

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

SERIA MONOGRAFICZNA NR 14

**DOSKONALENIE ZASAD I METOD KONTROLI
METROLOGICZNEJ ŁAT NIWELACYJNYCH
I GEODEZYJNEGO MONITORINGU
PRZEMIESZCZEŃ**

pod redakcją

WOJCIECHA JANUSZA

Warszawa 2008



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
Agata Ciołkosz-Styk

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 St.
Poland
e-mail: boi@igik.edu.pl

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISBN: 978-83-60024-13-3

IGiK, Warszawa 2008 r.
Skład komputerowy i druk: IGiK

Recenzenci:

część I: prof. dr hab. inż. Józef Beluch

część II: prof. dr hab. Jan Gocał

część III: prof. dr hab. Adam Żurowski

Słowa kluczowe:

do części I: komparator łat kodowych, wzorcowanie w roboczej pozycji pionowej, odchyłka systematyczna podziału, przyczyny i rodzaje uszkodzeń łat;

do części II: przemieszczenia i deformacje termiczne żelbetowej budowli monolitycznej;

do części III: obciążenia i ugięcia podłoża pod zbiornikiem wodnym i w jego otoczeniu.

Keywords:

For part I: comparator of code staffs, calibration in working vertical position, systematic deviation of graduation, reasons and types of damages of staffs

For part II: thermal displacements and deformations of ferroconcrete monolithic construction

For part III: loadings and deflections of base under water reservoir and in its surroundings

SPIS TREŚCI

Przedmowa.....	7
Część I: Komparacja zestawów: niwelator cyfrowy – lata kodowa.....	11
I.1. Wprowadzenie.....	12
I.2. Rozbudowa istniejącego komparatora lat kodowych.....	18
I.3. Procedura komparacji na rozbudowanym komparatorze.....	20
I.4. Przykłady badania współpracy lat kodowych T do niwelacji technicznej i niwelatorów cyfrowych DL101C.....	27
I.5. Przykłady badania współpracy lat kodowych do niwelacji precyzyjnej i niwelatorów cyfrowych.....	32
I.6. Analiza przyczynowo-skutkowa wyników komparacji lat do niwelacji precyzyjnej.....	37
Część II: Badanie przemieszczeń, deformacji i zmian termicznych komory wlotowej szczytowo–pompowej elektrowni wodnej “Żarnowiec” pod wpływem opróżniania zbiornika wodnego.....	53
II.1. Wprowadzenie.....	53
II.2. Charakterystyka budowli, przedmiot i zakres wykonanych prac pomiarowych.....	54
II.3. Przemieszczenia poziome punktów, przemieszczenia i deformacje poziome górnej powierzchni budowli wlotowej.....	56
II.4. Przemieszczenia pionowe reperów, przemieszczenia i deformacje pionowe górnej powierzchni budowli wlotowej.....	61
II.5. Przemieszczenia pionowe reperów, przemieszczenia pionowe i deformacje dolnej powierzchni budowli wlotowej.....	63
II.6. Wykorzystanie wyznaczonych parametrów przemieszczeń.....	64
Część III. Wstępne badanie ugięć podłoża pod dnem zbiornika wodnego.....	69
III.1. Wprowadzenie – wyniki badania ugięć podłoża w otoczeniu zbiornika wodnego.....	69
III.2. Koncepcja metody wyznaczania ugięć podłoża na obszarze zbiornika wodnego.....	74
III.3. Realizacja koncepcji.....	75
Streszczenia poszczególnych części w języku angielskim.....	82

CONTENTS

Introduction.....	7
Part I: Calibration of the sets: digital level – code staff.....	11
I.1. Introduction.....	12
I.2. Improvement of the existing comparator of code staffs.....	18
I.3. Procedure of calibration using the improved comparator.....	20
I.4. Examples of examining joint use of code staffs T for technical leveling and digital levels DL101C.....	27
I.5. Examples of examining joint use of code staffs for precise leveling and digital levels.....	32
I.6. Cause and effect analysis of the results of calibration of codes for precise leveling.....	37
Part II: Examination of displacements, deformations and thermal changes of intake chamber of pumped-storage power station “Zarnowiec” due to emptying water reservoir.....	53
II.1. Introduction.....	53
II.2. Characteristics of construction, subject and scope of measurement works.....	54
II.3. Horizontal displacements of points, horizontal displacements and deformations of upper surface of intake construction.....	56
II.4. Vertical displacements of benchmarks, vertical displacements and deformations of upper surface of intake construction.....	61
II.5. Vertical displacements of benchmarks, vertical displacements and deformations of lower surface of intake construction.....	63
II.6. Use of the determined parameters of displacements.....	64
Part III. Preliminary examination of deflection of base under water reservoir.....	69
III.1. Introduction – results of examination concerning deflection of base in the surroundings of water reservoir.....	69
III.2. Concept of the method for determining deflection of base at the area of water reservoir.....	74
III.3. Concept implementation.....	75
Summaries.....	82

JERZY JANUSZ

WOJCIECH JANUSZ

ANDRZEJ KALIŃSKI

DOSKONALENIE ZASAD I METOD KONTROLI METROLOGICZNEJ ŁAT NIWELACYJNYCH I GEODEZYJNEGO MONITORINGU PRZEMIESZCZEŃ

PRZEDMOWA

Niniejsze opracowanie monograficzne składa się z trzech części, które na pierwszy rzut oka mogą sprawiać wrażenie odrębnych opracowań, nie mających ze sobą ścisłego związku tematycznego. Zwłaszcza wrażenie takie może robić pierwsza część opracowania, dotycząca laboratoryjnej, metrologicznej kontroli niwelatorów i łat stosowanych w niwelacji precyzyjnej, pozornie odbiegająca tematem od dwu pozostałych części, mających związek z wykonaniem pomiarów przemieszczeń punktów oraz analizą i wykorzystaniem wyników tych pomiarów. Wymieńmy przeto części opracowania, poszukajmy związków między nimi i zastanówmy się, czy rzeczywiście wrażenie braku takich związków ma podstawy:

- część I – Komparacja zestawów: niwelator cyfrowy – łata kodowa. Prace konstrukcyjno-badawcze, pomiary, interpretacja wyników;
- część II – Badanie przemieszczeń, deformacji i zmian termicznych komory wlotowej w szczytowo-pompowej Elektrowni Wodnej „Żarnowiec” pod wpływem opróżniania zbiornika wodnego;
- część III – Wstępne badanie ugięć podłoża pod dnem zbiornika wodnego.

ad. części I. Nie popełnimy dużego błędu szacując, że około 80% prac w zakresie geodezyjnego monitoringu przemieszczeń dotyczy wyznaczania pionowych przemieszczeń reperów, rozmieszczonych na kontrolowanych obiektach. Jest to podyktowane faktem, że przemieszczenia i deformacje fundamentów kontrolowanych budowli wynikają głównie z nierównomiernych osiadań podłoża i z tego powodu stanowią obszar głównego zainteresowania projektantów i wykonawców wznoszonych budowli oraz ich opiekunów w okresie eksploatacji.

Podstawową metodą wyznaczania przemieszczeń pionowych jest geometryczna niwelacja precyzyjna. Jej dokładność zależy w głównym stopniu od jakości i stanu technicznego stosowanych niwelatorów i łąt. W literaturze dotyczącej pomiarów wysokościowych dominują zdecydowanie rozważania na temat badania stanu technicznego niwelatorów, natomiast temat zagwarantowania stabilności jednostki długości podziału łąt jak też wprowadzania ewentualnych poprawek aktualizujących jednostkę długości jest znacznie mniej doceniany.

Wśród wykonawców pomiarów niwelacyjnych do celu monitoringu przemieszczeń rozpowszechniony jest pogląd, że długość podziału naniesionego na taśmie inwarowej łąty do niwelacji precyzyjnej może podlegać zmianom pod wpływem wstrząsów transportowych. Jest to zapewne pogląd uzasadniony, jednak prowadzi większość wykonawców do wniosku, że należy unikać komparowania łąt, bowiem w tym celu trzeba je transportować do znacznie oddalonego laboratorium komparacyjnego i poddawać wstrząsom transportowym. Sprawa nie jest łatwa, jednak wiele wskazuje, że unikanie kontroli nie jest dobrą drogą do zagwarantowania niezmienności jednostki długości podziału. Wynika to z faktu, że nawet ograniczając przewozy łąt i posługując się łątami jedynie na obiekcie monitoringu mamy wiele okazji do poddawania łąt wstrząsom i innym działaniom powodującym zmiany długości podziału. Wobec obaw co do zmienności długości podziału pod wpływem wstrząsów łąt nie należy więc rezygnować z kontroli podziału a raczej wzmoczyć kontrolę przez wykonywanie jej nie tylko przed zamierzonym pomiarem na kontrolowanym obiekcie ale również ponownie, po zakończeniu pomiaru. Wskazują na to przeprowadzone analizy zbioru wyników wieloletnich pomiarów przemieszczeń niektórych wysokich budowli hydrotechnicznych. Dowodzą one, że w wielu przypadkach powstają poważne wątpliwości, czy uzyskane wyniki świadczą, że rzeczywiście nastąpiły przemieszczenia takie jak pomierzono i obliczono, czy też wyznaczone przemieszczenia są znacznie zniekształcone przez zmiany stanu technicznego stosowanych przyrządów pomiarowych, a zwłaszcza przez zmiany długości podziału łąt do niwelacji precyzyjnej. Okazało się, że szczególnie drastycznie wygląda sytuacja w przypadku, gdy w trakcie wieloletniego monitoringu przemieszczeń obiektu następuje, na ogół w wyniku działania przepisów o przetargowym pozyskiwaniu wykonawców prac pomiarowych, zmiana wykonawców monitoringu, przeprowadzana bez niezbędnych czynności gwarantujących zachowanie ciągłości wyznaczeń. Zmianie wykonawcy pomiarów towarzyszy z reguły zmiana kompletu instrumentów i łąt, które często, wskutek obawy przed wstrząsami transportowymi, nie podlegały żadnej kontroli metrologicznej.

Trzeba powiedzieć, że przypadki takie mają znikomą szkodliwość dla monitoringu, gdy wszystkie repery sieci kontrolnej obiektu znajdują się na nieznacznie różniących się wysokościach, nie przekraczających kilku metrów. Natomiast szkody mogą się stać poważne w przypadku kontrolowania np. wysokich obiektów hydrotechnicznych, gdzie repery sieci kontrolnej

rozmieszczone są na znacznie zróżnicowanych wysokościach, często przekraczających 100 metrów. Wówczas, z powodu następujących zmian długości podziału stosowanych łąt lub różnic długości podziałów łąt zmienionych i stosowanych dotychczas, nieusunięte zmiany systematyczne podziału mogą wywoływać systematyczne błędy wyznaczonych przemieszczeń sięgające kilku milimetrów.

Dodamy, że jeśli nawet wykonawcy monitoringów przemieszczeń dadzą się skłonić do zwracania większej uwagi na zagwarantowanie stabilności długości podziałów łąt przez poddawanie ich okresowemu komparowaniu, to sytuacja może nie ulec jeszcze radykalnej poprawie. Mamy bowiem do czynienia z obowiązkiem prowadzenia w jednolitym układzie odniesienia wieloletnich monitoringów przemieszczeń wielu obiektów hydrotechnicznych, z których niektóre rozpoczęły się w latach 50-tych ubiegłego stulecia i trwają nadal. W tym czasie nastąpiły znaczne zmiany i ulepszenia metod komparacji łąt, a także nastąpiło lepsze rozpoznanie znaczenia osiąganych wyników. Powstały też nowe rozwiązania w postaci niwelatorów cyfrowych i łąt kodowych, prowadzące do zastąpienia (lub równoległego stosowania) z tradycyjnymi niwelatorami i łątami mającymi podział równomierny. Wprowadzenie niwelatorów cyfrowych i łąt kodowych nastąpiło pod koniec lat 80-tych ubiegłego stulecia i od tego czasu nadal trwa dopracowywanie systemu ich komparacji, które może powodować pewne niejednoznaczności w redukowaniu wyników pomiarów do systemu metrycznego. Dlatego ważne jest również śledzenie postępu w tej sprawie i zdawanie sobie sprawy z tego, że wyniki wcześniej wykonywanych komparacji mogą nie być całkiem porównywalne z wynikami komparacji wykonywanych aktualnie.

Reasumując możemy powiedzieć, że świadoma kontrola metrologiczna łąt i niwelatorów ma ścisły związek z odpowiedzialnym wykonywaniem monitoringu osiadań budowli i utrzymywaniem porównywalności ich wyników w długim czasie. Ma też istotne znaczenie dla oceny wartości wyznaczeń przedstawionych w II i III części niniejszego opracowania, są tam bowiem opisane analizy przemieszczeń wyznaczonych w sieci wysokościowej, w której stałe repery odniesienia rozmieszczone są o 50 – 100 metrów niżej aniżeli repery kontrolowane, których przemieszczenia są przedmiotem analiz. W związku z tym ewentualne, niedostrzeżone zmiany długości podziału łąt stosowanych w kolejnych pomiarach okresowych mogłyby przynieść poważne zniekształcenia wyznaczanych przemieszczeń i prowadzić do błędnych wniosków.

ad. części II. W większości przypadków geodeta prowadzący monitoring przemieszczeń poprzestaje na wyznaczeniu przemieszczeń kontrolowanych punktów i reperów nie próbując przedstawić swoich wniosków na temat przemieszczania się i odkształcania całego obiektu lub jego części, na której zlokalizowane są te punkty i repery. Temat ten jest dosyć kontrowersyjny, bowiem wielu geodetów obawia się, że przedstawiając swe wnioski dotyczące zachowania się nie tylko punktów i reperów, ale całego obiektu, na którym są

one zlokalizowane, mogliby wkroczyć w zakres kompetencji odbiorców wyników monitoringu – geotechników i konstruktorów budowli. Z drugiej jednak strony takie ograniczanie się tylko do wyznaczania przemieszczeń punktów i reperów powoduje, że cały szereg ważnych informacji o geometrycznych cechach zachowania się obiektu badań pozostaje nieujawniona. Trudno bowiem liczyć na to, że specjalista z zakresu geotechniki i konstrukcji budowli, koncentrujący uwagę głównie na aspektach związanych z budową podłoża budowli i cechami wytrzymałościowymi konstrukcji budowli zauważy i zdoła przeanalizować wszystkie nasuwające się aspekty natury geometrycznej, bliższe wiedzy i doświadczeniu geodety. Doświadczenie wskazuje, że geotechnicy i konstruktorzy na ogół chętnie korzystają z informacji o charakterze geometrycznym nie ograniczających się do przemieszczeń punktów i reperów lecz rozszerzonych o ocenę zmian geometrycznych, jakim podlega obiekt badań. Oczywiście geodeta powinien przy tym zachować daleko idącą ostrożność, unikając zbyt zdecydowanego formułowania ocen wykraczających poza sferę zauważonych zmian geometrycznych. W części II pokazano przykład wykorzystania wyników pomiarów przemieszczeń punktów i reperów rozmieszczonych na i w masywnej, żelbetowej budowli do oceny zachodzących w niej zmian geometrycznych i termicznych. Tego rodzaju oceny mogą nie być całkiem słuszne, lecz stanowią dobrą podstawę do dyskusji geodety z geotechnikiem i konstruktorem i do wspólnego dochodzenia do oceny charakteru, przyczyn i skutków określonego zachowania się obiektu badań.

ad. części III. Geodezyjny monitoring bezpieczeństwa obiektu badań jest ograniczony do wyznaczania przemieszczeń punktów i reperów dostępnych do pomiarów. W wielu przypadkach spotykamy się z pytaniami, czy jesteśmy w stanie wyznaczyć przemieszczenia wewnątrz korpusu budowli lub w innych miejscach interesujących geotechnika i konstruktora. Jednym z takich miejsc jest dno i podłoże pod dnem zbiornika wodnego a także podłoże pod dnem wykopu budowlanego. W tej części opracowania opisany jest eksperyment związany z wyznaczaniem osiadań dna zbiornika wodnego pod wpływem zmian obciążenia dna, spowodowanych zmianą poziomu piętrzenia wody. W eksperymencie tym wykorzystano maszt stalowy ustawiony na dnie opróżnionego zbiornika, którego wierzchołek jest widoczny z obwałowania również po napełnieniu zbiornika. Jest to przykład wskazujący na celowość i ukazujący możliwość rozszerzania zakresu geodezyjnego monitoringu przemieszczeń eksploatowanych budowli.

WOJCIECH JANUSZ

Instytut Geodezji i Kartografii

Część I

**KOMPARACJA ZESTAWÓW:
NIWELATOR CYFROWY – ŁATA KODOWA¹**

Prace konstrukcyjno-badawcze, pomiary, interpretacja wyników

ZARYS TREŚCI: Opisano przebieg prac nad budową komparatora do sprawdzania w pozycji pionowej łat kodowych z użyciem niwelatorów cyfrowych. W roku 2002 w Zakładzie Geodezji Stosowanej IGiK zbudowano komparator przystosowany do komparowania łat z użyciem interferometru laserowego, nieruchomej łaty i przemieszczanego pionowo niwelatora cyfrowego. W roku 2003 przebudowano komparator w następujący sposób: niwelator cyfrowy został unieruchomiony, zaś przemieszczaniu podlegała łata, przy czym dolna część łaty 3-metrowej była komparowana w jej normalnej pozycji, natomiast górna część w pozycji odwrotnej z jednoczesnym wprowadzeniem inwersu odczytów niwelatora cyfrowego.

W roku 2007 rozbudowano komparator w taki sposób, że cała łata może być na nim komparowana w normalnej pozycji pionowej. Rozbudowa ta została dokonana, mimo uzyskiwania na komparatorze w wersji poprzedniej (z roku 2003) poprawnych wyników komparacji łat. Rozbudowie przyświecało jednak dążenie do uzyskania pewności, że wyniki komparacji nie są obciążone ewentualnymi wadami konstrukcji komparatora i procedury komparacji.

Przedstawiono procedurę komparowania łat oraz przykładowe wyniki komparacji łat do niwelacji technicznej i precyzyjnej. Omówiono problemy analizy przyczynowo-skutkowej wyników komparacji tych łat, które wykazały nadmierne błędy przypadkowe i systematyczne podziału, podano również wnioski dotyczące ochrony łat przed uszkodzeniami oraz dotyczące posługiwania się łatami przy pomiarach w terenie.

¹ Opracowano w ramach Projektu Badawczo-Rozwojowego R 090 29 01 (PR1) pt. „Krajowy System Oceny Zgodności w Geodezji i Kartografii, spełniający wymagania norm ISO”.

I.1. WPROWADZENIE

Problem 1

W roku 2002 Zakład Geodezji Stosowanej IGiK rozpoczął prace nad zaprojektowaniem i wykonaniem systemu komparacji łąt kodowych spełniające tezę, że nie można poprzestawać na sprawdzaniu cech metrologicznych łąt, lecz konieczne jest sprawdzanie cech metrologicznych rezultatów pracy przy użyciu niwelatorów cyfrowych odczytujących samoczynnie łąty kodowe. Chodziło więc o sprawdzanie efektów stosowania zespołu niwelator cyfrowy – łąta kodowa zamiast praktykowanego wówczas w niektórych laboratoriach sprawdzania samych tylko łąt kodowych. Teza taka została sformułowana i jest podtrzymywana w kilku publikacjach zagranicznych (w tym: Maurer, Schadelbach, 1995; Rueger, Brunner, 2000; Woschitz, Brunner, 2002 (a) i (b); Takalo, Rouchianen, 2002, 2004), w których uzasadniono potrzebę jednoczesnego sprawdzania metryczności podziału łąt kodowych i „umiejętności” dobrego ich samoczynnego odczytywania i przetwarzania odczytów do systemu metrycznego przez niwelatory cyfrowe. Nasze doświadczenia w tym zakresie, a zwłaszcza stwierdzenie występowania znacznych błędów odczytów dokonywanych przez niwelator cyfrowy w miejscach zabrudzeń i zatarć podziału łąty, całkowicie potwierdziły słusność tej tezy.

Problem 2

Od dłuższego czasu w środowisku geodezyjnym trwa dyskusja na temat pozycji, jaką łąta powinna zajmować w czasie komparacji. Wiele laboratoriów dysponuje komparatorami, na których sprawdza się łąty w pozycji poziomej, jest to bowiem łatwiejsze, biorąc pod uwagę konstrukcję komparatora, przebieg prac komparacyjnych oraz przestrzeń, jaką się dysponuje (możliwe jest wówczas umieszczenie komparatora w jednokondygnacyjnym pomieszczeniu o wysokości rzędu 3 m). Wysuwany jest jednak argument, że sprawdzaniu powinna podlegać łąta zajmująca pozycję pionową, tj. taką samą, jak przy pomiarach, wówczas bowiem sprawdzenie łąty następuje w warunkach zbliżonych do warunków jej pracy, a ponadto taśma inwarowa jest w mniejszym stopniu narażona na zakłócenia jej rozszerzalności termicznej wskutek przylegania do korpusu łąty i pociągania taśmy przez ten korpus wskutek zmian temperatury. Zjawisko takie może zachodzić wskutek tego, że korpus łąty ma wielokrotnie większy współczynnik rozszerzalności termicznej niż taśma inwarowa, na której naniesiony jest podział (Janusz J., 1989, 1991). Ponadto w pozycji pionowej taśma inwarowa może być w większym stopniu prostoliniowa. To jednak nie zawsze zachodzi, zwłaszcza w łątach znacznie zużytych, których drewniane korpusy uległy wypaczeniu i wygięciu, zaś korpusy aluminiowe miejscowemu załamaniu kątowemu wskutek ewentualnych

uderzeń lub zbyt silnych dokręceń śrub mocujących osprzęt (Beluch, Frukacz, Mróz, Pokrzywa, Szczutko, 2005).

W pracy *Niwelacja precyzyjna* (1993, st. 335) podano informacje, które wskazują, że długość podziału usytuowanego poziomo jest większa od długości podziału usytuowanego pionowo, choć wyznaczone wówczas różnice, dotyczące łąt z podziałem w układzie metrycznym, przekraczały nieznacznie błędy wyznaczenia. Według powyższej pracy stosowana siła naciągu taśmy w łątach jest zbliżona do 20 kG, zaś powierzchnia przekroju poprzecznego taśmy jest rzędu 15 mm². Z tego wynika, że strzałka zwisu swobodnie, poziomo rozwieszanej taśmy inwarowej o długości 3 m mogłaby osiągać wartość rzędu 6,5 mm zaś taśmy inwarowej o długości 2 m – wartość rzędu 3,0 mm, przy ułożeniu się taśmy w przybliżeniu wzdłuż krzywej łańcuchowej. Biorąc pod uwagę wymiary kanału w korpusie łąty przeznaczonego na taśmę inwarową i stosowany sposób podparcia łąty podczas komparowania w pozycji poziomej, minimalizujący zwisy korpusu łąty (zob. *Niwelacja precyzyjna*, 1993), trzeba stwierdzić, że taśma inwarowa łąty podczas komparacji w pozycji poziomej nie zwisa swobodnie, lecz spoczywa prawie całą swą powierzchnią na powierzchni kanału lub na podpórkach. Uwzględniając własny ciężar taśmy inwarowej możemy ocenić wynikającą z tego siłę przylegania taśmy do korpusu jako znikomo małą (naprężenie rzędu 0,4 G/cm²). Możliwe jest ukształtowanie linii zwisu korpusu łąty usytuowanej poziomo, wzdłuż krzywej łańcuchowej o strzałce zwisu takiej, jaką osiąga taśma inwarowa, przez podparcie korpusu w punktach początkowym i końcowym oraz odpowiednie dociążenie na środku, wskutek czego można by jeszcze bardziej zminimalizować siłę przylegania taśmy do powierzchni korpusu. Wówczas jednak występuje nadmierna różnica między długością podziału ułożonego wzdłuż krzywej łańcuchowej i długością cięciwy, w związku z czym „mniejszym złem” pozostaje przy stosowanym sposobie podparcia korpusu spoczywanie taśmy na powierzchni kanału.

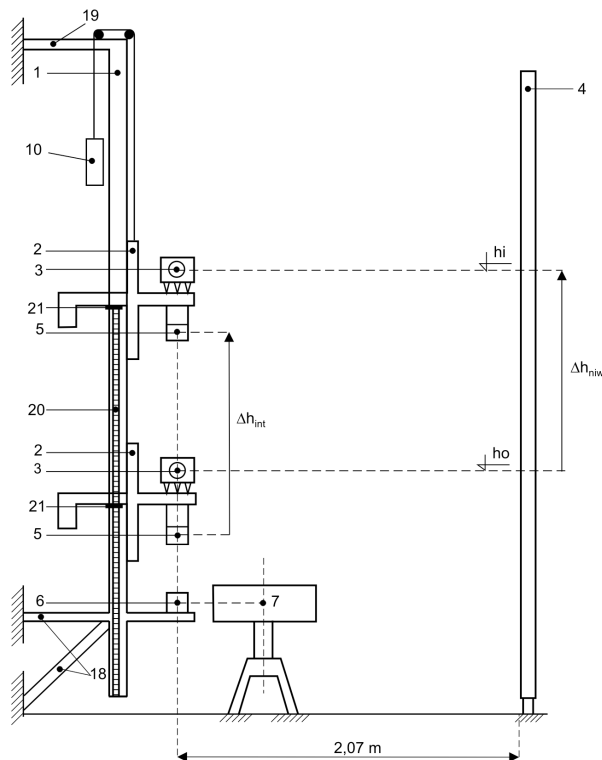
O stopniu sprzęgnięcia taśmy inwarowej z korpusem łąty decyduje nie tylko siła jej przylegania do korpusu, ale również stopień „szorstkości” powierzchni przylegania, a po pewnym czasie użytkowania łąt i związanego z tym zabrudzenia powierzchni również stopień „lepkości” nawarstwionych osadów. Wyniki badań statystycznych dotyczących wielu łąt (Maurer, Schadelbach, 1995; Woschitz, Brunner, 2002) wskazują, że średnia różnica długości podziału znajdującego się w pozycji poziomej i pionowej jest znikomo mała – bez praktycznego znaczenia. Jednak przy badaniu poszczególnych egzemplarzy łąt różnice te mogą osiągać wartości mające wpływ na wynik komparacji i pomiarów terenowych, zwłaszcza w przypadku łąt znacznie zużytych i zabrudzonych. Istotne znaczenie może tu mieć wspomniany wyżej stopień lepkości osadów tworzących się na powierzchni przylegania taśmy do kanału w korpusie łąty, który zależy od warunków środowiska, w jakim wykonywane są pomiary (może to być istotne np. przy pomiarach w rejonach

przemysłowych, w których występuje duże zapylenie i zanieczyszczenie atmosfery różnymi substancjami).

Z tego wynika, że dobrze jest dysponować możliwością sprawdzania łąt w obu pozycjach, bowiem wówczas powstają warunki do wykrywania przyczyn rozbieżności między ich wynikami i wykrywania ewentualnych wad sprawdzanej łąty.

W momencie podjęcia tych prac w IGiK nie istniał w Polsce pionowy komparator przystosowany do sprawdzania łąt kodowych z użyciem niwelatorów cyfrowych, przyjęto przeto, że projektowany i wykonywany w Zakładzie Geodezji Stosowanej interferometryczny komparator zespołu niwelator cyfrowy – łąta kodowa powinien być przystosowany do komparacji w pionowej pozycji łąt.

W roku 2002 zaprojektowano i wykonano w IGiK pionowy komparator zestawu „niwelator cyfrowy – łąta kodowa” przy użyciu wzorca w postaci długości fali emitowanej przez interferometr laserowy. W komparatorze tym łąta była nieruchoma, natomiast pionowym przemieszczeniom wzdłuż podziału łąty podlegał niwelator cyfrowy, wykonujący w ustalonych odstępach odczyty na łącie.



