Seria GEOMATYKA

1

Wykorzystanie pomiarów kątowo-liniowych do badania przemieszczeń zapór wodnych

Karolina Makowska, Przemysław Kuras

ISBN 978-83-947357-2-2

Gdańsk, 2016

Wydawnictwo Polskiego Internetowego Informatora Geodezyjnego

seria GEOMATYKA - wydanie 2016

Redakcja:

Katedra Geodezji

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Politechnika Gdańska

Redakcja naukowa monografii:

dr hab. inż. Marek Przyborski, prof. nadz. PG

Wydawca:

I-NET.PL Sp.J.

ul. Józefa Wassowskiego 19c, 80-225 Gdańsk

www.i-net.pl office@i-net.pl

Afiliacja:

autorzy – Karolina Makowska[1)], Przemysław Kuras[2)]

[1)] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geodezji

[2)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa

Monografia / Praca Naukowa: recenzowana w ramach procedury wydawniczej.

Redaktor prowadzący serii GEOMATYKA: dr inż. Jakub Szulwic.

WYDANIE I

ISBN 978-83-947357-2-2

Dostępny on-line w serwisie www.GEOMATYKA.eu:

www.geomatyka.eu/publikacje/isbn9788394735722/isbn9788394735722.pdf

Spis treści

Wstęp ... 5
1. Zapory wodne ... 6
1.1. Podział zapór wodnych ... 7
1.1.1. Czynniki wpływające na wybór typu zapory wodnej ... 7
1.1.2. Zapory ziemne ... 8
1.1.3. Zapory betonowe ... 9
1.1.4. Przykłady zapór wodnych ... 11
1.2. Budowa zapór ziemnych ... 13
1.2.1. Podział zapór ziemnych ze względu na konstrukcję ... 14
1.2.2. Wymiarowanie elementów zapór ziemnych ... 16
1.3. Stateczność zapór wodnych ... 17
1.4. Katastrofy zapór wodnych ... 19
2. Pomiary zapór wodnych i opracowanie wyników ... 22
2.1. Pomiary przemieszczeń ... 24
2.1.1. Pomiar przemieszczeń – metody bezwzględne ... 25
2.1.1.1. Sieci trygonometryczne do pomiaru przemieszczeń poziomych ... 28
2.1.2. Pomiar przemieszczeń – metody względne fizykalne ... 31
2.2. Opracowanie wyników pomiarów przemieszczeń ... 35
2.2.1. Wstępne wyrównanie sieci ... 35
2.2.2. Transformacje poszukiwawcze ... 40
3. Zapora Czorsztyn-Niedzica ... 45
3.1. Lokalizacja ... 45
3.2. Budowa geologiczna podłoża i tektonika ... 47
3.3. Budowa i struktura zapory ... 51
3.4. Aparatura kontrolno-pomiarowa ... 53
3.5. Osnowa geodezyjna i metodyka jej pomiaru ... 54
4. Wyznaczanie przemieszczeń poziomych punktów sieci pomiarowej ... 58
4.1. Wyrównanie pomiaru aktualnego ... 58
4.1.1. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków ... 64

4.1.2. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji długości 70
4.1.3. Obliczenia – dane wyjściowe do wyrównania poziomej sieci kątowo-liniowej 75
4.1.4. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości i kierunków 81
4.2. Wyznaczenie przemieszczeń osnowy w okresie 2014-2015 88
4.3. Wyznaczenie przemieszczeń osnowy w okresie 2005-2015 92
5. Podsumowanie i wnioski 98
6. Literatura 99
Spis tabel 102
Spis rysunków 104

Wstęp

Gospodarowanie zasobami wodnymi już w czasach starożytnych było jednym z problemów, z jakimi musiał zmagać się człowiek. Dzisiaj, w dobie wzrastającego zapotrzebowania na wodę, problem ten jest jeszcze bardziej istotny. Istniejące zasoby wodne znajdujące się na terenie naszego kraju są niewielkie oraz dodatkowo nierównomiernie rozłożone – powoduje to konieczność podejmowania działań mających na celu tworzenie rezerwuarów wody na potrzeby gospodarki. W związku z tym, coraz częściej tam, gdzie jest to możliwe, budowane są budowle piętrzące, z powstaniem których związane jest tworzenie sztucznych zbiorników wodnych. W Polsce dość duży potencjał retencyjny występuje w dorzeczu górnej Wisły, na rzekach zlokalizowanych w Karpatach – najzasobniejszą w wodę rzeką w tym dorzeczu jest Dunajec.

Kolejnym z zadań budowli piętrzących, oprócz tworzenia zasobów wodnych, jest ochrona przeciwpowodziowa. Stanowi to bardzo ważny czynnik do lokalizowania tego typu obiektów zwłaszcza na terenach górskich. Wynika to z faktu szybkiego przyrostu poziomu wody w rzekach podczas obfitych opadów deszczu oraz roztopów, a co za tym idzie, wzrostem niebezpieczeństwa wystąpienia powodzi. W tym przypadku budowle piętrzące mają za zadanie zatrzymać część wody w zbiorniku i ograniczyć falę powodziową.

Budowle piętrzące, zwłaszcza te o większych rozmiarach, są najczęściej częścią systemu energetycznego. Zlokalizowane przy nich elektrownie wodne wykorzystują różnicę poziomów wód po obu stronach obiektu do produkcji „zielonej” energii.

Patrząc na powyższe argumenty można się zgodzić ze stwierdzeniem, że budowanie obiektów piętrzących powinno być jednym z głównych zadań gospodarki wodnej. Nie należy jednak podchodzić do tego typu obiektów bezkrytycznie. W przypadku katastrofy, budowle te stanowią ogromne zagrożenie dla terenów położnych poniżej obiektu piętrzącego. Ze względu na to, że obiekty piętrzące podlegają obciążeniom statycznym i dynamicznym związanym z parciem wody na korpus, a także obciążeniom dynamicznym związanym z pracą elektrowni wodnych, konieczne jest podjęcie działań mających na celu monitorowanie przestrzennego usytuowania budowli. Jednym z takich działań jest prowadzenie pomiarów geodezyjnych zapór oraz przyległego do zapór terenu.

Celem niniejszej monografii jest przedstawienie całokształtu badań pozwalających na ocenę stabilności zapór wodnych oraz terenów je otaczających. Obiektem, dla którego wykonane zostały analizy praktyczne jest zapora Czorsztyn-Niedzica, oddana do użytku w roku 1997.

1. Zapory wodne

Pierwsze dane dotyczące budowli piętrzących pochodzą już z czasów starożytnych. Wznoszenie budowli przegradzających cieki rzeczne związane wtedy było z próbami gromadzenia wody, głównie dla lepszego nawadniania pól w okresach jej niedoboru. Początkowo zapory były budowane jedynie w krajach suchych i ciepłych – w rejonie Morza Śródziemnego, a także na terenie Egiptu, Mezopotamii, Chin oraz na Cejlonie. Ówczesne obiekty wykonywane były z gruntu oraz kamieni [8], [11].

Za najstarszą zaporę przyjmuje się starożytną zaporę Sadd-el-Kafara wybudowaną w Egipcie, około 30 km na południe od Kairu i usytuowaną na jednym z bocznych dopływów Nilu. Według badań archeologicznych był to obiekt o wysokości piętrzenia 12 m i długości 108 m. Jego powstanie datuje się na okres około 2800 – 2600 r. p.n.e. Już wówczas, aby chronić ziemną konstrukcję korpusu, zastosowano osłonę w postaci muru z kamienia łamanego. Zapora ta została zniszczona wkrótce po wybudowaniu wskutek przelania się wody przez jej koronę [11].

Najstarszą działającą zaporą wodną jest zapora Quatinah w Syrii powstała około 1310 r. p.n.e. i do dziś zaopatrująca miasto Hims w wodę. Obecnie nie jest to obiekt oryginalny – zapora była dwukrotnie powiększana [35].

W Europie rozwój zapór wodnych nastąpił dopiero w XVIII wieku, co spowodowane było rozbudową miast i koniecznością zaopatrzenia ludności w wodę, a także potrzebą stworzenia taniego źródła energii dla rozwijającego się wówczas przemysłu.

We wcześniejszym okresie w Europie powstawały jedynie pojedyncze obiekty piętrzące, takie jak zbudowana w I – II wieku n.e. zapora Proserpine Dam koło Meridy w Hiszpanii [34], zapora w Grenoble oraz, istniejąca do dziś, francuska zapora ziemna Saint Ferriol o wysokości 36 m.

Przyjmuje się jednak, że dopiero początek XX wieku przyniósł największy przełom w budowie zapór – oprócz zapór ziemnych o coraz większych wysokościach, zaczęto budować także zapory betonowe. W tym czasie zwiększyło się także wykorzystanie budowli piętrzących jako obiektów o dużym znaczeniu w profilaktyce przeciwpowodziowej.

W początkowym okresie XX wieku liczba powstających zapór betonowych i ziemnych utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Jednak w latach 40. tam, gdzie było to możliwe, zaczęto odchodzić od budowy konstrukcji betonowych na rzecz konstrukcji ziemnych, najczęściej ze względu na wysoki koszt wykonania obiektów betonowych.

W Polsce największy rozwój zapór wodnych rozpoczął się latach 60. i trwał do lat 90. W tym czasie wybudowano wiele z najbardziej znaczących zapór, w tym najwyższy tego typu obiekt w Polsce – betonową grawitacyjną zaporę w Solinie.

Opisywany okres to także czas rozwoju wysokich zapór wodnych na świecie – powstały m.in. zapora Nurek, Grande Dixence oraz Inguri. Obecnie, według danych Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (skrót nazwy anglojęzycznej: ICOLD), najprężniej rozwijającym się państwem pod względem budowy zapór jest Chińska Republika Ludowa [27].

Jak widać, zapory wodne są obiektami budowanymi od wielu wieków, jednak największy ich rozwój przypadł na ostatnie około 100 lat – zaczęły być to budowle wykonywane nie tylko z materiałów naturalnych, ale także z materiałów sztucznych,

tj. betony, asfaltobetony, geosyntetyki. Omawiany rozwój był w dużej mierze związany z postępem w takich dziedzinach nauki, jak hydraulika, mechanika budowli oraz mechanika gruntów [8], [11].

1.1. Podział zapór wodnych

Zapory wodne należą do budowli hydrotechnicznych, w których poziom piętrzenia wód rzeki wynosi ponad 10÷15 m, a ich budowa wiąże się z powstaniem zbiornika retencyjnego. Taki warunek zaliczania obiektów wodnych do zapór stosowany jest w Polsce. Na świecie natomiast ICOLD wprowadziła pojęcie małych i wielkich zapór wodnych. Jako wielką zaporę określa się budowlę o wysokości, liczonej od podstawy fundamentu do korony, co najmniej 15 m lub budowlę o wysokości od 10 m do 15 m i spełniającą jeden z poniższych warunków:

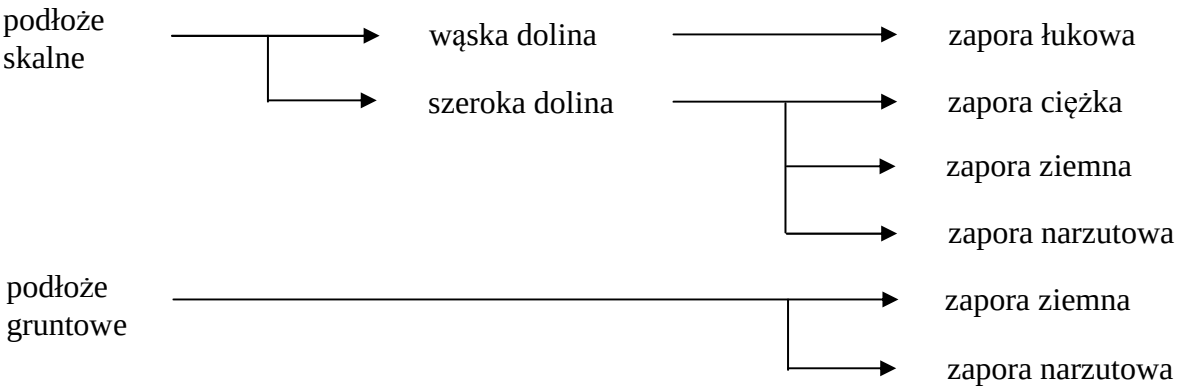
- pojemność zbiornika retencyjnego jest większa niż 1 mln m^3,
- długość korony jest nie mniejsza niż 500 m,
- obiekt musi zapewniać przepływ powodziowy nie mniejszy niż 2000 m^3/s [25].

Na podstawie powyższego opisu można wywnioskować, że międzynarodowy termin *wielka zapora* odnosiłby się do obiektu, jaki w polskim nazewnictwie określany jest jako zapora. Obiekty niespełniające powyższych warunków posiadałyby swój odpowiednik w postaci jazów. Taki sposób myślenia wydaje się logiczny z uwagi na to, że w wielu krajach każdą budowlę piętrzącą nazywa się zaporą i nie stosuje się rozróżnienia na jazy i zapory.

W obecnym opracowaniu przedstawiony zostanie podział zapór wodnych według publikacji [8] pod redakcją Adama Bolta. Jako główny stosuje się podział według materiału, z jakiego zbudowana jest zapora. Wyróżnia się w ten sposób zapory ziemne oraz zapory betonowe. Bardziej szczegółowemu opisowi poszczególnych rodzajów zapór poświęcony będzie w części obecny podrozdział.

