrznej krawędzi korony w roku 2004 w poszczególnych miejscach miały wypiętrzenia w granicach od 9,6 mm do 17,1 mm, zaś cała korona miała wypiętrzenie o średniej wartości 12,6 mm. W miarę oddalania od korony na zewnątrz zbiornika, w rejonie skarpy naturalnej wypiętrzenia osadzonych tam punktów i reperów stopniowo malały. Można przyjąć, że praktycznie zanik wypiętrzenia pod wpływem odciażenia podłoża wynikający z opróżnienia zbiornika następuje w miejscu izolinii 2 mm. Oznacza to, że zasięg wpływu odciażenia na wypiętrzenia reperów nastąpił na przekroju prostopadłym do korony przechodzącym przez punkt 507 w odległości rzędu 120 m od zewnętrznej krawędzi korony, na przekroju przechodzącym przez punkt 508 w odległości rzędu 170 m od zewnętrznej krawędzi korony, na przekroju przechodzącym przez punkt 509 w odległości rzędu 170 m. Jest nieco zaskakujące, że maksymalny zasięg wpływu odciażenia zaznaczył się nie w rejonie skarpy naturalnej, lecz na kierunku prostopadłym do krawędzi korony, przechodzącym przez punkt 513. Wyniósł on na tym kierunku około 180 m. Na rysunku 16 naniesiona jest również izolinia 1 mm znajdująca się na tych przekrojach odpowiednio w odległości 180 m, 230 m, 200 m od korony i w przekroju przechodzącym przez punkt 513 w odległości 270 m. Jednak przebieg tej izolinii ustalony został częściowo ekstrapolacyjnie, (co zasygnalizowano na rysunku 16 linią przerywaną), bowiem na zewnątrz od niej nie ma na długich odcinkach reperów, na których można wyznaczyć z pomiarów wypiętrzenia zachodzące pod wpływem dużej zmiany obciążenia podłoża.

Izolinie równych wypiętrzeń mogą też służyć do wyznaczenia zmian nachylenia powierzchni pod wpływem odciażenia podłoża. Na obszarze skarpy naturalnej zmiany nachylenia, obliczone na podstawie odległości między sąsiadującymi izoliniami, są w pobliżu korony rzędu 0,10–0,15 mm/m, który to wynik jest zgodny z wynikami pomiarów zmian nachylenia korony omówionych w punkcie 5.3.3. W miarę oddalania od korony odległości między izoliniami stopniowo się zwiększają, z czego wynika, że zmiany nachylenia terenu maleją do około 0,02 mm/m w strefie zawierającej się między izoliniami o wartościach 1 mm i 2 mm. Jest godne ponownego przypomnienia, że izolinie uniesienia podstawy budowli wlotowej oznaczone na rysunku 16 kolorem czerwonym mają znacznie większe zagęszczenie, czego wyrazem i konsekwencją są zmiany nachylenia tej budowli rzędu 0,24 mm/m. Jest to niewątpliwym wynikiem usytuowania budowli wlotowej bliżej środka zbiornika aniżeli korony obwałowania.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA UŻYTE W TEKŚCIE

X, Y	– współrzędne prostokątne z wyrównania swobodnego pomiaru wyjściowego,
X', Y'	– współrzędne prostokątne z wyrównania swobodnego pomiaru aktualnego,
$\underline{x}, \underline{y}$	– współrzędne z 3-parametrowej transformacji izometrycznej współrzędnych X, Y do układu współrzędnych X', Y' ,
$\mathbf{x}, \mathbf{y}$	– współrzędne z 4-parametrowej transformacji konforemnej współrzędnych X, Y do układu współrzędnych X', Y' ,
$s - l$	– współczynnik zmiany skali obliczany z transformacji 4-parametrowej,
$d\underline{x} = X' - \underline{x}, d\underline{y} = Y' - \underline{y}$	– składowe wektora $d\underline{P}$ przemieszczenia (z transformacji 3-parametrowej),
$d\mathbf{x} = X' - \mathbf{x}, d\mathbf{y} = Y' - \mathbf{y}$	– składowe wektora $d\mathbf{P}$ przemieszczenia zredukowanego o wpływ zmiany skali (z transformacji 4-parametrowej),
$d\underline{x}_w, d\underline{y}_w$	– składowe wektora względnego przemieszczenia przy dostosowaniu do punktów ruchomych,
$d\mathbf{x}_{sw}, d\mathbf{y}_{sw}$	– składowe wektora względnego przemieszczenia zredukowanego o wpływ zmiany skali przy dostosowaniu do punktów ruchomych,
w_{Pj}	– wskaźnik jednostkowy przemieszczenia poziomego,
w_{Hj}	– wskaźnik jednostkowy przemieszczenia pionowego,
$w_{\varphi j}$	– wskaźnik jednostkowy zmiany nachylenia,
h_w	– różnica poziomów piętrzenia wody w zbiorniku,
h	– przewyższenie,
dH	– przemieszczenie pionowe,
dH_o	– przemieszczenie pionowe początku przyjętego układu współrzędnych,
$d\varphi$	– kąt zmiany nachylenia,
α	– azymut.