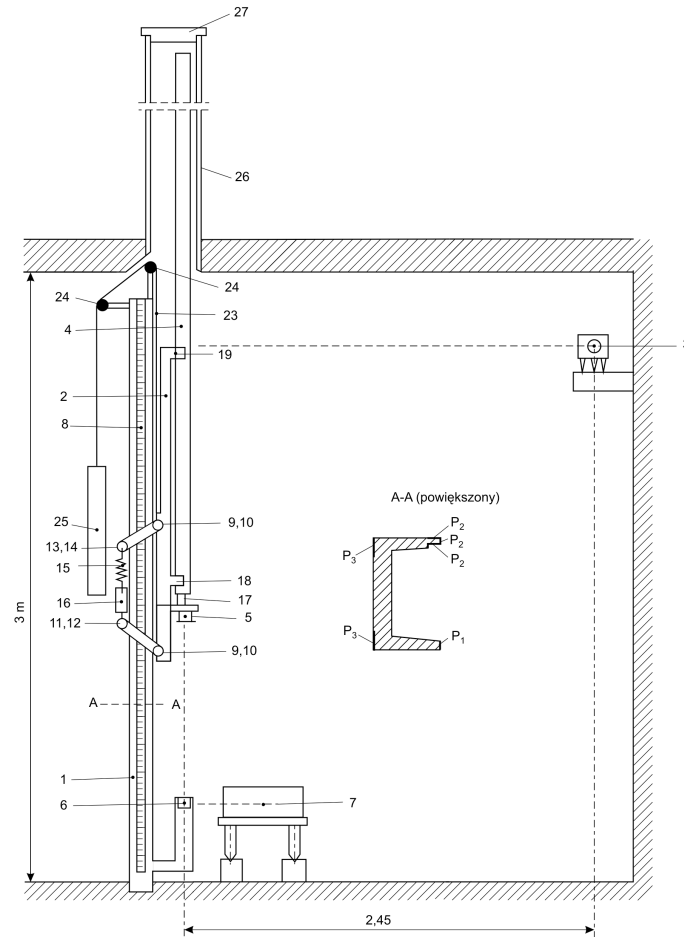
Rys. I.1. Schemat konstrukcyjny komparatora z roku 2002

Taki wariant budowy komparatora podyktowany był faktem, że wówczas, w pomieszczeniu Zakładu Geodezji IGiK przy ul. Chocimskiej nie dysponowaliśmy miejscem, w którym łąta mogłaby być przesuwana pionowo a dysponowaliśmy jedynie pomieszczeniem o wysokości 3,05 m, w którym łąta o długości 3 m mogła być ustawiona nieruchomo w pozycji pionowej. Komparacja podziału łąty polegała na tym, że przemieszczenia niwelatora wzdłuż podziału łąty były mierzone jako różnice odczytów wykonanych niwelatorem na łącie, a równocześnie przemieszczenia te były mierzone wzorcowym interferometrem laserowym. Opis tego komparatora i opis posługiwania się nim zawarty jest w pracy *System komparacji...* (Janusz J., Janusz W., Kołodziejczyk, 2003). Schemat konstrukcyjny takiego komparatora podany jest w w/w pracy na rysunku 2 (tutaj pokazany na rysunku I.1).

W roku 2003 po przeprowadzeniu serii badań łąt stwierdzono, że korzystniejsze będzie stosowanie komparatora, w którym niwelator cyfrowy jest unieruchomiony, natomiast pionowym przemieszczeniom wzdłuż osi podziału podlega łąta kodowa, przy czym jej przemieszczenia są mierzone równocześnie niwelatorem cyfrowym i wzorcowym interferometrem laserowym. Wyższość tego rozwiązania wynika z faktu, że przy przemieszczaniu niwelatora mogą następować pewne niewielkie zmiany jego nachylenia w granicach zakresu kompensatora, wywołujące minimalne, lecz wyczuwalne różnice wysokości osi celowej.

W związku z tym zaprojektowano i wykonano komparator oparty na zasadzie „nieruchomego niwelatora i przemieszczającej się łąty”. Jego opis i wyniki stosowania opisane są w pracy *Wstępne badanie zestawów łąt kodowych...* (Janusz J., Janusz W., Kaliński, Kołodziejczyk, Toruński, 2004) Schemat konstrukcyjny tego niwelatora pokazany jest w pracy *Wstępne badanie zestawów łąt kodowych...* na rysunku 2.

Możliwość wykonania komparatora opartego na tej zasadzie powstała po przeniesieniu Instytutu Geodezji i Kartografii do budynku przy ul. Modzelewskiego 27, w którym można było wykonać w stropie laboratorium komparacyjnego otwór umożliwiający pionowe przesuwanie łąty do pomieszczenia znajdującego się nad laboratorium, należącego również do Instytutu, jak to pokazuje wspomniany w pracy *Wstępne badanie zestawów...* (Janusz J., Janusz W., Kaliński, Kołodziejczyk, Toruński, 2004) rysunek 2 (tutaj rysunek I.2).



Rys. I.2. Schemat konstrukcyjny komparatora z roku 2003

Zgodnie z rysunkiem I.2 ze stanowiska niwelatora (3) znajdującego się 0,4 m poniżej sufitu laboratorium można wykonywać odczyty na łacie przesuwanej w zakresie od początku podziału łaty do odczytu 2,05 m, natomiast odczyty w zakresie od 1,95 m do końca podziału łaty 3-metrowej można wykonywać z tego stanowiska po odwróceniu łaty stopką do góry i ustawieniu jej na reperze (17) obudową górnej głowicy oraz po zaprogramowaniu wykonywania przez niwelator odczytów w odwrotnej pozycji łaty. W obydwu położeniach łaty wykonuje się odczyty graniczne na poziomie 2,05 m oraz dodatkowo „na zakładkę” sprawdzanych odcinków podziału na poziomie 1,95 m tak, aby można było sprawdzić stopień poprawności odczytów w pobliżu styku odcinków i dokonać wyrównania przy doprowadzaniu wszystkich odczytów z obu odcinków podziału do jednego układu odniesienia. Tak więc możliwe było pełne wykonanie procesu komparacji łat 2-metrowych w normalnej pozycji pio-

nowej, natomiast łąaty 3-metrowe musiały być komparowane w podziale na dwa odcinki, z których odcinek niższy podziału łąaty komparowany był w jej normalnej pozycji pionowej, natomiast odcinek wyższy w odwrotnej pozycji łąaty z ustawieniem jej na reperze (17) górną głowicą zamiast stopką.

Niekorzystną cechą komparacji wyższego odcinka podziału przy odwróceniu łąaty „do góry nogami” była możliwość samoczynnej zmiany długości i przemieszczania podziału w czasie komparacji wzdłuż osi łąaty wskutek potencjalnych zagrożeń:

- ewentualnych zmian temperatury aluminiowego, fiberglasowego lub drewnianego korpusu łąaty,
- zgniatania przez reper (17) opierającej się na nim warstwy lakieru pokrywającego obudowę górnej głowicy i powodowanego tym przemieszczania łąaty,
- zmiany siły naciągu taśmy iwarowej o około 1%, która może zmienić długość podziału o około 1 $\mu\text{m/m}$.

Te zagrożenia zmuszały do szczególnie ostrożnego prowadzenia komparacji górnego odcinka podziału odwróconej łąaty, tj. bardzo delikatnego ustawiania jej na reperze, aby uniknąć wyczuwalnego zgniatania lakieru, oraz do szczególnej dbałości o utrzymywanie niezmienniej temperatury korpusu łąaty w czasie komparacji tego odcinka podziału.

Zabiegi służące zapobieganiu samoczynnemu przemieszczaniu podziału były przy wykonywaniu komparacji łąat 3-metrowych skuteczne, tj. nie odnotowano niekorzystnych symptomów przemieszczania podziału, jednak proces komparacji gwarantujący unikanie wspomnianych zagrożeń był nieco uciążliwy i niezbyt elegancki pod względem formalnym.

Z powyższego powodu przedmiotem niniejszych prac w ramach Projektu PR1 stało się opracowanie i zastosowanie systemu komparacji, w którym całe łąaty 3-metrowe są komparowane w normalnej pozycji pionowej, tj. przy ustawieniu ich stopkami na reperze (17). Możliwe jest zastosowanie 2 wariantów postępowania:

- wydłużenie prowadnicy (1), po której przemieszcza się wózek (2) z reperem (17) do ponad 3,6 m i przeniesienie stanowiska (3) niwelatora na taki wyższy poziom, na którym możliwe jest wykonanie odczytu łąaty na górnym skraju podziału przy najniższym ustawieniu wózka na prowadnicy. Wówczas cały podział łąaty 3-metrowej można komparować bez podziału na odcinki;
- wykonanie drugiego stanowiska niwelatora na wyższym poziomie, umożliwiające odczytywanie wyższego odcinka podziału łąaty w zakresie 1,95-2,85 m bez jej odwracania, tj. przy ustawieniu łąaty stopką na reperze (17).

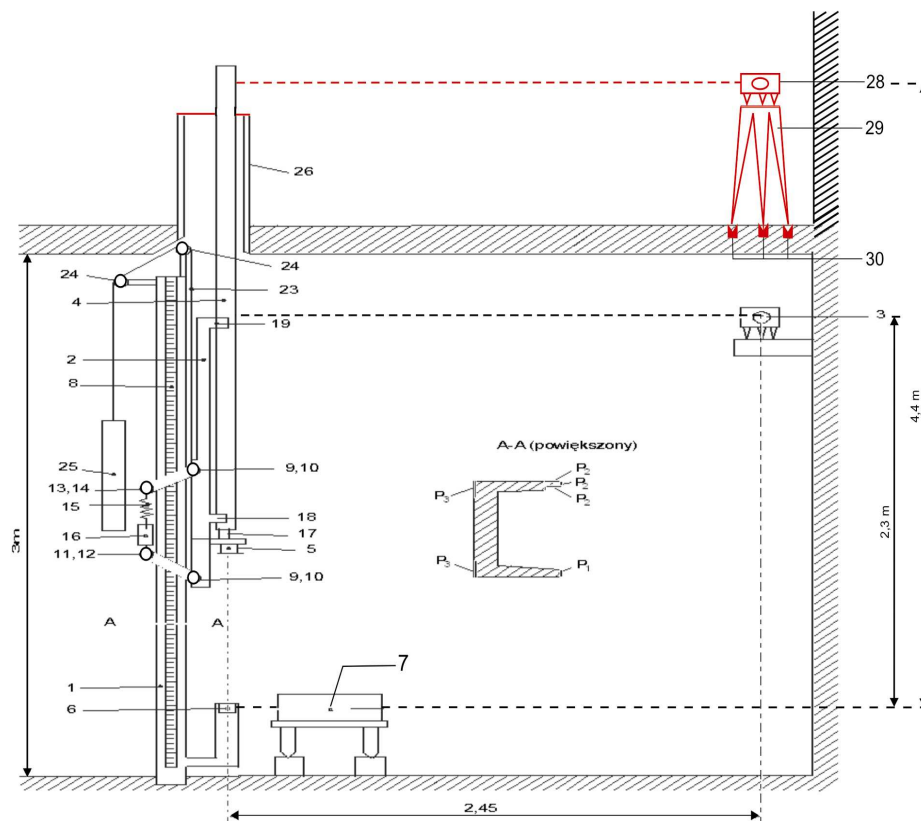
W naszych warunkach lokalowych pierwszy z wymienionych wariantów nie jest możliwy do zastosowania, bowiem zbudowanie takiego komparatora wymaga pionowego przemieszczania łąaty w wolnej przestrzeni pionowej większej od 6 m, co oznacza konieczność dysponowania wolną przestrzenią

przekraczającą 2 kondygnacje. Ponadto wariant ten wymaga zdemontowania komparatora i poszerzenia otworu w stropie tak, aby mieściła się w nim również przedłużona prowadnica (1) (w dotychczasowej wersji komparatora według rysunku 1.2 prowadnica ta nie sięgała do stropu i mieściła się całkowicie w pomieszczeniu laboratorium).

W związku z tym, w ramach Projektu PR1 podjęto prace umożliwiające zastosowanie drugiego z wymienionych wariantów, które polegają na nieznacznym rozbudowaniu istniejącego komparatora łat kodowych pokazanego na rysunku I.2 i zasadniczej zmianie procedury komparacji górnego odcinka podziału łat 3-metrowych.

I.2. ROZBUDOWA ISTNIEJĄCEGO KOMPARATORA ŁAT KODOWYCH

Schemat rozbudowy istniejącego komparatora z rysunku I.2 pokazano na rysunku I.3.



Rys. I.3. Schemat konstrukcyjny komparatora z roku 2007

Po rozbudowie komparator składa się z dwu modułów:

- modułu dwu stanowisk niwelatora: niższego (3) i wyższego (28), znajdujących się na dwu różnych wysokościach, w pomieszczeniu laboratorium i w pomieszczeniu na wyższej kondygnacji nad laboratorium,
- modułu stanowiska łąty.

I.2.1. Moduł dwu stanowisk niwelatora

Oś celowa niwelatora na niższym jego stanowisku (3) znajduje się na wysokości 2,3 m nad osią projektora interferometru laserowego (7). Niwelator ustawiony jest na trwale unieruchomionym wózku komparatora według rysunku I.1 (wykorzystano tu fragmenty konstrukcji komparatora z tej pierwotnej wersji w celu obniżenia kosztów bieżących prac konstrukcyjnych związanych z rozbudową). Niwelator na tym poziomie używany jest do wykonywania odczytów na łącie w zakresie 0,15 – 2,05 m (odczytów poniżej 0,15 m nie wykonujemy, nie są one bowiem wartościowe przy pomiarach ze względu na jednostronne ograniczenie sektora obserwowania podziału łąty przez niwelator cyfrowy, zob. Woschitz, Brunner, 2002; Woschitz, Brunner, Heister, 2002).

W pomieszczeniu nad laboratorium komparacyjnym umieszczono drugie, wyższe stanowisko niwelatora (28) służące do wykonywania z niego odczytów łąty wysuwanej ponad rurę osłonową (26). Oś celowa niwelatora na tym stanowisku znajduje się na wysokości 4,4 m nad osią projektora interferometru laserowego (7). Niwelator na tym poziomie używany jest do wykonywania na łącie odczytów w zakresie 1,95 – 2,85 m (odczytów powyżej 2,85 m nie wykonujemy, nie są one bowiem wartościowe przy pomiarach ze względu na jednostronne ograniczenie sektora obserwowania łąty przez niwelator cyfrowy, zob. Woschitz, Brunner, 2002; Woschitz, Brunner, Heister, 2002). Aby umożliwić dokonywanie odczytów z wyższego stanowiska (28), usunięto wyższą część rury osłonowej (26) znajdującą się powyżej 1,2 m nad podłogą pomieszczenia znajdującego się nad laboratorium komparacyjnym.

Według początkowej koncepcji dodatkowe stanowisko niwelatora (28) miało być wykonane na słupku zabetonowanym w podłodze pomieszczenia znajdującego się nad laboratorium komparacyjnym, aby jednak nie utrudniać korzystania z tego pomieszczenia jego użytkownikom, postanowiono wykorzystać do tego przenośny statyw geodezyjny (29) z nogami z drewna, ustawiany tam tylko na czas wykonywania komparacji. W związku z tym, w celu zagwarantowania nieruchomości niwelatora na statywie i powtarzalności ustawiania go przy kolejnych komparacjach, zastabilizowano w podłodze pomieszczenia trzy tuleje (30) przeznaczone do ustawiania w nich nóg statywu. W celu zwiększenia stabilności tego stanowiska statyw z ustawionym na nim niwelatorem cyfrowym po ustawieniu jego nóg w tulejach może być dodatkowo obciążony zawieszonym na nim obciążnikiem.

I.2.2. Moduł stanowiska łąty

Budowa i działanie stanowiska łąty są następujące. Po pionowo usytuowanej prowadnicy (5) można przesuwając wózek (2) z przytwierdzoną do niego łątą kodową (4). Prowadnica jest wykonana z ceownika stalowego o długości 3 m i wymiarach przekroju poprzecznego 140 x 60 mm. Do prowadnicy przytwierdzona jest zębata (8) o długości 2500 mm i pryzmat interferometru (6). Płaska powierzchnia (P1) i trzy płaskie powierzchnie (P3) są sfrezowane i oszlifowane. Stanowią one bieżnie dla dwu kółek (9) z walcowymi powierzchniami tocznymi, toczących się po powierzchni (P1), i dwu kółek (10) ze stożkowymi powierzchniami, toczących się po krawędziach powierzchni (P2). Osie obrotu tych kółek są połączone trwale z wózkiem. Cztery kółka przypierające (11 – 14), toczące się po powierzchni (P3), mają osie obrotu połączone wahliwie z wózkiem (2). Osie kółek (9), (10) są połączone parami z wózkiem na dwu poziomach różniących się o 600 mm. Leżące naprzeciw nich kółka (11 – 14) wsparte o przeciwległą płaską powierzchnię prowadnicy (1) są do niej dociskane za pomocą dwu sprężyn (15) i śrub rzymskich (16), co powoduje silne sprzęgnięcie wózka (2) z prowadnicą (1). Wózek o całkowitej długości 1900 mm jest zaopatrzony w: reper do ustawiania łąty (17), dwa jarzma (18), (19) do mocowania łąty odległe od siebie o 1250 mm, kółko zębate (20) z korbką (21) służącą do ręcznego przemieszczania wózka po prowadnicy, lustro zwrotne interferometru (5) oraz magnes (22) służący do aretowania wózka (2) na prowadnicy (1). Wózek jest zawieszony na linie stalowej (23) przełożonej przez dwa bloczki (24) i obciążonej przeciwwagą (25), równoważącą ciężar wózka i łąty (około 16 kG w przypadku komparowania łąt o długości 3 m). Rzutnik laserowy (7) jest ustawiony na osi pryzmatu interferometru (6). Jest on połączony z komputerem PC z zainstalowanym programem obsługi interferometru i monitorem, na którym są wyświetlane odczyty mierzonych odległości między lustrem zwrotnym (5) a pryzmatem interferometru (6).

W stropie pomieszczenia laboratorium nad stanowiskiem łąty wykonany jest otwór, w którym osadzono w pozycji pionowej rurę (26) z PCV o średnicy 160 mm, chroniącą łątę w pomieszczeniu o piętro wyżej przed potarciem. Rura ta służy jako osłona łąty przesuwanej ku górze. Rura sięga do poziomu niższego od poziomu celowania na łątę niwelatorem ustawionym na wyższym stanowisku.

I.3. PROCEDURA KOMPARACJI NA ROZBUDOWANYM KOMPARATORZE

Komparowanie łąt może się odbywać pod warunkiem, że w okresie poprzedzającym komparację i w czasie komparacji odcinka łąty, w pomieszczeniu laboratorium nie następują duże zmiany temperatury powietrza i nośników stanowiska niwelatora i interferometru. Chodzi o to, by pod wpływem zmian temperatury nie zmieniała się nadmiernie pionowa odległość między stanowis-

kami niwelatora i interferometru, co jest możliwe wskutek rozszerzalności termicznej ściany, w której zastabilizowane są wsporniki stanowisk. Warunek ten oczywiście dotyczy komparatorów wszystkich typów.

Warunek ten wynika z faktu, że zmiany temperatury mogą wywoływać zmiany różnicy wysokości osi celowej niwelatora cyfrowego względem dolnego pryzmatu interferometru. Zmiany tej różnicy wysokości można wprawdzie redukować, ale ze względu na histerezę przemieszczeń stanowiska niwelatora względem pryzmatu interferometru redukcje te mogą być obarczone bliżej nieokreślonymi błędami. Do celu sprawdzenia zmian temperatury i ewentualnej redukcji należy wykonywać pomiar temperatury co najmniej 1 godzinę przed rozpoczęciem komparacji oraz na początku, w połowie i na końcu komparacji każdego odcinka łąty. Proces komparowania odcinka łąty powinien być prowadzony w równym tempie i bez przerw, bowiem tylko wówczas może być sensowne dokonywanie ewentualnej redukcji różnicy wysokości niwelatora względem interferometru, powodowanej zmianą temperatury.

Zaobserwowano, że w aktualnym miejscu zainstalowania komparatora praktyczne utrzymanie małych zmian temperatury w pomieszczeniu laboratorium (w granicach nie przekraczających $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) można osiągnąć przy:

- wyłączonej klimatyzacji,
- zamkniętych oknach i drzwiach,
- w dni pochmurne, w godzinach 12 – 14,
- podczas wykonania komparacji odcinka łąty w czasie nieprzekraczającym 0,5 godziny,
- w godzinach nocnych.

I.3.1. Pomiary do komparacji niższego odcinka podziału łąty (0,15 – 2,05 m)

1. Ustawiamy wózek (2) z reperem (17) i umocowaną na nim łątą na takim poziomie prowadnicy (1), przy którym odczyt podziału łąty w systemie metrycznym, dokonany niwelatorem cyfrowym ustawionym na stanowisku (3) jest zbliżony do 0,15 m, wykonujemy odczyt niwelatorem na łącie i równocześnie odczyt poziomu ustawienia wózka interferometrem a następnie odczyty interferometru i niwelatora resetujemy do 0. Wykonujemy przy tym pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_1 .

2. Przesuwamy wózek do dołu o około 1 dcm według wskazań interferometru i wykonujemy odczyt położenia wózka interferometrem oraz równocześnie odczyt łąty niwelatorem cyfrowym i redukujemy odczyt niwelatora o wartość zresetowaną w punkcie 1.

3. Czynności wymienione w punkcie 2 powtarzamy aż do osiągnięcia takiego poziomu wózka, przy którym odczyt łąty dokonany niwelatorem cyfrowym osiąga wartość zbliżoną do 2,05 m. Podczas dokonywania odczytów na poziomie 2,05 m wykonujemy pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_2 (w tym samym miejscu co uprzedni odczyt t_1). Różnica $t_2 - t_1$ nie powinna przekraczać $0,5^{\circ}\text{C}$. W przeciwnym razie komparację odcinka podziału należy

powtórzyć. W rezultacie otrzymujemy zbiór odczytów dokonanych interferometrem i niwelatorem cyfrowym w odstępach co około 1 dcm, służący do porównania długości odcinków na łacie w zakresie 0,15 – 2,05 m przy przesuwaniu łaty z góry do dołu.

4. Przesuwamy wózek co około 1 dcm według wskazań interferometru od dołu do góry, wykonując równoczesne odczyty interferometrem i łaty niwelatorem cyfrowym, redukując odczyty wykonane niwelatorem jak uprzednio. W rezultacie otrzymujemy zbiór odczytów dokonanych interferometrem i niwelatorem cyfrowym, służący do porównania długości odcinków na łacie w zakresie 2,05 – 0,15 m przy przesuwaniu łaty od dołu do góry. Podczas dokonywania odczytów na poziomie 0,15 m wykonujemy pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_3 . Różnica $t_3 - t_2$ nie powinna przekraczać $0,5^\circ\text{C}$.

5. Obliczamy długości odcinków od najwyższego miejsca ustawienia łaty do kolejnych miejsc ustawienia łaty na podstawie odczytów niwelatora i odczytów interferometru a następnie obliczamy różnice $N - I$ między długościami tych odcinków wyznaczonymi niwelatorem i interferometrem.

6. Obliczamy średnie różnice między długościami odcinków wyznaczonymi niwelatorem i interferometrem przy przesuwaniu łaty w dół i w górę, uzyskując zbiór wartości odchyłek długości odcinków zmierzonych w zakresie 0,15 – 2,05 m w odstępach co około 1 dcm.

I.3.2. Pomiary do komparacji wyższego odcinka podziału łaty (1,95 – 2,85 m)

1. Ustawiamy wózek z reperem (17) i umocowaną na nim łatą na takim poziomie prowadnicy (1), aby odczyt niwelatora cyfrowego ustawionego na stanowisku (28) był zbliżony do 1,95 m, wykonujemy odczyt niwelatorem na łacie i równocześnie odczyt poziomu ustawienia wózka interferometrem a następnie odczyty interferometru i niwelatora resetujemy do 0. Wykonujemy przy tym pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_4 .

2. Przesuwamy wózek do dołu o około 1 dcm według wskazań interferometru i wykonujemy odczyt położenia wózka interferometrem oraz równocześnie odczyt łaty niwelatorem cyfrowym i redukujemy odczyt wykonany niwelatorem o wartość zresetowaną w punkcie 1.

3. Czynności wg punktu 2 powtarzamy aż do osiągnięcia takiego poziomu wózka, przy którym odczyt łaty dokonany niwelatorem cyfrowym osiąga wartość zbliżoną do 2,85 m. Podczas odczytów na tym poziomie wykonujemy pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_5 . Różnica $t_5 - t_4$ nie powinna przekraczać $0,5^\circ\text{C}$. W rezultacie otrzymujemy zbiór odczytów dokonanych interferometrem i niwelatorem cyfrowym w odstępach co około 1 dcm, służący do porównania długości odcinków na łacie w zakresie 1,95 – 2,85 m przy przesuwaniu łaty z góry do dołu.

4. Przesuwamy wózek co około 1 dcm według wskazań interferometru od dołu do góry, wykonując równoczesne odczyty interferometrem i łaty

niwelatorem cyfrowym i redukując wskazania niwelatora jak uprzednio. W rezultacie otrzymujemy zbiór odczytów dokonanych interferometrem i niwelatorem cyfrowym, służący do porównania długości odcinków na łącie w zakresie 2,85 – 1,95 m przy przesuwaniu łąty od dołu do góry. Podczas odczytów na poziomie 1,95 m wykonujemy pomiar temperatury powietrza w laboratorium t_6 . Różnica $t_6 - t_5$ nie powinna przekraczać $0,5^\circ\text{C}$.

5. Obliczamy długości odcinków od najwyższego miejsca ustawienia łąty do kolejnych miejsc ustawienia łąty na podstawie odczytów niwelatora i odczytów interferometru a następnie obliczamy różnice $N - I$ między długościami tych odcinków wyznaczonymi niwelatorem i interferometrem.

6. Obliczamy średnie różnice między długościami odcinków wyznaczonymi niwelatorem i interferometrem w dół i w górę, uzyskując zbiór różnic długości odcinków zmierzonych w zakresie 1,95 – 2,85 m w odstępach co około 1 dcm.

I.3.3. Zestawienie wyników pomiarów do komparacji podziału łąty

Przykład zestawienia wyników pokazany jest w tabeli 1.

- w kolumnie 1 podane są wysokości h wykonania odczytów niwelatorem na łącie,
- w dalszych kolumnach podane są różnice odczytów $N - I$ niwelatora N i interferometru I ,
- w kolumnach 2, 7 różnice odczytów górnego odcinka łąty,
- w kolumnach 3, 8 różnice odczytów dolnego odcinka łąty,
- w kolumnach 4, 9 poprawki obliczone na podstawie odczytów na poziomie 1,95 i 2,05 m służące do wyrażenia różnic odczytów górnego odcinka w jednolitym układzie odniesionym do zresetowanych odczytów na poziomie $h = 0,15$ m,
- w kolumnach 5, 10 różnice odczytów zredukowane do zresetowanych odczytów na poziomie $h = 0,15$ m uzyskane przy przemieszczaniu łąty do dołu (kolumna 5) i do góry (kolumna 10),
- w kolumnie 12 – średnie z różnic odczytów zestawionych w kolumnach 5, 10,
- w kolumnach 6, 11, 13 – poprawki wyrównawcze v z wpasowania prostych obrazujących wykresy funkcji (prostych regresji) wyrażonych wzorem (1), których parametry obliczono na podstawie obserwacji $N - I$ zestawionych odpowiednio w poprzedzających kolumnach 5, 10, 12.