1.1.1. Czynniki wpływające na wybór typu zapory wodnej

Podczas tworzenia planów budowy zapory kluczową kwestią są koszty jej wykonania. Z tego powodu rozpatrywane są różne warianty projektowania uzależnione w głównej mierze od panujących warunków geologicznych i rodzaju doliny, przez którą płynie przegradzany ciek. Dla przykładu rozpatrzmy teren, na którym nie występuje podłoże skalne. Przedsięwzięcie budowy zapory betonowej, będącej konstrukcją sztywną, byłoby w takim miejscu dość ryzykowne ze względu na możliwe nierównomierne osiadanie gruntu. Z tego powodu, przy występowaniu podłoża nieskalnego, budowane są przeważnie zapory ziemne. Schemat dotyczący wyboru rodzaju zapory w zależności od warunków gruntowych i kształtu doliny rzecznej przedstawia rys. 1.1.



Rys. 1.1. Schemat wyboru rodzaju zapory w zależności od warunków terenowych (źródło: [8])

Dodatkowo wybór rodzaju zapory zależny jest w dużej mierze od jej planowanej wysokości. Na podstawie analizy posiadanych danych stwierdzono, że wraz ze wzrostem wysokości zapory zmniejsza się ilość zapór ziemnych na korzyść zapór łukowych i ciężkich. Wpływ na to mają po części duże rozmiary zapór ziemnych o znacznych wysokościach. Poniżej podano procentowy udział różnego rodzaju zapór ze względu na ich wysokości według danych z roku 1983:

- $15 \leq h < 30$ m: zapory ziemne – 88.3 %; zapory ciężkie – 8.0 %; zapory łukowe – 2.8 %; zapory filarowe – 0.9 %;
- $60 \leq h < 100$ m: zapory ziemne – 43.6 %; zapory ciężkie – 33.0 %; zapory łukowe – 18.6 % ; zapory filarowe – 4.8 %;
- $h \geq 200$ m: zapory ziemne – 25.0 %; zapory ciężkie – 16.7 %; zapory łukowe – 54.2 % ; zapory filarowe – 4.1 %;

Można jednak zauważyć, że nawet dla najwyższych zapór odsetek konstrukcji ziemnych jest wysoki. Jako potwierdzenie można wymienić, do niedawna najwyższą na świecie, zaporę Nurek, która jest budowlą ziemną [8].

1.1.2. Zapory ziemne

Zapory ziemne (wg ICOLD – *embankment dam*) są konstrukcjami zbudowanymi z materiałów naturalnych, tj. gruntu rodzimego, kamienia łamanego lub rumoszu skalnego, które układane są bez wykorzystania dodatkowych materiałów wiążących. Ważną cechą, odróżniającą zapory ziemne od innych hydrotechnicznych budowli ziemnych, jest wykorzystanie elementów zabezpieczających przed, bardzo groźną dla tego typu obiektów, filtracją. Zapory ziemne, tak jak i zapory betonowe, mogą piętrzyć wodę na duże wysokości, skutkuje to jednak znaczną szerokością ich podstawy. Przykładem może być, wspomniana wcześniej, zapora Nurek w Tadżykistanie o wysokości 300 m i szerokości podstawy około 1.4 km.

Uwzględniając rodzaj materiału naturalnego, z jakiego zbudowana jest zapora, wprowadza się podział na zapory ziemne oraz zapory narzutowe. Dodatkowo wyróżnić można jeszcze zapory ziemno-narzutowe.

Zapory ziemne (wg ICOLD – *earth fill dam*, skrót – TE) są budowlami o korpusie zbudowanym w co najmniej 50 % z zagęszczonego gruntu drobnoziarnistego, o jednorodnym lub zróżnicowanym uziarnieniu.

Oprócz zapór ziemnych, wyróżnione zostały także zapory narzutowe (wg ICOLD – *rockfill dam*, skrót – ER). Zbudowane są one głównie z grubego materiału skalnego, tj. kamienia łamanego lub rumoszu skalnego. Ilość narzutu kamiennego, analogicznie do zapory ziemnej, powinna być większa od połowy objętości zapory.

Obiektem pośrednim pomiędzy dwiema opisanymi wyżej budowlami jest zapora ziemno-narzutowa (skrót – TE/ER). Zbudowana jest ona częściowo z gruntu drobnoziarnistego oraz częściowo z narzutu kamiennego.

Powyżej wymieniono typowe rodzaje zapór czołowych przegradzających dany ciek i tworzących zbiornik retencyjny. Oprócz nich występują jeszcze zapory boczne. Ich budowa ma na celu ochronę terenów przyległych do zbiornika oraz stałe lub okresowe piętrzenie wody [8], [27].

1.1.3. Zapory betonowe

Drugim rodzajem zapór wodnych są zapory betonowe. Ich nazwa pochodzi od materiału, z jakiego zostały zbudowane. Zaletą tego typu obiektów, w porównaniu do zapór ziemnych, jest m.in. wyższa niezawodność oraz niewrażliwość na przelanie się wody przez koronę zapory, co w przypadku zapór ziemnych może skutkować ich całkowitym zniszczeniem [36].

Podział zapór betonowych opiera się głównie na sposobie zapewnienia stateczności obiektu, co powoduje zróżnicowanie ich kształtu i sposobu wykonania. Na tej podstawie można wydzielić trzy podstawowe grupy zapór betonowych – zapory ciężkie, inaczej nazywane też grawitacyjnymi, zapory łukowe oraz zapory filarowe. Dodatkowo występują także konstrukcje pochodne, np. zapory filarowe płytowe oraz zapory wielołukowe, nazywane inaczej zaporami filarowymi łukowymi.

Zapory ciężkie (wg ICOLD – *gravity dam*, skrót – PG) są to budowle o masywnej konstrukcji i ogromnym ciężarze, który przeciwstawia się sile naporu wody i tym samym zapewnia stateczność obiektu. Ze względu na to, że najczęściej tego typu zapory mają duże długości, dzielone są pionowymi dylatacjami na sekcje. Dzięki temu każda z sekcji, w pewnym sensie, jest samodzielnie pracującym elementem. Zabezpiecza to przed powstawaniem nadmiernych naprężeń w konstrukcji zapory.

W pierwotnej koncepcji, sekcje zapory ciężkiej podzielone były na bloki o objętości kilkuset m^3, posiadały pionową lub prawie pionową ścianę odwodną, a ich szerokość wynosiła zwykle $0.6 \div 1.0$ wysokości zapory.

W ostatnich 20 latach zapory betonowe przeszły dużą ewolucję. Pierwszym jej etapem było zaprzestanie wykorzystywania bloków betonowych do wykonywania poszczególnych sekcji zapory. W zamian zastosowano tzw. beton wałowany. Pozwoliło to na zmniejszenie ilości dozowanego cementu oraz liczby dylatacji, co w efekcie wpłynęło na obniżenie kosztów budowy i ułatwiło kontrolę termiki tężejącego betonu. Zapory takie otrzymały nazwę od wykorzystanej techniki wykonywania robót – zapory z betonu wałowanego (ang. *roller compacted concrete dam*). Kolejny etap to zaprojektowanie symetrycznej zapory z nasypu

utwardzonego (ang. *faced symmetrical hardfill dam*), w której praktycznie wyeliminowano podział konstrukcji na sekcje, przyjęto symetryczny profil korpusu oraz zastosowano ekran z płyt betonowych po stronie odwodnej. Można zauważyć, że ten typ zapory jest pewnego rodzaju złotym środkiem pomiędzy pierwotną zaporą ciężką, a zaporą ziemną.

Kolejnym typem zapór betonowych są zapory łukowe (wg ICOLD – *arch dam*, skrót – VA). W przeciwieństwie do zapór ciężkich, zapory te wykonywane są jako konstrukcje monolityczne, łukowo wygięte w stronę wody górnej oraz oparte zarówno o dno doliny rzecznej, jak i o jej brzegi. Pozwala to na przeniesienie obciążeń od parcia wody przez cały kontur zapory. Są to budowle smukłe, ponieważ, pracując jak sklepienia, lepiej wykorzystują właściwości betonu na ściskanie. Analizując **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**. zauważymy, że obiekty takie buduje się w wąskich dolinach rzecznych, a najlepsze warunki do ich wykorzystania występują, gdy stosunek szerokości doliny do projektowanej wysokości zapory jest mniejszy od 3. W przypadku, gdy stosunek ten jest większy, zapora łukowa zaczyna upodabniać się przekrojem poprzecznym do zapory ciężkiej i maleje opłacalność jej zastosowania.

Oprócz standardowych rozwiązań jednokrzywiznowych, gdzie zakrzywienie zapory występuje jedynie w płaszczyźnie poziomej, występują rozwiązania z dwiema krzywiznami – jedna w płaszczyźnie poziomej, druga w płaszczyźnie pionowej. Zazwyczaj obiekty jednokrzywiznowe budowane są w dolinach U-kształtnych, zaś obiekty posiadające dwie krzywizny – w dolinach V-kształtnych [12].

Do ostatniej z podstawowych grup zapór wodnych należą zapory filarowe (wg ICOLD – *buttress dam*, skrót – CB). Idea ich budowy opiera się na zmniejszeniu ilości wykorzystywanego betonu w stosunku do zapór ciężkich, przy jednoczesnym zachowaniu samodzielności pracy poszczególnych sekcji zapory. W sekcjach tego typu konstrukcji można wydzielić dwie główne części – głowicę stanowiącą część odwodną oraz część odpowietrzną w postaci wąskiego filara, który przenosi na podłoże siłę naporu wody działającą na głowicę. W zaporach filarowych przedstawiono inne podejście do sposobu uzyskania stateczności obiektu – buduje się nachyloną ścianę odwodną. Powoduje to, że do sił przeciwstawiających się łącznemu wpływowi poziomej składowej parcia wody i wyporu pod budowlą zalicza się nie tylko ciężar samej budowli, ale także pionową składową parcia wody działającą na odwodną ścianę konstrukcji. Należy przy tym zaznaczyć, że siła wyporu jest mniejsza niż np. w przypadku zapór ciężkich, ponieważ działa ona właściwie tylko pod głowicami zapory. Dla zapór filarowych zaproponowano dwa rozwiązania – głowica może być oparta o jeden lub dwa filary. Stąd wywodzi się nazwa poszczególnych typów zapór: jedno- lub dwufilarowe. Główną zaletą zapór dwufilarowych jest większa szerokość sekcji, co pozwala na wykonanie mniejszej ilości dylatacji.

Jak już wcześniej wspomniano, oprócz głównych rodzajów zapór, występują także konstrukcje pochodne. Przykładem mogą być zapory płytowe oraz wielołukowe. Są to rozwiązania wywodzące się od zapór filarowych, przy czym ich konstrukcja ma na celu dalsze zmniejszenie ilości stosowanego betonu.

Istotą zapór płytowych jest użycie, jako elementu piętrzącego, żelbetowych płyt opartych o głowice filarów. Tak jak w przypadku typowych zapór filarowych, w celu zagwarantowania stateczności, ściany odwodne konstrukcji są nachylone. Zapewnienie stateczności jest o tyle ważną kwestią, że ciężar wody leżącej na budowli jest niejednokrotnie

większy od ciężaru samej konstrukcji. Dodatkowo, dla bezpieczeństwa, stosuje się zęby – części zapory kotwiące ją w podłożu. Zapory tego typu, ze względu na swoją specyficzną budowę, sytuowane są w miejscach, gdzie nie jest konieczna duża wysokość piętrzenia wody.

W budowie zapór wielołukowych (wg ICOLD – *multiple arch dam*, skrót – MA) można zauważyć analogie do zapór płytowych. Różnica polega na tym, że żelbetowe płyty zastępowane są przez łuki. Zatem budowla taka, ze względu na kształt, posiada zalety zarówno konstrukcji filarowych, jak i łukowych. Są to obiekty o wysokości w granicach kilkudziesięciu metrów, jednak ich dużą zaletą jest możliwość ich budowy w szerokich dolinach, co było niewskazane przy typowych konstrukcjach łukowych [8], [27].

1.1.4. Przykłady zapór wodnych

Analizując zestawienie ICOLD dotyczące najwyższych światowych zapór zauważono, że obecnie zarówno zapory ziemne, jak i zapory betonowe mogą być wykonywane jako obiekty o wysokości około 300 m. Jedynie wśród zapór filarowych nie występują obiekty o wysokości powyżej 200 m [27].

W obecnym fragmencie przedstawione zostaną ogólne informacje dotyczące najwyższych zrealizowanych na świecie zapór trzech typów – zapora ziemna, ciężka oraz łukowa. Wcześniej należy jednak wspomnieć o obecnie budowanej irańskiej zaporze Bakhtyari na rzece Bakhtyari, która po ukończeniu będzie najwyższą budowlą piętrzącą na świecie. Obiekt ten został zaprojektowany jako zapora łukowa o dwóch krzywiznach i wysokości 315 m [37].

Obecnie najwyższą ziemną budowlą piętrzącą jest zapora Nurek (rys. 1.2.) zlokalizowana na rzece Wachsz w Tadżykistanie. Jej budowa trwała prawie 20 lat i została zakończona w 1980 r. Zapora Nurecka zaprojektowana została jako budowla o betonowym rdzeniu, wysokości 300 m, długości korony 714 m oraz szerokości podstawy, w najszerszym miejscu, 1420 m. Korpus budowli zbudowany został z siedmiu stref ułożonych symetrycznie względem rdzenia. W związku z położeniem Tadżykistanu w strefie sejsmicznej, konieczne było zastosowanie dodatkowych zabezpieczeń antysejsmicznych – wykonano specjalne pasy antysejsmiczne [31].