LITERATURA

- Barlik M., Pachuta A., Olszak T., 2003, *Gravimetric monitoring of hydro-technic objects*. PW.
- Ciesielski R.: 2001, *O zmianach stanu konstrukcji inżynierskich, ich przyczynach i sprawdzieniach pomiarowych*. Prace IGiK. z. 102.
- Grzegorzewicz K., 2002, *Obudowa ścian głębokich wykopów*. Seminarium "Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich". Warszawa 19.11.2002.
- Janusz J., 2002, *Błędy skali w sieciach liniowych do wyznaczania przemieszczeń poziomych*. Prace IGiK z.105.
- Janusz J., 2002b, *Liniowa niwelacja trygonometryczna*. Prace IGiK z.105.
- Janusz J., 2002c, *Analiza poziomych deformacji obwałowania zbiornika wodnego* (więcej niż zwykła geodezja). Geodeta 2.
- Janusz J., 2003a, *Deformacje obwałowania zbiornika wodnego w świetle wyników pomiarów geodezyjnych*. Inżynieria i Budownictwo 2.
- Janusz J., 2003b, *Wskaźniki deformacji obwałowania zbiornika wodnego*. VI konferencja AGI (Problemy Automatyzacji w Geodezji Inżynierskiej) Warszawa–Białobrzegi 27–28.03.2003b.
- Janusz J., Janusz W., Kołodziejczyk M., 2003c, *Wzorcowanie niwelatorów cyfrowych i łąt kodowych oraz łąt z podziałem równomiernym*. System komparacji łąt kodowych opracowany w IGiK w Warszawie. Seria monograficzna nr 7, IGiK, Warszawa.
- Janusz W., 1959, *Geodezyjna interpretacja wyników pomiarów przemieszczeń*. Prace IGiK t. XVI z 2 (38).
- Janusz W., 1973, *Wytyczne dotyczące techniki i organizacji prac geodezyjnych związanych z obsługą i kontrolą stanu bezpieczeństwa obiektów hydrotechnicznych*. Umowa 124/72 z Głównym Biurem Studiów i Projektów Energetycznych "Energoprojekt", Warszawa.
- Janusz W., 1974, *Opracowanie studialne zainstalowania geodezyjnej aparatury pomiarowej w obiektach elektrowni wodnej Żarnowiec*. Zlecenie PP/PG-4/6896/74 Głównego Biura Studiów i Projektów Energetycznych "Energoprojekt", Warszawa.
- Janusz W., 1976, *Transformacja współrzędnych bez zniekształceń*. Przegląd Geodezyjny 4.
- Janusz W., Janusz J. Kołodziejczyk M., 2003, *Komparator łąt kodowych*. Geodeta 9.
- Kadaj R., 1995, *GEONET – system obliczeń geodezyjnych*. Opis funkcjonalny i zasady obsługi. Rzeszów.
- Kłosiński B., 2002, *Projektowanie obudów głębokich wykopów*. Seminarium "Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich". Warszawa, 19.11.2002.