Tabela I.1. Łata GPCL3 nr 29 700 Niw. Na3003 nr 283289 Data komparacji 3.10.06

h	Przemieszczenia do dołu					Przemieszczenia do góry					Średnia	
	$N-I$	$N-I$	$popr$	$N-I$	v	$N-I$	$N-I$	$popr$	$N-I$	v	$(N-I)_{sr}$	v
[m]	[μm]					[μm]					[μm]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2,85	-8			2	12	-8			8	9	5	10
2,75	5			15	-2	-1			15	2	15	-1
2,65	0			10	2	11			27	-12	18	-5
2,55	-1			9	2	10			26	-12	18	-5
2,45	1			11	-1	-5			11	3	11	1
2,35	6			16	-7	-2			14	-1	15	-4
2,25	1			11	-3	-7			9	3	10	0
2,15	9			19	-12	4			20	-9	20	-10
2,05	-7	-3	10	0	6	-2	7	16	10	0	5	3
1,95	0	15		12	-6	-10	13		10	0	11	-4
1,85		6		6	-1		7		7	2	6	1
1,75		-2		-2	6		7		7	1	2	4
1,65		13		13	-10		-2		-2	9	6	-1
1,55		-5		-5	7		-5		-5	11	-5	9
1,45		-6		-6	7		1		1	4	-2	5
1,35		2		2	-2		-9		-9	13	-4	7
1,25		-8		-8	7		9		9	-6	0	1
1,15		-3		-3	1		12		12	-9	4	-3
1,05		-1		-1	-2		-2		-2	3	-2	1
0,95		-2		-2	-1		-10		-10	11	-6	4
0,85		-8		-8	4		8		8	-8	0	-2
0,75		8		8	-13		-4		-4	3	2	-5
0,65		1		1	-7		-4		-4	2	-2	-2
0,55		2		2	-9		11		11	-13	6	-11
0,45		-21		-21	13		5		5	-8	-8	2
0,35		-24		-24	15		-8		-8	4	-16	10
0,25		-15		-15	5		4		4	-8	-6	-1
0,15		0		0	-11		-9		-9	3	-4	-4
$\Sigma (N-I)_{red}^2$				3084					2701		2075	
$\Sigma (vv)$				1579					1511		768	
m_h	[μm]			7,8					7,6		5,4	
B	[μm]			-12,1					-6,3		-9,4	
A	[μm/m]			9,0±1,8					8,0±1,7		8,6±1,2	

I.3.4. Obliczenie parametru A charakteryzującego odchyłkę systematyczną skali podziału łąty

Zbiór różnic odczytów $N-I$ zestawiony w kolumnie 12 poddajemy wyrównaniu spełniającemu układ liniowych równań obserwacji typu

$$(N - I) + v = A h + B \quad (1)$$

otrzymując w rezultacie wartości parametrów A , B wpasowanej prostej regresji oraz poprawki v . Parametr A charakteryzuje odchyłkę skali podziału łąty wyrażoną w układzie metrycznym, natomiast wartość parametru B określa wyrównaną odległość $N - I$ na poziomie $h = 0$ i w przyjętym systemie komparacji jest bez znaczenia dla metrologicznej oceny podziału (jest wykorzystywany wyłącznie do obliczenia poprawek v z równań typu (1) oraz do utworzenia wykresu wyników komparacji).

Możliwe jest również oddzielne dokonanie odpowiednich wyrównań zbiorów odczytów $N - I$ z kolumn 5, 10 w celu wpasowania odpowiednich prostych regresji i uzyskania informacji o stopniu zgodności parametrów z komparacji dokonanych przy przesuwaniu łąty z góry do dołu i z dołu do góry. Informacja ta może być istotna w przypadku przypuszczenia, że w trakcie komparacji następowały zmiany różnicy wysokości niwelatora i interferometru powodowane zmianami temperatury lub wynikające z innych przyczyn (np. wstrząsów).

Zestawione poprawki v umożliwiają obliczenie sumy kwadratów i błędu standardowego m_h ². Obliczony błąd

$$m_h = \sqrt{[vv]/n_n} \quad (2)$$

jest zależny od błędu odczytu różnicy $N - I$ na komparatorze oraz od błędu rozmieszczenia kresek podziału taśmy inwarowej i błędu odczytu podziału przez niwelator cyfrowy.

Błąd średni wyznaczanego parametru A obliczamy z wzoru

$$m_A = m_h \sqrt{Q_{AA}} \quad (3)$$

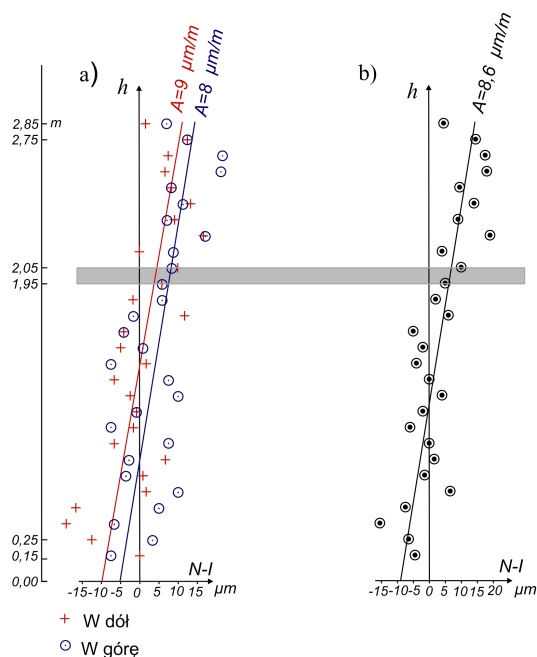
gdzie Q_{AA} jest elementem odwrotności tabeli współczynnika rozwiązanego układu równań normalnych, utworzonego na podstawie układu równań obserwacyjnych (1). (Dla łąt 3-metrowych sprawdzanych na odcinku 0,15 – 2,85 m w odstępach co 1 dcm $m_A = 0,23 m_h$ zaś dla łąt 2-metrowych sprawdzanych na odcinku 0,15 – 1,85 m w odstępach co 1 dcm $m_A = 0,40 m_h$).

² W rozdziale 6 użyte jest zamiast m_h równoważne oznaczenie m_o stosowane w laboratorium komparacyjnym AGH.

Porównanie sumy kwadratów poprawek v i sumy kwadratów różnic $(N - I)_{red}$ zredukowanych o średnią daje wyobrażenie o stopniu efektywności wpasowania prostej regresji.

I.3.5. Zobrazowanie graficzne wyników komparacji

Dane zestawione w tabeli 1 zostały wykorzystane do utworzenia wykresów pokazanych na rysunku I.4.



Rys. I.4. Zobrazowanie graficzne wyników komparacji

Na rysunku I.4a naniesiono w układzie współrzędnych h , $(N - I)$ różnice $(N - I)$ zestawione w kolumnie 5 (oznaczone krzyżykami) oraz różnice $(N - I)$ zestawione w kolumnie 10 (oznaczone kółkami). Wpasowane analitycznie proste regresji naniesiono w taki sposób, że na osi poziomej na wysokości $h = 0$ m odłożono od początku układu wartość współczynnika B zaś na poziomie $h = 2,85$ m odłożono wartość $2,85 A - B$ (wartości A , B zaczerpnięto z kolumn 6, 10 tabeli I.1). Przez pary punktów uzyskane w ten sposób poprowadzono proste regresji. Na wykresie można zmierzyć odchyłki v (podane w tabeli I.1 w kolumnach 6 i 11) jako poziome odległości między odpowiednimi punktami a wpasowanymi w nie prostymi regresji.

Na rysunku I.4b pokazano wykres utworzony na podstawie średnich wartości $(N - I)_{sr}$ zestawionych w kolumnie 12 oraz wpasowaną w ten wykres

prostą regresji, naniesioną między punktami na poziomach $h = 0$ m i $h = 2,85$ m przy wykorzystaniu parametrów A , B podanych w tabeli I.1 w kolumnie 13.

Wykresy pokazane na rysunku I.4a pokazują, w jakim stopniu wyniki komparacji przy przemieszczaniu łąty z góry do dołu zgodziły się z wynikami komparacji przy przemieszczaniu łąty z dołu ku górze (decydują o tym różnice nachylenia prostych regresji).

I.4. PRZYKŁADY BADANIA WSPÓŁPRACY ŁAT KODOWYCH T DO NIWELACJI TECHNICZNEJ I NIWELATORÓW CYFROWYCH DL101C³

I.4.1. Łaty składane

Badaniem objęto współpracę niwelatorów DL101C i 3-metrowych łąt fiberglasowych T składanych z trzech części, przeznaczonych do niwelacji technicznej. Łaty te mają współczynnik rozszerzalności termicznej $\alpha = 15$ ppm/°C. Przeprowadzono komparacje czterech łąt kodowych typu T przy wykorzystaniu dwu niwelatorów cyfrowych DL101C, uzyskując wyniki, które zasługują na szczególną uwagę. Na rysunku 1.5 pokazano przykładowo świadectwo komparacji jednej z tych łąt (nr T6269).

Odchyłki systematyczne podziału tych łąt osiągnęły wartości charakteryzowane parametrami A o bardzo zróżnicowanych wartościach: 89, 0, 7, 17 $\mu\text{m}/\text{m}$. Jednocześnie wszystkie te łąty wykazały wykresy rozrzutu odchyłek przypadkowych podziału, charakteryzowanych przez wyznaczone poprawki v , zbliżone do krzywych podobnych nieco do sinusoidy, oscylujących wokół wyznaczonych prostych regresji, o amplitudach rzędu 100 μm i błędach średnich podziału m_h w granicach 25 – 35 μm . Wyznaczone wartości zestawiono w tabeli I.2.

Tabela I.2. Odchyłki systematyczne i błędy odczytów podziału łąt składanych do niwelacji technicznej

Nr łąty	A	m_h	<i>Amplituda rozrzutu błędów przypadkowych podziału</i>
	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[μm]	[μm]
3682	89	35	111
4445	0	25	86
6323	7	25	76
6269	17	35	104

³ Wszystkie pomiary komparacyjne pokazane i omówione w punktach 4–5 niniejszego opracowania zostały wykonane przez zespół pracowników Zakładu Geodezji Stosowanej IGiK w składzie: mgr inż. Andrzej Kaliński, Grzegorz Cisowski.

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

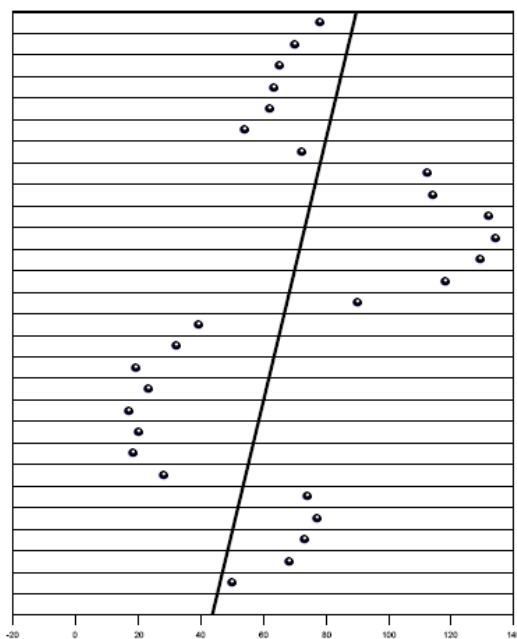
TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E.MAIL: janusz@igik.edu.pl

LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODELL: T NO.: T6263 DATE:
DIGITAL LEVEL: DL101C NO.: - 5/06/2007
CUSTOMER:

h [m]	N-I [μm]	v [μm]
2,85	78	11,47
2,75	70	17,81
2,65	65	21,14
2,55	63	21,47
2,45	62	20,81
2,35	64	27,14
2,25	72	7,48
2,15	112	-34,19
2,05	114	-37,86
1,95	132	-57,52
1,85	134	-61,19
1,75	129	-57,86
1,65	118	-48,52
1,55	90	-22,19
1,45	39	27,15
1,35	32	32,48
1,25	19	43,82
1,15	23	38,15
1,05	17	42,48
0,95	20	37,82
0,85	18	38,15
0,75	28	26,49
0,65	74	-21,18
0,55	77	-25,85
0,45	73	-23,51
0,35	68	-20,18
0,25	60	-3,85
0,15	-	-

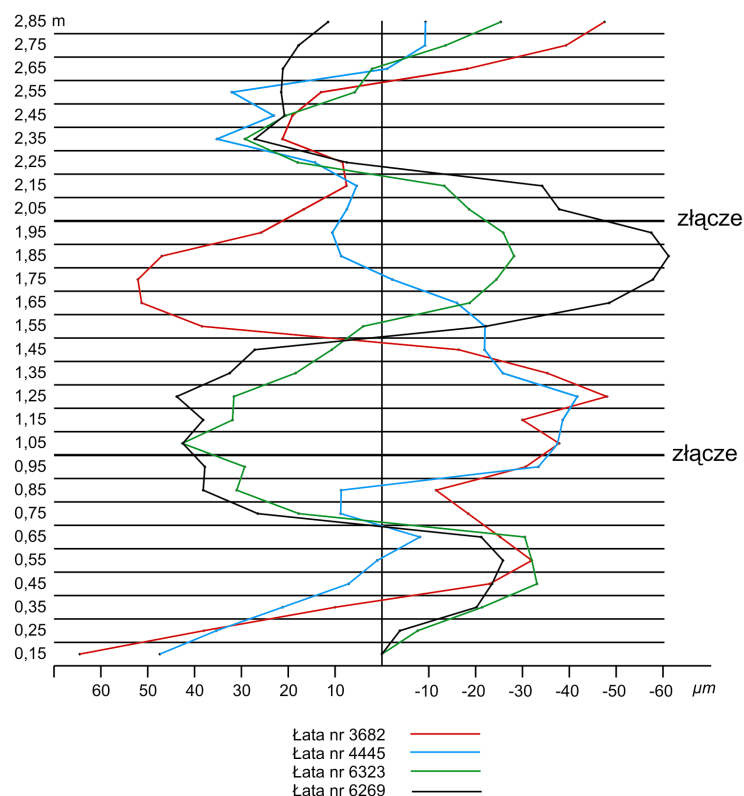
REGRESSION PLOT



A= 16,66 B= 41,99

-Przeciętny rozstaw kresek podziału jest mniejszy od nominalnego o $(|A| \pm m_A) = (17 \pm 9) \mu\text{m/m}$
- Błąd średni odczytu na łacie $m_b = 35 \mu\text{m}$

Rys. I.5. Świadcstwo komparacji technicznej łaty składanej



Rys. I.6. Wykresy poprawek v 4-ch technicznych łąt składanych

Na rysunku I.6 zestawiono wykresy rozrzutu odchylek przypadkowych (poprawek v) podziałów tych łąt wskazujące, że występują przemienne strefy zbytniego zagęszczenia lub rozgęszczenia kresek. Oznacza to, że przy nanoszeniu podziałów występowały duże błędy o charakterze okresowym lub, że materiał, z którego wykonano łąty, nie jest wystarczająco jednorodny pod względem wartości współczynnika rozszerzalności termicznej i odporności na zmiany długości powodowane innymi przyczynami. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na nierównomierność podziałów są też błędy kalibracji usytuowania złączy sąsiadujących fragmentów łąt.

Należy wyraźnie stwierdzić, że przy posługiwaniu się łątami fiber-glasowymi uzyskuje się dokładności charakteryzujące się wyznaczonymi dużymi błędami m_h podziału łąty mimo znacznie wyższych dokładności odczytowych użytego niwelatora cyfrowego (o dokładności pracy decyduje tu dokładność naniesienia i zachowania podziału łąty a nie dokładność niwelatora).

Wobec stwierdzonego okresowego charakteru błędów przypadkowych podziału (mających miejscowo cechy błędów systematycznych) można by pokusić się o aproksymowanie ich funkcjami bardziej złożonymi od

zastosowanych prostych regresji. Jednak indywidualne przebiegi wykresów pokazanych na rysunku I.6 różnią się od siebie, wskazując, że nie ma jednej funkcji, której podporządkowałyby się błędy podziału wszystkich łąt. W tej sytuacji określenie bardziej złożonych funkcji i wyznaczonych ich parametrów byłoby mało przydatne do korzystania przy pomiarach terenowych do redukcji ich wyników ze względu na odchyłki rozstawu kresek podziału łąt w stosunku do rozstawu normatywnego. W praktyce przy użyciu tych łąt nie pozostaje do zrobienia nic innego, jak przyjąć, że podziały łąt mają wykazane duże błędy przypadkowe m_h , natomiast zwiększenie dokładności wyników pomiarów terenowych może ograniczać się jedynie do ograniczenia liniowych błędów systematycznych przez użycie wyznaczonych wartości parametru A do redukcji odczytów.

I.4.2. Łąty teleskopowe (rozsuwane)

Badaniami objęto również dwie 4-metrowe, fiberglasowe łąty teleskopowe z użyciem niwelatora cyfrowego Leica Typ DNA03. Wyniki tego badania przedstawiono na rysunku I.7. Podziały łąt wykazują błędy przypadkowe m_h naniesienia kresek na poszczególnych segmentach łąt rzędu $35\text{ }\mu\text{m}$ i odchylenia systematyczne charakteryzowane wartością parametru $A \cong -300\text{ }\mu\text{m/m}$. Jednak bardzo duże odchyłki długości podziału w miejscach łączenia członów łąt, zwłaszcza w miejscu łączenia ostatniego, najwyższego członu, gdzie odchyłki osiągnęły wartości $0,8\text{ mm}$ i $0,7\text{ mm}$, powodują, że podział łąt na całej ich długości nie jest równomierny i odczyty nie mogą być redukowane o wyznaczone odchyłki systematyczne.

W przypadku stosowania łąt teleskopowych należy pamiętać, że ich poszczególne człony mają podział naniesiony nie w jednej płaszczyźnie, lecz w płaszczyznach oddalonych od siebie co około 2 mm . W miejscu łączenia członów może wystąpić przy oświetleniu łąt od dołu zjawisko tworzenia się na każdym wyższym członie podziału cienia od krawędzi wystającego niższego członu. Cień taki może wpływać podobnie jak narysowana na podziale dodatkowa kreska, powodująca „oszukanie” niwelatora cyfrowego i zniekształcenie odczytów wykonywanych na poziomach zbliżonych do poziomów łączenia członów łąt lub powodująca odmowę wykonania odczytu.

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



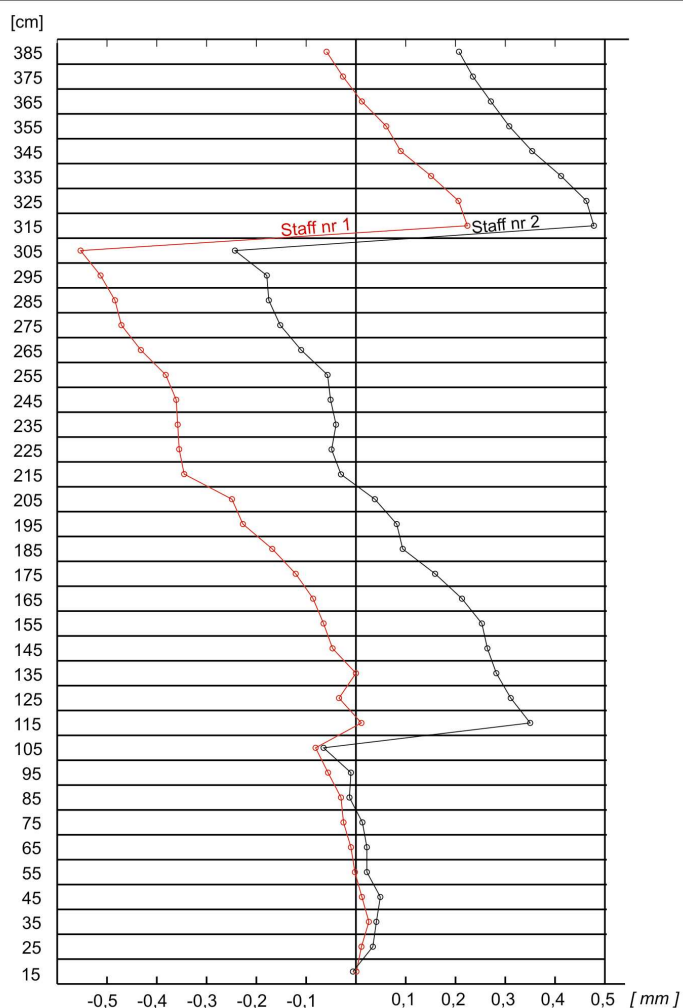
Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E-MAIL: janusz@igik.edu.pl

LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODEL:	GTL4M	NO.: 1,2	DATE:
DIGITAL LEVEL:	Leica DNA03	NO.: 336803	28/09/2007
CUSTOMER: P.H.U. „GEODETA” Tomasz Janas, 66-400 Gorzów Wlkp., ul. Dąbroszyska 26			



Rys. I.7. Wyniki komparacji 2-ch technicznych łąt teleskopowych

Na tle przeprowadzonych badań nasuwa się kilka wniosków dotyczących posługiwania się składanymi łatami kodowymi typu T i rozsuwanymi łatami teleskopowymi.

1. Jest rzeczą niewątpliwą, że powierzchnie styku łączonych i rozłączanych odcinków łat powinny być szczególnie chronione przed deformacjami powodowanymi przez uderzenia i ścieranie oraz przed gromadzeniem się na nich zabrudzeń, są to bowiem miejsca, w których na skutek niejednoznaczności i zmienności łączenia mogą następować stosunkowo szybko zmiany usytuowania sąsiadujących fragmentów podziału o wartościach rzędu kilkudziesięciu mikrometrów.

2. Należy dbać o utrzymanie odcinków łaty w takim stanie, aby styk odcinków podziału był możliwie jak najmniej widoczny ze stanowiska niwelatora. Wynika to z faktu, że krawędź styku widoczna na tle podziału może być odczytana przez niwelator jako zabrudzenie lub zarysowanie i powodować odmowę wykonania lub zafałszowanie odczytu w strefie do kilkunastu centymetrów od miejsca styku. Możliwość pojawiania się takich przypadków narasta w miarę zużywania się długo eksploatowanych łat i nieutrzymywania ich w należytej czystości.

3. Łaty fiberglasowe mają współczynnik rozszerzalności termicznej $15 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, o 1 rząd większy niż taśma inwarowa łat do niwelacji precyzyjnej i dlatego, gdy pragniemy uzyskać podwyższoną dokładność pomiaru, powinny być używane głównie w pomieszczeniach zamkniętych o wyrównanej temperaturze lub w miejscach zacienionych.

I.5. PRZYKŁADY BADANIA WSPÓŁPRACY ŁAT KODOWYCH DO NIWELACJI PRECYZYJNEJ I NIWELATORÓW CYFROWYCH

Badaniami na rozbudowanym pionowym komparatorze IGiK objęto w maju 2007 roku dwie łaty kodowe LD13 nr 13651, 13648 współpracujące z niwelatorami cyfrowymi DiNi12 nr 320230, 700996A,

Są to przyrządy należące do Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, a ich badania przeprowadzono z myślą o możliwości porównania w przyszłości wyników komparacji na pionowym komparatorze IGiK z wynikami komparacji na poziomym komparatorze Politechniki Warszawskiej.

Wyniki dokonanych na pionowym komparatorze IGiK komparacji łat LD13 w zestawie z niwelatorami cyfrowymi DiNi12 pokazano przykładowo w świadectwach komparacji na rysunkach I.8–I.11, natomiast wyznaczone przy tych komparacjach wartości błędu przypadkowego m_h odczytu na łacie oraz wartości parametru A charakteryzującego systematyczne odchylenie rozstawu kresek w stosunku do rozstawu nominalnego i jego błędu m_A zestawiono w tabeli I. 3.

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E.MAIL: janusz@igik.edu.pl

LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODELL: LD13
DIGITAL LEVEL: DiNi12

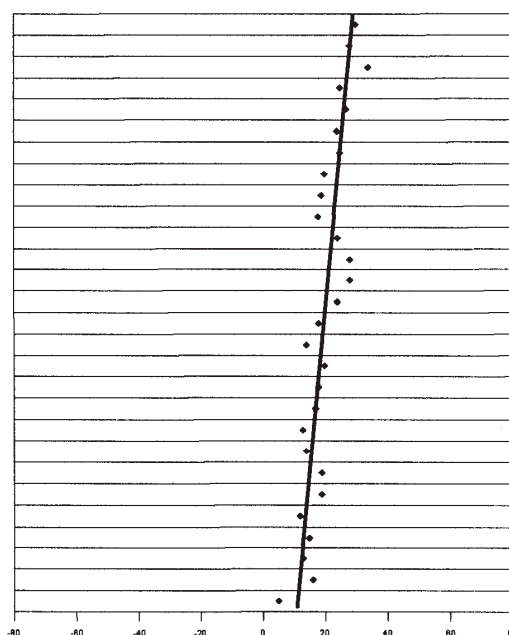
NO.: 13648
NO.: 320230

DATE:
18/05/2007

CUSTOMER: Politechnika Warszawska

REGRESSION PLOT

h [m]	N-I [μm]	v [μm]
2,85	30	-0,84
2,75	28	0,50
2,65	34	-6,16
2,55	25	2,18
2,45	27	-0,48
2,35	24	1,86
2,25	25	0,20
2,15	20	4,54
2,05	19	4,88
1,95	18	5,22
1,85	24	-1,44
1,75	28	-6,10
1,65	28	-6,76
1,55	24	-3,42
1,45	18	1,92
1,35	14	5,26
1,25	20	-1,40
1,15	18	-0,06
1,05	17	0,28
0,95	13	3,62
0,85	14	1,96
0,75	19	-3,70
0,65	19	-4,36
0,55	12	1,98
0,45	15	-1,68
0,35	13	-0,34
0,25	16	-4,00
0,15	5	6,34



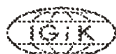
A= 6,60 B= 10,35

- Przeciętny rozstaw kresek podziału jest mniejszy od nominalnego o $(|A| \pm m_A) = (7 \pm 1) \mu\text{m/m}$
- Błąd średni odczytu na łacie $m_b = 4 \mu\text{m}$

Rys. I.8. Świadcstwo komparacji łąty do niwelacji precyzyjnej

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

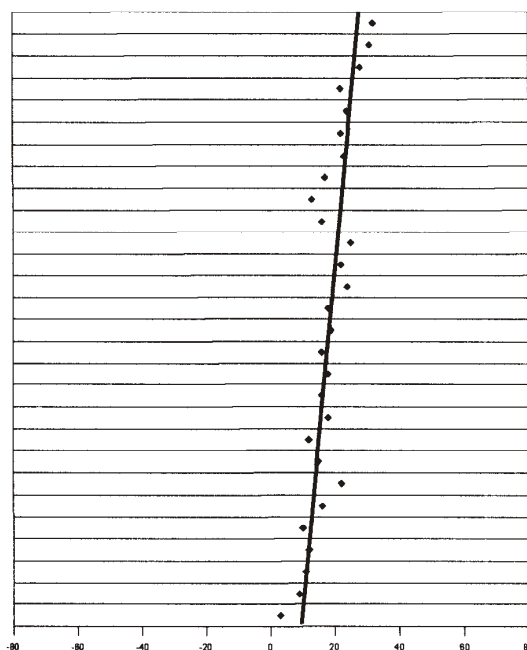
TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E.MAIL: janusz@igik.edu.pl

LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODEL: LD13 NO.: 13648 DATE:
DIGITAL LEVEL: DiNi12 NO.: 700996A 11/05/2007
CUSTOMER: Politechnika Warszawska

h [m]	N-I [μm]	v [μm]
2,85	32	-4,62
2,75	31	-4,29
2,65	28	-1,96
2,55	22	3,37
2,45	24	0,71
2,35	22	2,04
2,25	23	0,37
2,15	17	5,70
2,05	13	9,03
1,95	16	5,36
1,85	25	-4,30
1,75	22	-1,97
1,65	24	-4,64
1,55	18	0,69
1,45	19	-0,98
1,35	16	1,35
1,25	18	-1,31
1,15	16	0,02
1,05	18	-2,65
0,95	12	2,68
0,85	15	-0,99
0,75	22	-8,66
0,65	16	-3,32
0,55	10	2,01
0,45	12	-0,66
0,35	11	-0,33
0,25	9	1,00
0,15	3	6,33

REGRESSION PLOT



A= 6,68 B= 8,33

-Przeciętny rozstaw kresek podziału jest mniejszy od nominalnego o $(|A| \pm m_A) = (7 \pm 1) \mu\text{m/m}$

-Błąd średni odczytu na łacie $m_b = 4 \mu\text{m}$

Rys. I.9. Świadczenie komparacji łaty do niwelacji precyzyjnej

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E.MAIL: janusz@igik.edu.pl

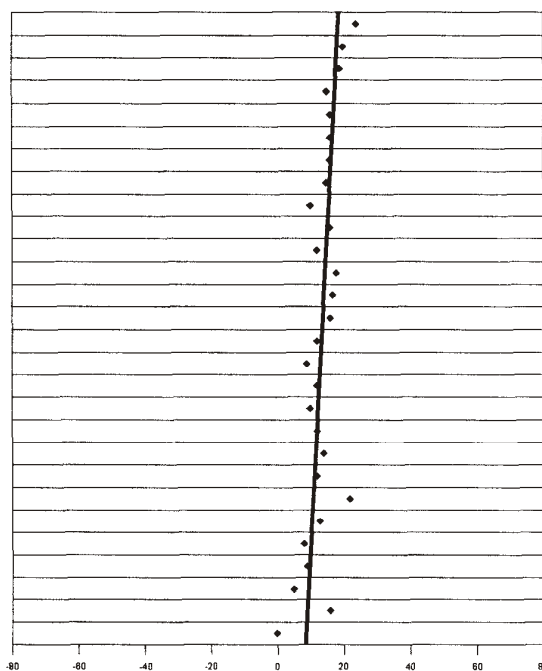
LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODEL: LD13 NO.: 13651 DATE:
DIGITAL LEVEL: DiNi12 NO.: 320230 17/05/2007