Rys. 1.2. Zapora Nurek (źródło: [39])

Przykładem zapory ciężkiej jest szwajcarska zapora Grande Dixence (rys. 1.3.) usytuowana na rzece Dixence. Jest to obiekt o wysokości 285 m, długości korony 695 m oraz szerokości podstawy około 190 m. Prace przy jego budowie trwały 11 lat i zakończone zostały w 1961 r. W momencie wybudowania, zapora ta była najwyższym obiektem piętrzącym na świecie. Jej budowa spowodowała utworzenie zbiornika wodnego o powierzchni około 4 km^2 [33].

Rys. 1.3. Zapora Grande Dixence (źródło: [42])

Najwyższą budowlą wśród zapór łukowych na świecie jest chińska zapora Jinping–I (rys. 1.4.) o wysokości 305 m wybudowana na rzece Yalong. Jej budowa trwała 11 lat i zakończona została niedawno – w 2014 r. Zapora została zaprojektowana jako obiekt dwukrzywiznowy, o długości korony równej 569 m. Uzupełnieniem działania zapory Jinping–I jest położona poniżej zapora ciężka Jinping–II. W związku z budową zapory, utworzony został zbiornik o powierzchni około 83 km^2 [28].

Rys. 1.4. Zapora Jinping–I (źródło: [40])

W Polsce nie występują tak wysokie obiekty piętrzące, jak opisane w powyższym tekście, co związane jest w głównej mierze z warunkami topograficznymi. Najwyższa wybudowana w naszym kraju zapora ma wysokość jedynie 80 m – jest to ciężka betonowa zapora w Solinie zlokalizowana na Sanie. Wśród zapór ziemnych największą wysokość (56 m) posiada zapora Czorsztyn-Niedzica zlokalizowana na Dunajcu.

Rozpatrując ogólną liczbę zapór wodnych różnych rodzajów, największy odsetek stanowią zapory ziemne – 76%. Jest to związane z czynnikami, takimi jak:

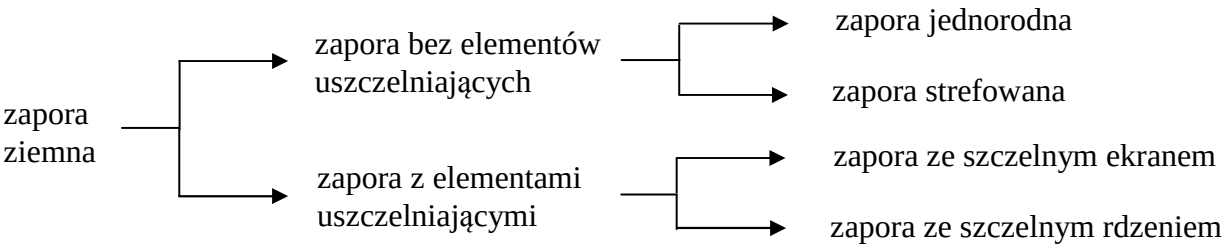
- możliwość budowy zapór ziemnych zarówno na podłożu gruntowym, jak i skalnym,
- rozwój nauk hydraulicznych, co pozwala na bardziej oszczędne i bezpieczniejsze projektowanie budowli piętrzących,
- możliwość zastosowania podczas budowy lokalnie występujących materiałów,
- zmniejszanie się liczby miejsc, gdzie występują dobre warunki do posadowienia zapór betonowych [11].

1.2. Budowa zapór ziemnych

Odwołując się do informacji mówiących o tym, że przeważającym rodzajem budowanych zapór wodnych są zapory ziemne – 76%, w obecnym podrozdziale zostanie omówiona bardziej szczegółowo ich konstrukcja. Zwrócono także uwagę na wymiarowanie niektórych elementów tego typu budowli.

Podstawowym podziałem zapór ziemnych, przytaczanym już wcześniej, jest podział na zapory ziemne, narzutowe oraz ziemno-narzutowe. Warto jednak dodać, że nie jest to jedyna klasyfikacja – istnieją także inne, które dzielą zapory m.in. ze względu na konstrukcję korpusu czy sposób prowadzenia budowy. Oba wspomniane podziały zostaną omówione poniżej.

Klasyfikacja zapór wodnych ze względu na konstrukcję korpusu, dla większej czytelności, została przedstawiona na **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**. Podział taki wynika głównie z wymaganego stopnia szczelności zapory oraz rodzaju gruntów występujących w pobliżu projektowanego obiektu i możliwości ich wykorzystania do budowy.



Rys. 1.5. Podział zapór ziemnych ze względu na konstrukcję (źródło: opracowanie własne na podstawie [7])

Drugi z podziałów wyróżnia zapory sypane, zapory narzutowe oraz zapory namywane. Klasyfikacja ta wynika z planowanej technologii wykonawstwa zapory, na co pośrednio wpływa m.in. rodzaj gruntów wykorzystywanych do budowy oraz wysokość obiektu.

1.2.1. Podział zapór ziemnych ze względu na konstrukcję

Pierwszą grupą omawianych zapór są zapory bez elementów uszczelniających. Należą do nich zapory jednorodne oraz zapory strefowane.

Zapory jednorodne są najprostszymi zaporami ziemnymi – cały ich korpus zbudowany jest z jednego rodzaju gruntu nieskalistego. Obiekty tego typu są budowane w przypadku, gdy nie jest wymagana duża wysokość piętrzenia oraz całkowita szczelność korpusu. Mimo tego, że dopuszczalne są pewne straty wody, zaporę taką należy zabezpieczyć przed zniszczeniem spowodowanym nadmierną filtracją. W tym celu stosuje się odpowiednie zwiększenie przekroju poprzecznego oraz system drenażu. Zwiększenie przekroju realizuje się poprzez odpowiednie zmniejszenie nachylenia skarpy odpowietrznej, co pozwala na sterowanie przebiegiem krzywej filtracji – powinna się ona znaleźć w odpowiedniej odległości od powierzchni skarpy. Zabezpieczy to zarówno przed występowaniem wysięków, jak i zamarzaniem filtrującej wody. W zaporach jednorodnych, przy prawidłowo ukształtowanej krzywej filtracji, niezbędne jest zastosowanie jedynie drenażu przyskarpowego.

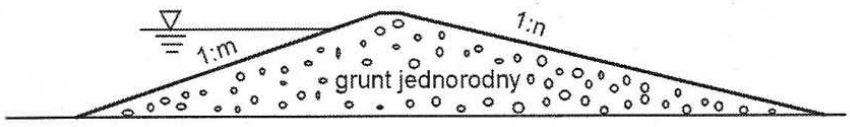
Kolejnym rodzajem zapór bez elementów uszczelniających są zapory strefowane. Różnica względem obiektów jednorodnych polega na wykorzystaniu do budowy kilku rodzajów gruntu o zróżnicowanym uziarnieniu. Pozwala to na uzyskanie lepszej ochrony korpusu zapory przed filtracją. W zależności od posiadanego materiału, możliwe jest zastosowanie jednego z dwóch sposobów strefowania – niesymetrycznego lub symetrycznego.

Niesymetryczny układ strefowania charakteryzuje się zwiększaniem granulacji materiału w miarę odsuwania się od strony wody górnej, czyli zgodnie z kierunkiem działania sił filtracyjnych. Oznacza to, że po stronie odwodnej znajdować się będzie grunt najdrobniejszy, charakteryzujący się najmniejszą przepuszczalnością, zaś kolejne warstwy zbudowane będą z materiału coraz grubszego i bardziej przepuszczalnego. Taka koncepcja formowania korpusu zapory pozwala na wykorzystanie działania filtru odwrotnego, dzięki czemu cząstki o mniejszym uziarnieniu nie będą wymywane.

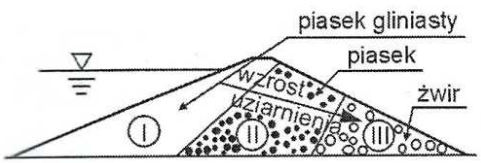
Inną koncepcję stanowi symetryczny układ strefowania, w którym grunt najdrobniejszy stanowi środkową część korpusu zapory. Następnie symetrycznie układane są warstwy gruntu o coraz większym uziarnieniu. Przy takim sposobie formowania przekroju poprzecznego, grunt najbardziej przepuszczalny znajdować się będzie na zewnątrz zapory – zarówno po stronie odwodnej, jak i odpowietrznej. Ważną zaletą przedstawionego rozwiązania, w porównaniu do zapór o niesymetrycznym układzie strefowania, jest zabezpieczenie korpusu także przed filtracją w kierunku odwrotnym, która może wystąpić po szybkim obniżeniu poziomu piętrzenia.

Opisane powyżej rodzaje zapór bez elementów uszczelniających przedstawia rys. 1.6.

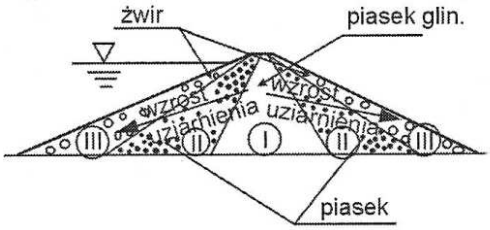
a)



b)



c)



Rys. 1.6. Zapory ziemne bez elementów uszczelniających: a) jednorodna, b) strefowana – układ niesymetryczny, c) strefowana – układ symetryczny (źródło: [8])

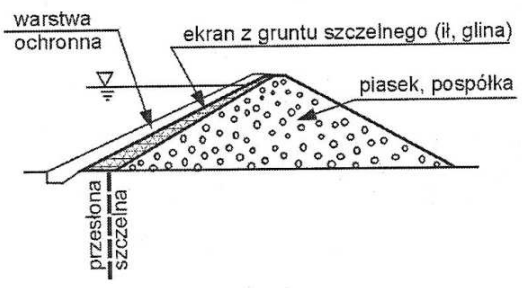
W związku z koniecznością lepszego zabezpieczania zapór ziemnych przed niszczącym działaniem filtracji, zaczęto budować zapory z elementami uszczelniającymi. Zalicza się do nich zapory z uszczelnieniami zewnętrznymi – ekranami (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** a, b) oraz zapory z uszczelnieniami wewnętrznymi – rdzeniami (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** c, d). Zastosowanie uszczelnień, skutkujące zwiększeniem bezpieczeństwa obiektu, pozwoliło na rozwój zapór ziemnych i budowę konstrukcji o coraz wyższym poziomie piętrzenia.

Uszczelnienia ekranowe należą do uszczelnień zewnętrznych odwodnej strony korpusu zapory – stanowią one warstwę znajdującą się bezpośrednio na zaporze. Obecnie do wykonywania ekranów stosuje się różnorodne materiały, poczynając od gruntów spoistych, przez uszczelnienia membranowe, a na płytach żelbetowych kończąc. Należy jednak zaznaczyć, że ze względu na uciążliwość budowy oraz niebezpieczeństwo wystąpienia zsuwów, obecnie stosuje się coraz mniej uszczelnień z gruntów spoistych. Dodatkowo na korzyść płyt z materiałów sztucznych wpływa fakt, że jednocześnie umacniają one skarpę odwodną zapory, dzięki czemu nie ma konieczności stosowania dodatkowych zabezpieczeń skarpowych.

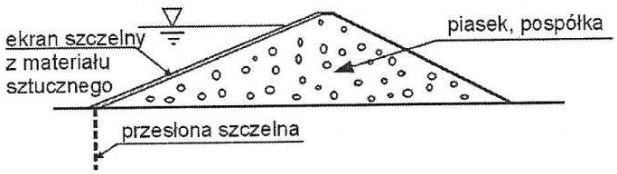
Uszczelnienia wewnętrzne wykonywane są w postaci rdzeni. Podobnie jak w przypadku uszczelnień zewnętrznych, mogą one być zbudowane z różnego rodzaju materiałów – głównie są to grunty spoiste. Zastosowanie gruntów nieprzepuszczalnych jest dobrym rozwiązaniem zwłaszcza w przypadku, kiedy przewidywane są nierównomierne osiadania korpusu zapory. Rdzenie mogą występować także w postaci sztywnych elementów z betonu lub żelbetu. W obecnych czasach coraz częściej do budowy rdzenia wykorzystywane są geomembrany oraz maty bentonitowe.

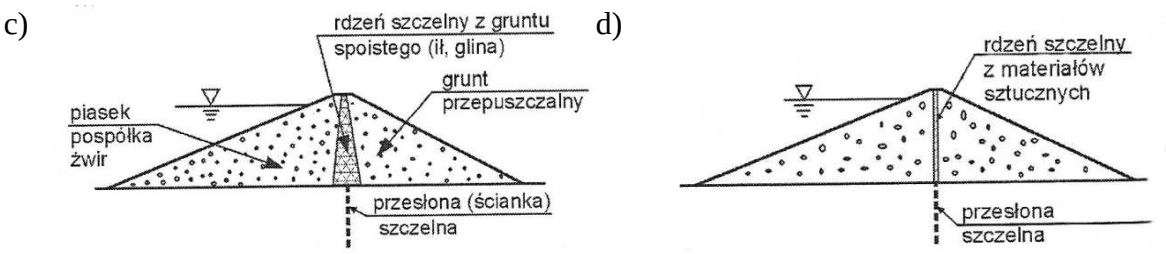
Oprócz różnic dotyczących materiału, z jakiego zbudowany jest rdzeń, występują także rozbieżności co do kształtu. Pod tym względem wyróżnia się rdzenie pionowe, pochylone oraz zakrzywione [8].

a)



b)





Rys. 1.7. Zapory ziemne z elementami uszczelniającymi: a) z ekranem z gruntu nieprzepuszczalnego, b) z ekranem z materiału sztucznego, c) z rdzeniem z gruntu nieprzepuszczalnego, d) z rdzeniem z materiału sztucznego (źródło: [8])

Podział ze względu na technologię wykonania wprowadza trzy rodzaje zapór ziemnych – zapory sypane, narzutowe oraz namywane [12].