- Kwaśniak M., 1987, *Zagadnienie ruchu punktów geodezyjnych sieci inżynierskich w czasie trwania cyklu pomiarowego*. Rozprawa doktorska.
- Lazzarini T., 1961, *Geodezyjne pomiary odkształceń i ich zastosowanie w budownictwie*. PPWK Warszawa.
- Malinowski R., 1998, *Analiza stateczności i osiadań komory wlotowej EW Żarnowiec*. Towarzystwo Elektrowni Wodnych – ekspertyza –maszynopis.
- Michalak H., 2004, *O uwarunkowaniach w projektowaniu i realizacji podziemnych kondygnacji budynków w zabudowie zwartej*. Inżynieria i Budownictwo 5.
- Pęski S., Dawidowski S., 2002, *Problemy realizacji głębokich wykopów i zmian stosunków wodnych na przykładzie budynków TP.SA*. Seminarium “Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich”. Warszawa, 19.11.2002.
- Prospekt informacyjny – Elektrownia Wodna Żarnowiec.
- Prószyński W., 2001, *Teoria niezawodności jako podbudowa pojęciowa metodyki projektowania pomiarów inżynierskich*. V konferencja AGI, Warszawa 29–30.03.2001
- Szpunar R., Walo J., Olszak T., Pachuta A., 2003, *Monitoring of the water reservoir of the water-power-plant “Żarnowiec” applying RTK–GPS measurements-preliminary results*. PW.
- Szulborski K., 2002, *Awaryjne budowlane związane z głębokimi wykopami*. Seminarium “Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich”. Warszawa, 19.11.2002.
- Szulborski K., Nalewajko R., 2004, *Analiza osiadań budynku wysokościowego w Warszawie*. Inżynieria i Budownictwo 5.
- Woźniak M. 2001, *Badanie dynamicznych zmian kształtu obiektów hydrotechnicznych*. V konferencja AGI, Warszawa 29–30.03.2001.
- Woźniak M., Prószyński W., Wojciechowski J., Jastrzębski S., Walo J., Pachuta A., 2003, *Doświadczenia z badań przemieszczeń poziomych oraz zmian geometrii korony zbiornika wodnego*. VI konferencja AGI, Warszawa 27–28.03.2003.
- Woźniak M., Prószyński W., Walo J., Wojciechowski J., Jastrzębski S., Pachuta A., 2003, *Summing-up the experience from research into long-term displacements of hydrotechnical objects with regard to their short-term deformations*. PW.
- Walo J., Prószyński W., Woźniak M., Pachuta A., Szpunar R., 1999, *Sieci hybrydowe w monitorowaniu budowli wodnych na przykładzie EW Żarnowiec*. IV konferencja AGI, Warszawa 15–16.03.1999.
- Wysokiński Ł., 2002, *Badania geotechniczne przed i w trakcie wykonywania głębokich wykopów budowlanych*. Seminarium “Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich”. Warszawa, 19.11.2002.

JERZY JANUSZ
WOJCIECH JANUSZ

INVESTIGATIONS OF REACTIONS OF WATER STORAGE
RESERVOIRS TO CHANGES OF ACTING PRESSURE LOAD

S u m m a r y

Every structure is subject to geometrical changes correlated to variations in acting pressure loads. Vectors describing shifts of discrete points established on the structure can be determined on the basis of measurements of a control network, which contains discrete points of the structure as well as points in its vicinity. Such shift vectors, in conjunction with pressure load information, may serve for calculations of coefficients which characterize the susceptibility of the construction to pressures acting on it.

This work describes the technology employed in geometrical monitoring of the embankment and water inlet/outlet building of the largest in Poland storage pumping power plant. Here, shifts occur as a result of daily changes in water level in the reservoir – of app. 14 mln m³.

The following vectors and coefficients have been derived from surveys of horizontal and vertical control networks covering the embankment and water inlet/outlet building, performed under high and low water levels:

- horizontal and vertical shifts of points established on structures under investigation,
- model of geometrical changes (of scale and inclination) of these structures,
- coefficients of changes of scale and inclination of the structures per unit of change of water level,
- divergence of shift vectors from the model, pointing out regions of the embankment of lesser/greater susceptibility to pressure changes (change in water level),
- shifts of the natural terrain in vicinity of the water reservoir.

Values mentioned above have been observed once a year since 2001, demonstrating changes within the range of error of measurement. This indicates a persistent resistance of the man-made land bank and reinforced-concrete inlet/outlet building to changes in pressure.

Future surveys, such as have been described, are expected to serve as an important safety precaution – changes of values of shift vectors and individual shift vector divergence from the model can indicate altered vulnerability of the embankment and water outlet construction and should alert of heightened risk of operation of the facility.