CUSTOMER: Politechnika Warszawska

h [m]	N-I [μm]	v [μm]
2,85	24	-5,07
2,75	20	-1,46
2,65	19	-0,84
2,55	15	2,77
2,45	16	1,39
2,35	16	1,00
2,25	16	0,61
2,15	15	1,23
2,05	10	5,84
1,95	16	-0,55
1,85	12	3,07
1,75	18	-3,32
1,65	17	-2,71
1,55	16	-2,09
1,45	12	1,52
1,35	9	4,13
1,25	12	0,75
1,15	10	2,36
1,05	12	-0,02
0,95	14	-2,41
0,85	12	-0,80
0,75	22	-11,18
0,65	13	-2,57
0,55	8	2,04
0,45	9	0,66
0,35	5	4,27
0,25	16	-7,12
0,15	0	8,50

REGRESSION PLOT



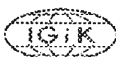
A= 3,86 B= 7,92

- Przeciętny rozstaw kresek podziału jest mniejszy od nominalnego o $(|A| \pm m_A) = (4 \pm 1) \mu\text{m/m}$
- Błąd średni odczytu na łacie $m_b = 4 \mu\text{m}$

Rys. I.10. Świadcstwo komparacji łąty do niwelacji precyzyjnej

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa



Tel.: +48 22 32 919 00

ZAKŁAD GEODEZJI STOSOWANEJ

TEL.: (22) 32 919 12 ; (0) 602 113 889 FAX.: (22) 32 919 21 E-MAIL: janusz@igik.edu.pl

LEVELLING STAFF CALIBRATION REPORT

STAFF MODELL: LD13
DIGITAL LEVEL: DiNi12

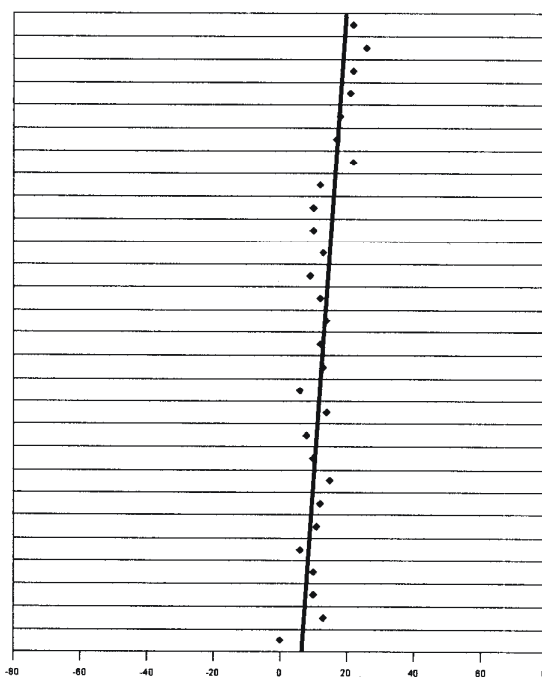
NO.: 13651
NO.: 700996A

DATE:
11/05/2007

CUSTOMER: Politechnika Warszawska

h [m]	N-I [μm]	v [μm]
2,85	22	-1,88
2,75	26	-6,40
2,65	22	-2,92
2,55	21	-2,44
2,45	18	0,05
2,35	17	0,53
2,25	22	-4,99
2,15	12	4,50
2,05	10	5,98
1,95	10	5,46
1,85	13	1,94
1,75	9	5,43
1,65	12	1,91
1,55	14	-0,61
1,45	12	0,88
1,35	13	-0,64
1,25	6	5,84
1,15	14	-2,68
1,05	8	2,81
0,95	10	0,29
0,85	15	-5,23
0,75	12	-2,75
0,65	11	-2,26
0,55	6	2,22
0,45	10	-2,30
0,35	10	-2,81
0,25	13	-6,33
0,15	0	6,15

REGRESSION PLOT



A= 5,17 B= 5,38

- Przeciętny rozstaw kresek podziału jest mniejszy od nominalnego o $(|A| \pm m_A) = (5 \pm 1) \mu\text{m/m}$
- Błąd średni odczytu na łacie $m_h = 4 \mu\text{m}$

Rys. I.11. Świadczenie komparacji łaty do niwelacji precyzyjnej

Tabela I.3. Błędy odczytów i odchyłki systematyczne podziału łąt LD 13 do niwelacji precyzyjnej

Łata LD13 nr Niw. DiNi12	13648			13651		
	m_h	A	m_A	m_h	A	m_A
	[μm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		[μm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	
320230	4	7	1	4	4	1
70096A	4	7	1	4	5	1

Widoczne jest, że obie łąty kontrolowane z użyciem dwu instrumentów wykazały jednakowe wartości $m_h = 4 \mu\text{m}$. Oznacza to, że własne błędy przypadkowe podziału obu łąt były bardzo małe i osiągnięto błędy odczytów przy komparacji uzależnione głównie od dokładności naniesienia podziału łąt i dokładności odczytowej niwelatorów cyfrowych (najmniejsza jednostka zapisu odczytu niwelatora cyfrowego wynosi 0,01 mm tj. 10 μm). Z dotychczasowych doświadczeń zebranych przy komparacji kilkudziesięciu łąt wynika, że w przypadku łąt z dobrym podziałem, pozbawionym miejscowych zakłóceń rozstawu kresek, osiąga się na pionowym komparatorze IGiK przy użyciu niwelatora cyfrowego błędy odczytów m_h w granicach 4 – 5 μm .

Widoczne jest też, że przy użyciu obydwu niwelatorów uzyskano na każdej łącie wartości parametru A zgodne ze sobą w granicach dokładności wyznaczenia, charakteryzowanej przez $m_A = 1 \mu\text{m}/\text{m}$. Świadczy to dobrze zarówno o jakości badanych łąt i niwelatorów, jak i o jakości komparacji dokonanych na rozbudowanym komparatorze pionowym IGiK.

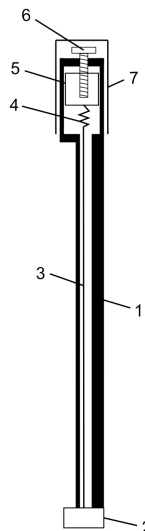
I.6. ANALIZA PRZYCZYNOWO-SKUTKOWA WYNIKÓW KOMPARACJI ŁĄT DO NIWELACJI PRECYZYJNEJ

Oznakami prawidłowego działania zestawu niwelator cyfrowy – precyzyjna łąta kodowa jest uzyskiwanie przy komparacji wartości parametrów A , m_h (m_o) w granicach sprawdzonych doświadczalnie możliwości produkcyjnych niwelatorów cyfrowych i łąt kodowych oraz uzyskiwanie przypadkowego rozrzutu poprawek v różnic $N - I$, charakteryzującego się brakiem systematycznych, długookresowych odchyłeń wykresu v względem wyaprosymowanej prostej regresji. W świetle wyników badania wielu kompletów precyzyjnych łąt kodowych można uznać za poprawne osiąganie błędu m_h (m_o) na poziomie 4 – 5 μm oraz wartości parametru A w granicach $\pm 15 \mu\text{m}/\text{m}$.

Gdy spełnienie tych warunków okazuje się niemożliwe, a zwłaszcza gdy występują systematyczne załamania i odchylenia wykresu poprawek v o charakterze długookresowym, należy przeprowadzać analizę przyczynowo-skutkową uzyskanych rezultatów komparacji. Występowanie odchyłeń długookresowych może bowiem wskazywać, że mniejsze błędy m_h można by uzyskać

aproksymując różnice $N - I$ nie przy użyciu równania prostej regresji, lecz przy wykorzystaniu bardziej złożonej funkcji, której wykres jest krzywoliniowy. Występowanie wykresu krzywoliniowego świadczy, że na poszczególnych odcinkach podziału są zbyt duże i zbyt małe rozstawy kresek. Celem takiej analizy jest wykrywanie przyczyny nieprawidłowych wyników komparacji oraz ocenianie, czy łąta nadaje się do dalszej eksploatacji, a jeśli tak, to pod jakimi dodatkowymi warunkami lub w jakim innym zakresie. Do przeprowadzania takiej analizy potrzebna jest znajomość omówionych dalej podstawowych cech konstrukcyjnych łąt.

I.6.1. Cechy konstrukcyjno-użytkowe łąt do niwelacji precyzyjnej mające wpływ na poprawność podziału



Rys. I.12. Schemat konstrukcji łąty do niwelacji precyzyjnej

Łata do niwelacji precyzyjnej pokazana na schematycznym rysunku I.12 w pionowej pozycji pracy składa się z metalowego (zazwyczaj aluminiowego), fibreglasowego lub drewnianego korpusu (1) połączonego trwale ze stopką (2) i taśmy inwarowej (3), której początek jest połączony trwale ze stopką, zaś koniec jest połączony sprężysto za pośrednictwem systemu naciagowo-kompensacyjno-regulacyjnego z górnym zakończeniem korpusu (1). System ten składa się ze sprężyny (4) naciągającej taśmę inwarową i utrzymującej siłę jej naciągu w stanie prawie niezmiennym (rola kompensacyjna) nawet przy dosyć dużych zmianach długości korpusu (1) oraz z uchwytu (5) sprężyny (4) umożliwiającego regulowanie siły jej naciągu. W tym celu uchwyt (5) jest połączony z korpusem (1) w sposób umożliwiający przesuwanie go śrubą (6)

względem korpusu równolegle do osi taśmy (3) i sprężyny (4). Do górnego zakończenia korpusu (1) przytwierdzona jest osłona (7).

Taśma inwarowa znajduje się w kanale wykonanym w korpusie łąty i powinna mieć w nim swobodę ruchu (może się lekko stykać z jego powierzchnią, jednak nie powinna być do tej powierzchni dociśnięta).

Taśma inwarowa podlega w trakcie eksploatacji zmianom własnej długości pod wpływem zmian temperatury (współczynnik rozszerzalności mechaniczno-termicznej inwaru⁴ α_{inw} ma wartość rzędu 1 ppm/°C).

W czasie eksploatacji drewniany korpus łąty podlega dużym, lecz powolnym zmianom długości pod wpływem zmian wilgotności (dochodzącym do 1 mm w ciągu kilku miesięcy) i nieznacznym, lecz szybko następującym, zmianom długości pod wpływem zmian temperatury (współczynnik rozszerzalności termicznej drewna wzdłuż włókna α_{dr} jest rzędu 3 ppm/°C) (Janusz J., 1989 (a) i (b), 1991). Ponadto drewniany korpus łąty może podlegać pod wpływem zmian wilgotności wygięciom, których strzałka osiąga kilka mm. Wygięcia te powodują ograniczenie swobody położenia taśmy inwarowej w kanale, to jest dociśnięcie taśmy do uwypuklonej powierzchni kanału. Dla zapobiegania znacznym, długotrwałym zmianom wilgotności łąt z drewnianymi korpusami nie należy ich przechowywać w pomieszczeniach z centralnym ogrzewaniem, w miejscach silnie nasłonecznionych ani w pomieszczeniach zawilgoconych (należy je przechowywać w warunkach średniej rocznej wilgotności powietrza) (Janusz J., 1991).

Metalowy (zazwyczaj aluminiowy) korpus łąty podlega w czasie eksploatacji dużym zmianom długości pod wpływem zmian temperatury (współczynnik rozszerzalności termicznej aluminium $\alpha_{al} = 24$ ppm/°C). Przy zmianie temperatury np o 10 °C długość korpusu 3-metrowej łąty zmieni się

⁴ W niniejszej pracy operuję pojęciem współczynnika mechaniczno-termicznej rozszerzalności taśmy inwarowej, odmiennie niż się to stosuje w literaturze geodezyjnej, gdzie występuje pojęcie współczynnika rozszerzalności termicznej, bowiem przy stosowanym sposobie wyznaczania nie uzyskuje się wartości współczynnika zależnego tylko od zmiany temperatury ale również od zmienności siły naciągu taśmy. Wynika to z tego, że współczynnik taki jest praktycznie wyznaczany na dylatometrze przy taśmie inwarowej podlegającej zmianom długości wskutek połączenia jej z korpusem łąty za pośrednictwem systemu naciągowo-kompensacyjno-regulacyjnego, zamiast wyznaczania go przy taśmie naciągniętej podczas zmian temperatury za pomocą niezmiennego ciężaru. Podczas wyznaczania tego współczynnika zmiana długości aluminiowego korpusu łąty pod wpływem zmiany temperatury dochodzącej do 50°C osiąga 3,6 mm i powoduje niewielkie, ale już wyczuwalne przy wyznaczaniu współczynnika, sprężyste zmiany długości sprawdzanej taśmy inwarowej. Dodatkowym czynnikiem deformującym wynik badania jest spoczywanie taśmy na powierzchni kanału lub podpórkach w poziomo usytuowanym korpusie łąty powodujące, że wskutek tarcia taśma inwarowa przejmuje część znacznie większych termicznych zmian długości korpusu. Zachodzi to zwłaszcza w przypadkach skrzywienia korpusu łąty.

o 0,72 mm. Korpus taki może podlegać pod wpływem uderzeń oraz pod wpływem zbyt silnego dokręcenia śrub mocujących osprzęt (libele, uchwyty) zgięciom powodującym miejscowe dociskanie taśmy inwarowej do powierzchni kanału w korpusie (Beluch, Frukacz, Mróz, Pokrzywa, Szczutko, 2005). Zgięcia korpusu i towarzyszące im zakrzywienia kanału na taśmę inwarową mogą też wynikać z nieprawidłowego ułożenia łąt przy ich transporcie i przechowywaniu. Za szczególnie niebezpieczne należy uważać zgięcia korpusu łąt w płaszczyźnie podziału, bowiem powodują one silne docięnięcia taśmy do bocznych powierzchni kanału, związane z dużą sztywnością poprzeczną taśmy. W związku z tym przy codziennym przeglądzie stanu łąt przed wyjściem w teren należy sprawdzać odchylenia krawędzi korpusu łąt od prostoliniowości w obu prostopadłych płaszczyznach, skupiając szczególną uwagę na wygięcia w płaszczyźnie poprzecznej do kierunku celowania niwelatorem.

System naciągowo-kompensacyjno-regulacyjny jest zbudowany w taki sposób, aby przy fabrycznym montażu łąt można było doprowadzić siłę naciągu taśmy do wartości, przy której rozstaw kresek podziału wykonanego na taśmie inwarowej jest zgodny z nominalnym (według stosowanej terminologii odpowiada to zgodności metra średniego podziału łąt z metrem normalnym). Jeśli w czasie eksploatacji łąt następuje zmiana długości podziału, to system naciągowo-kompensacyjno-regulacyjny umożliwia korygowanie siły naciągu taśmy prowadzące do przywrócenia długości podziału do stanu początkowego. Z możliwości takiej korekty można jednak korzystać jedynie w warunkach laboratoryjnych, tj. przy obserwacji podziału na komparatorze i pod warunkiem, że taśma inwarowa z naniesionym na niej podziałem ma zagwarantowaną swobodę ruchu w kanale wykonanym w korpusie łąt.

Podstawowym zadaniem systemu naciągowo-kompensacyjno-regulacyjnego jest samoczynne utrzymanie prawie niezmiennej siły naciągu taśmy inwarowej i długości podziału na taśmie, mimo następujących zmian długości korpusu i zmian temperatury taśmy inwarowej. Systemy naciągowo-kompensacyjno-regulacyjne łąt powodują, że gdy taśma inwarowa i sprężyna mają swobodę przesuwu w kanale, to własne zmiany długości taśmy powodowane przez zmiany długości korpusu łąt są od nich wielokrotnie mniejsze. W łątach z podziałem równomiernym produkowanych przez firmę Zeiss-Jena instalowano sprężyny (4) zmniejszające zmiany długości taśmy pod wpływem zmian długości korpusu 30-50-krotnie, natomiast sprężyny w łątach firmy Wild-Heerbrugg zmniejszały wpływ zmian długości korpusu na zmiany długości taśmy inwarowej około 400-krotnie (Janusz J., 1989 (a) i (b)). Można oszacować, że sprężyny w aktualnie produkowanych kodowych łątach do niwelacji precyzyjnej kompensują zmiany długości taśmy inwarowej, tj. umożliwiają zmniejszenie wpływu zmian długości korpusu na zmiany długości taśmy inwarowej 100-200-krotnie.

Stopień kompensacji zmian długości korpusu na zmiany długości taśmy inwarowej ocenimy na następującym przykładzie. Jeśli np. zachodzi zmiana temperatury o 10°C, to następuje zmiana długości aluminiowego korpusu łąt 3-metrowej o 0,72 mm, zaś system naciągowo-kompensacyjny wspomnianych

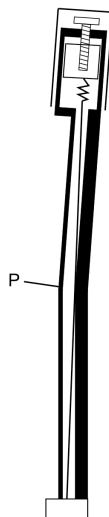
łat firm Wild-Heerbrugg i Zeiss-Jena doprowadza do tego, że zmiana długości 3-metrowego odcinka taśmy inwarowej zawiera się w granicach 2–24 μm (zmiana długości 1 m podziału osiąga 1–8 μm). Można oszacować, że przy parametrach sprężyn stosowanych w aktualnie produkowanych łątach kodowych zmiana długości podziału łąty 3-metrowej pod wpływem zmiany temperatury korpusu aluminiowego o 10°C osiąga 4–7 μm (zmiana długości 1 m podziału osiąga 1–2 μm).

W przypadku, gdy taśma lub sprężyna jest dociśnięta do powierzchni kanału w korpusie łąty, stopień kompensacji ulega znacznemu ograniczeniu, tj. wpływ zmian długości korpusu na zmiany długości taśmy jest znacznie większy od wyżej podanego (tym większy, im większa jest siła i powierzchnia docisku taśmy do powierzchni kanału w korpusie). Docisnięcie to może następować wskutek: skrzywienia korpusu łąty, zaklinowania się obcego ciała między powierzchnią taśmy a powierzchnią kanału w korpusie, „przyklejenia się” taśmy do korpusu wskutek zabrudzenia, zniekształcenia korpusu łąty w profilu poprzecznym, powodującego silne docisnięcie krawędzi taśmy inwarowej do bocznej powierzchni kanału. Docisnięcie sprężyny i taśmy do górnego skrajka kanału może też nastąpić wskutek krzywego zamocowania sprężyny lub przesunięcia miejsca przymocowania taśmy do sprężyny podczas silnego wstrząsu łąty.

Miejscowe silne docisnięcie taśmy inwarowej do powierzchni kanału w punkcie *P*, powodujące nieprzesuwne sprzęgnięcie taśmy z korpusem w tym punkcie (rysunek 1.13), skutkuje tym, że po zmianie temperatury odcinek taśmy między stopką łąty a punktem *P* podlega dużej zmianie długości, wynikającej z termicznej zmiany długości tego odcinka korpusu łąty. Wynika to z faktu, że powierzchnia przekroju poprzecznego korpusu łąty jest wielokrotnie większa od powierzchni przekroju poprzecznego taśmy inwarowej (w łątach z korpusami aluminiowymi około 20-krotnie), co pomimo różnic modułu sprężystości korpusu i taśmy decyduje, iż zmiany długości taśmy są dyktowane w przeważającym stopniu przez zmiany długości korpusu.

Natomiast odcinek taśmy inwarowej między punktem *P* a miejscem przytwierdzenia taśmy do systemu naciągowo-kompensacyjno-regulacyjnego podlega wówczas niedużej zmianie długości, zależnej od wartości współczynnika mechaniczno-termicznej zmiany długości taśmy i od stopnia kompensacji systemu.

Gdy docisnięcie taśmy do powierzchni kanału jest słabsze, nie następuje całkowite, nieprzesuwne sprzęgnięcie taśmy z korpusem, a jedynie zwiększenie siły tarcia taśmy o powierzchnię kanału, powodujące ograniczenie swobody jej przesuwu w stosunku do korpusu. Powoduje to, że zmiana długości odcinka taśmy od stopki do miejsca docisnięcia nie jest skutecznie ograniczana przez system naciągowo-kompensacyjno-regulacyjny i jest zależna w dużym, lecz trudnym do określenia stopniu od zmiany długości tego odcinka korpusu łąty.



Rys. I.13. Efekt wygięcia korpusu łaty do niwelacji precyzyjnej

Natomiast zmiana długości odcinka taśmy od miejsca dociśnięcia do miejsca połączenia taśmy z systemem naciagowo-kompensacyjno-regulacyjnym pozostaje wówczas nieduża, zależna od termiczno-mechanicznego współczynnika zmiany długości taśmy inwarowej i od stopnia kompensacji systemu.

Łaty do niwelacji precyzyjnej produkowane jeszcze kilkanaście lat temu były odporniejsze na uzależnienie zmian długości podziału od zmian długości korpusu w przypadku skrzywienia korpusu niż łaty produkowane aktualnie. Wynika to z tego, że w dawniej produkowanych łatach luz taśmy inwarowej w kanale wykonanym w korpusie wynosił około 2 mm i był ograniczony jedynie w miejscach podpórek rozmieszczonych co około 0,5 m, natomiast obecnie został ograniczony do około 0,5 mm. Ta zmiana konstrukcyjna łat zmniejsza wprowadzić ryzyko zabrudzenia kanału zwiększającego siłę tarcia taśmy o powierzchnię kanału, przyczynia się jednak do zwiększenia siły nacisku powierzchni kanału na powierzchnię taśmy nawet przy niewielkim skrzywieniu łaty. Z tego powodu przed każdym przystąpieniem do pomiaru w terenie należy sprawdzać, czy korpus łaty jest prostoliniowy w dwu prostopadłych płaszczyznach, jego skrzywienie może bowiem wywołać zwiększenie wpływu zmian długości korpusu łaty na zmiany długości podziału.

I.6.2. Analiza przyczynowa wyników komparacji

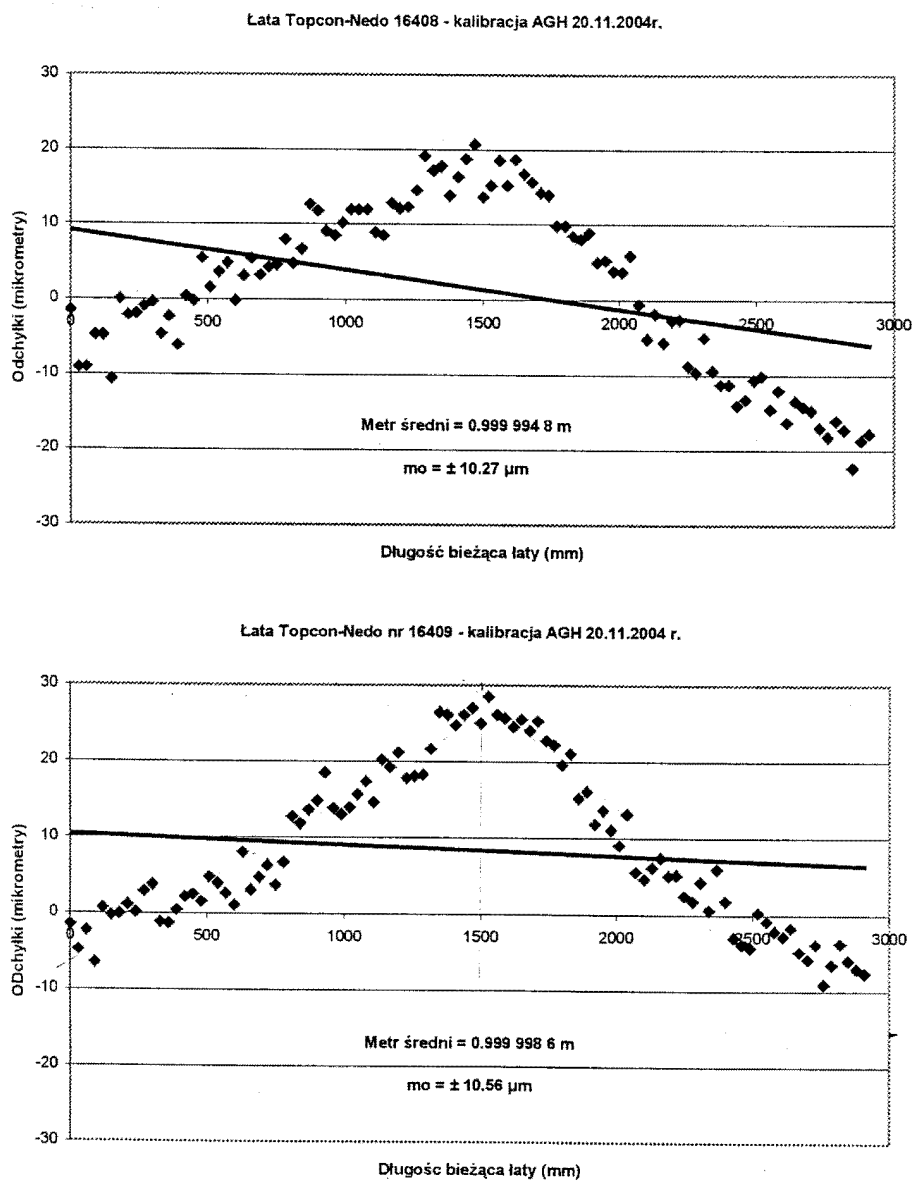
Wykrywanie przyczyn występowania: nadmiernych błędów odczytów podziału łaty m_h (m_o), nadmiernych wartości błędu systematycznego podziału, charakteryzowanego przez uzyskaną wartość parametru A , oraz nieprawidłowego rozkładu odchylek v nie jest zazwyczaj rzeczą łatwą i nie zawsze jest skuteczne.

Wymaga ono na ogół przeprowadzenia dodatkowych, dobrze zaprojektowanych pomiarów i przeglądu stanu technicznego poszczególnych części łąty.