Zapory wykonane metodą sypania składają się z ułożonych na sobie kolejnych warstw gruntu o określonej miąższości, przy czym do budowy wykorzystywany jest zazwyczaj grunt drobnoziarnisty. Przed położeniem kolejnej warstwy, poprzednia musi zostać zagęszczona w sposób mechaniczny, np. z wykorzystaniem walców. Ubijanie prowadzi się do momentu uzyskania odpowiedniego stopnia zagęszczenia.

Podobna technologia wykorzystywana jest przy budowie zapór narzutowych. Różnica, w głównej mierze, polega na wykorzystaniu do budowy innego rodzaju materiału – kamienia łamanego lub rumoszu skalnego. Ze względu na uziarnienie użytego gruntu, zapory narzutowe mogą posiadać większe nachylenie skarp niż zapory sypane.

Ostatnim z omawianych rodzajów zapór są zapory namywane. Metoda wykonania tego typu obiektu polega na wykorzystaniu wody do transportu i układania gruntu. Pobierana pulpa, czyli mieszanina gruntu i wody, transportowana jest rurociągami na korpus budowanej zapory. Tam, odpowiednio kierowana, rozpływa się, a cząstki gruntu zaczynają tworzyć odpowiednio ukształtowany przekrój poprzeczny. Bardzo dużą zaletą tego typu zapór jest szybkość ich wykonywania i brak konieczności zagęszczania. Istnieje jednak niebezpieczeństwo rozsadzenia konstrukcji w czasie jej budowy, w związku z nadmiernym ciśnieniem wody w porach gruntu [11].

W przypadku, gdy grunt wykorzystywany do budowy zapory namywanej jest niejednorodny, występuje możliwość wykonania jej jako zapory strefowanej, przy czym istnieją dwa podejścia do realizacji tego rodzaju obiektów. Możliwe jest jednoczesne namywanie z obu stron, co pozwala na uzyskanie zapory o symetrycznym rozkładzie uziarnienia lub z jednej strony – grubszy materiał osadzany jest na stronie odpowietrznej zapory, zaś najbardziej drobnoziarnisty po stronie odwodnej [8].

1.2.2. Wymiarowanie elementów zapór ziemnych

Po wyborze typu zapory, bardzo ważny jest dobór parametrów związanych z jej kształtem, tj. wysokość zapory, szerokość korony, bezpieczne wyniesienie korony zapory ponad poziom piętrzenia, nachylenie skarp. Wartości te, po części, przedstawione są w warunkach technicznych związanych z budową zapór ziemnych, a część z nich zależna jest m.in. od materiałów wykorzystanych do budowy zapory, technologii budowy.

Zapory ziemne są obiektami o przekroju poprzecznym w kształcie trapezu o, najczęściej, różnie nachylonej skarpie odwodnej i odpowietrznej. Maksymalne możliwe do uzyskania pochylenie skarp związane jest z materiałem wykorzystanym do budowy, a w szczególności z jego kątem tarcia wewnętrznego. Poniżej przedstawiono możliwe do uzyskania nachylenia skarp zbudowanych z kilku przykładowych materiałów:

- piasek namywany: 1:3.5÷1:4.5;
- piasek sypany: 1:2.75÷1:3.5;
- pospółka i żwir: 1:2.25÷1:2.75;
- grube żwiry z otoczakami: 1:1.75÷1:2.25;
- narzut kamienny: 1:1.25÷1:1.75 [11].

Jak widać, dla każdego z materiałów nie jest podane jedno nachylenie, a pewien przedział, przy którym zachowana będzie stateczność zboczy. Jest to o tyle ważne, że pozwala na wybór takiego nachylenia, które umożliwi jednocześnie bezpieczne poprowadzenie krzywej filtracji.

Należy także dodać, że, aby zwiększyć bezpieczeństwo budowanego obiektu, skarpa odwodna powinna posiadać ochronę przed niszczącym działaniem fal, zaś skarpa odpowietrzna – przed działaniem wód opadowych.

Bardzo ważnym elementem charakteryzującym daną zaporę jest jej wysokość, mierzona od najniższego punktu doliny do poziomu korony. Z wielkością tą związane jest bezpieczne wyniesienie korony zapory ponad poziom piętrzenia.

Wartość wyniesienia korony jest różna w zależności od klasy obiektu hydrotechnicznego. Mierzy się ją zawsze od górnej krawędzi skarpy odwodnej. Tabela z wartościami tego parametru stanowi załącznik nr 6 do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie [3]. Podczas projektowania należy rozpatrywać bezpieczne wyniesienie korony zapory zarówno nad statycznym poziomem wody, jak i poziomem wody wywołanym falowaniem, z uwzględnieniem przewidywanego osiadania budowli i jej podłoża. Zgodnie z przytaczanym rozporządzeniem, nawet w wyjątkowych warunkach pracy budowli, wzniesienie korony zapory ponad statyczny poziom wody nie powinno być mniejsze niż 0.3 m [3].

1.3. Stateczność zapór wodnych

Zapewnienie bezpieczeństwa zapór wodnych jest priorytetem podczas każdego z etapów funkcjonowania obiektu. Z tego powodu oblicza się parametry związane ze statecznością konstrukcji. Analizy stateczności wykonuje się dla zapór wodnych w stanie budowlanym, stanie eksploatacyjnym normalnym i wyjątkowym oraz stanie remontowym. W każdym z wymienionych stanów zaistnieć mogą dwa układy obciążeń. Według obecnie obowiązujących przepisów wyróżnia się podstawowy oraz wyjątkowy układ obciążeń budowli piętrzących.

Do układu podstawowego zalicza się obciążenia, jakie działają na budowlę piętrzącą, przy założeniu całkowitej sprawności jej urządzeń (m.in. przelewy, drenaże) oraz poziomie piętrzenia, który odpowiada projektowanemu przepływowi miarodajnemu. Jako wyjątkowy

układ obciążeń przyjmuje się te obciążenia, których kombinacja jest mniej korzystna dla prawidłowej pracy budowli piętrzącej. Wśród obciążeń wyjątkowych wyróżnić można obciążenia związane m.in. z niesprawnością poszczególnych części budowli piętrzącej, nierównomiernym odkształcaniem gruntu pod obiektem czy zjawiskami naturalnymi, takimi jak ruchy sejsmiczne i huraganowe wiatry [3].

Do podstawowego układu obciążeń wlicza się, podawane przez normę branżową „Obciążenia budowli w obliczeniach statycznych” [6]: obciążenia stałe, obciążenia zmienne długotrwałe oraz zmienne krótkotrwałe, zaś układ wyjątkowy to odpowiedni układ podstawowy wraz z obciążeniami wyjątkowymi [8].

Poniżej przedstawiono przykłady poszczególnych obciążeń wymienianych przez normę [6]:

- obciążenia stałe: ciężar własny budowli i elementów z nią związanych, ciężar gruntu wykorzystanego do budowy zapór ziemnych lub leżącego na budowli betonowej,
- obciążenia zmienne długotrwałe: napór wody przy normalnym poziomie piętrzenia, parcie wód filtracyjnych w warunkach normalnych, obciążenie lodem, obciążenia termiczne,
- obciążenia zmienne krótkotrwałe: obciążenia wywoływane przez fale, obciążenie wiatrem, obciążenia zaistniałe w czasie transportu i montażu konstrukcji,
- obciążenia wyjątkowe: napór wody przy przepływie nadzwyczajnym, parcie wód filtracyjnych przy niesprawnie działającym drenażu.

Ocena stateczności budowli piętrzących została zróżnicowana ze względu na rodzaj zapory – inne warunki bezpieczeństwa sprawdzane będą dla zapór ziemnych, inne dla zapór betonowych. Dodatkowo, dla zapór betonowych występuje jeszcze zróżnicowanie ze względu na rodzaj podłoża, na jakim jest posadowiony obiekt. W tabeli 1.1. przedstawiono zestawienie zawierające zagrożenia, na jakie narażone są zapory betonowe budowane na podłożu nieskalnym oraz podłożu skalnym.

Tabela 1.1. Zagrożenia zapór betonowych (źródło: opracowanie własne na podstawie [3])

Zagrożenia zapór betonowych	
Zapora betonowa na podłożu nieskalnym	Zapora betonowa na podłożu skalnym
a) Przekroczenie obliczeniowego oporu granicznego podłoża	a) Przekroczenie obliczeniowego oporu granicznego podłoża
b) Poślizg po podłożu lub w podłożu	b) Poślizg po podłożu lub w podłożu
c) Przekroczenie dopuszczalnych wartości osiadań i różnicy osiadań oraz przechylenia	c) –
d) –	d) Obrót budowli
e) Przebicie hydrauliczne i sufozja gruntu podłoża i przyczółków	e) –
f) –	f) Przebicie hydrauliczne w szczelinach podłoża skalnego i przyczółków
g) Przekroczenie nośności konstrukcji	g) Przekroczenie nośności konstrukcji

h) Wystąpienie nadmiernych ciśnień w podstawie budowli hydrotechnicznej oraz w podłożu i) –	h) Wystąpienie nadmiernych ciśnień w podstawie budowli hydrotechnicznej oraz w podłożu i) Wystąpienie naprężeń rozciągających od strony odwodnej, w poziomie posadowienia i w przekrojach konstrukcji

Jak można zauważyć, przeważająca część zagrożeń zapór betonowych na podłożu skalnym i gruntowym pokrywa się. Inaczej jest w przypadku zapór ziemnych – jedynym wspólnym zagrożeniem dla zapór ziemnych i betonowych jest niebezpieczeństwo wystąpienia poślizgu po podłożu i w podłożu. Budowle ziemne, ze względu na inną konstrukcję niż budowle betonowe, muszą być analizowane pod względem:

- stateczności skarp – łącznie dla korpusu i podłoża,
- gradientów ciśnień filtracyjnych i możliwości wystąpienia sufozji,
- sprawności działania drenaży,
- wartości osiadań korpusu i odkształceń podłoża zapory ziemnej,
- niebezpieczeństwa wyparcia gruntu spod budowli piętrzącej [3].

1.4. Katastrofy zapór wodnych

Zapory wodne, tak jak wszystkie obiekty budowlane, narażone są na różnego rodzaju czynniki mogące powodować ich uszkodzenie lub nawet całkowite zniszczenie – katastrofę. Zgodnie z definicją podawaną przez ICOLD, katastrofą zapory określa się *„zawalenie lub przemieszczenie części zapory lub jej podłoża, w wyniku którego budowla nie może piętrzyć wody. Na ogół wiąże się to ze znacznie zwiększonym odpływem, stwarzającym zagrożenie dla życia ludzi i ich mienia w dolinie rzeki poniżej zapory.”*. Jak wynika z definicji, zniszczenie lub choćby uszkodzenie korpusu zapory najczęściej pociąga za sobą tragiczne konsekwencje. Zanim jednak opisane zostaną możliwe następstwa takiego zdarzenia, należy zastanowić się nad jego przyczynami.

Ogólnie przyczyny katastrof, można podzielić na trzy grupy:

- związane z przelaniem się wody nad koroną zapory,
- związane z negatywnym działaniem filtracji na podłoże i korpus zapory,
- inne,

przy czym każdej z tych trzech grup szacunkowo przypisuje się 1/3 z łącznej liczby wszystkich katastrof.

Uszczegóławiając podane wyżej informacje, przelanie się wody przez koronę zapory oraz erozja jej korpusu to najczęściej występujące przyczyny katastrof zapór ziemnych. W przypadku zapór betonowych to przeważnie zbyt mała wytrzymałość podłoża na ścinanie oraz jego erozja doprowadzają do zniszczenia lub uszkodzenia budowli piętrzącej. Dodatkowo, rozpatrując także obiekty towarzyszące zaporom, główną przyczyną ich awarii jest zbyt mała zdolność przepustowa spustów i przelewów [19].

Na wymienione główne przyczyny katastrof zapór wodnych wpływ mają różnorodne czynniki. Są to zarówno zaniedbania na każdym z etapów powstawania obiektu, jak i czynniki naturalne. Do czynników subiektywnych zaliczyć można m.in. brak dostatecznej wiedzy

na temat budowy geologicznej podłoża oraz właściwości materiałów, z których zbudowana jest zapora, pomyłki występujące na etapie projektowania i wykonawstwa oraz nieodpowiedzialność osób sprawujących nadzór nad zapewnieniem bezpieczeństwa obiektu podczas jego użytkowania. Obecnie dokłada się wszelkich starań, zarówno podczas projektowania, budowy, jak i eksploatacji, aby ograniczyć ryzyko awarii spowodowanej pośrednio wymienionymi wyżej sytuacjami [12].

Rozpatrując czynniki wpływające na katastrofy należy wziąć pod uwagę, oprócz błędów człowieka, także zjawiska naturalne, których nie da się wyeliminować. Należą do nich m.in. trzęsienia ziemi, intensywne opadu deszczu. Zjawiska te brane są pod uwagę podczas projektowania, jednak nie ma możliwości, aby całkowicie przewidzieć ich natężenie.

Jak już wcześniej wspomniano, awarie i katastrofy zapór wodnych pociągają za sobą ogromne konsekwencje spowodowane uwolnieniem wielkich ilości wody w krótkim czasie i powstaniem wysokiej fali powodziowej. Wśród skutków takiego zdarzenia należy wymienić zniszczenie obszarów leżących poniżej zapory, ofiary śmiertelne wśród ludności zamieszkującej obszary w pobliżu zbiornika, zniszczenie infrastruktury oraz szkody ekologiczne. Przyjmuje się, że jedynie w niewielkim procencie katastrof zapór wodnych nie było ofiar śmiertelnych [19].