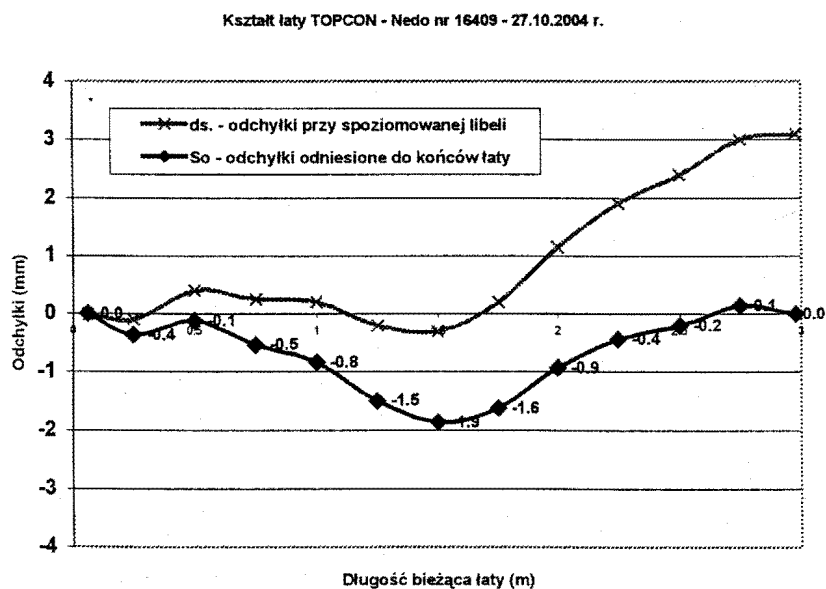
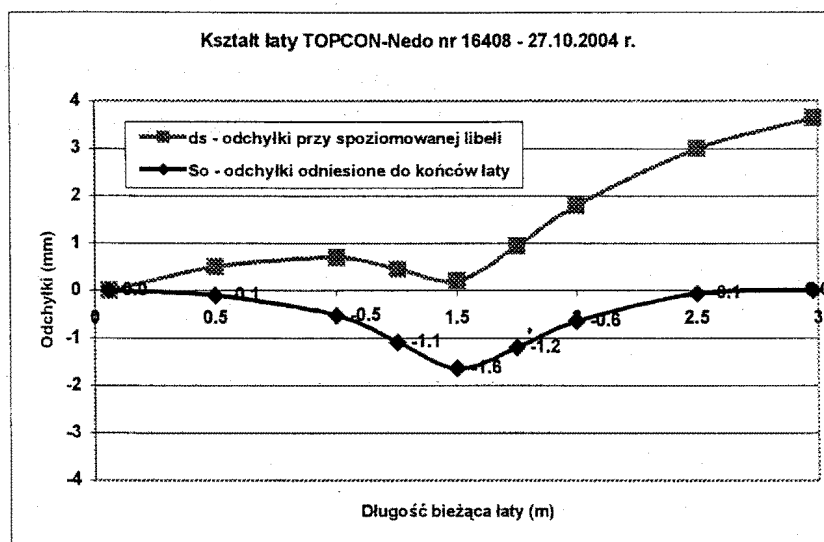
Bardzo interesujący przykład takiej analizy przyczynowej zawarty jest w pracy *Interpretacja wyników kalibracji...* (Beluch, Frukacz, Mróz, Pokrzywa, Szczutko, 2005). Podano w niej wyniki komparacji dwu łąt kodowych Topcon-Nedo, dokonanej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wyniki komparacji tych łąt Topcon-Nedo przedstawiono na zacytowanym z pracy *Interpretacja wyników kalibracji...* rysunku nr 3 (tu rysunek nr I.14). Pokazane systematyczne rozkłady wykresów odchyłek od wpasowanych prostych regresji potraktowane zostały w *Interpretacja wyników kalibracji...* jako objaw uszkodzenia łąt. W celu zbadania przyczyny takich rozkładów odchyłek długości podziału zmierzono dodatkowo odchyłki korpusów łąt od prostoliniowości w płaszczyźnie celowania niwelatorem, uzyskując wyniki przedstawione na zacytowanym z pracy *Interpretacja wyników kalibracji...* rysunku 4 (tu rysunek I.15), wskazujące, że korpusy łąt nie są prostoliniowe a miejsca maksymalnego ugięcia znajdują się w połowie długości łąt. Niestety brakuje wyników pomiaru odchyłek korpusów łąt od prostoliniowości w płaszczyźnie podziału, mniej prawdopodobnych lecz w przypadku wystąpienia bardziej szkodliwych dla utrzymania swobody ruchu taśmy inwarowej w kanale wykonanym w korpusie łąty. Te wyniki pomiarów Autorzy pracy *Interpretacja wyników kalibracji...* potraktowali jako rezultat zbyt silnego dokręcenia zamocowanych w tych miejscach podpórek do łąt, które mogło wywołać deformacje korpusów łąt i objawy przedstawione przykładowo na rysunkach I.14, I.15. W rezultacie Autorzy podali ważne dla praktyki pomiarów zalecenie, aby stosować podpórki przymocowane do korpusu łąty nie w połowie jego długości lecz przymocowane do górnego zakończenia korpusu łąty.

Należy dodać, że zalecane przymocowanie podpórek łąt do górnych zakończeń korpusów musi być również dokonane tak, aby nie zniekształcać przekroju poprzecznego korpusów łąt i nie ograniczać swobody działania systemu naciągowo-kompensacyjno-regulacyjnego. Najlepiej, gdy zostają one przymocowane nie bezpośrednio do korpusów łąt, lecz do ich osłon (7) z rysunku I.12.

W rozpatrywanym tu przypadku zniekształcenia wykresów odchyłek zapewne powstały głównie pod wpływem sprężgnięcia taśm inwarowych z korpusami łąt przez ich dociśnięcie lub zakleszczenie w kanałach. Najsilniejsze sprężgnięcie nastąpiło zapewne w połowie długości łąt, tj. w miejscu przykręcenia uchwytów podpórek. Mogło ono w tym miejscu całkowicie lub częściowo unieruchomić taśmę w stosunku do korpusu, wywołując połączenie nieprzesuwne lub połączenie znacznie hamujące swobodę ruchu taśmy w kanale. Hamowanie swobody ruchu taśmy w kanale mogło też wystąpić w innych miejscach, gdzie wykresy odchyłek korpusu od prostoliniowości (rysunek I.15) wykazały zakrzywienie korpusu i wykonanego w nim kanału na taśmę.



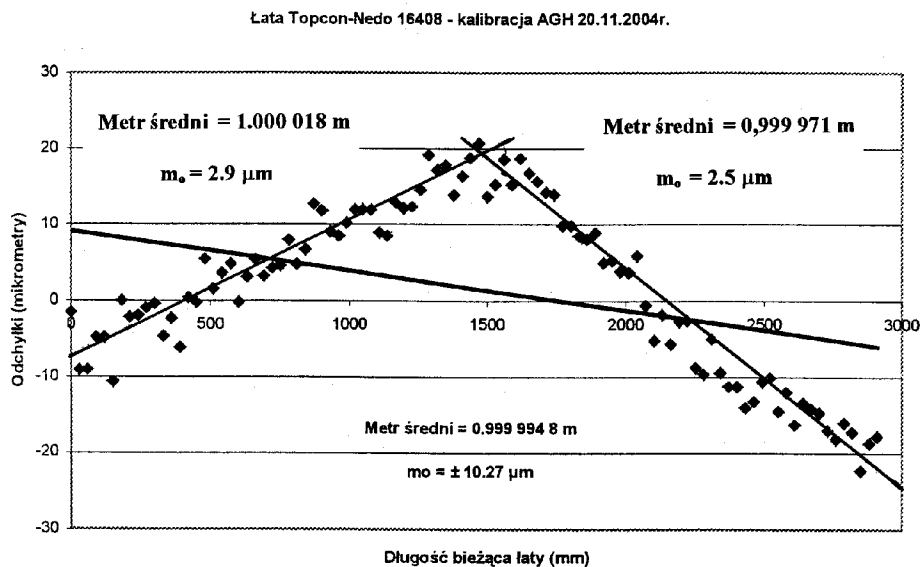
Rys. I.14. Przykładowe wyniki kalibracji łąt kodowych Topcon-Nedo zniekształconych podczas użytkowania (cytat z pracy „Interpretacja wyników kalibracji..”, Beluch, Frukacz, Mróz, Pokrzywa, Szczutko, 2005)



Rys. I.15. Wykres kształtu łąt kodowych Topcon-Nedo
z rys. I.14 (cytat z pracy „Interpretacja wyników kalibracji...”,
Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T., 2005)

I.6.3. Analiza skutkowa wyników komparacji

Pozostając przy powyższym przykładzie zauważymy na rysunku I.14, że odchyłki systematyczne rozstawu kresek podziału łąty nr 16 408 zostały wyrażone wykresem jednej prostej regresji, prowadzącej do stwierdzenia z dużym błędem $m_0 = 10 \mu\text{m}$, że odchylenie systematyczne skali podziału osiąga wartość $A = -5 \mu\text{m/m}$ to jest, że metr średni podziału całej łąty osiąga wartość $0,999\,995 \text{ m}$. Wyznaczona nieduża wartość A odchyłki systematycznej całego podziału łąty może działać na użytkownika łąty w sposób uspokajający i utwierdzający go w złudnym przekonaniu, że mimo nieprawidłowych kształtów wykresu, powodujących duże, lecz utrzymane na poziomie dokładności odczytowej niwelatorów cyfrowych wartości m_0 , łąta nadaje się do niwelacji precyzyjnej. W rzeczywistości wykres odchyłek wyraźnie wskazuje, że odchyłka systematyczna dolnej połowy podziału łąty daje się aproksymować przy użyciu odcinkowej prostej regresji o znacznie większym parametrze $A_{\text{dol}} = 18 \mu\text{m/m}$ (metr średni = $1,000\,018 \text{ m}$), zaś odchyłka systematyczna górnej połowy podziału łąty daje się aproksymować odcinkową prostą regresji o parametrze $A_{\text{gór}} = -29 \mu\text{m/m}$ (metr średni = $0,999\,971 \text{ m}$), co pokazano na rysunku I.16.



Rys. I.16. Odcinkowe proste regresji

Przy obu tych aproksymacjach, oddzielnych dla dolnej i górnej części podziału, osiąga się wówczas znacznie mniejsze błędy $m_0 = 2,9 \mu\text{m}$ i $2,5 \mu\text{m}$, co oznacza, że parametry A odcinkowych prostych regresji zostały wyznaczone z kilka razy mniejszym błędem m_A aniżeli parametr A całego podziału łąty. Nie to

jednak stanowi o celowości aproksymowania odchyłek oddzielnie dla dolnej i górnej części podziału, bowiem konfrontacja takich wyników, przedstawionych na rysunku I.16, z omówionymi w punkcie I.6.1 cechami konstrukcyjno-użytkowymi łąt wyraźnie potwierdza, że dolna część podziału między stopką a miejscem dociśnięcia taśmy do powierzchni kanału w skrzywionym korpusie mogła podlegać innym wpływom, aniżeli część górna na odcinku między miejscem dociśnięcia taśmy do powierzchni kanału a połączeniem taśmy z systemem naciągowo-kompensacyjno-regulacyjnym.

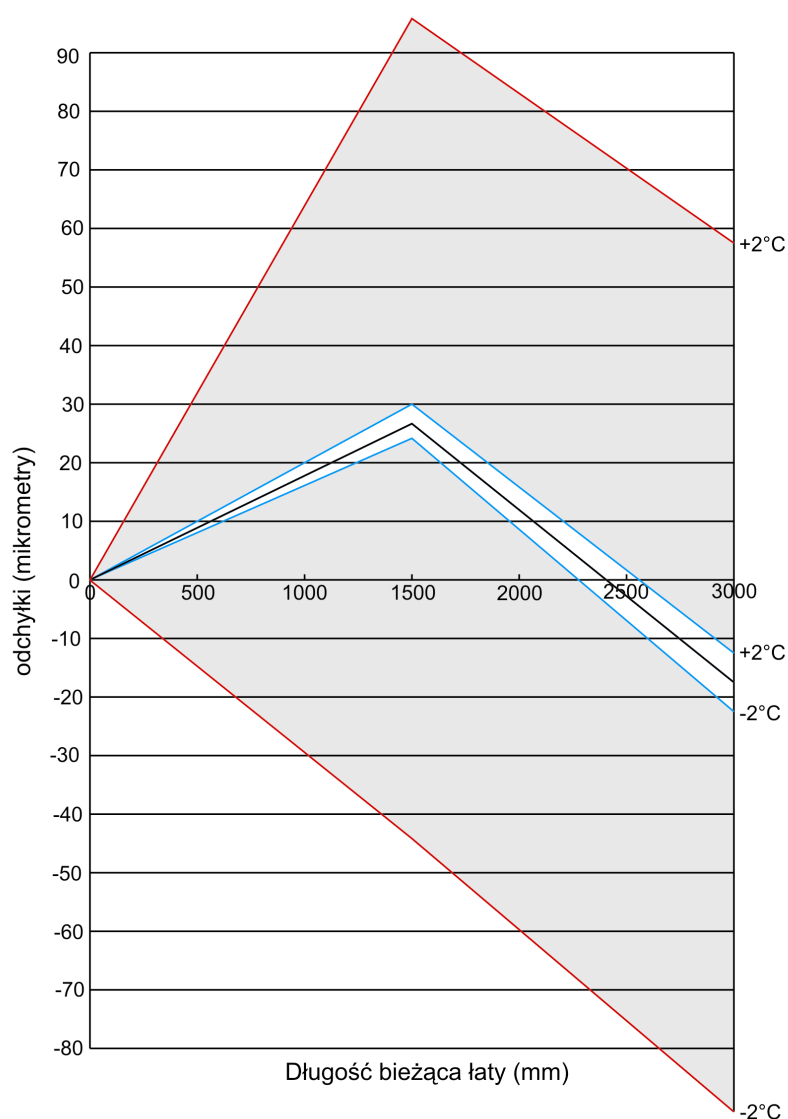
Powoduje to, że w warunkach sprzęgnięcia taśmy z korpusem łąty wyznaczone parametry A systematycznych odchyłek całego podziału i obu jego części są miarodajne do oceny wartości metrologicznej łąty jedynie w warunkach termicznych, które panowały w czasie dokonywania komparacji, trzeba bowiem oczekiwać, że po zmianie temperatury dolna część podziału ulegnie znacznej zmianie długości wskutek sprzęgnięcia z korpusem łąty. Tym samym wynik całej komparacji nie może być traktowany jako miarodajny do oceny wartości metrologicznej podziału, przydatnej dla wykonawcy pomiarów przy używaniu tej łąty w temperaturach dużo różniących się od temperatury komparacji. Trzeba zwłaszcza podkreślić, że w tym wypadku normalnie stosowana procedura redukowania błędów systematycznych podziału ze względu na zmianę temperatury, opierająca się na wykorzystaniu współczynnika rozszerzalności termiczno-mechanicznej taśmy inwarowej, staje się całkowicie bezowocna. Trzeba bowiem liczyć się z tym, że przy pomiarach wykonywanych w temperaturach dużo niższych lub dużo wyższych od temperatury komparacji rzeczywiste wykresy odchyłek długości podziału będą przybierać całkiem inne kształty i położenia, w większym stopniu zależne od współczynnika rozszerzalności termicznej korpusu łąty, często bliżej nieokreślone.

Problem ten zilustrowano przykładowo na rysunku I.17. Pokazano na nim oznaczony kolorem czarnym wykres utworzony przez proste regresji dla odcinków łąty nr 16408 przeniesione z rysunku I.16 i zmiany tego wykresu odchyłek podziału, które następują w wyniku zmian temperatury w stosunku do temperatury komparacji. Na przykład zmiana temperatury zaledwie o $\pm 2^\circ\text{C}$ powoduje, że gdy taśma inwarowa jest swobodna, to wykresy odchyłek uzyskują nieznacznie różniące się położenia wyrażone liniami niebieskimi. Jednak w skrajnym przypadku, gdy taśma inwarowa jest nieprzesuwnie sprzęgnięta z korpusem aluminiowym, to wykresy odchyłek po zmianie temperatury o $\pm 2^\circ\text{C}$ uzyskają znacznie odleglejsze położenia względem wykresu regresji utworzonego na podstawie komparacji, wyrażone liniami czerwonymi. O kształcie tych wykresów i ich oddaleniu od wykresu odchyłek w temperaturze komparacji decydować będą przede wszystkim termiczne zmiany długości korpusów wywołujące bardzo duże zmiany długości dolnej połowy podziału naniesionego na taśmie inwarowej, przy stosunkowo niewielkich zmianach długości górnej połowy podziału.

W bardzo częstych przypadkach, gdy styk taśmy z krawędziami kanału w korpusie osiągany jest bez całkowitego sprzęgnięcia taśmy z korpusem lecz

z „przyhamowaniami” swobody jej ruchu podłużnego względem korpusu, zmiany temperatury w podanych granicach będą powodowały, że wykresy odchyłek mogą przyjmować dowolne, bliżej nieokreślone położenia w polach zacienionych na rysunku I.17, mieszczących się między sąsiadującymi wykresami oznaczonymi kolorem niebieskim i czerwonym.

Łata Topcon - Nedo 16408



Rys. I.17. Skutki sprężenia taśmy inwarowej z korpusem łaty przy zmianie temperatury

Wnioski te są oczywiście aktualne również w stosunku do łąty nr 16 409 wg rysunku I.14., wykazującej podobne wady rozkładu odchyłek i podobne zniekształcenia korpusu.

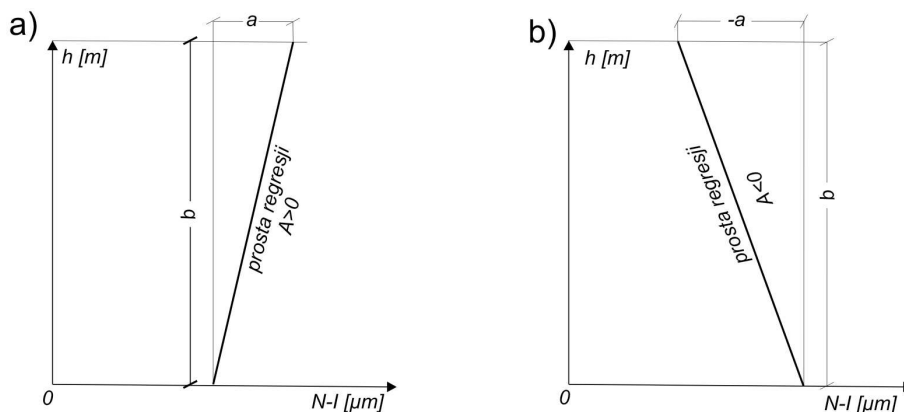
Należy dodać, że użytkownik omawianych łąt po ich naprawie polegającej na odkręceniu połączeń korpusów z podpórkami powinien ponownie zmierzyć odchylenia korpusów od prostoliniowości w celu sprawdzenia, czy operacja ta mogła wywołać wyprostowanie korpusów oraz uwolnienie taśm w miejscu ich docięnięcia do korpusów i przywrócenie warunków niezbędnej ich swobody. Oczywiście stwierdzenie, że nastąpiło wyprostowanie korpusów nie gwarantuje, że rzeczywiście nastąpiło przywrócenie swobody ruchu taśmy, bowiem uprzednio istniejące przykręcenie mogło wywołać nie tylko odchylenia korpusów łąt od prostoliniowości ale również trwałe, miejscowe zniekształcenia profilu poprzecznego korpusu i trwałe zaciśnięcie taśmy w zniekształconym kanale w miejscu przykręcenia, nieulegające usunięciu. Z tego powodu po odkręceniu połączeń korpusów z podpórkami należy wykonać ponowną komparację łąt i upewnić się, czy nastąpiło zmniejszenie systematycznych odchyłek długości podziałów, umożliwiające traktowanie łąt jako nadających się do niwelacji precyzyjnej. W przypadku braku takiego efektu należy traktować te łąty jako nadające się jedynie do niwelacji technicznej.

I.6.4. Uwagi dotyczące spotykanych rozkładów odchyłek $N - I$, ich znaczenia i sposobu aproksymacji

Gdy w układzie współrzędnych jak na rysunku I.4 wykres odchyłek $N - I$ wyznaczonych przy komparacji sprawia wrażenie, że można go z małymi odchyłkami v i małymi błędami m_h (m_o) aproksymować przy użyciu równania prostej regresji i uzyskamy potwierdzenie słuszności tego wrażenia w toku obliczeń aproksymacyjnych, to mamy do czynienia z systematycznym błędem skali podziału łąty jednakowym co do znaku i wartości na całej długości podziału. Podział ten jest zbyt gęsty w stosunku do normatywnego rozkładu kresek w przypadku, gdy wyznaczona prosta regresji jest na wykresie (w układzie współrzędnych jak na rysunku I.4) odchylona od pionu ze zwrotem dodatnim $N - I$ (por. rysunku I.18a – wartość parametru $A > 0$) i zbyt rzadki, gdy wyznaczona prosta regresji jest na wykresie odchylona od pionu ze zwrotem ujemnym $N - I$ (por. rysunku I.18b – wartość parametru $A < 0$). Wartość liczbową parametru błędu systematycznego $A = a/b$ możemy wówczas określić również na podstawie wymiarów a i b pobranych z rysunku.

Gdy wykres odchyłek $N - I$ wyznaczonych przy komparacji sprawia wrażenie, że zamiast aproksymowania równaniem prostej można by go z mniejszymi odchyłkami v i w konsekwencji z mniejszym błędem m_h aproksymować przy użyciu równania wybranej krzywej regresji i uzyskamy potwierdzenie słuszności tego wrażenia w toku obliczeń aproksymacyjnych, to mamy do czynienia z systematycznymi błędami skali podziału zróżnicowa-

nymi na poszczególnych fragmentach podziału łąty. Wówczas o wartości i znaku błędu systematycznego skali w rozpatrywanym miejscu podziału decyduje pozycja na wykresie stycznej do wyaprosymowanej krzywej.



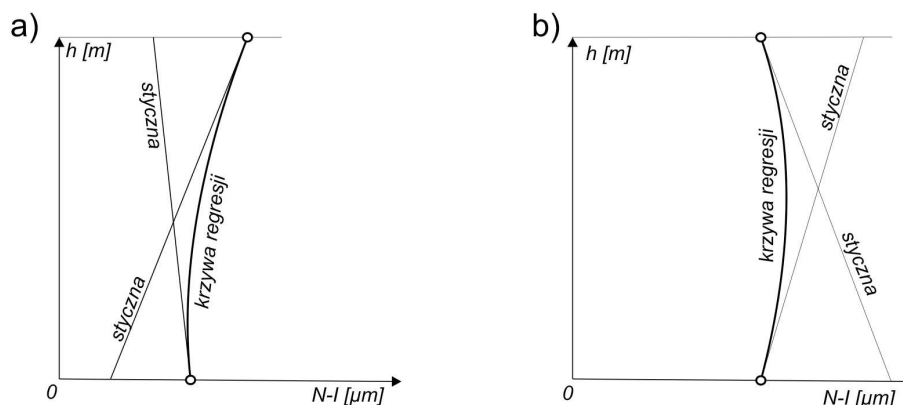
Rys. I.18. Wyniki aproksymacji przy równomiernych rozkładach odchyłek podziału

Jeśli np. wyaprosymowana krzywa przyjmuje pozycję i kształt podobne do pokazanego na rysunku I.19a, to styczne do tej krzywej wskazują, że podział przy stopce łąty jest zbyt rzadki, zaś przy końcu łąty zbyt gęsty. Jeśli zaś wyaprosymowana krzywa przyjmuje pozycję i kształt podobne do pokazanego na rysunku I.19b, to styczne do tej krzywej wskazują, że podział przy stopce jest zbyt gęsty, a przy końcu łąty zbyt rzadki.

Różnica nachylenia stycznych do krzywej przy początku i przy końcu podziału określa wówczas maksymalną różnicę wartości błędu systematycznego podziału łąty.

Wartość parametru A w otoczeniu każdego rozpatrywanego miejsca wyaprosymowanej krzywej możemy określić na podstawie wymiarów a i b pobranych z rysunku I.19 przy traktowaniu stycznej tak, jak by to była prosta regresji (por. rysunku I.18).

Należy dodać, że przy opracowaniu wyników pomiarów komparacyjnych przyjmuje się z reguły, że błąd systematyczny skali podziału jest jednakowy na całej jego długości, co wyraża się aproksymowaniem wyznaczonych różnic $N - I$ przy użyciu równania prostej. Gdy błąd systematyczny skali podziału jest zróżnicowany na poszczególnych fragmentach, to konsekwencją takiego opracowania wyników (zamiast aproksymowania równaniem krzywej, lub zespołem prostych odcinkowych jak np. na rysunku I.16, lepiej dopasowanych do wyznaczonego z pomiarów komparacyjnych wykresu różnic $N - I$) jest znaczny wzrost sumy kwadratów poprawek v i wzrost liczonego na ich podstawie błędu m_h (m_0). W tych przypadkach rozkładu poprawek v nie można już traktować jako rozkładu przypadkowego. Pokazuje to wyraźnie przykład zilustrowany na rysunkach I.14 i I.16.



Rys. 1.19. Wyniki aproksymacji przy nierównomiernych rozkładach odchylek podziału

LITERATURA

- Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T., 2005, *Interpretacja wyników kalibracji precyzyjnych łąt niwelacyjnych oraz uwagi wynikające z badań niwelatorów*. VII Konferencja nt. Problemy Geodezji Inżyniersko-Przemysłowej. Warszawa – Białobrzegi 31. 03 – 1. 04. 2005.
- Janusz J., 1989, *Metody i urządzenia służące do zmniejszenia błędów systematycznych niwelacji precyzyjnej*. Biuletyn IGiK w Przeglądzie Geodezyjnym (a).
- Janusz J., 1989, *Zwiększenie stabilności długości precyzyjnych łąt niwelacyjnych*. Rozprawa doktorska w IGiK 9. 05. 1989 (niepublikowana) (b).
- Janusz J., 1991, *Wpływ wilgotności na niestabilność długości łąt do niwelacji precyzyjnej*. Geodezja i Kartografia nr 2.
- Janusz J., Janusz W., Kaliński A., Kołodziejczyk M., Toruński A., 2004, *Wstępne badanie zestawów łąt kodowych z użyciem niwelatorów cyfrowych na komparatorze IGiK w wersji "nieruchomy niwelator – ruchoma łąta"*. Prace IGiK t. 50, z. 108.
- Janusz J., Janusz W., Kołodziejczyk M., 2003, *System komparacji łąt kodowych opracowany w IGiK w Warszawie*. Seria monograficzna IGiK nr 7.
- Janusz W., 1980, *Zniekształcenia skali w niwelacyjnych sieciach kontrolnych – sposób ograniczenia ich wpływu*. Przegląd Geodezyjny, nr 4–5.
- Janusz W., 1986/1987, *Problem identyfikacji stałego poziomu odniesienia w kontrolnych sieciach niwelacyjnych*. Przegląd Geodezyjny, cz. I – 9-10/1986, cz. II–1/1987.

- Maurer W., Schadelbach K., 1995, *Laserinterferometry – ten Years Experience in Calibrating Invar Levelling Staffs*. Proc. First Int. Symp. Appl. Laser Techniques in Geodesy and Mine Surveing, Lubliana, Sept. 1995, p. 9.
- Niwelacja precyzyjna, 1993, Praca zbiorowa. PPWK Warszawa-Wrocław.
- Pokrzywa A., Mróz J., Szczutko T. i inni, 2000, *Technologia kompleksowego sprawdzania łat niwelacyjnych z wykorzystaniem interferometru laserowego HP5529A*. Geodezja, t. 6, z. 1.
- Rueger J. M., Brunner F. K., 2000, *On system calibration and type testing of digital levels*. Zeitschrift fur Vermassungswesen, 4.
- Takalo M., Rouchianen P., 2002, *On system calibration of digital levels*. Proceedings of the 14th General Meeting of the Nordic Geodetic Commision. Espoo, Finland 1–6 Oct. 2002.
- Takalo M., Rouchianen P., 2004, *On system calibration of digital level*. Ingenieurmessung – 14th International Course on Ingeniering Surveing ETH Zurich, 2004.
- Woschitz H., Brunner F. K., 2002, *System calibration of digital levels – experimental results of systematic effects*. 2nd Conference of Engineering Surveing, Bratislava, Nov. 2002.
- Woschitz H., Brunner F. K., Heister H., 2002, *Scale determination of digital levelling system using a vertical comparator*. Proceedings FIG XXII Congress Washington, April 2002.

JERZY JANUSZ

WOJCIECH JANUSZ

Instytut Geodezji i Kartografii

Część II

**BADANIE PRZEMIESZCZEŃ, DEFORMACJI
I ZMIAN TERMICZNYCH KOMORY WLOTOWEJ
SZCZYTOWO-POMPOWEJ ELEKTROWNI WODNEJ
“ŻARNOWIEC” POD WPŁYWEM OPRÓŻNIANIA
ZBIORNIKA WODNEGO**

ZARYS TREŚCI: Monitoring geodezyjny bezpieczeństwa budowli kończy się zazwyczaj na wyznaczeniu przemieszczeń punktów i reperów osadzonych na kontrolowanym obiekcie. Pragniemy tu pokazać na przykładzie, że jest możliwe i celowe przeprowadzanie dodatkowej analizy wyznaczonych przemieszczeń punktów i reperów mające charakter interpretacji geometrycznej, która prowadzi do określenia przemieszczeń i deformacji całego kontrolowanego obiektu lub oddzielnych jego części.

II.1. WPROWADZENIE

Przedmiotem rozważań jest sposób przeprowadzenia uzupełniających obliczeń dotyczących pomiarów przemieszczeń punktów i reperów rozmieszczonych na i w budowli oraz wyniki tych obliczeń.

W większości przypadków geodezyjny monitoring przemieszczeń kończy się na pomierzeniu i obliczeniu przemieszczeń punktów rozmieszczonych na i w budowli, natomiast w niniejszej pracy wyznaczone przemieszczenia punktów, traktowane dalej jako pseudoobserwacje, poddane zostały dodatkowym przeliczeniom prowadzącym do wyznaczenia parametrów przemieszczeń całej budowli lub jej określonych fragmentów, co umożliwia zauważenie, jak zachowywała się budowla a nie tylko jak zachowały się rozmieszczone na niej punkty geodezyjne. Takie dodatkowe przeliczenia i analiza ich wyników są elementem geometrycznej interpretacji wyników pomiarów, dokonywanej przez geodetę prowadzącego monitoring, która ułatwia dokonywanie przez projektantów branżowych interpretacji przyczynowo-skutkowych wyników pomiarów.

Dokonywanie interpretacji geometrycznej należy traktować jako „pomost” w porozumieniu specjalistów zajmujących się z różnych pozycji monitorowaniem bezpieczeństwa pracy wznoszonych i eksploatowanych obiektów budowlanych. Służy to polepszeniu i pogłębieniu oceny wyników wykonanych pomiarów i ich roli w procesie wykrywania przyczyn określonego zachowania się budowli i ich podłoża.

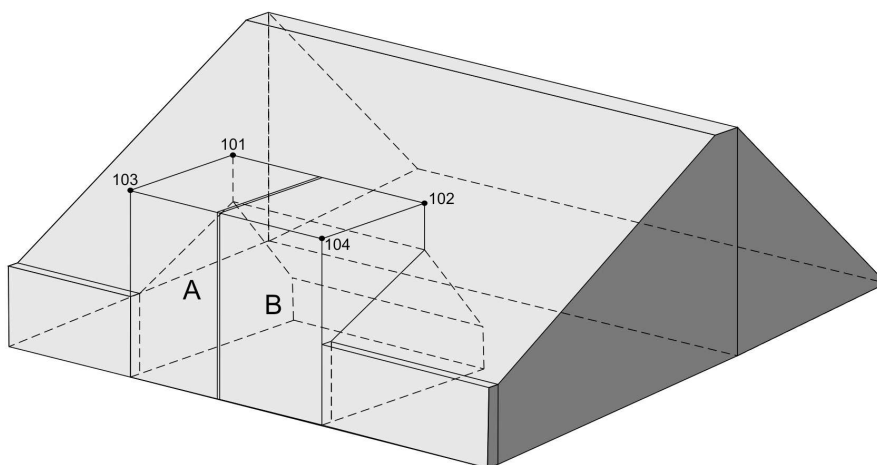
II.2. CHARAKTERYSTYKA BUDOWLI, PRZEDMIOT I ZAKRES WYKONANYCH PRAC POMIAROWYCH

Żelbetowa budowla wlotowa łączy zbiornik górny szczytowo-pompowej elektrowni wodnej o mocy 716 MW z rurociągami, którymi woda jest przesyłana do znajdującej się około 125 m niżej siłowni, gdzie znajdują się turbogeneratory napędzane siłą spadającej wody. W budowli wlotowej zainstalowane są wloty do rurociągów zaopatrzone w kraty z prowadnicami, zastawki remontowe z prowadnicami oraz zasuwki szybkoopadające z prowadnicami i podnośnikami hydraulicznymi. Górna część budowli widoczna jest na rys.II.1a, natomiast kontur całej budowli pokazano na schematycznym rys.II.1b, gdzie widoczne jest, że większa część budowli ukryta jest w ziemnym obwałowaniu górnego zbiornika. Górna powierzchnia budowli wlotowej, wystająca z obwałowania, jest prostokątem o wymiarach rzędu 77 m x 18 m, natomiast stopa budowli wlotowej znajdująca się około 37 m niżej, ma postać prostokąta o wymiarach rzędu 78 m x 24 m. Tuż nad stopą budowli znajduje się galeria drenażowo-kontrolna, której przedłużenia wychodzą na powierzchnię terenu na zboczu poniżej zewnętrznej skarpy obwałowania zbiornika.

Na górnej powierzchni budowli znajdują się punkty kontrolowane o wyznaczonych przemieszczeniach poziomych i repery o wyznaczonych przemieszczeniach pionowych. W galerii drenażowo-kontrolnej znajdują się repery o wyznaczonych przemieszczeniach pionowych.

Budowla przystosowana jest do wypuszczania wody ze zbiornika do rurociągów w cyklu produkowania energii elektrycznej i do ponownego napełniania zbiornika wodą pompowaną rurociągami z dolnego zbiornika – naturalnego jeziora w celu akumulowania energii. Wypuszczanie wody ze zbiornika i ponowne napełnianie go następuje każdego dnia w porach dyktowanych szczytowym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.

Pomiary przemieszczeń punktów rozmieszczonych: na obwałowaniach, na i w budowli wlotowej oraz na terenie otaczającym górny zbiornik prowadzono w czasie remontu zbiornika, który trwał 3 miesiące od maja do lipca 2006 r. W celu umożliwienia remontu zbiornik został całkowicie opróżniony, co spowodowało znaczne odciążenie podłoża pod jego dnem, obwałowaniem, budowlą wlotową i otaczającym terenem, wywołujące przemieszczenia oraz deformacje podłoża i budowli.

*Rys. II.1.a. Górna część badanej budowli**Rys.II.1.b. Schemat badanej budowli*

Dotychczasowe pomiary prowadzone w ciągu ostatnich 7 lat udowodniły, że opróżnienie zbiornika powoduje uwypuklenie się podłoża pod dnem zbiornika, obwałowaniem i szerokim na kilkaset metrów pasem terenu otaczającego zbiornik. Z tego powodu, pod wpływem opróżnienia zbiornika obwałowanie ziemne i żelbetowa budowla wlotowa ulegają uniesieniu i zmianie nachylenia ze zwrotem na zewnątrz zbiornika. Ponowne napełnienie zbiornika powoduje osiadanie i nachylenie tych budowli ze zwrotem do zbiornika.

W czasie prac remontowych następowały duże zmiany temperatury, mające również istotny wpływ na deformacje budowli, co uwidoczniło się zwłaszcza w postaci zmian wymiarów liniowych żelbetowej budowli wlotowej, obliczonych w toku dodatkowej analizy wyników pomiarów przemieszczeń punktów sieci poziomej i wysokościowej, znajdujących się na budowli i w jej wnętrzu.

W celu wyznaczania przemieszczeń powodowanych przez zmiany poziomu piętrzenia wody oraz przemieszczeń związanych z opóźnieniem reakcji podłoża na zmiany obciążenia wykonano 6-krotnie pomiar poziomej i wysokościowej sieci kontrolnej w terminach:

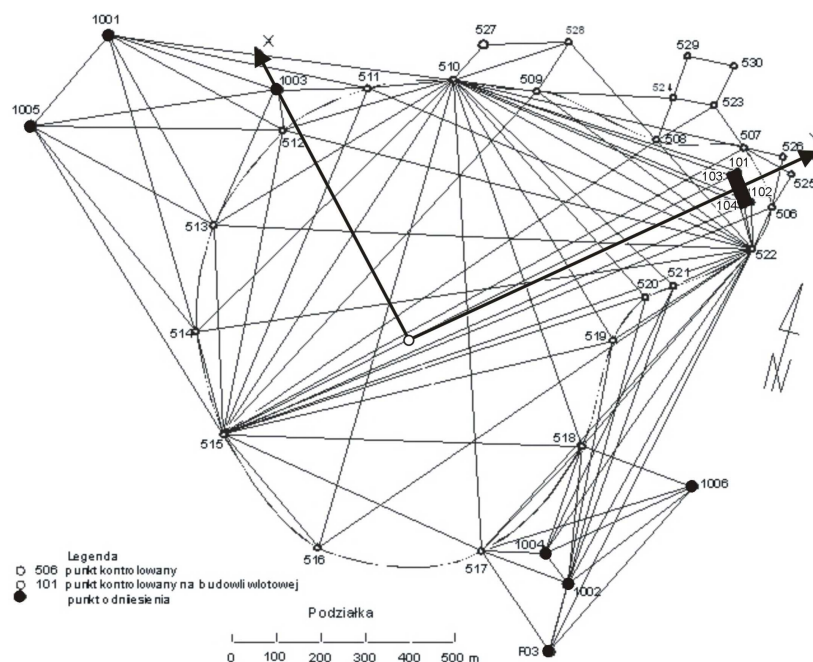
- 1) pomiar (wyjściowy) w kwietniu przy zbiorniku napełnionym do poziomu 124 m n.p.m.; przy średniej temperaturze powietrza rzędu 4°C;
- 2) pomiar w maju, bezpośrednio po opróżnieniu zbiornika, tj. obniżeniu poziomu piętrzenia do 95 m n.p.m., przy temperaturze rzędu 18°C;
- 3) pomiar w pierwszej dekadzie lipca przy zbiorniku opróżnionym, przy temperaturze 28°C;
- 4) pomiar w trzeciej dekadzie lipca przy zbiorniku opróżnionym, przy temperaturze 28°C;
- 5) pomiar w sierpniu, po podniesieniu poziomu piętrzenia wody do 115 m n.p.m., przy temperaturze 22°C;
- 6) pomiar we wrześniu po ponownym napełnieniu zbiornika do poziomu 124 m n.p.m., przy temperaturze 24°C.

W niniejszej pracy jako ilustrację rozwiązania problemu oceny przemieszczeń i deformacji żelbetowego korpusu budowli wlotowej prezentujemy wyniki wybranego pomiaru przemieszczeń w okresie między kwietniem a pierwszą dekadą lipca (porównanie pomiaru trzeciego z pomiarem pierwszym).

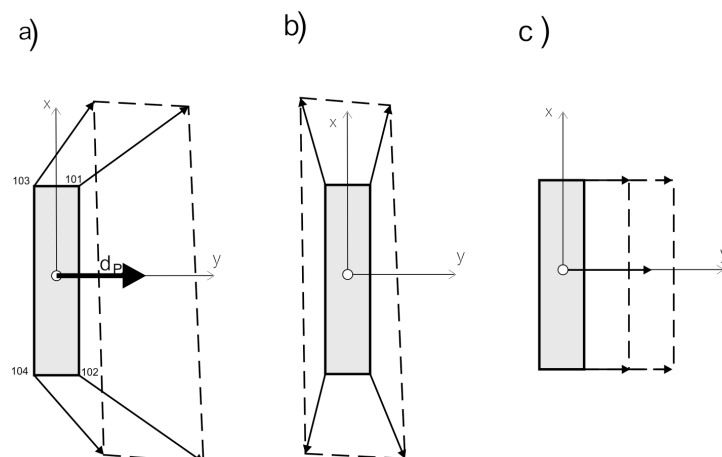
II. 3. PRZEMIESZCZENIA POZIOME PUNKTÓW, PRZEMIESZCZENIA I DEFORMACJE POZIOME GÓRNEJ POWIERZCHNI BUDOWLI WLOTOWEJ

Górna powierzchnia budowli wlotowej ukształtowana jako płaski, poziomy prostokąt o wymiarach 77 m x 18 m, usytuowana jest w stosunku do kierunku północy jak na rys. II. 2. Zwracamy uwagę na to usytuowanie, bowiem po opróżnieniu zbiornika ma ono istotny wpływ na kierunki ogrzewania odsłoniętych powierzchni budowli w wyniku dziennej wędrówki Słońca i na charakter deformacji termicznych. Na górnej powierzchni w pobliżu naroży tego prostokąta znajdują się 4 punkty sieci poziomej nr 101, 102, 103, 104, oznaczone w postaci stanowisk tachimetru elektronicznego i tarcz celowniczych z mechanicznym ich centrowaniem w tulejach o średnicy 20 mm. Osie tych tulej są skierowane pionowo. Punkty 101, 103 znajdują się na sekcji A, zaś punkty 102, 104 na sekcji B budowli wlotowej. Poziome przemieszczenia tych punktów (osi tulej) wyznaczane są za pomocą okresowych pomiarów liniowo-kątowej sieci poziomej pokazanej na rys. II. 2. Współrzędne punktów sieci poziomej

liczone są w lokalnym układzie współrzędnych, którego oś Y jest skierowana wzdłuż osi derywacji tj. prostopadłe do dłuższego boku górnej powierzchni budowli wlotowej. W tym układzie wyznaczone zostały składowe dx , dy poziomych przemieszczeń punktów.



Rys. II. 2. Pozioma sieć kontrolna i rzut poziomy górnej powierzchni badanej budowli



Rys. II. 3. Przemieszczenia poziome górnej powierzchni badanej budowli

Przemieszczenia poziome wyznaczone są w odniesieniu do stałych punktów wybranych w drodze analitycznej oceny stałości spośród punktów oznaczonych symbolem • na rys. II. 2, z błędami standardowymi m_p rzędu 1,1 mm. Wyznaczone z izometrycznej transformacji 3-parametrowej składowe $d\bar{x}$, $d\bar{y}$ przemieszczeń punktów 101–104 zostają wykorzystane jako pseudo-observacje do dalszej analizy, która służy do obliczenia składowych $d\bar{x}$, $d\bar{y}$ poziomego przemieszczenia środka ciężkości figury utworzonej przez nie oraz współczynnika skrętu α i współczynnika zmiany skali β tej figury.

W kwietniu 2006 pomierzono wspomnianą sieć przy temperaturze powietrza rzędu 4°C i poziomie piętrzenia wody w zbiorniku 124 m n.p.m. zaś w pierwszej dekadzie lipca pomierzono ją powtórnie przy temperaturze powietrza rzędu 28°C i przy zbiorniku opróżnionym. Współrzędne X , Y punktów 101–104 wyznaczone z tej sieci w kwietniu i składowe $d\bar{x}$, $d\bar{y}$ wektorów ich przemieszczeń w okresie kwiecień – lipiec osiągnęły wartości wykazane w tabeli II.1.

Tabela II.1. Współrzędne i poziome składowe wektorów przemieszczeń

Numer punktu	X	Y	$d\bar{x}$	$d\bar{y}$
	[m]			
101	38,30	9,05	0,0080	0,0109
102	-38,70	9,05	-0,0090	0,0123
103	38,70	-9,05	0,0083	0,0062
104	-38,70	-9,05	-0,0085	0,0070
			$d\bar{x}$	$d\bar{y}$
przybliżone wartości składowych wektora $d\bar{p}$			-0,0003	0,0091

Na rys. II. 3a rzut poziomy górnej powierzchni budowli wlotowej pokazany jest w skali 4000 razy mniejszej aniżeli wektory poziomych przemieszczeń punktów 101–104. Końce wektorów połączono linią przerywaną tworzącą czworokąt, który obrazuje górną powierzchnię budowli wlotowej po przemieszczeniu i zdeformowaniu (w zniekształceniu spowodowanym na rysunku przez różnice skal górnej powierzchni i wektorów przemieszczeń jej narożników 101–104). Obliczono wartość wektora $d\bar{p}$ przemieszczenia środka ciężkości tego czworokąta jako średnią z wektorów przemieszczeń punktów 101–104 i odłożono ten wektor od punktu na środku górnej powierzchni, oznaczając go linią pogrubioną. Widoczne jest, że górna powierzchnia przemieściła się (w lipcu) w przybliżeniu równolegle do osi Y układu współrzędnych i uległa powiększeniu w stosunku do stanu przed przemieszczeniem punktów (z kwietnia).

Na rys. II. 3b zredukowano wektory przemieszczeń punktów 101–104 pokazane na rys. II. 3a o wektor $d\bar{p}$, w rezultacie czego otrzymano wektory

częściowe wyznaczające czworokąt, który obrazuje samo tylko powiększenie górnej powierzchni bez jej przemieszczenia.

Na rys. II. 3c zredukowano wektory przemieszczeń z rys. II.3a o wektory przemieszczeń z rys. II. 3b, w rezultacie czego otrzymano wektory częściowe wyznaczające czworokąt, który obrazuje samo tylko przemieszczenie górnej powierzchni bez jej powiększenia.

Oczywiście sumy wektorów częściowych przemieszczeń punktów 101–104 z rysunków II. 3b, II. 3c są równe wektorom przemieszczeń odpowiednich punktów z rys. II. 3a.

Widoczne jest, że przedłużenia wektorów częściowych przemieszczeń punktów z rys. II. 3b przebiegają blisko środka ciężkości figury 101–104 zaś końce tych wektorów tworzą figurę powiększoną lecz mającą zbliżony do niej kształt. Świadczy to o powiększeniu figury 101–104 z nieznacznym tylko zdeformowaniem jej kształtu.

Aby zbadać, w jakim stopniu zachowany jest kształt figury tworzonej przez punkty 101–104 po jej przemieszczeniu, wykonano transformację konforemną, 4-parametrową¹ punktów 101–104 o współrzędnych $X + d_x$, $Y + d_y$ do układu współrzędnych X , Y , otrzymując w rezultacie 4 parametry charakteryzujące przemieszczenie figury utworzonej przez punkty 101–104 w lipcu w stosunku do stanu w kwietniu.

Parametry te osiągnęły wartości:

$$\alpha = -12,77 \text{ ppm} (1\text{ppm} = 1 \cdot 10^{-6})$$

$$\beta = 221,78 \text{ ppm}$$

$$d_x = -0,3 \text{ mm}$$

$$d_y = 9,1 \text{ mm}$$

Oznacza to, że przemieszczona i zdeformowana figura uległa obróceniu o kąt poziomy $\alpha = -12,77 \text{ ppm} \times 636620^{\text{cc}} = -8,2^{\text{cc}}$, jej względne wymiary powiększyły się o $\beta = 221,78 \text{ ppm}$, zaś jej środek ciężkości uległ przemieszczeniu poziomemu wzdłuż osi X o $d_x = -0,3 \text{ mm}$ i wzdłuż osi Y o $d_y = 9,1 \text{ mm}$. Całkowite przemieszczenie poziome górnej powierzchni, utożsamiane z przemieszczeniem środka ciężkości, osiągnęło wartość

$$dp = 9,1 \text{ mm} \text{ i skierowane jest w kierunku } Az = 102^{\text{g}}$$

Błąd standardowy wykonanej transformacji osiągnął wartość $m_p = 0,6 \text{ mm}$ znacznie mniejszą od błędu standardowego $m_p = 1,1 \text{ mm}$ wyznaczenia przemieszczenia punktu. Potwierdza to, że przemieszczona figura uległa zdecydowanemu powiększeniu (zmianie wymiarów liniowych) z bardzo małymi zmianami kształtu, mieszczącymi się w granicach dokładności wyznaczenia.

¹ W badaniu tym zastosowano metodę wykorzystania transformacji do badania zmian skali figury opisaną w pracach (Janusz J., 2002), (Janusz J., Janusz W., 2004).

Taki wynik transformacji wskazuje, że powiększenie figury mogło być efektem wzrostu temperatury górnej powierzchni budowli wlotowej. Zakładając, że współczynnik rozszerzalności termicznej betonu, z którego wykonana jest budowla osiąga wartość $\alpha = 12 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, możemy obliczyć przyrost temperatury korpusu budowli na poziomie górnej powierzchni, jaki nastąpił w pierwszej dekadzie lipca w stosunku do temperatury w kwietniu

$$\Delta t = \beta/\alpha = 221,78 \text{ ppm} / 12 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C} = 18,5^{\circ}\text{C}$$

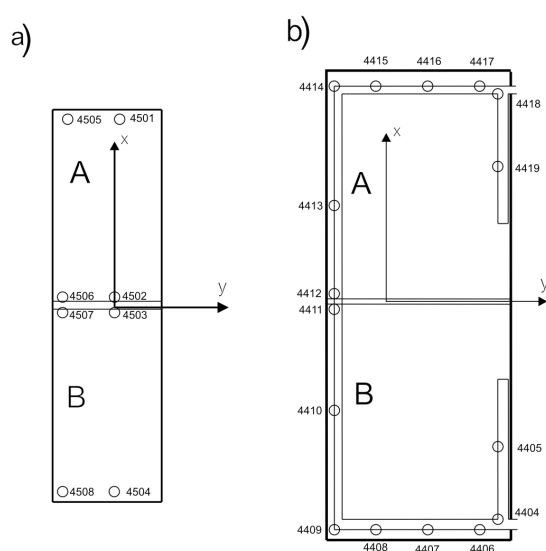
Jak podano wcześniej, zmierzony przyrost temperatury podczas pomiaru wykonanego w lipcu w stosunku do temperatury pomiaru w kwietniu osiągnął $\Delta t_p = 24^{\circ}\text{C}$, tj. zaledwie o $5,5^{\circ}\text{C}$ więcej niż przyrost Δt obliczony na podstawie zmiany wymiarów liniowych górnej powierzchni budowli wlotowej. Trzeba dodać, że nie można oczekiwać pełnej zgodności przyrostów temperatury powietrza i przyrostu temperatury budowli, bowiem reakcja termiczna korpusu budowli, również w strefie przypowierzchniowej następuje w okresie zmian temperatury z opóźnieniem. Stwierdzenie, że zachodzi nierówność $\Delta t_p > \Delta t$, jest naturalnym wynikiem tego, że po okresie chłódów zimowych i wczesnowiosennych korpus budowli ocieplał się wolniej niż powietrze. Dodatkowo trzeba zauważyć, że przyrosty temperatury uzyskane na obu drogach są słabo porównywalne, bowiem przyrost temperatury Δt_p jest średnią różnicą temperatur w porach dnia, w których wykonywano pomiary, natomiast przyrost Δt temperatury górnej powierzchni budowli trzeba traktować jako różnicę między średnimi dobowymi temperatur w okresach pomiarów.

Niewielka różnica między zmierzonym przyrostem temperatury Δt_p i przyrostem Δt obliczonym na podstawie powiększenia wymiarów górnej powierzchni budowli wlotowej wskazuje, że zmiana wymiarów figury utworzonej przez punkty 101–104 mogła być w przeważającym stopniu wynikiem zmiany temperatury.

Dla porządku należy dodać, że powyższa analiza zmian termicznych została dokonana z pominięciem faktu usytuowania punktów 101–104 na dwu sekcjach budowli wlotowej, oddzielonych szczeliną dylatacyjną. Nastąpiło to po sprawdzeniu, przy użyciu zainstalowanych szczelinomierzy XYZ, że nie nastąpiły wzajemne przemieszczenia sekcji wywołujące zmiany szerokości szczeliny dylatacyjnej przekraczające błąd średni wyznaczenia przemieszczeń tych punktów. W tej sytuacji przemieszczenia punktów 101–104 potraktowano tak, jakby punkty te znajdowały się na jednym, monolitycznym bloku budowli.

II. 4. PRZEMIESZCZENIA PIONOWE REPERÓW, PRZEMIESZCZENIA I DEFORMACJE PIONOWE GÓRNEJ POWIERZCHNI BUDOWLI WLOTOWEJ

Na górnej powierzchni budowli wlotowej na poziomie 127,7 m n.p.m znajduje się 8 reperów 4501–4508 rozmieszczonych jak na rys. II. 4a.



Rys.II.4. Rozmieszczenie reperów na i w badanej budowli

Przemieszczenia pionowe dH tych reperów w pierwszej dekadzie lipca w stosunku do pozycji w kwietniu osiągnęły wartości zestawione w tabeli II.2.

Wyznaczono współrzędne X , Y reperów, a następnie ułożono i rozwiązano na zasadach podanych w (Janusz W., 2005) układ równań pseudoobserwacji dH o postaci:

$$dH_i + v_{dH\,i} = -X_i d\varphi_x - Y_i d\varphi_y + dH_o, \quad (1)$$

gdzie wskaźnik „i” w dolnej frakcji oznacza numer reperu.

W rezultacie rozwiązania tego układu obliczono wartości parametrów pionowych przemieszczeń górnej powierzchni: $d\varphi_{x\,g}$, $d\varphi_{y\,g}$ (składowe zmiany nachylenia), $dH_{o\,g}$ (pionowe przemieszczenie początku układu współrzędnych) oraz poprawki v_{dH} i błędy standardowe pseudoobserwacji dH . Wyznaczone poprawki v_{dH} są równe pionowym deformacjom górnej powierzchni w miejscach poszczególnych reperów.

Tabela II. 2. Przesunięcia pionowe reperów na górnej powierzchni budowli

Nr reperu	4501	4502	4505	4506	4503	4504	4507	4508
X [m]	35,00	0,00	35,00	0,00	0,00	-36,40	0,00	-36,40
Y [m]	0,00	0,00	-10,00	-10,00	0,00	-0,80	-10,00	-10,00
H [m]	127,67	127,69	127,68	127,69	127,73	127,69	127,69	127,68
dH [mm]	26,00	26,80	29,10	30,70	27,40	26,70	30,60	29,50
m _{dH} [mm]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
v _{dH} [mm]	-0,47	0,13	-0,67	0,74	0,73	-0,43	0,64	-0,67

Otrzymana wartość błędu m_{dH} świadczy o wystąpieniu nie tylko błędów pomiarów, ale również pionowych deformacji powierzchni o wartościach przekraczających błąd standardowy wyznaczenia przesunięć reperów. Jest to częściowo spowodowane faktem, że sekcja A budowli podlegała nieco różniącym się co do kierunku zmianom nachylenia niż sekcja B. Bliższe omówienie tego problemu znajduje się w pracach (Janusz J., Janusz W., 2004), (Janusz W., 2005).

Parametry pionowych przesunięć górnej powierzchni osiągnęły wartości:

$$\begin{array}{lll}
 \text{zmiana nachylenia} & \text{zmiana nachylenia} & \text{przesunięcie początku} \\
 \text{wzdłuż osi X} & \text{wzdłuż osi Y} & \text{układu współrzędnych} \\
 d\varphi_g = (0,006 \pm 0,010) \text{ mm/m} & d\varphi_g = (0,330 \pm 0,054) \text{ mm/m} & dH_{o,g} = (26,67 \pm 0,38) \text{ mm}
 \end{array}$$

gdzie wskaźnik g w dolnej frakcji oznacza, iż parametry dotyczą górnej powierzchni budowli wlotowej.

Błąd standardowy pseudoobserwacji m_{dH} obliczono na podstawie poprawek v_{dH} uzyskanych z rozwiązania metodą najmniejszych kwadratów układu równań (1) pseudoobserwacji. Wartość tego błędu kształtuje się pod wpływem wartości błędów wykonanych pomiarów oraz wartości pionowych deformacji powierzchni, na której znajdowały się repy przy pomiarze wyjściowym. Błędy parametrów przesunięć obliczono jako błędy funkcji pseudoobserwacji.

Na podstawie wyznaczonych parametrów obliczono całkowitą wartość zmiany nachylenia górnej powierzchni korzystając z zależności

$$d\varphi^2 = d\varphi_x^2 + d\varphi_y^2, \quad (2)$$

i poziomy kierunek tej zmiany

$$Az = \arctg (d\varphi_x/d\varphi_y), \quad (3)$$

Otrzymano

$$d\varphi_g = (0,330 \pm 0,054) \text{ mm/m}, \quad Az_g = (99 \pm 2)^\circ$$

II. 5 PRZEMIESZCZENIA PIONOWE REPERÓW, PRZEMIESZCZENIA PIONOWE I DEFORMACJE DOLNEJ POWIERZCHNI BUDOWLI WLOTOWEJ

W galerii drenażowo-kontrolnej wewnątrz budowli wlotowej na poziomie 91,8 m npm znajduje się 16 reperów rozmieszczonych jak na rys. II. 4b. Ich przemieszczenia pionowe można utożsamić z przemieszczeniami punktów na dolnej powierzchni budowli wlotowej, znajdującej się tuż pod galerią drenażowo-kontrolną. Repery 4412–4419 znajdują się w sekcji A, zaś repery 4404–4411 w sekcji B budowli wlotowej.

Przemieszczenia pionowe dH reperów na górnej powierzchni budowli i w galerii wyznaczono w rezultacie pomiarów jednolitej sieci wysokościowej, odniesionej do reperów stałych znajdujących się w znacznych odległościach od obwałowania zbiornika górnego – poza zasięgiem ugięcia podłoża pod wpływem zmiany jego obciążenia. Przemieszczenia te wyznaczono w wyniku dwukrotnego pomiaru sieci wysokościowej metodą precyzyjnej niwelacji geometrycznej. Błędy standardowe przemieszczeń w odniesieniu do reperów stałych znajdujących się w znacznej odległości od obwałowania wyniosły około 0,7 mm. Błędy wzajemnych przemieszczeń reperów znajdujących się na górnej powierzchni budowli wlotowej można oszacować jako nieprzekraczające 0,2 mm zaś błędy wzajemnych przemieszczeń reperów w galerii można oszacować jako nieprzekraczające 0,4 mm. Te oszacowania wynikają z obserwowania wzajemnych przewyższeń reperów na górnej powierzchni znajdujących się w zasięgu widoczności z jednego stanowiska oraz obserwowania wzajemnych przewyższeń reperów galerii w ciągu niwelacyjnym biegnącym galerią, zamkniętym na reperze, który znajduje się u wylotu galerii na powierzchni terenu.