Aby ograniczyć skutki katastrof zapór wodnych w Polsce, dla obszarów, na których fala powodziowa mogłaby stanowić zagrożenie dla życia ludzkiego, infrastruktury i środowiska, podejmuje się działania mające na celu ograniczenie negatywnych konsekwencji takiego zdarzenia. Zgodnie z rozporządzeniem [3] do działań takich należy:

- instalacja systemów ostrzegania o nadejściu fali powodziowej,
- wykonanie zabezpieczeń chroniących ludność, infrastrukturę, obiekty przemysłowe,
- opracowanie planów akcji ratowniczych i ewakuacyjnych.

Wcześniej jednak należy określić przewidywane parametry przejścia fali wezbraniowej. Zagadnieniami tego typu zajmują się specjaliści do spraw hydrauliki, którzy tworzą adekwatne modele matematyczne. Modele takie pozwalają, dla danego typu zapory, prognozować schemat tworzenia się wyrwy w korpusie, a co za tym idzie sposób rozchodzenia fali wezbraniowej. Na tej podstawie określane są maksymalne rzędne zwierciadła wody, zasięg zalania terenu oraz prędkość przepływu wody.

Najczęściej do katastrof budowli piętrzących dochodzi w pierwszym roku ich użytkowania, a aż 70% incydentów zanotowano w czasie pierwszej dekady od ich wybudowania.

Aby uwidocznić, jak wielka może być skala zniszczeń związanych z awariami budowli piętrzących, przytoczyć można przykład chińskiej zapory Banqiao Dam o wysokości 118 m, której katastrofa spowodowała bezpośrednią śmierć blisko 26 tys. osób, zaś prawie 230 tys. zmarło później wskutek epidemii.

W Europie, jedna z większych katastrof wydarzyła się w pobliżu francuskiego miasta Frejus w 1959 r. Betonowa, łukowa zapora Malpasset o wysokości 66 m uległa katastrofie podczas pierwszego napełniania zbiornika, powodując śmierć ponad 400 osób i poważne zniszczenia we wspomnianym wcześniej mieście Frejus. Jako bezpośrednią przyczynę katastrofy podaje się błędne rozpoznanie geologiczne podłoża. Podczas przepełnienia zbiornika spowodowanego ulewnymi deszczami, zapora uległa poślizgowi względem

prawego przyczółka, co skutkowało powstaniem w dolinie fali wezbraniowej o wysokości do 50 m. Jest to jedyna dobrze udokumentowana katastrofa zapory wodnej – znane są maksymalne rzędne zwierciadła wody w dolinie oraz prędkość rozchodzenia się fali powodziowej. Opisane powyżej wydarzenie przyczyniło się do wprowadzenia w Europie regulacji prawnych w zakresie projektowania, budowy i użytkowania zapór wodnych [19].

Biorąc pod uwagę informacje zawarte w obecnym podrozdziale, należy zdać sobie sprawę z tego, jak ważne są działania zapobiegające katastrofom obiektów piętrzących. Jednym z takich działań jest wykonywanie cyklicznych pomiarów monitorujących stan zapór wodnych i ich otoczenia.

2. Pomiary zapór wodnych i opracowanie wyników

Odwołując się do poprzedniego rozdziału, katastrofy zapór wodnych najczęściej powodują duże straty materialne, a także zagrażają życiu wielu osób. Aby uniknąć negatywnych skutków związanych z uszkodzeniem budowli piętrzących, a także wesprzeć ich procedury utrzymaniowe, ważne jest wykonywanie cyklicznych pomiarów dostarczających danych o stanie badanego obiektu. Informacja o obowiązku wykonywania obserwacji zawarta jest w ustawie Prawo budowlane [1], ustawie Prawo wodne [2], przytaczanym wcześniej rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie [3] oraz normie europejskiej Eurokod 7 [4].

Zgodnie z ustawą Prawo budowlane, właściciel obiektu budowlanego lub osoba odpowiedzialna za zarządzanie tym obiektem jest zobowiązany utrzymywać budowlę w odpowiednim stanie technicznym oraz zapewniać bezpieczeństwo jej użytkowania w każdych warunkach. W związku z tym, ustawa nakłada obowiązek okresowej kontroli stanu technicznego *„elementów budynku, budowli i instalacji narażonych na szkodliwe wpływy atmosferyczne i niszczące działanie czynników występujących podczas użytkowania obiektu”*. Kontrolę taką przeprowadza się co najmniej raz w roku [1]. W tym miejscu należy zaznaczyć, że powyższy zapis Prawa budowlanego tyczy się wszystkich obiektów budowlanych. Aby znaleźć informacje dotyczące stricte budowli hydrotechnicznych, należy odwołać się do ustawy Prawo wodne.

Ustawa Prawo wodne wskazuje na konieczność zapewnienia przez właściciela budowli piętrzącej przeprowadzenia pomiarów i badań, których celem jest określenie stanu technicznego oraz stanu bezpieczeństwa danego obiektu. W szczególności wiąże się to z ustaleniem stanu wód podziemnych i wielkości filtracji, zarówno przez budowlę, jak i w podłożu, stanu urządzeń upustowych oraz zmian, jakie zaszły na górnym i dolnym stanowisku budowli wodnej. Zgodnie z przepisami ww. ustawy, w przypadku budowli piętrzących zaliczanych do I lub II klasy i obiektów klasy III lub IV, których stan techniczny zagraża bezpieczeństwu, oraz jednocześnie należących do Skarbu Państwa, ocena stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa wykonywana jest przez państwową służbę do spraw bezpieczeństwa budowli piętrzących – jedną z dwóch jednostek organizacyjnych IMGW. Służbie do spraw bezpieczeństwa budowli piętrzących przekazuje się także raporty dotyczące stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa obiektów I lub II klasy, niebędących własnością Skarbu Państwa [2]. Jak można zauważyć, zapisy Prawa wodnego ograniczają się głównie do obiektów piętrzących I i II klasy (do klas tych należy większość zapór wodnych w Polsce), pomijając obiekty klas niższych.

Zgodnie z Eurokodem 7 *„w celu zapewnienia bezpieczeństwa i jakości budowli należy, w miarę potrzeby: nadzorować procesy budowlane i jakość wykonawstwa, monitorować zachowanie konstrukcji podczas budowy i po jej zakończeniu, zapewnić odpowiednie utrzymanie konstrukcji”*. Norma wiąże podstawę do oceny zachowania konstrukcji z jej kategorią geotechniczną. Ocenę dla obiektów 2. kategorii geotechnicznej można oprzeć na pomiarach przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji. Natomiast dla obiektów 3. kategorii geotechnicznej pomiary przemieszczeń i ich analiza, uwzględniająca kolejność robót budowlanych, powinny zwykle stanowić podstawę oceny zachowania

konstrukcji. Zapory wodne przypisane zostały, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych [5], do 3. kategorii geotechnicznej – zakwalifikowane zostały do grupy nietypowych obiektów budowlanych, których wykonanie lub użytkowanie może stwarzać poważne zagrożenie dla użytkowników, niezależnie od stopnia skomplikowania warunków gruntowych.

W celu realizacji wymagań stawianych przez wymienione przepisy prawa, budowle piętrzące oraz ich otoczenie wyposażane są w urządzenia kontrolno-pomiarowe, które pozwalają na monitorowanie stanu technicznego już w momencie rozpoczęcia budowy, a następnie przez cały okres użytkowania obiektu. Zgodnie z rozporządzeniem [3] rodzaj, liczba i rozmieszczenie urządzeń kontrolno-pomiarowych, a także dokładność wykonywanych pomiarów dostosowuje się do konkretnej budowli piętrzącej, rodzaju podłoża, na jakim została ona wybudowana oraz do charakteru terenu otaczającego monitorowany obiekt. Dopasowanie urządzeń kontrolno-pomiarowych do konkretnej zapory opiera się na analizie przewidywanej pracy budowli oraz analizie występowania stref zwiększonego zagrożenia, jakimi są np. uskoki czy miejsca koncentracji naprężeń. Jeden z warunków wprowadzanych przez rozporządzenie mówi o tym, że urządzenia kontrolno-pomiarowe w budowlach piętrzących klas I i II muszą być przystosowane do ciągłego i automatycznego wykonywania odczytów. W celu sprawdzenia poprawności działania takich urządzeń, powinna istnieć możliwość porównania otrzymywanych za ich pomocą wyników z wartościami uzyskiwanymi z pomiarów klasycznych [3]. Planując cały schemat pomiaru zapór wodnych, nie należy zapominać, że bardzo ważnym elementem kontroli stanu obiektów piętrzących jest ich ocena wizualna pozwalająca na zauważenie groźnych dla obiektu rys, pęknięć czy przecieków.

Automatyzacją mogą być objęte wszystkie pomiary, oprócz obserwacji typowo geodezyjnych. Automatyczne Systemy Technicznej Kontroli Zapór, nazywane dalej ASTKZ, obejmują kilka powiązanych ze sobą elementów. W ich skład wchodzą wspomniane wcześniej, automatycznie działające, urządzenia kontrolno-pomiarowe, okablowanie oraz jednostka centralna wyposażona w odpowiednie oprogramowanie. ASTKZ pozwala na zdalne inicjowanie pomiarów, gromadzenie i analizę danych, wysyłanie raportów o stanie technicznym obiektu oraz ostrzeganie o przekroczeniu parametrów użytkowych. Dzięki pomiarom realizowanym w trybie ciągłym, istnieje możliwość wykonywania bieżącej analizy zmian, jakie zachodzą w badanym obiekcie. W odniesieniu do rozporządzenia dotyczącego budowli hydrotechnicznych, instalowane w systemach kontroli zapór sensory powinny zapewniać możliwość pomiaru m.in. przemieszczeń i odkształceń budowli hydrotechnicznych, parcia budowli na podłoże, stanu wód podziemnych i procesu filtracji, intensywności przecieków oraz zjawisk meteorologicznych [30].

Jak można zauważyć, wymienione pomiary można umownie podzielić na dwie grupy – pomiary przemieszczeń i odkształceń (wielkości geometryczne) oraz pomiary wielkości geotechnicznych i hydrotechnicznych, przy czym w monografii główny nacisk zostanie położony na pierwszą z wymienionych grup pomiarów. Wpierw jednak, pokrótce, przedstawione zostaną pomiary niektórych wielkości geotechnicznych i hydrotechnicznych wraz z wykorzystywanymi do badań przyrządami.

Bardzo ważny, szczególnie w przypadku zapór ziemnych, jest pomiar ciśnień filtracyjnych wykonywany z wykorzystaniem piezometrów otwartych lub zamkniętych, przy czym sposób pomiaru w przypadku obu rodzajów piezometrów jest odmienny. W piezometrze otwartym pomiarowi podlega poziom swobodnego zwierciadła wody, który wykonywany jest np. za pomocą czujników ultradźwiękowych – mierzony jest czas przejścia ultradźwięków pomiędzy czujnikiem, a poziomem wody. Zastosowanie piezometru zamkniętego opiera się na pomiarze ciśnienia wody (np. czujnikami, w których element sprężysty odkształca się pod wpływem ciśnienia) i przeliczeniu tej wielkości na wysokość słupa wody. Przyjmuje się, że piezometry zamknięte służą najczęściej do wyznaczania ciśnień filtracyjnych w warstwach drenażowych, zaś otwarte – w korpusie zapory i obwałowaniach bocznych [30], [10]. Przykład piezometru otwartego przedstawiono na rys. 2.1.

Rys. 2.1. Piezometr otwarty (źródło: własne)

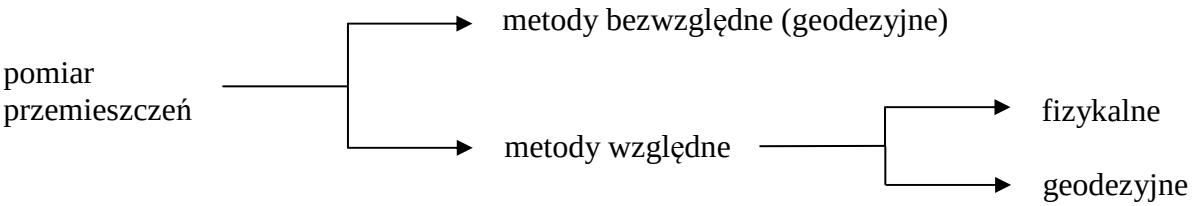
Pomiar wydatku przecieków wykonywany jest często za pomocą zwężki Venturiego. Pozwalają one na wyznaczenie wydatku w sposób pośredni, na podstawie zmian ciśnienia podczas przepływu cieczy przez przewężenie. Pomiar sprowadza się do zainstalowania dwóch czujników mierzących poziom wody w piezometrach zainstalowanych na zwężce, przed i na przewężeniu. Obliczenia wydatku przeprowadzane są w oparciu o równanie ciągłości oraz równanie Bernoulliego [30].

Jako konieczny wymienia się także pomiar wielkości meteorologicznych. Dane z czujników meteo są o tyle ważne, że pozwalają na wprowadzanie poprawek, związanych ze zmianami temperatury i ciśnienia, do danych pozyskanych z innych przyrządów pomiarowych. Przykładem urządzeń służących jedynie do pomiaru temperatury są termometry elektroniczne montowane zazwyczaj na zewnątrz zapory, w galeriach kontrolno-pomiarowych, w korpusie zapory oraz w podłożu [30], [10].