Współrzędne reperów w galerii oraz ich przemieszczenia pionowe dH , błędy m_{dH} tych przemieszczeń traktowanych jako pseudoobserwacje oraz poprawki v_{dH} , tj. wyznaczone deformacje pionowe budowli w miejscach reperów, zestawiono w tabeli II.3.

Tabela II.3. Przemieszczenia pionowe reperów w galerii nad dolną powierzchnią budowli

Nr reperu	4412	4413	4414	4415	4416	4417	4418	4419
X [m]	0,00	18,43	41,84	42,03	41,56	41,79	40,56	26,91
Y [m]	-9,70	-9,70	-9,68	-1,70	8,65	18,20	20,30	21,52
H [m]	92,00	91,98	91,96	91,90	91,79	91,71	91,67	91,75
dH [mm]	25,20	23,60	22,10	21,00	18,30	15,80	15,50	16,20
m_{dH} [mm]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
v_{dH} [mm]	1,61	0,17	-1,13	-0,24	-0,36	-0,48	-0,27	0,62

Nr reperu	4404	4405	4406	4407	4408	4409	4410	4411
X [m]	-41,59	-27,04	-42,69	-42,19	-42,67	-42,03	-18,79	0,00
Y [m]	20,28	21,53	17,83	8,15	-1,70	-9,70	-9,70	-9,70
H [m]	91,63	91,68	91,62	91,76	91,86	91,91	91,95	92,00
dH [mm]	16,30	17,40	16,60	19,00	21,40	22,80	23,80	25,10
m_{dH} [mm]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
v_{dH} [mm]	-0,17	1,36	-0,49	-0,50	-0,56	-1,14	0,05	1,51

Parametry przemieszczeń pionowych dolnej powierzchni budowli wlotowej osiągnęły wartości:

$$d\phi_{\kappa d} = (0,009 \pm 0,007) \text{ mm/m} \quad d\phi_d = (0,249 \pm 0,018) \text{ mm/m} \quad dH_{od} = (21,17 \pm 0,24) \text{ mm}$$

Na podstawie wyznaczonych składowych $d\phi_{\kappa d}$, $d\phi_d$ obliczono

$$d\phi_d = (0,249 \pm 0,018) \text{ mm/m}, \quad Az_d = (98 \pm 2)^\circ$$

gdzie wskaźnik „d” w dolnej frakcji oznacza, że chodzi o wartości uzyskane „na dole”, tj. w galerii drenażowo-kontrolnej

II.6. WYKORZYSTANIE WYZNACZONYCH PARAMETRÓW PRZEMIESZCZEŃ

II.6.1. Związek między przemieszczeniami poziomymi i pionowymi – charakter przemieszczenia budowli

Wyznaczone parametry wskazują, że pod wpływem opróżnienia zbiornika budowla wlotowa uległa przemieszczeniu pionowemu i zmianie nachylenia.

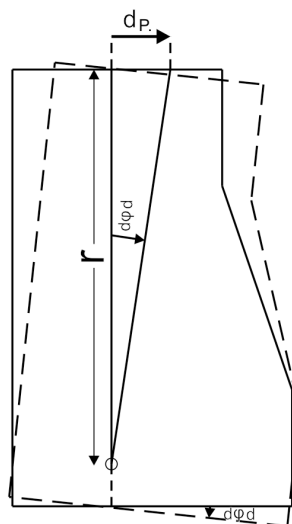
Jest rzeczą znaną, że kierunek poziomy Az przemieszczenia poziomego dp górnej powierzchni jest zbliżony w granicach dokładności wyznaczenia do kierunków Az_ϕ , Az_d zmian nachylenia górnej powierzchni $d\phi_\phi$ i korpusu budowli na poziomie galerii drenażowo-kontrolnej $d\phi_d$. Można więc przypuszczać, że poziome przemieszczenie górnej powierzchni nastąpiło w znacznym stopniu pod wpływem zmiany nachylenia budowli. Korzystając z wyznaczonego wektora dp przemieszczenia górnej powierzchni i z wyznaczonej zmiany nachylenia budowli na poziomie galerii drenażowo-kontrolnej $d\phi_d$, możemy obliczyć długość pionowo skierowanego promienia r obrotu (zmiany nachylenia) budowli:

$$r = dp / d\phi_d = 9,1 \text{ mm} / 0,249 \text{ mm/m} = 36,5 \text{ m}$$

Odejmując wyznaczoną długość promienia r od rzędnej wysokości górnej powierzchni budowli wlotowej, uzyskujemy poziom punktu obrotu budowli $H_{obr} = 127,6 - 36,5 = 91,1 \text{ m n.p.m.}$ Jest to poziom bardzo zbliżony do poziomowi 91,8 m n.p.m., na którym znajdują się repery w galerii drenażowo-kontrolnej.

Galeria ta znajduje się tuż nad stopą budowli posadowioną na poziomie 91 m n.p.m. Zakładając więc, że korpus budowli nie uległ wygięciu w płaszczyźnie pionowej, można powiedzieć, że pionowy obrót budowli nastąpił wokół osi poziomej skierowanej prostopadle do kierunku zmiany nachylenia, przechodzącej przez punkt obrotu znajdujący się kilka metrów nad stopą budowli. Wynika z tego wniosek, że stopa budowli wlotowej mogła ulec zaledwie nieznacznemu przemieszczeniu poziomemu (rzędu 1 mm, tj. w granicach dokładności wyznaczenia przemieszczenia poziomego), a wyznaczone poziome przemieszczenie górnej powierzchni jest zapewne w przeważającym stopniu wynikiem zmiany nachylenia budowli.

Taki wynik obliczenia można zilustrować na schematycznym rys. II.5 zmiany położenia pionowego przekroju poprzecznego korpusu budowli wlotowej.



Rys. II.5. Obraz zmiany nachylenia przekroju badanej budowli

Należy dodać, że podobne obliczenie promienia r na podstawie wektora dp i wyznaczonej zmiany nachylenia górnej powierzchni $d\phi_g$ przynosi wynik $r = 25,5$ m. Wynik ten uznamy jednak za niemiarodajny do oceny położenia wysokości punktu (osi) pionowego obrotu budowli. Zauważmy bowiem, że wyznaczona zmiana nachylenia górnej powierzchni $d\phi_g = 0,330$ mm/m różni się znacznie od zmiany nachylenia podstawy budowli wyznaczonej na poziomie galerii $d\phi_d = 0,249$ mm/m, czego przyczyną jest niewątpliwie nierównomiernie działający wpływ przyrostu temperatury korpusu budowli w miejscach mniej i bardziej ogrzanych. Zagadnienie to jest omówione w punkcie II.6.2.

II.6.2. Zmiany termiczne korpusu budowli

Rozpatrzmy wyznaczoną zmianę własnej wysokości budowli. W linii pionowej przechodzącej przez przyjęty początek układu współrzędnych jest ona równa $dh_o = dH_{o,g} - dH_{o,d} = 26,67 \text{ mm} - 21,17 \text{ mm} = (5,50 \pm 0,45) \text{ mm}$. Dzieląc uzyskaną wartość przez różnicę wysokości górnej powierzchni i reperów w galerii $\Delta h = 127,7 \text{ m} - 91,8 \text{ m} = 35,9 \text{ m}$ otrzymamy względne zwiększenie wysokości budowli $dh_o / \Delta h = 5,50 \text{ mm} / 35,9 \text{ m} = 0,000154$ i wynikającą z niego średnią różnicę temperatur korpusu budowli $\Delta t = 12,8^\circ\text{C}$ w linii pionowej przechodzącej przez początek układu współrzędnych, znajdujący się w pobliżu środka rzutu poziomego górnej powierzchni budowli.

Należy podkreślić, że różnica temperatur korpusu budowli wyznaczona na podstawie różnic pionowych przemieszczeń górnej powierzchni i podstawy budowli na poziomie galerii drenażowo-kontrolnej ma charakter **średniej** różnicy temperatur na rozpatrywanym pionowym przekroju budowli. Podkreślenie to wynika ze znanego faktu, że sezonowe zmiany temperatury zagłębionej w obwałowaniu ziemnym dolnej części korpusu budowli na poziomie dolnej galerii są znacznie mniejsze od sezonowych zmian temperatury górnych fragmentów korpusu budowli w pobliżu jej górnej powierzchni, wystawionych w większym stopniu na oddziaływanie zmian temperatury otoczenia budowli. Trzeba więc pamiętać, że zmiany temperatury na pionowych przekrojach budowli nie są równomierne, a ich szczegółowe wyznaczenie wymagałoby instalowania termometrów ze zdalnym odczytem w rozpatrywanym pionowym przekroju korpusu budowli w odpowiednich odstępach pionowych, umożliwiających prawidłową interpolację wskazań.

Widoczne jest, że zmiana temperatury korpusu budowli ustalona na podstawie przyrostu jej własnej wysokości jest znacznie mniejsza od zmiany temperatury ustalonej wcześniej na podstawie zwiększenia wymiarów górnej powierzchni budowli wlotowej. Jest to wynik logiczny, bowiem odsłonięta górna powierzchnia budowli była w większym stopniu narażona na wpływ zachodzących zmian temperatury powietrza aniżeli korpus budowli zagłębiony częściowo w obwałowaniu ziemnym górnego zbiornika a ponadto była narażona na bezpośrednie oddziaływanie promieni słonecznych.

Różnica zmiany nachylenia górnej powierzchni i powierzchni podstawy budowli $d\phi_g - d\phi_d = 0,330 - 0,249 = 0,081 \text{ mm/m}$ wskazuje, że przednia ściana budowli wlotowej przylegająca do zbiornika (przy której znajdują się punkty 103, 104 sieci poziomej), odsłonięta po jego opróżnieniu, uległa większemu wydłużeniu pionowemu niż tylna ściana tej budowli, zagłębiona w obwałowaniu ziemnym (przy której znajdują się punkty 101, 102 sieci poziomej). Jest to oczywisty skutek nierównomierności przyrostów temperatury w różnych miejscach żelbetowego korpusu budowli. Różnica nachylenia górnej powierzchni i powierzchni podstawy budowli wlotowej pomnożona przez poziomą odległość od początku układu współrzędnych do ściany

graniczącej ze zbiornikiem, wskazuje, że pionowe wydłużenie tej ściany dh mogło być większe od dh_o . Osiągnęło ono zapewne wartość $dh=dh_o+10\text{m} \times 0,08 \text{ mm/m} = 6,3 \text{ mm}$, co wskazuje, że względny wzrost wysokości tej ściany osiągnął $6,3 \text{ mm} / 35,9 \text{ m} = 0,000175$, zaś temperatura korpusu w strefie przylegającej do tej ściany wzrosła o $14,6^\circ\text{C}$, tj. o $1,8^\circ\text{C}$ więcej niż przyrost temperatury w środkowym przekroju korpusu budowli.

Na tej samej zasadzie możemy obliczyć pionowe wydłużenie ściany tylnej $dh = dh_o - 8 \text{ m} \times 0,08 \text{ mm/m} = 4,9 \text{ mm}$, co wskazuje, że względny wzrost wysokości osiągnął tu $4,9 \text{ mm} / 35,9 \text{ m} = 0,000136$, zaś temperatura korpusu budowli w pobliżu tylnej ściany górnej powierzchni wzrosła o $11,4^\circ\text{C}$, tj. mniej o $1,4^\circ\text{C}$ od wzrostu temperatury korpusu w środkowym przekroju budowli.

LITERATURA

- Jamiołkowski M. B., 2004; *Ostateczna stabilizacja Krzywej Wieży w Pizie*. Inżynieria i Budownictwo 6.
- Janusz W., 1974, *Geometryczna interpretacja wyników pomiarów osiadań budynków*. Referaty szkoleniowe z geodezji budowlanej. Biuletyn Geoprojektu.
- Janusz W., 1975, *Obsługa geodezyjna budowli i konstrukcji*. Wydanie II, PPWK, Warszawa.
- Janusz W., 1976, *Transformacja współrzędnych bez zniekształceń*. Przegląd Geodezyjny 4.
- Janusz J., 2002, *Błędy skali w sieciach liniowych do wyznaczania przemieszczeń poziomych*. Prace IGiK, z.105.
- Janusz J., Janusz W., 2004, *Metodyka badania podatności budowli piętrzących wodę na zmiany obciążenia*. Seria Monograficzna nr 9, Instytut Geodezji i Kartografii.
- Janusz J., Janusz W., 2005, *Badanie przemieszczeń i deformacji komory wlotowej w Elektrowni Wodnej „Żarnowiec” pod wpływem opróżniania zbiornika górnego*, Geodeta 9.
- Janusz W., 2005, *Metoda obliczania pionowych przemieszczeń i deformacji fundamentu budowli z identyfikacją i uwzględnieniem symptomów jego nieciągłości*, Prace IGiK, tom LI, zeszyt 109.
- Janusz J., Janusz W., 2006, *Wyznaczanie wpływu obciążenia i odciążenia podłoża budowlanego na deformacje podłoża i fundamentów budowli – Głębokie wykopy*, Geodeta 2.
- Janusz J., Janusz W., 2007, *Zmiany termiczne, przemieszczenia i deformacje masywnej, żelbetowej budowli wodnej w świetle wyników pomiarów geodezyjnych*, Przegląd Geodezyjny 11.
- Kłosiński B., 2004, *Rozmyślenia o współczesnych problemach geotechniki*. Inżynieria i Budownictwo 6.

- Lazzarini T. i in., 1977, *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. PPWK Warszawa.
- Szokarew W. S., Klepikowa N.S., Pogorzelski B., 2005, *O eliminowaniu nadmiernych przechyleń obiektów budowlanych*. Inżynieria i Budownictwo 3.
- Szulborski K., Nalewajko R., 2004, *Analiza osiadań budynku wysokościowego w Warszawie*. Inżynieria i Budownictwo 5.

JERZY JANUSZ

WOJCIECH JANUSZ

ANRDZEJ KALIŃSKI

Instytut Geodezji i Kartografii

Część III

WSTĘPNE BADANIE UGIĘĆ PODŁOŻA POD DNEM ZBIORNIKA WODNEGO

ZARYS TREŚCI: Zestawiono wyniki dotychczasowych badań ugięć podłoża na terenie otaczającym zbiornik wodny pod wpływem zmiany obciążenia powodowanej napełnieniem lub opróżnieniem zbiornika. Dają one podstawę do wniosku, że pod wpływem napełniania zbiornika powierzchnia obwałowania i terenu otaczającego zbiornik ulega osiadaniu tworzącemu wklęsłą czaszę ugięcia, zaś pod wpływem opróżnienia czasza ugięcia podlega uwypukleniu ku górze. Z wyznaczonego kształtu części czaszy na obszarze otaczającym zbiornik wynika, że na jej części środkowej, obejmującej obszar samego zbiornika, następują pod wpływem zmian poziomu piętrzenia wody znacznie większe przemieszczenia pionowe podłoża. Przedstawiono koncepcję wyznaczania pionowych przemieszczeń dna zbiornika pod wpływem zmian obciążenia za pośrednictwem wyznaczania przemieszczeń wierzchołków masztów stalowych ustawionych na dnie zbiornika. Omówiono eksperyment polegający na wyznaczeniu pionowego przemieszczenia masztu stalowego ustawionego na dnie w pobliżu środka zbiornika. Wyznaczone w tym miejscu osiadanie masztu pod wpływem zwiększenia poziomu wody w zbiorniku o 10 m wyniosło -29 mm, tj. -2,9 mm/m. Jest to osiadanie około 4x większe od osiadania korony obwałowania tego zbiornika.

III.1. WPROWADZENIE – WYNIKI BADANIA UGIĘĆ PODŁOŻA W OTOCZENIU ZBIORNIKA WODNEGO

W ramach zakończonego projektu badawczego 5T12E 021 25, którego wyniki są opisane w pracy (Janusz J, Janusz W. „Metodyka badania podatności budowli piętrzących wodę na zmiany obciążenia”, Monografia nr 9 IGiK), opracowaliśmy i zastosowaliśmy metodę wyznaczania przemieszczeń i wskaźników jednostkowych, charakteryzujących przemieszczenia i deformacje budowli i podłoża na obszarze otaczającym zbiornik wodny następujące pod wpływem przemiennego napełniania i opróżniania tego zbiornika, tj. zmieniania obciążeń podłoża pod zbiornikiem.

Do tego celu wykorzystaliśmy przemieszczenia poziome 17 słupów- stanowisk na koronie ziemnego obwałowania zbiornika, 4 stanowisk na górnej powierzchni żelbetowej budowli wlotowej i 15 słupów zastabilizowanych w podłożu na terenie otaczającym zbiornik oraz przemieszczenia pionowe 20 reperów zastabilizowanych na koronie obwałowania, 17 reperów przy krawędzi zewnętrznej skarpy obwałowania z terenem, 8 reperów na górnej powierzchni budowli wlotowej, 16 reperów w galerii nad stopą budowli wlotowej i reperów w galeriach komunikacyjnych oraz kilkunastu reperów zastabilizowanych na obszarze skarpy naturalnej, wymagającej szczególnie pieczołowitego kontrolowania.

W każdym roku następuje jednorazowo całkowite opróżnienie zbiornika, stanowiącego obiekt badań, do celu przeglądu technicznego stanu szczelnej wykładziny dna i wewnętrznej skarpy obwałowania. W związku z tym w latach 2001–2007 kilkakrotnie wyznaczaliśmy przemieszczenia poziome i pionowe wspomnianych punktów na podstawie par pomiarów wykonanych przy zbiorniku całkowicie napełnionym (do poziomu 124 m n.p.m.) i przy zbiorniku całkowicie opróżnionym (do poziomu 95 m n.p.m.). Całkowite opróżnienie zbiornika jest równoznaczne z usunięciem z niego 15 mln m³ wody i z wynikającym z tego odciążeniem dna i skarpy wewnętrznej w poszczególnych miejscach zbiornika w granicach od 0 do 3 kG/cm².

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdziliśmy fakt, że pod wpływem opróżnienia zbiornika następuje na obszarze otaczającym zbiornik uwypuklenie podłoża, natomiast w wyniku napełnienia, pod wpływem obciążenia wodą następuje tam zakłębienie podłoża. Obrazem pionowych przemieszczeń pod wpływem odciążenia dna i wewnętrznej skarpy obwałowania zbiornika przez jego opróżnienie są średnie wieloletnie izolinie charakteryzujące uniesienie powierzchni zewnętrznej skarpy obwałowania i terenu w otoczeniu zbiornika, pokazane na rys. III.1.

W wyniku tych badań stwierdziliśmy też, że pod wpływem opróżnienia zbiornika następują przemieszczenia poziome punktów na koronie obwałowania wskazujące, że figura utworzona przez te punkty ulega powiększeniu, natomiast napełnienie zbiornika wywołuje zmniejszenie tej figury. Ilustracją przemieszczeń poziomych są średnie wieloletnie wektory przemieszczeń słupów na koronie obwałowania i na otaczającym terenie pod wpływem opróżnienia zbiornika, pokazane na rys. III.1. Widoczny charakterystyczny obraz w postaci w przybliżeniu koncentrycznie skierowanych wektorów poziomych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania ma silny związek ze zmianami nachylenia podłoża pod obwałowaniem wywołanymi przez odciążenie dna zbiornika przy jego opróżnieniu.

Tak więc granica czaszy ugięcia podłoża na tym fragmencie terenu przebiega w odległości rzędu 200–250 m od zewnętrznej krawędzi obwałowania. Należy dodać, że w fazie projektowania i początkowego okresu eksploatacji tego obiektu, gdy jeszcze nie było informacji o przemieszczeniach, oceniano, że granica czaszy ugięcia podłoża będzie przebiegać w odległości około 400 m od zbiornika.

Wyznaczone wskaźniki i przemieszczenia są przydatne do bieżącej oceny bezpieczeństwa obwałowań i budowli istniejących w otoczeniu zbiornika, mogą też być wykorzystane jako dane orientacyjne do porównania z wynikami powtarzanych pomiarów przemieszczeń i do oceny stanu bezpieczeństwa innych obiektów piętrzących wodę o podobnych warunkach posadowienia i reżimu pracy.

Między innymi wyznaczone przemieszczenia pionowe reperów na koronie obwałowania posłużyły do określenia bezwzględnej wartości średniego dla korony wskaźnika jednostkowego osiadania pod wpływem napełnienia lub wypiętrzenia pod wpływem opróżnienia zbiornika $w_{Hj} = 0,7$ mm/m. Należy jednak podkreślić, że wartości tego wskaźnika w miejscach poszczególnych reperów na koronie różnią się w granicach 50%, co ilustruje wykres pokazany na rys. III.2. Ma to częściowo związek z ukształtowaniem dna zbiornika, którego warstwy pokazano na rys. III.3. Warstwy te umożliwiają określenie wysokości słupa wody w każdym miejscu zbiornika przy określonym poziomie jego napełnienia. Widoczne jest, że repery na koronie, w pobliżu których znajdują się płytsze fragmenty zbiornika zmieniają na ogół swą wysokość w wyniku napełnienia lub opróżnienia w mniejszym stopniu niż repery w rejonach korony, w pobliżu których zbiornik jest głębszy a jego napełnienie powoduje tam większy miejscowy przyrost lub ubytek obciążenia. Nie jest to jednak zależność prosta, bowiem o reakcji na zmiany obciążenia zbiornika w postaci pionowych przemieszczeń korony obwałowania decydują też różnice w budowie podłoża pod poszczególnymi miejscami zbiornika i obwałowania oraz różnice poziomu wody gruntowej.

Wartość wskaźnika jednostkowego przemieszczeń pionowych dla reperów rozmieszczonych nieco dalej od zbiornika, tj. przy krawędzi zewnętrznej skarpy obwałowania z powierzchnią terenu, wyniosła $w_{Hj} = 0,5$ mm/m, co potwierdza, że wartość wskaźnika zmniejsza się w miarę oddalania od zbiornika.

Na podstawie wektorów poziomych przemieszczeń punktów na koronie obwałowania obliczono średnią wieloletnią bezwzględną wartość jednostkowego wskaźnika powiększenia lub zmniejszenia figury utworzonej przez te punkty pod wpływem opróżnienia lub napełnienia zbiornika $w_{pj} = 0,8$ ppm/m¹.

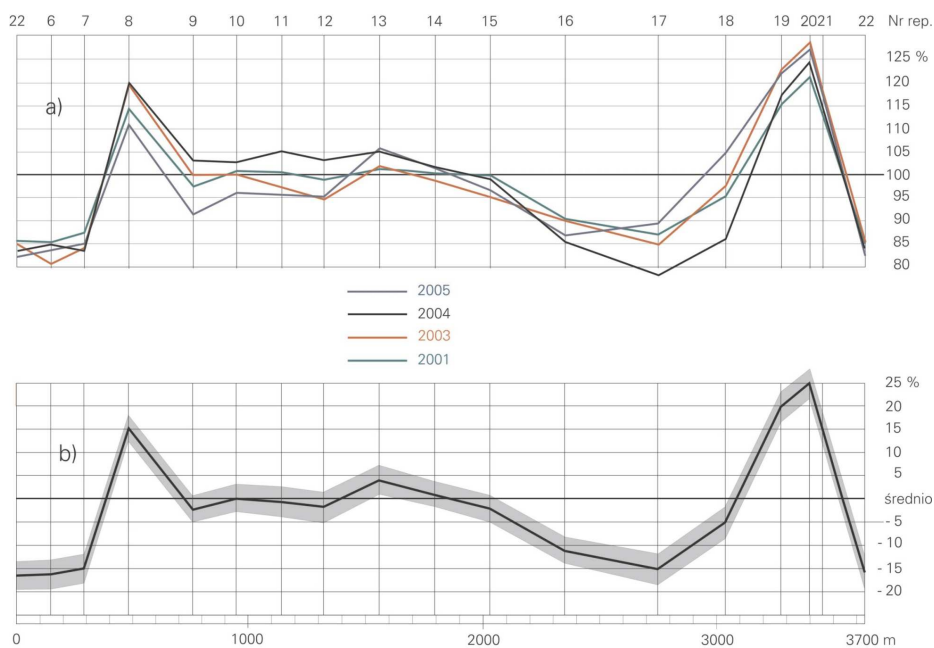
¹ Trzeba pamiętać, że ugięcia podłoża pod zbiornikiem wynikają ze zmiany jego obciążenia powstającej wskutek zmian poziomu wody w zbiorniku. Natomiast wyznaczane dotychczas przemieszczenia podłoża i budowli w otoczeniu zbiornika, mają charakter wtórny, bowiem następują bez zmiany obciążenia w miejscu pomiaru przemieszczenia. Wynikają one z tego, co się dzieje w sąsiedztwie dzięki zachowaniu „ciągłości, spójności i sprężystości” podłoża nie tylko na obszarze występowania zmian obciążenia, ale również wokół niego.

KORONA OBWAŁOWANIA ZBIORNIKA GÓRNEGO ELEKTROWNI WODNEJ ŻARNOWIEC

Wykresy różnic wskaźnika jednostkowego W_{is} wypiętrzeń pod wpływem opróżnienia zbiornika:

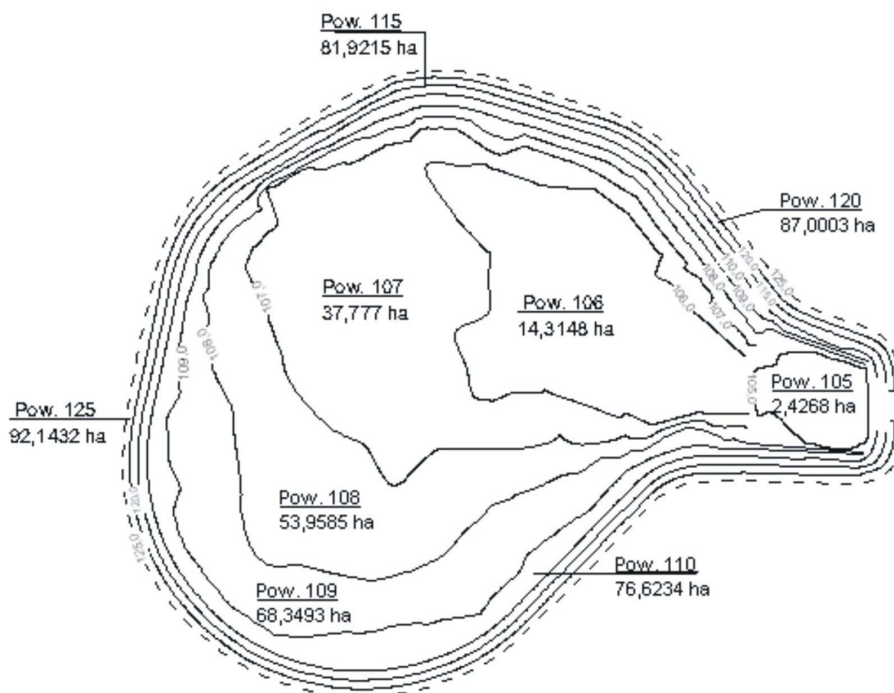
a) wyznaczone w latach: 2001, 2003, 2004, 2005;

b) średnie z 4-ch wyznaczeń w okresie 2001-2005



Rys. III.2. Wskaźniki osiadań korony

Możliwość wyznaczania parametrów ugięć podłoża również na obszarze samego zbiornika jest interesująca dla geotechników i hydrotechników zajmujących się projektowaniem i kontrolą bezpieczeństwa budowli piętrzących. Jest to spowodowane tym, że wielkości i charakter ugięć podłoża pod bezpośrednim wpływem zmiany obciążenia mają istotne znaczenie dla trwałości szczelnej wykładziny dna i wewnętrznej skarpy zbiornika, od których w głównym stopniu zależy bezpieczeństwo obiektu. Ponadto wiedza o ugięciach podłoża pod określonymi obciążeniami jest niezwykle przydatna do określenia nośności podłoża, stanowiącej ważny parametr potrzebny do projektowania kolejnych budowli wodnych.



Rys. III.3. Warstwy dna zbiornika

III.2. KONCEPCJA METODY WYZNACZANIA UGIĘĆ PODŁOŻA NA OBSZARZE ZBIORNIKA WODNEGO

Zgodnie z naszą koncepcją, w celu wyznaczenia pionowych przemieszczeń i ugięć podłoża pod zbiornikiem należy na dnie opróżnionego zbiornika ustawić w wybranych miejscach metalowe maszty o takiej wysokości, aby przy zbiorniku napełnionym ich wierzchołki były widoczne ze stanowisk na koronie obwałowania. Przedmiotem wyznaczania mają być pionowe przemieszczenia wierzchołków masztów utożsamiane z pionowymi przemieszczeniami dna zbiornika w miejscach ich ustawienia, oczywiście z uwzględnieniem poprawek ze względu na termiczne i sprężyste zmiany własnej wysokości masztów.

Wyznaczenie pionowego przemieszczenia dH_C wierzchołka masztu ustawionego w punkcie C (rys. III.5) polega na wykonaniu dwu pomiarów różnic wysokości metodą niwelacji trygonometrycznej (tj. na podstawie kątów zenitalnych) ze stanowiska P na koronie obwałowania przy celowaniu na wierzchołek masztu C i na reper odniesienia O, znajdujący się poza zasięgiem wpływu obciążenia i odciążenia zbiornika (na zewnątrz od granicy czaszy ugięcia podłoża). Pierwszy pomiar wykonuje się przy zbiorniku napełnionym, zaś drugi przy zbiorniku opróżnionym, wyznaczając przemiesz-

czenie odpowiadające odciążeniu podłoża. Możliwe jest też stosowanie odwrotnej kolejności obu pomiarów w przypadku, gdy wyznaczenie rozpoczyna się przy zbiorniku opróżnionym i odbywa się w trakcie napełniania zbiornika. Oczywiście wówczas następuje zmiana znaku wyznaczanego przemieszczenia, wynikająca z efektu obciążenia podłoża. O kolejności pomiarów decyduje przede wszystkim dążenie do tego, aby obydwa pomiary odbywały się w niedużym odstępie czasu i w zbliżonych warunkach atmosferycznych, wówczas bowiem można uznać, że wyznaczone przemieszczenie pionowe punktu C jest spowodowane odciążeniem lub obciążeniem podłoża, a nie innymi czynnikami.

Do obliczenia przemieszczeń pionowych punktów P i C względem nieruchomego punktu O , znajdującego się poza granicami czaszy ugięcia podłoża, potrzebna jest znajomość poziomych odległości d , które wskutek przemieszczeń poziomych punktów P i C mogą nie być jednakowe przy obydwu pomiarach. Ponadto konieczna jest znajomość współczynnika refrakcji atmosferycznej w przypadku, gdy jego wartość też może się różnić przy pomiarze, w czasie którego celowa przebiega tuż nad wodą od wartości przy pomiarze, w czasie którego celowa przebiega na znacznej wysokości nad dnem opróżnionego zbiornika. Podczas obydwu pomiarów trzeba też mierzyć temperaturę powietrza i wody w celu wprowadzenia do wyników ewentualnej poprawki ze względu na termiczną zmianę wysokości masztu.

Możliwe jest również wyznaczanie pionowych przemieszczeń dH_C punktu C za pomocą powtarzanego pomiaru kąta zenitalnego przy celowaniu ze stanowiska P na wierzchołek masztu i przy wykorzystaniu przemieszczenia dH_{st} stanowiska P , wyznaczonego metodą niwelacji precyzyjnej na podstawie wyników pomiarów sieci reperów na obwałowaniu i na otaczającym terenie. Ten wariant wyznaczenia wydaje się korzystniejszy z uwagi na dokładność i z przyczyn organizacyjnych.

III.3. REALIZACJA KONCEPCJI

Realizacja tej na pozór prostej koncepcji nie jest łatwa ze względu na warunki eksploatacji zbiornika i inne czynniki decydujące o możliwościach pomiarowych. Wynika to głównie z faktu, że terminy napełnienia i opróżnienia oraz czas pozostawiania zbiornika w stanie napełnionym lub opróżnionym są ściśle podporządkowane programowi eksploatacji szczytowo-pompowej elektrowni wodnej, pracującej w powiązaniu z całą siecią elektrowni w celu zaspakajania krajowego zapotrzebowania na energię. Tak więc pomiar w trakcie napełniania lub opróżniania należy wykonać na tyle szybko, aby zachodzące w czasie pomiaru zmiany poziomu piętrzenia można było uznać za zanedbywalnie małe do określania związku między przemieszczeniami a obciążeniami dna zbiornika. Jednocześnie pomiar ten musi się odbywać w terminie wymuszonym wspomnianymi warunkami eksploatacji, niezależnie od tego czy w tym terminie panują dobre dla pomiaru warunki atmosferyczne. Byłoby

najlepiej, gdyby pomiary przy zbiorniku opróżnionym i zbiorniku napełnionym były wykonane kilka dni po osiągnięciu tych stanów, tj. po ustabilizowaniu się pionowych przemieszczeń, jednak jest to w większości przypadków praktycznie niemożliwe. W tej sytuacji trzeba uznać, że niekorzystną cechą wyznaczania przemieszczeń dna w warunkach, gdy pomiar odbywa się w trakcie napełniania lub opróżniania zbiornika jest możliwość pewnego zniekształcenia wyników wskutek wystąpienia opóźnień osiadań lub wypiętrzeń podłoża w stosunku do momentu, w którym nastąpiła zmiana obciążenia.

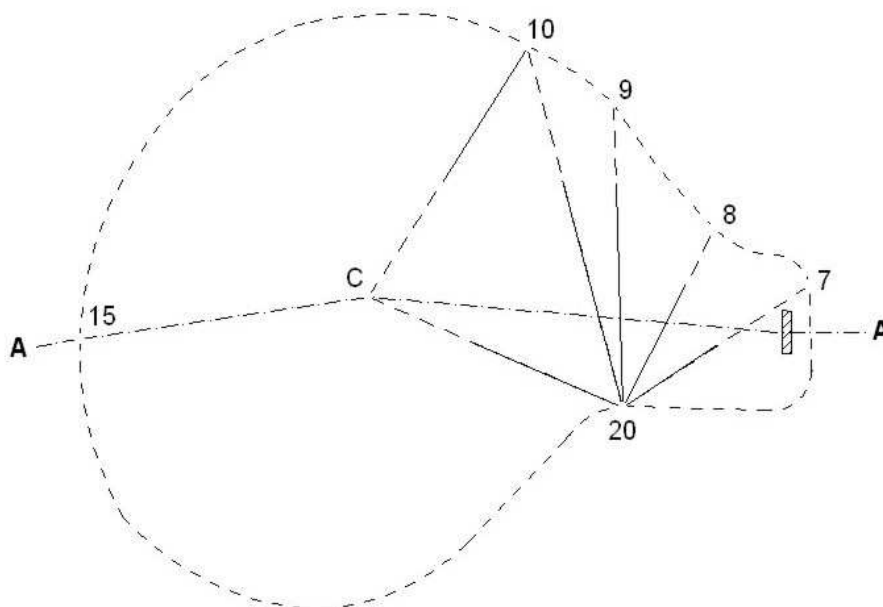
Eksperyment polegający na wyznaczeniu pionowego przemieszczenia dna w jednym wybranym punkcie przeprowadzono w 2006 r., korzystając z długotrwałego opróżnienia zbiornika do celów remontowych. Właściciel elektrowni, zainteresowany wynikami tego eksperymentu wykonał maszt metalowy pokazany na rys. III.4 i ustawił go w punkcie C na dnie w pobliżu środka zbiornika, jak to pokazuje rys. III.5. Jak widać na rys. III.4, podstawa masztu została obciążona blokami betonowymi przed jego przemieszczeniami po powierzchni dna, które mogłyby nastąpić pod wpływem działania wiatru i pod wpływem ruchu wody podczas napełniania i opróżniania zbiornika.



Rys. III.4. Maszt

Niestety ze względu na bardzo intensywne przygotowania do prac remontowych możliwe było wówczas wykonanie tylko jednego masztu. Nie było też możliwe w tym czasie wykonanie masztu tak wysokiego, aby jego wierzchołek sięgał do poziomu wyższego od maksymalnego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku (124 m n.p.m.). Wykonany maszt o wysokości własnej 11 m został ustawiony na dnie zbiornika w miejscu o wysokości

106 m n.p.m., w związku z czym jego wierzchołek znalazł się na wysokości 117 m n.p.m. W tej sytuacji w planie obserwacji należało uwzględnić fakt, że pomiar wyjściowy będzie wykonany przy zbiorniku opróżnionym, zaś pomiar drugi nie po całkowitym napełnieniu zbiornika lecz w trakcie napełniania. Udało się jedynie uzgodnić, że w trakcie napełniania zbiornika, po osiągnięciu poziomu piętrzenia 116 m n.p.m., przy którym trzeba było wykonać drugi pomiar aby zdążyć przed całkowitym zakryciem masztu, nastąpi krótka przerwa w dalszym napełnianiu, umożliwiającą wykonanie tego pomiaru. Chodziło głównie o to, by zdążyć przy jednym stanie napełnienia zbiornika z wyznaczeniem przemieszczenia wierzchołka masztu nie z jednego, lecz z trzech stanowisk na koronie obwałowania w celu uzyskania niezależnej kontroli wyników.



Rys. III.5. Miejsce ustawienia masztu

Wyznaczono współrzędne wierzchołka masztu ustawionego w punkcie C metodą wcięć kątowych w przód ze stanowisk nr 10, 15, 20 na koronie obwałowania, niezbędne do obliczenia odległości punktu C od tych stanowisk. Następnie pomierzono przy zbiorniku opróżnionym kąty zenitalne przy celowaniu na punkt C ze stanowisk nr 10, 15, 20 i powtórzono ich pomiar po napełnieniu zbiornika do poziomu 116 m n.p.m. Pomiary te wykonano precyzyjnym tachimetrem TC2002 firmy Leica, ustawianym na płytach centrujących stanowisk, przy celowaniu na poziomo usytuowany, czarny pierścień nasadzony na jaskrawo-żółty wierzchołek masztu.

Równocześnie, zgodnie z rys. III.5, wykonano ze stanowiska nr 20 pomiary kątów zenitalnych do tarcz celowniczych ustawionych na stanowiskach nr 7, 8, 9, 10 przy zbiorniku opróżnionym i powtórzono je przy zbiorniku napełnionym do poziomu 116 m n.p.m. Przeszacowania pionowe tych stanowisk, przy zbiorniku opróżnionym i napełnionym do poziomu 116 m n.p.m., zostały wyznaczone metodą niwelacji precyzyjnej. Pomiary te wykonano w celu sprawdzenia, czy zmiana poziomu piętrzenia wody nie wpłynęła na zmiany wartości współczynnika refrakcji atmosferycznej. Stwierdzono, że zmierzone na tych celowych różnice kątów zenitalnych nie wykazały wpływu zmian wartości współczynnika refrakcji, wobec czego możliwe stało się obliczanie przeszacowań punktu *C* metodą różnicową, przy założeniu, że wpływ refrakcji, jednakowy przy obu pomiarach, uległ zniesieniu.

Na podstawie wektorów przeszacowań poziomych stanowisk na koronie obwałowania pokazanych na rys. III.1 stwierdzono, że podniesienie poziomu piętrzenia wody od stanu zbiornika opróżnionego do poziomu 116 m n.p.m. wywołało zmiany odległości *d* od stanowisk na koronie do punktu *C* nieprzekraczające 0,00005 *d*, co oznacza, że przy odchyleniach celowych od poziomu w granicach nieprzekraczających 2^g są to zmiany zaniedbywalnie małe i mogą być pominięte przy obliczaniu przeszacowań punktu *C*.

Na podstawie różnic pomierzonych kątów zenitalnych obliczono przeszacowania pionowe dH_{wzgl} punktu *C* względem punktów nr 10, 15, 20. Podniesienie poziomu wody w zbiorniku do poziomu 116 m n.p.m., spowodowało pionowe przeszacowania dH_{st} stanowisk nr 10, 15, 20, których wartości wyznaczono z niwelacji precyzyjnej. Obliczono całkowite przeszacowania $dH_C = dH_{wzgl} + dH_{st}$ punktu *C* względem nieruchomych reperów odniesienia, znajdujących się nazewnątrz czaszy ugięcia podłoża. Przeszacowania te nastąpiły pod wpływem podniesienia poziomu wody w punkcie *C* o 10 m. Wyniki pomiarów i obliczenia zestawiono w tab. III.1

Tabela III. 1. Obliczenie przeszacowania dna zbiornika w punkcie *C*

Nr stanowiska na koronie			10	15	20
		miana			
Zbiornik opróżniony	φ	[cc]	1014104	1014437	1014937
Zbiornik napełniony do 116 m n.p.m.	φ'	[cc]	1014132	1014464	1014959
	$d\varphi = \varphi' - \varphi$	[cc]	28	27	22
Odległość od stanowiska	<i>d</i>	[m]	543,360	531,640	508,800
Przeszacowanie względne	dH_{wzgl}	[mm]	-24	-23	-18
Przeszacowanie stanowiska	dH_{st}	[mm]	-6	-6	-10
Przeszacowanie całkowite	dH_C	[mm]	-30	-29	-28
Średnie całkowite przeszacowanie punktu <i>C</i>			$dH_C = - 29 \text{ mm}$		

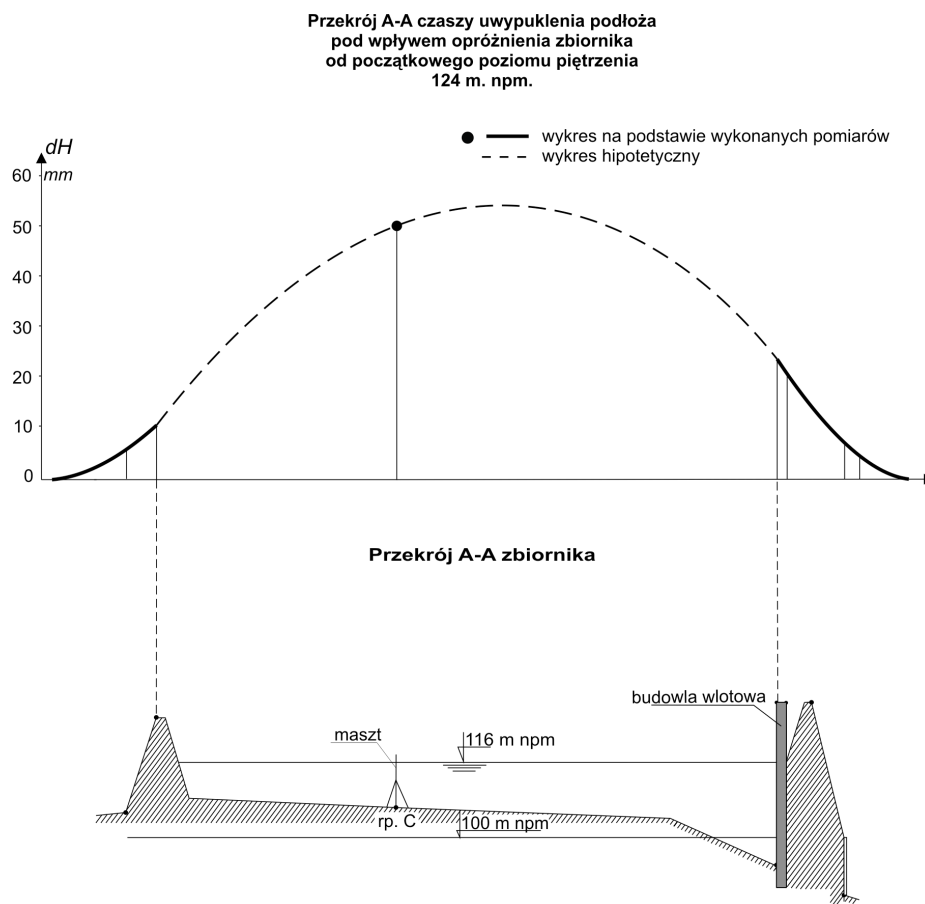
Uzyskany w eksperymencie stopień zgodności przemieszczeń punktu C uzyskanych z pomiarów na stanowiskach nr 10, 15, 20 jest wyższy od oczekiwanego, bowiem według wstępnego oszacowania spodziewaliśmy się osiągnięcia błędu standardowego całkowitego przemieszczenia o wartości około 3 mm.

Podczas obydwu pomiarów następowały zmiany temperatury masztu nie przekraczające 8°C, w związku z czym zmiany własnej wysokości masztu nie przekraczały 1 mm. Przyjęto więc, że przy osiągniętej dokładności wyznaczenia można utożsamić pionowe przemieszczenia wierzchołka masztu z przemieszczeniami dna zbiornika w miejscu jego ustawienia.

Widoczne jest, że pod wpływem podniesienia poziomu wody w zbiorniku nastąpiło obniżenie poziomu dna w miejscu punktu C, 4-krotnie większe niż średnie obniżenie poziomu korony obwałowania w miejscach stanowisk nr 10, 15, 20. Wskaźnik jednostkowy tego obniżenia w miejscu punktu C wyniósł $w_{HC} = 2,9$ mm/m (przy $w_{Hj} = 0,7$ mm/m dla reperów na koronie).

Przyjmując, że zachodzi liniowa zależność między przemieszczeniem a zmianą poziomu piętrzenia wody w zbiorniku, możemy oczekiwać, że w przypadku całkowitego napełnienia zbiornika do poziomu 124 m n.p.m. poziom dna zbiornika w miejscu punktu C mógłby obniżyć się o 52 mm. Takie przemieszczenie pionowe dna odpowiada dociążeniu podłoża w rozpatrywanym miejscu równemu $1,8$ kG/cm². Na rys. III.6 pokazano przekrój zbiornika wzdłuż łamanej linii biegnącej od punktu nr 15 na koronie obwałowania do punktu C i dalej wzdłuż osi derywacji tj. po osi symetrii budowli wlotowej. Na rysunku tym pokazano też profil ugięcia podłoża wzdłuż przekroju pod wpływem opróżnienia zbiornika.

Na rys. III.6 linią pogrubioną oznaczono fragmenty profilu ugięcia wynikające z pomiarów wykonanych na zewnątrz zbiornika, natomiast cienką linią przerywaną oznaczono hipotetyczny przebieg profilu ugięcia na obszarze samego zbiornika. Wyznaczone przemieszczenie punktu C oznaczono kropką. Ustalenie rzeczywistego przebiegu profilu na obszarze zbiornika ma istotne znaczenie, bowiem przebieg „łagodny” pozbawiony załamań lub dużych zmian krzywizny na krótkich odcinkach sprzyja niepoddawaniu wykładziny zbiornika dużym miejscowym ugięciom pod wpływem wielokrotnie następujących zmian poziomu piętrzenia wody w zbiorniku. Niestety, z wyżej podanych powodów na razie nie byliśmy w stanie wyznaczyć pionowych przemieszczeń w większej liczbie miejsc zbiornika w celu wyinterpolowania profilu ugięcia i określenia kształtu całej czaszy ugięcia. Należy więc dążyć do tego, by w miarę pojawiających się możliwości wyznaczyć przemieszczenia pionowe dna zbiornika w większej liczbie miejsc.



Rys. III.6. Schematyczny wykres ugięcia podłoża pod zbiornikiem
i w otoczeniu zbiornika

Wynik omówionego tu eksperymentalnego pomiaru przemieszczenia punktu C w pobliżu środka zbiornika można skonfrontować z wynikami innych badań mających na celu rozpoznanie wielkości i charakteru ugięcia podłoża prowadzonych na terenach głębokich wykopów budowlanych, gdzie ugięcie o charakterze uwypuklenia jest powodowane odciążeniem pod wpływem głębienia wykopu, zaś następujące po nim ugięcie o charakterze wklęsnięcia jest powodowane wzrastaniem obciążenia przez budowlę wznoszoną w wykopie. Zagadnienie to jest przedmiotem zainteresowania projektantów i wykonawców budowlanych, bowiem nierównomierności ugięcia podłoża mają szkodliwy wpływ na stan fundamentów i wznoszonej konstrukcji (Grzegorzewicz, 2002). Wydaje się, że wobec trudności wykonania pomiarów *in situ* to interesujące zagadnienie nie jest jeszcze dostatecznie rozpoznane zarówno w zakresie zmian kształtu podłoża budowli lądowych jak i podłoża pod dnem zbiorników wodnych.

LITETATURA

- Grzegorzewicz K., 2002, *Obudowa ścian głębokich wykopów*, Seminarium „Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich”, Warszawa, 19 listopada 2002.
- Janusz J., Janusz W., 2004, *Metodyka badania podatności budowli piętrzących wodę na zmiany obciążenia*, Seria monograficzna nr 9, IGiK.
- Janusz J., Janusz W., 2006, *Głębokie wykopy. Wyznaczanie wpływu obciążenia i odciążenia podłoża budowlanego na deformacje podłoża i fundamentów budowli*, Geodeta nr 2.
- Kawulok M., 2005, *Obciążenia obiektów budowlanych spowodowane wpływami eksploatacji górniczej*, Inżynieria i Budownictwo, nr 9.
- Siemińska-Lewandowska A., 2002, *Głębokie wykopy w miastach na przykładzie metra warszawskiego*, Seminarium „Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich” Warszawa, 19 listopada 2002.
- Tarnowski K., 1955, *Geodezyjne pomiary odkształceń przy badaniach hydrogeologicznych i gruntowych na terenie budowy Pałacu Kultury i Nauki w Warszawie*. Prace IGiK z. 2 (6).
- Wysokiński L., 2002, *Badania geotechniczne przed i w trakcie wykonywania głębokich wykopów budowlanych*. Seminarium „Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich” Warszawa, 19 listopada 2002.

**IMPROVEMENT OF RULES AND METHODS
OF METROLOGICAL VERIFICATION OF LEVELING STAFFS
AND GEODETIC MONITORING OF DISPLACEMENTS**

WOJCIECH JANUSZ

Institute of Geodesy and Cartography

Part 1.

**CALIBRATION OF THE SETS:
DIGITAL LEVEL – CODE STAFF**

Construction-research works, measurements, interpretation of the results

Summary

Chapter 1 includes description of the works aimed at construction of comparator for checking code staffs in vertical position with the use of laser interferometer and digital levels. In 2002 comparator adjusted to checking deviations from staff metric graduation was constructed at the Department of Applied Geodesy, Institute of Geodesy and Cartography; the method of checking was based on fixed staff and vertically movable digital level. In 2003 the comparator was modified in such a way, that digital level was stabilized, while staff was moved. In this method lower part of 3-meter (or longer) staff was tested in its normal vertical position, while upper part in reverse position with simultaneous inversion of readouts of digital level.

In 2007 comparator was modified once again, so now the whole staff can be checked in normal vertical position. Description of this re-construction and its background was given in chapter 2.

Procedures of measurements and calibration calculations were included in chapter 3. Using the constructed comparator random and systematic deviations of graduation from nominal division are checked every 10 cm, which is assumed as optimal interval (certainly it is possible to make checking in smaller intervals). Procedure of making measurements used for comparing lengths of graduation measured with digital level and laser interferometer was presented. The author also presented procedure of calculating random deviations v and random errors m_h of graduation lengths expressed in μm , as well as systematic deviations A of graduation lengths and errors m_A expressed in $\mu\text{m/m}$.

In chapter 4 exemplary examinations of the selected staffs, applied for technical leveling performed with the use of digital levels, were described.

4 fiberglass sliding staffs T for technical leveling, used in conjunction with DL101C digital level, were tested, as well as 2 telescope staffs used in conjunction with Leica DNA 03 digital level. It was found, that random errors d_h of sliding staffs reach 25 – 35 μm , while systematic deviations are within 0 – 90 $\mu\text{m}/\text{m}$. Telescope staffs were characterized by similar random errors of graduation of segments as sliding staffs, however it was found, that gross errors appear in places of segment joints, reaching even 800 μm .

In chapter 5 exemplary examinations of code staffs for precise leveling using digital levels were discussed.

Two LD13 staffs for precise leveling, which are used with DiNi12 digital levels, were examined. It was found, that random errors of graduation for both staffs checked with the use of both digital levels reached $m_h = 4 \mu\text{m}$, while deviations v were distributed randomly. Systematic deviations A determined with the use of both levels reached 7 and 7 $\mu\text{m}/\text{m}$ for first staff, while 4 and 5 $\mu\text{m}/\text{m}$ for second staff, respectively. These results reveal, that both checked staffs and both levels proved to be accurate, qualifying them for precise leveling. The results also confirmed high accuracy of calibration measurements.

It results from the experience gained during examining several tens of staffs in the period 2003 – 2007, that in case of staffs with good graduation, not disturbed locally when compared with nominal graduation, random errors m_h determined with the use of digital level on IGiK comparator are between 4 – 5 μm , while systematic deviations A , determined with $m_A = 1 \mu\text{m}/\text{m}$, are within $\pm 15 \mu\text{m}/\text{m}$. More frequently staff graduations are characterized by positive value of A parameter; it means that tape in the staffs is tensed less than nominally.

In chapter 6 construction-practical features of staffs for precise leveling, which are important for keeping high quality of graduation made on invar tape, were discussed. Special attention was put to cause and effect analysis of the results of calibration of those staffs, which have too high errors m_h , non-random distribution of deviations v and too large systematic deviations A of staff graduation. The results of comprehensive analysis of reasons of excessive errors m_h , which was done at calibration laboratory at the Mining-Metallurgical Academy in Cracow, were cited. Additional analysis of the effects of deviations, which have impact on repair works and on possibilities of further use of staffs, was also carried out.

*JERZY JANUSZ**WOJCIECH JANUSZ**Institute of Geodesy and Cartography*

Part 2.

**EXAMINATION OF DISPLACEMENTS, DEFORMATIONS
AND THERMAL CHANGES OF INTAKE CHAMBER
OF PUMPED-STORAGE POWER STATION “ZARNOWIEC”
DUE TO EMPTYING WATER RESERVOIR**

Summary

Method of conducting supplementary computations, concerning measurements of displacements of points and benchmarks located on the construction and inside it, was the scope of the presented work, as well conclusions derived from the results of computations.

In most cases geodetic monitoring of displacements is completed, when displacements of points located on the construction and inside it are measured and computed. In the presented work the determined displacements of points, further treated as pseudo-observations, were used for additional calculations, aimed at determination of parameters of displacements of the whole construction or its particular fragments. This approach enables to observe behaviour of the construction itself, not only of the geodetic points, which were located on it. Such supplementary calculations and analysis of their results are the element of geometric interpretation of the results of measurements, which is done by **surveyor** responsible for monitoring and can help **designers** in making causal-consecutive interpretation of the measurements.

Geometrical interpretation should be treated as a “bridge” between specialists dealing with various aspects of monitoring of safety of built and exploited constructions. It helps in improving evaluation of the results of measurements in the process of detecting causes of specific behaviour of constructions and their foundations.

Horizontal displacements of 4 points and vertical displacements of 24 benchmarks located on ferroconcrete water construction were additionally analysed in the presented work. These displacements occurred due to emptying the adjoining water reservoir and due to increase of air temperature.

JERZY JANUSZ

WOJCIECH JANUSZ

ANDRZEJ KALIŃSKI

Institute of Geodesy and Cartography

Part 3.

PRELIMINARY EXAMINATION OF DEFLECTION OF BASE UNDER WATER RESERVOIR

Summary

At first part of the work authors presented the results of measurements of displacements of outer part of embankments and terrain around water reservoir due to its filling and emptying. It was found, that as a result of filling reservoir with 15 mln m³ of water, i.e. increase of loading of base under reservoir depending on depth from 0 to 3 kG/cm², settlements can be observed at its surroundings, which are characterized by unit indices w_{Hj} (displacements due to 1-meter change of water level), equal to 0.7 mm/m on the top of embankment and 0.5 mm/m at the edge zone of outer escarpment of embankment. The settlements due to changes of loading reservoir disappear at the distance of 200 – 250 m. It was also found, that while filling reservoir horizontal displacements appear on the top of embankment; their vectors are directed towards reservoir. Unit index w_{pj} characterizing decrease of figure created by points on the embankment due to loading reservoir reaches 0.8 ppm/m (0.000 0008 for 1 m of difference of water level).

Shape of deflection of base on the area surrounding reservoir suggests, that within reservoir vertical displacements caused by changes in filling can be much higher.

The concept of determining vertical displacements of reservoir bottom was presented; it is based on trigonometric levelling measurements of displacements of metal masts fixed on the bottom. Method of measurements and results concerning displacements of bottom of reservoir close to its center were discussed. As a result of measurements vertical displacement reaching –29 mm was observed; it was caused by increase of water level by 10 m.

Translation: Zbigniew Bochenek