2.1. Pomiary przemieszczeń

Zgodnie z wcześniej wprowadzoną klasyfikacją, oprócz pomiaru wielkości geotechnicznych i hydrotechnicznych, obserwacjom podlegają również przemieszczenia i odkształcenia (liniowe, kątowe oraz postaciowe). Obecny rozdział, w głównej mierzy,

dotyczyć będzie właśnie pomiaru przemieszczeń. Poniżej przedstawiono wykres schematycznie obrazujący podział metod wykonywania tego typu pomiarów.



Rys. 2.2. Podział metod pomiaru przemieszczeń (źródło: opracowanie własne na podstawie [14])

Przez metody bezwzględne pomiaru przemieszczeń rozumie się metody geodezyjne, które pozwalają na wyznaczenie położenia punktów kontrolowanych, rozmieszczonych na obiekcie i wokół niego, w stosunku do stałych punktów geodezyjnej sieci kontrolno-pomiarowej, a także na wyznaczenie zmian położenia obserwowanych punktów.

Metody względne służą określaniu wzajemnych zmian położenia wybranych punktów znajdujących się na monitorowanym obiekcie. W przeciwieństwie do metod bezwzględnych, w których położenie punktów kontrolowanych analizowane jest w układzie zewnętrznym, metody względne wykorzystują układy wewnętrzne. Jak widać na rys. 2.2., wśród metod względnych wyróżnia się dodatkowo metody fizykalne oraz metody geodezyjne. Należy jednak zaznaczyć, że podczas pomiarów względnymi metodami geodezyjnymi stosuje się takie same instrumenty i techniki pomiarowe, jak podczas pomiaru metodami bezwzględnymi [14].

Odnosząc się jeszcze do pomiarów wykonywanych czujnikami przystosowanymi do automatycznego odczytu, ASTKZ do wyznaczania przemieszczeń wykorzystują względne metody fizykalne. Metody bezwzględne i metody względne geodezyjne stosowane są zazwyczaj jako pomiary sprawdzające pracę czujników automatycznych. W tym miejscu należy jednak zaznaczyć, że głównym celem wykonywania pomiarów bezwzględnych jest określenie ruchu obiektu i jego otoczenia w zewnętrznym układzie odniesienia.

Porównując obie metody pomiaru, urządzenia do pomiarów względnych odznaczają się łatwością ich wykorzystania oraz wyższą dokładnością. Z drugiej jednak strony, analiza jedynie przemieszczeń względnych nie daje pełnego opisu zachowania obiektu. Dlatego ważne jest, aby łączyć pomiary wykonywane obiema metodami.

2.1.1. Pomiar przemieszczeń – metody bezwzględne

Bezwzględne metody pomiarowe (dalej nazywane geodezyjnymi) wykorzystywane są do pomiaru, w danym momencie czasu, położenia punktów kontrolowanych w określonym, zewnętrznym układzie odniesienia. W przypadku zapór wodnych metodami bezwzględnymi wyznacza się wielkości, takie jak:

- przemieszczenia pionowe (osiadania oraz wypiętrzenia) oraz określane na ich podstawie wychylenia obiektu od pionu oraz nachylenie względem poziomu,
- przemieszczenia poziome.

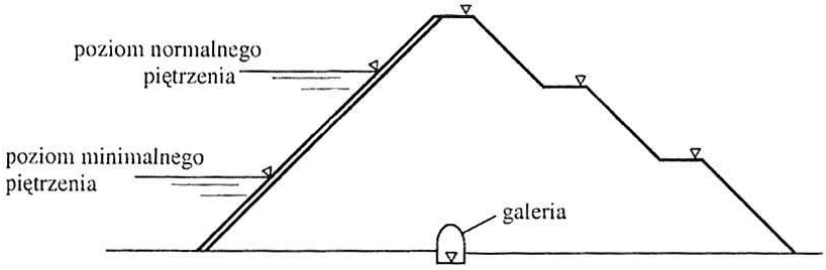
Pierwsze z wymienionych wielkości wyznaczyć można korzystając z wyników uzyskanych z niwelacji precyzyjnej. Przy pomiarze przemieszczeń poziomych możliwy jest

szerszy wachlarz technik – od metody stałej prostej dla wyznaczania przemieszczeń prostopadłych do osi zapory, poprzez pomiar różnego rodzaju sieci, w których dla określenia dwuwymiarowego ruchu punktów rozmieszczonych na korpusie zapory i w jej pobliżu, wykorzystywane są sieci kątowo-liniowe i liniowe [10].

Zgodnie z powyższym tekstem, do wyznaczania przemieszczeń pionowych punktów kontrolowanych zastabilizowanych na obiekcie wykorzystywana jest metoda geometrycznej niwelacji precyzyjnej z dowiązaniem do reperów odniesienia. Należy od razu nadmienić, że w przypadku zapór ziemnych ich część gruntowa jest na tyle ciężka, że nie będzie podlegać wychyleniom, zatem obliczenia nachylenia i wychylenia wykonywane są głównie dla betonowych sekcji zapory [15]. Obserwacjami metodą niwelacji precyzyjnej obejmuje się:

- sieć reperów kontrolowanych zakładanych w różnych częściach zapory – w dolnej części korpusu oraz na półkach po stronie odpowietrznej, w galeriach kontrolno-pomiarowych, na koronie zapory, a w szczególnych przypadkach także na korpusie zapory po stronie odwodnej (na poziomie najwyższego i najniższego piętrzenia);
- sieć reperów odniesienia, do której należą repery dowiązania i repery kontrolne [10].

Ważne jest także, aby pomiarami niwelacyjnymi objąć tereny wokół zbiornika zaporowego. Pozwala to, biorąc pod uwagę także wartości przemieszczeń poziomych, na analizę ruchu obszaru wokół zapory. Na rys. 2.3. przedstawiono przykładowe rozmieszczenie reperów kontrolowanych na korpusie zapory ziemnej.



Rys. 2.3. Rozmieszczenie reperów kontrolowanych na korpusie zapory ziemnej (źródło: [14])

Zakładając sieć punktów kontrolowanych wykorzystuje się różne sposoby stabilizacji – w galeriach mogą być to metalowe repery ścienne, zaś do obserwacji przemieszczeń korpusu zapory stosuje się repery powierzchniowe posadowione poniżej poziomu przemarzania gruntu. Przekroje pomiarowe, prostopadłe do osi zapory, rozmieszcza się w lokalizacjach takich jak: miejsca o największej wysokości zapory, w sąsiedztwie urządzeń upustowych, w miejscach o odmiennej budowie geologicznej [15].

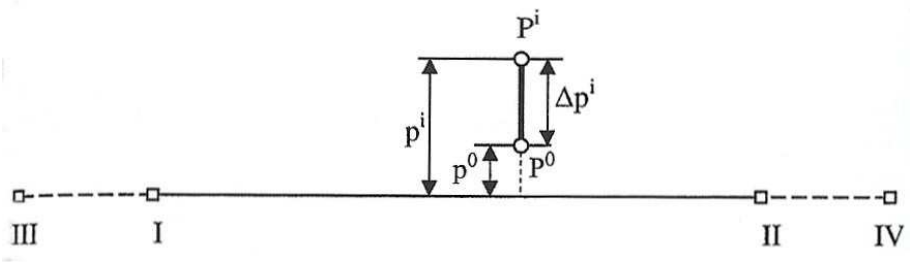
Sieć reperów odniesienia zakładana jest najczęściej po obu stronach zapory, przy czym liczba reperów dowiązania zazwyczaj waha się w okolicy 10 punktów. Repery dowiązania stabilizuje się w odległości około 0.5÷1 km od obserwowanego obiektu, w miejscach o niskim poziomie wód gruntowych. Ze względu na znaczną odległość tych reperów od obiektu, często zakłada się dodatkowe repery kontrolne, w odniesieniu do których prowadzone są właściwe pomiary.

Projektując rozmieszczenie punktów kontrolowanych i punktów odniesienia należy wziąć pod uwagę także zalecenie, aby sieć niwelacyjna tworzyła w miarę możliwości

optymalny układ geometryczny. Dąży się również do tego, aby ciągi obejmujące punkty kontrolowane nawiązane były do reperów odniesienia usytuowanych po obu stronach zapory oraz aby sieć reperów odniesienia była odpowiednio połączona ze sobą za pomocą ciągów niwelacyjnych. Spełnienie drugiego warunku pozwoli na określenie wzajemnej stałości położenia tych reperów.

Drugą grupą pomiarów są pomiary przemieszczeń poziomych. W celu wyznaczenia przemieszczeń prostopadłych do osi zapory wykorzystuje się, wymienioną wcześniej, metodę prostej odniesienia. Obserwacje tą metodą wykonuje się zazwyczaj w przypadku zapór betonowych, w zaporach ziemnych bywa ona głównie stosowana do monitorowania sekcji betonowych [15].

Metoda prostej odniesienia opiera się na wykorzystaniu punktów utrwalających oś zapory – słupy obserwacyjne z płytą do wymuszonego centrowania oraz punktów reprezentujących koronę zapory, których budowa umożliwia umieszczenie na nich tarczy celowniczej. Punkty utrwalające oś (punkty niezmienne – punkty I i II na rys. 2.4.) stabilizowane są w miejscu nienarażonym na deformacje i przemieszczenia. Konieczne jest jednak okresowe sprawdzenie stałości położenia tych punktów poprzez włączenie ich do sieci kątowo-liniowej występującej w otoczeniu zapory albo wykorzystując bardziej oddalone punkty również realizujące oś zapory (punkty III i IV na rys. 2.4.). Schemat wyznaczania przemieszczeń punktów na koronie zapory (Δp^i) metodą aliniometryczną przedstawiono na rys. 2.4., gdzie p^0 i p^i to odległość punktu kontrolowanego od prostej realizującej oś zapory (prosta I-II) odpowiednio w pomiarze wyjściowym i aktualnym.



Rys. 2.4. Schemat wyznaczania przemieszczeń poziomych metodą stałej prostej (źródło: [14])

Najczęściej stosowana jest metoda aliniometryczno-geometryczna, w której na punkcie I ustawiany jest aliniometr optyczny, zaś na punkcie II stała tarcza celownicza. Na punktach kontrolowanych na koronie zapory ustawiana jest kolejno ruchoma tarcza, której środek za pomocą ruchów śruby mikrometrycznej ustawiany jest bisekcyjnie na linii odniesienia. Odczyt z podziałki i śruby mikrometrycznej pozwala na obliczenie odległości p^i danego punktu od linii odniesienia [14].

Oprócz opisanej powyżej metody z użyciem aliniometru optycznego, wyróżnić można jeszcze kilka innych wykorzystujących prostą odniesienia. Schemat obliczenia przemieszczenia jest analogiczny, zaś różnica wynika z wykorzystywanego sprzętu i sposobu obliczania odległości p^i. Poniżej przedstawiono skrócony podział metod aliniometrycznych:

- metoda aliniometryczno-geometryczna – wykorzystuje się aliniometr optyczny i tarczę przesuwną ze śrubą mikrometryczną lub aliniometr z mikrometrem okularowym i tarczę stałą;
- metoda paralaktyczna – wykorzystuje się wysoko precyzyjny tachimetr i stałą tarczę celowniczą. Taka technika pomiarowa z powodzeniem stosowana jest przy pomiarze zapór łukowych;
- metoda aliniometryczno-laserowa – wykorzystuje aliniometr laserowy i tarczę z koncentrycznym układem okręgów, tarczę z siatką kwadratów lub, w najbardziej nowoczesnej wersji, tarczę z fotodetektorem i urządzeniem do automatycznej rejestracji odczytów położenia wiązki laserowej oraz soczewki Fresnela [10].

Metody stałej prostej charakteryzują się relatywnie dużą dokładnością, która może ulec pogorszeniu wskutek niesprzyjających warunków atmosferycznych oraz występowania refrakcji bocznej.

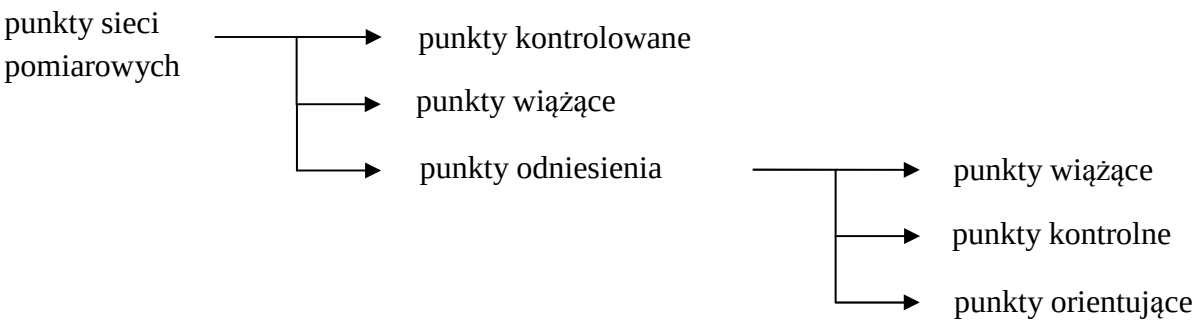
Druga z metod wyznaczania przemieszczeń poziomych wykorzystuje sieci – kątowo-liniowe oraz liniowe o różnych konstrukcjach. Ze względu na to, że sieci poziome są ważnym elementem obecnej monografii, wydzielono krótki podrozdział dotyczący tego zagadnienia.

2.1.1.1. Sieci trygonometryczne do pomiaru przemieszczeń poziomych

Zgodnie z tym, co już wspomniano, przemieszczenia poziome punktów kontrolowanych mogą być wyznaczane z punktów lokalnej, poziomej sieci kątowo-liniowej lub liniowej. W przypadku zapór wodnych, punkty sieci mogą być zlokalizowane na przedpolu zapory, zboczach doliny oraz na obszarze wokół zbiornika. Sieci pomiarowe mogą zajmować różne powierzchnie i mieć odmienne kształty, co zależy w głównej mierze od rozmiarów i usytuowania obserwowanego obiektu oraz ukształtowania otoczenia. W praktyce pomiarowej stosowane są trzy rodzaje sieci:

- sieci pełne,
- sieci niepełne,
- sieci powierzchniowe [17].

Przed przystąpieniem do scharakteryzowania każdego rodzaju sieci, należy wpierw określić rodzaje punktów, jakie mogą w nich występować. Punkty te można podzielić na trzy grupy – punkty kontrolowane, punkty wiążące oraz punkty odniesienia. Dalszy podział przedstawiony został na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Punkty występujące w sieciach pomiarowych (źródło: opracowanie własne na podstawie [17])

Punkty kontrolowane (celowniki) są grupą punktów, których zadaniem jest sygnalizowanie elementu budowli, na jakim zostały one umieszczone. Uczestniczą one w ruchu danej części obiektu, umożliwiając tym samym pomiar przemieszczeń danego elementu w czasie. Punkty takie obserwuje się najczęściej z punktów wiążących – w przypadku zapór wodnych z co najmniej trzech stanowisk. W praktyce pomiarowej można znaleźć przykłady obiektów, gdzie celowniki wykorzystywane są również jako stanowiska pomiarowe – występują wtedy nie tylko celowe zewnętrzne, ale także obustronne [17].

Punkty wiążące (stanowiska) są punktami wykorzystywanymi do bezpośredniej obserwacji punktów kontrolowanych. Za ich pośrednictwem pomiary nawiązywane są do punktów odniesienia, a tym samym do lokalnego układu współrzędnych. Punkty wiążące najczęściej są stabilizowane za pomocą filarów betonowych z urządzeniem do wymuszonego centrowania. Lokalizacja stanowisk powinna być określana po wykonaniu wywiadu terenowego z uwzględnieniem informacji dotyczących warunków geologicznych. Położenie punktów wiążących powinno być okresowo sprawdzane w nawiązaniu do punktów odniesienia – pozwala to nie tylko na określenie aktualnych współrzędnych stanowisk, ale także na ocenę stabilności obszaru, na jakim punkty te są rozmieszczone. Część z punktów wiążących zaliczana jest do grupy punktów odniesienia – punkty te zatem muszą spełniać wymagania takie, jakie stawiane są punktom odniesienia. Głównym warunkiem jest niezmienność położenia w granicach błędów pomiarowych. Punkty wiążące zaliczane do punktów odniesienia występują jedynie w sieciach pełnych i powierzchniowych [10], [17].

Głównym zadaniem punktów odniesienia jest utrwalenie, w sposób bezpośredni lub pośredni, lokalnego układu odniesienia. Zgodnie z informacjami zawartymi na rys. 2.5., wyróżnia się wśród nich punkty wiążące, punkty kontrolne oraz punkty orientujące.

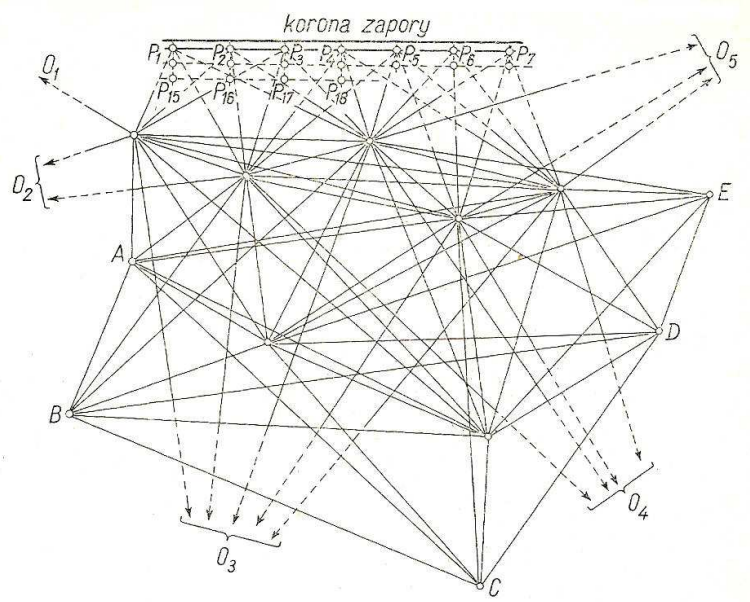
Punkty kontrolne zakładane są przeważnie w otoczeniu poszczególnych stanowisk i służą sprawdzeniu stałości ich położenia oraz obliczeniu ewentualnego przemieszczenia. Są one obserwowane za pomocą krótkich celowych wewnętrznych – z badanego stanowiska, ich długość powinna wynosić od kilku do co najwyżej kilkudziesięciu metrów. Punkty takie zakłada się głównie w przypadku sieci niepełnych.

Punkty orientujące są to najczęściej dość daleko położone punkty, których zadaniem jest wprowadzenie orientacji kierunków zaobserwowanych na stanowiskach pomiarowych. Punkty takie wykorzystuje się jedynie wtedy, gdy jest pewność, że celowe orientujące nie będą poddawane negatywnym wpływom atmosferycznym. Najczęściej długości celowych orientujących wynoszą kilkaset metrów. Zakłada się, że ewentualne niewielkie przemieszczenie punktu orientującego, przy takiej odległości od stanowiska, nie powinno wnosić zmian w pomiarze kątowym [10], [17].

Jak napisano na początku rozdziału, w praktyce geodezyjnej wykorzystywane są trzy rodzaje sieci pomiarowych. Poniżej przedstawiona zostanie krótka charakterystyka każdej z wymienionych sieci.

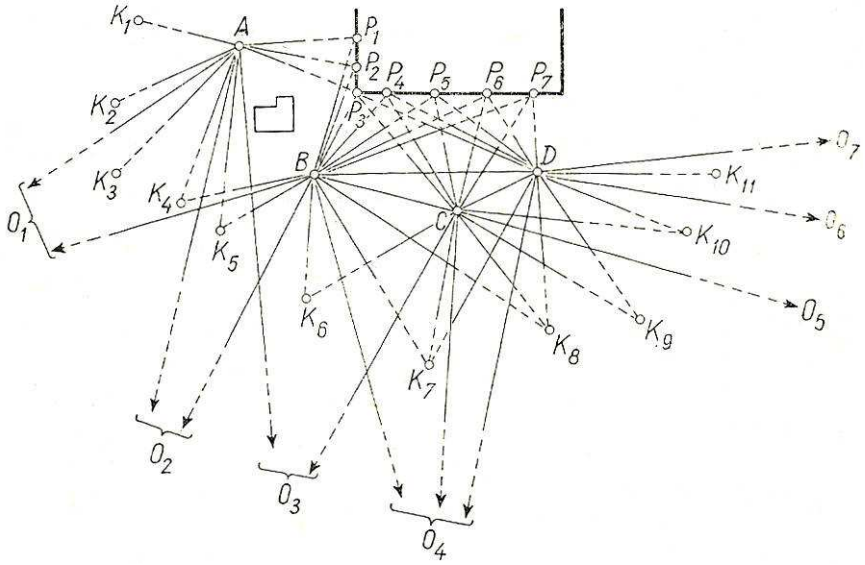
Sieci pełne są najbardziej rozbudowanym typem sieci pomiarowych. Składają się one z punktów kontrolowanych, punktów wiążących oraz punktów odniesienia w postaci punktów orientujących oraz niektórych punktów wiążących. Taki rodzaj sieci zakładany jest na potrzeby wieloletniego monitoringu budowli o znacznych rozmiarach, które znajdują się

pod wpływem dużych obciążeń – dlatego często wykorzystywane są dla potrzeb pomiarów zapór wodnych. Warunkiem ważnym dla sieci pełnej jest konieczność zachowania wizur pomiędzy stanowiskami. Przykład sieci pełnej przedstawiono na rys. 2.6., gdzie: P_x – punkty kontrolowane, O_x – punkty orientujące, A,…,E – zidentyfikowane punkty wiążące [17].



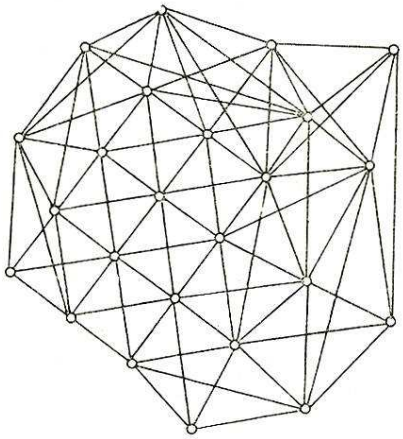
Rys. 2.6. Sieć pełna (źródło: [17])

Niepełna sieć punktów powstaje w momencie, gdy nie występują bezpośrednie wizury pomiędzy stanowiskami pomiarowymi (punktami wiążącymi). Ma to miejsce w przypadku terenów zabudowanych, obiektów przemysłowych – sytuacja taka raczej nie występuje podczas pomiaru zapór wodnych. W omawianym typie sieci występują punkty kontrolowane, punkty wiążące oraz punkty odniesienia, w tym także punkty kontrolne, które nie występują przy sieciach pełnych. Punkty kontrolne, za pomocą celowych wewnętrznych wykorzystuje się do nawiązywania pojedynczych stanowisk pomiarowych. Sieć niepełna przedstawiona została na rys. 2.7., gdzie: P_x – punkty kontrolowane, O_x – punkty orientujące, A,…,E – punkty wiążące, K_x – punkty kontrolne [17].



Rys. 2.7. Sieć niepełna (źródło: [17])

Sieci powierzchniowe zakłada się w przypadku pomiarów przemieszczeń powierzchni terenu, a także obiektów, do których istnieje bezpośredni dostęp. Sieć taka składa się z powiązanych dwustronnymi celowymi stanowisk pomiarowych oraz punktów odniesienia – wyeliminowane zostają celowniki. Przykład sieci powierzchniowej przedstawiono na rys. 2.8., gdzie punktami zaznaczono stanowiska pomiarowe.



Rys. 2.8. Sieć powierzchniowa (źródło: [17])

W obecnym podrozdziale przedstawiono charakterystykę poszczególnych sieci pomiarowych oraz punktów w tych sieciach występujących. Opracowaniu wyników przemieszczeń pochodzących z pomiaru sieci poziomych poświęcony będzie w całości podrozdział 2.2.

2.1.2. Pomiar przemieszczeń – metody względne fizykalne

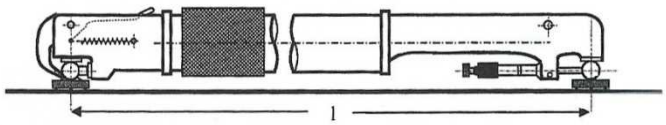
Pomiar przemieszczeń, oprócz omówionych w podrozdziale 2.1.1. metod bezwzględnych, wykonywany może być także z wykorzystaniem metod względnych. Wyniki pomiarów wykonywanych tymi metodami pozwalają na określenie wzajemnej zmiany

położenia punktów reprezentujących mierzony element konstrukcji, bez nawiązania do układu zewnętrznego – z tego powodu nie istnieje konieczność zakładania osnowy pomiarowej. Elementami konstrukcji, których dotyczą tego rodzaju pomiary mogą być m.in. kolejne sekcje zapór wodnych. Zmiany wzajemnego położenia punktów mogą być rozpatrywane pod kątem zmian długości, zmian nachylenia, zmian wychylenia oraz zmian kątów. Zgodnie z informacjami zawartymi na rys. 2.2., podczas wyznaczania przemieszczeń względnych stosować można zarówno metody geodezyjne, jak i metody fizykalne, które zostaną omówione w obecnym podrozdziale.

Podczas pomiaru metodami fizykalnymi wykorzystuje się różnego rodzaju przyrządy, tj. tensometry, szczelinomierze, wahadła oraz inne czujniki specjalnie dostosowane do potrzeb pomiaru danego obiektu. Poniżej przedstawione zostaną przykładowe rodzaje pomiarów wraz z używanymi w tym celu urządzeniami [14].

Jedną z wyznaczanych wielkości względnych jest zmiana długości pomiędzy oznaczonymi na obiekcie punktami. Obliczana jest ona jako różnica dwóch odległości – jednej zmierzonej w danym momencie czasu i drugiej, zmierzonej podczas pomiaru wyjściowego. Do pomiaru długości w kolejnych okresach czasu wykorzystywane są przyrządy zarówno mechaniczne, jak i elektryczne. Wśród nich wymienić można:

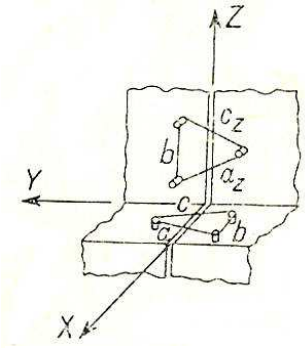
- przymiar sztywny Huggenbergera – przyrząd pomiarowy o długości bazy równej 1 m lub 2 m. Służy on do wyznaczania niewielkich zmian długości, które mogą być jednak zaobserwowane jedynie na relatywnie długich bazach pomiarowych (stąd długość przyrządu). Przymiar umieszcza się na dwóch kulisto uformowanych elementach osadzonych w badanym obiekcie. Pomiar polega na uzyskaniu styku ostrza przymiaru z prawą kulką (patrz: rys. 2.9.) i odczycie uzyskanej odległości z mikrometru [14];



Rys. 2.9. Przymiar sztywny Huggenbergera (źródło: [14])

- distometr – przyrząd pomiarowy o znacznej długości bazy pomiarowej, która zawiera się w zakresie 1÷50 m. Pod względem budowy, urządzenie to składa się z dwóch głównych części – korpusu oraz drutu inwarowego, za pomocą którego wykonywany jest pomiar długości. W korpusie występują dwa czujniki – czujnik zegarowy do pomiaru wydłużenia drutu inwarowego oraz drugi do pomiaru siły naciągu. Drut inwarowy rozciągany jest pomiędzy dwoma zastabilizowanymi w obiekcie punktami pomiarowymi i umożliwia pomiar w każdej płaszczyźnie [14];
- tensometr elektryczny – przyrząd pomiarowy o niedużej długości bazy pomiarowej. W urządzeniu tego typu zmianę długości oblicza się na podstawie zmian oporu w przewodniku umieszczonym na badanym obiekcie – wykorzystywane jest zjawisko zmian oporu elektrycznego w zależności od zmiany długości elementu pomiarowego. Obecnie pomiar przyrządami tego typu, w przeciwieństwie do wyżej wymienionych, jest zautomatyzowany, a co za tym idzie, pozwala na ciągłe monitorowanie zmian długości rozpatrywanego odcinka [14].

Podchodząc do zagadnienia zmian długości bardziej szczegółowo, obserwacje takie mogą być związane z pomiarem rozwartości szczelin dylatacyjnych – w przypadku zapór betonowych, pomiarem odległości miedzy segmentami galerii kontrolno-pomiarowych – w przypadku zapór ziemnych oraz z pomiarem szerokości wszystkich zarysowań występujących w konstrukcji. Przyrządy stosowane w wymienionych powyżej pomiarach nazywane są szczelinomierzami. Działają one na takiej samej zasadzie, co inne przyrządy wykorzystywane do pomiaru zmian odległości, tyle tylko, że szczelinomierze są wyodrębnioną grupą używaną jedynie do monitorowania rozwartości szczelin. Najczęściej charakteryzują się niezbyt dużą długością bazy pomiarowej i wysoką dokładnością wyników – setne części milimetra. W celu wykonania pomiaru, szczelinomierze osadza się na specjalnych bolcach pomiarowych.



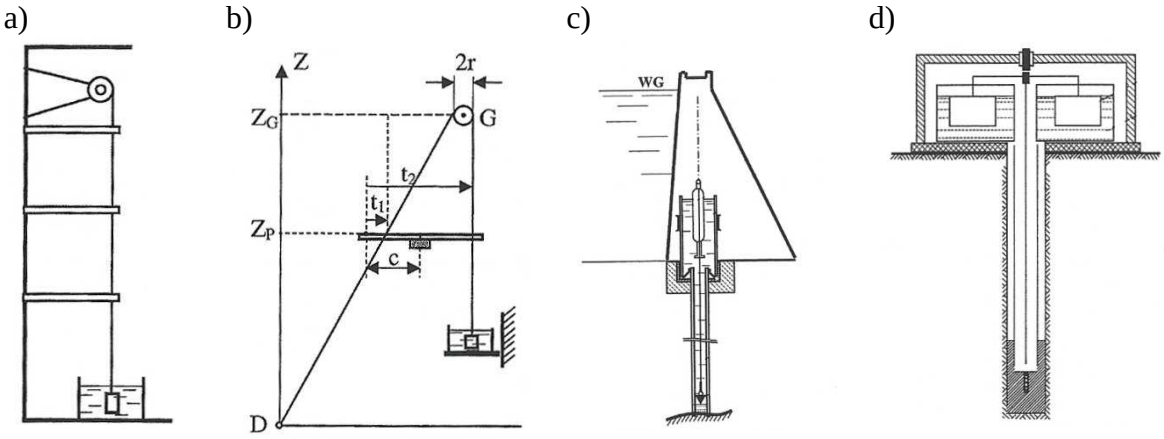
Rys. 2.10. Szczelinomierz płaski (źródło: [17])

Można wyróżnić dwa sposoby rozmieszczenia bolców:

- liniowy – bolce osadza się po dwóch stronach badanej szczeliny w taki sposób, aby pomiar zmian odległości wykonywany był prostopadle do kierunku szczeliny;
- płaski – bolce rozmieszczone są tak, aby tworzyły wierzchołki trójkąta równobocznego (patrz rys. 2.10.). Mierzonych jest 6 długości boków, łącznie w obu trójkątach, co pozwala na określenie wszystkich trzech składowych ruchu [17].

Obecnie na rynku spotkać można także szczelinomierze trójosiowe, które w sposób automatyczny pozwalają na pomiar przemieszczeń w trzech kierunkach.

Kolejnym rodzajem wykonywanych pomiarów względnych jest pomiar zmian wzajemnego położenia poziomego punktów rozmieszczonych na różnych poziomach. W tym celu bardzo często stosuje się przyrządy takie jak wahadła. Analizując ruch wahadła na określonych poziomach pomiarowych istnieje możliwość wyznaczenia, w danym momencie czasu, odpowiednich przemieszczeń, a co za tym idzie także wychylenia mierzonego elementu od pionu. Urządzenia takie stosuje się najczęściej w zaporach betonowych, jednak zaobserwować je można również w galeriach kontrolno-pomiarowych zapór ziemnych. Wśród wahadeł wyróżnić można trzy główne typu – wahadła proste, wahadła dyferencyjne oraz wahadła odwrotne, w tym wahadła „suche” i „mokre”. Schematy wymienionych wahadeł przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Wahadła pomiarowe: a) wahadło proste, b) wahadło dyferencyjne, c) wahadło odwrotne „mokre", d) wahadło odwrotne „suche" (źródło: [14])

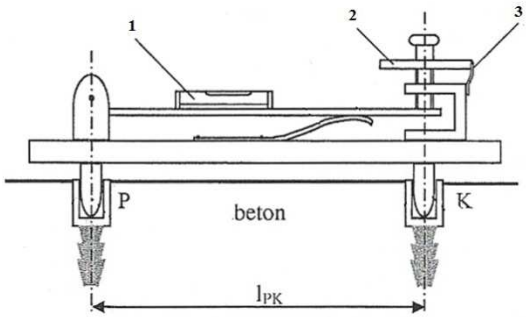
Wahadła proste, inaczej zwykłe, są najprostszą i zapewne najczęściej spotykaną konstrukcją wśród wahadeł stosowanych w zaporach wodnych. Jak widać na rysunku powyżej, przyrząd taki składa się ze struny stalowej obciążonej na końcu ciężarkiem (zanurzonym w oleistej cieczy) o wadze zależnej od długości struny. Punkt zawieszenia struny powinien znajdować się w miejscu możliwie najwyższym, zaś urządzenie pomiarowe w miejscu jak najniżej – często występuje kilka urządzeń odczytowych umieszczonych na różnych poziomach. Pomiar polega na określeniu położenia drutu na zadanych poziomach, względem punktu zaczepienia. Może on być wykonywany za pomocą różnego rodzaju urządzeń optycznych lub mechanicznych. Przykładem wcześniej używanych przyrządów odczytowych jest stolik z podziałkami mikrometrycznymi – obecnie pomiary takie są najczęściej zautomatyzowane [10].

Kolejnym sposobem wyznaczania przemieszczeń jest zastosowanie wahadła dyferencyjnego (różnicowego). Całkiem inaczej niż w przypadku wahadła prostego, punkt zaczepienia znajduje się poniżej systemu odczytowego – najczęściej w skalnym podłożu zapory. Jak widać na rys 2.11.b stalowa struna przerzucona jest przez bloczek umieszczony w górnej części zapory i zwisa obciążona ciężarkiem. Pomiar położenia struny najczęściej wykonywany jest tylko w miejscu najniższym – niewiele ponad naczyniem z oleistą cieczą. Rejestrując wielkości t_1 oraz t_2 możliwe jest obliczenie przesunięcia punktu zawieszenia wahadła i punktu wykonywania odczytu względem punktu zakotwienia, przy tym te dwa przesunięcia wykorzystuje się następnie do obliczenia zmiany wychylenia [10], [14].

Ostatnią grupą wahadeł są wahadła odwrotne – działają jak odwrócone wahadło zwykłe. Ich punkt zaczepienia znajduje się w litej skale, poniżej fundamentu zapory. Ten rodzaj wahadła stosowany jest najczęściej do określania przemieszczenia punktów korpusu zapory lub jej fundamentu względem stabilnego podłoża. Jak wcześniej wspomniano, wyróżnia się dwa rodzaje wahadeł odwrotnych – „mokre" i „suche". W wahadle „mokrym" rura osłaniająca strunę wypełniona jest cieczą, na której unosi się pływak, w wahadle „suchym" cieczą wypełniony jest jedynie toroidalny basen, w którym zanurzony jest odpowiedni pływak. W obu przypadkach urządzenie odczytowe rejestruje położenie pływaka

określając w ten sposób przemieszczenie danego poziomu zapory względem stałego punktu zamocowania [10], [14].

W czasie wykonywania pomiarów wewnątrz zapór wodnych, istotnym parametrem jest nachylenie określonych części budowli oraz zmiany tego nachylenia. Grupa urządzeń wykorzystywanych w tego typu pomiarach nazywana jest pochyłomierzami. W zależności od przyrządu, odczyt nachylenia w danym momencie określany może być w sposób analogowy lub cyfrowy. Głównymi elementami pochyłomierza są libela rurkowa (patrz rys. 2.12. – 1) oraz śruba mikrometryczna z urządzeniem odczytowym (patrz rys. 2.12. – 2,3). W celu wykonania pomiaru, pochyłomierz umieszcza się w specjalnie wyprofilowanych tulejach osadzonych na monitorowanym elemencie. Za pomocą śruby mikrometrycznej doprowadza się libelę rurkową do górowania i dokonuje odczytu z mikrometru. Na podstawie różnicy odczytów z pomiaru w danym momencie czasu i pomiaru wyjściowego oraz wartości kątowej jednej działki mikrometru obliczana jest zmiana nachylenia badanego elementu budowli [17].



Rys. 2.12. Pochyłomierz (źródło: opracowanie własne na podstawie [14])

2.2. Opracowanie wyników pomiarów przemieszczeń

Wśród metod obliczeniowych pozwalających na określenie przemieszczeń poziomych w oparciu o sieci geodezyjne, na szczególną uwagę zasługuje metoda transformacji poszukiwawczych. Proces prowadzący do wyznaczenia najbardziej prawdopodobnych wartości przemieszczeń, można podzielić na następujące etapy:

- wyrównanie wyników pomiaru wyjściowego sieci kontrolno-pomiarowej,
- wyrównanie wyników pomiaru aktualnego sieci kontrolno-pomiarowej,
- wykonanie kolejnych transformacji przemieszczeń – transformacji poszukiwawczych,
- wykonanie transformacji ostatecznej, w wyniku której otrzymuje się ostateczne przemieszczenia wszystkich punktów sieci [17].

2.2.1. Wstępne wyrównanie sieci

Pierwszym etapem podczas opracowania wyników pochodzących z pomiaru sieci poziomych jest wyrównanie wyników pomiaru aktualnego (wyrównanie wyników pomiaru wyjściowego najczęściej wykonane było już wcześniej). Za najbardziej rozpowszechnioną w rachunku wyrównawczym metodę wyrównania można przyjąć metodę najmniejszych

kwadratów (dalej nazywaną MNK), w której estymator wektora poprawek $\hat{\mathbf{V}}$ do wielkości mierzonych $\mathbf{x}^{obs}$ musi spełniać poniższe kryterium:

$$\hat{\mathbf{V}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{V}} = \min \tag{2.1}$$

gdzie:

$\mathbf{P}$ – macierz wag.

W praktyce geodezyjnej sieci pomiarowe realizowane są za pomocą różnych struktur, w których obserwacjom, a następnie opracowaniu, podlegają wielkości, takie jak: długości, kąty pionowe, kierunki poziome, itp. Dla każdej z wymienionych wielkości zapisać można, przedstawione dalej, warunki wiążące obserwacje i wyznaczane niewiadome. Jako dwa główne sposoby realizacji MNK wymienia się metodę warunkową oraz metodę parametryczną. Metoda warunkowa oparta jest na wykorzystaniu związków geometrycznych zachodzących pomiędzy obserwacjami podlegającymi pomiarowi w danej sieci. Układ wzajemnie niezależnych równań w metodzie warunkowej można przedstawić za pomocą zależności (2.2):

$$\left.\begin{array}{l} \psi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0 \\ \psi_2(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ \psi_f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0 \end{array}\right\} \Leftrightarrow \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \tag{2.2}$$

gdzie:

n – liczba obserwacji,

f – liczba obserwacji nadliczbowych,

$\mathbf{x}$ – wektor wartości prawdziwych wielkości mierzonych [20].

Druga z metod – metoda parametryczna zakłada, że wartości prawdziwe wielkości podlegających pomiarowi są funkcją pewnych parametrów X, co można przedstawić w postaci zależność (2.3):

$$\left.\begin{array}{l} x_1 = F_1(X_1, X_2, \ldots, X_r) = F_1(\mathbf{X}) \\ x_2 = F_2(X_1, X_2, \ldots, X_r) = F_2(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ x_n = F_n(X_1, X_2, \ldots, X_r) = F_n(\mathbf{X}) \end{array}\right\} \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{X}) \tag{2.3}$$

gdzie:

r – liczba parametrów,

$\mathbf{X}$ – wektor przyjętych parametrów modelu [20].

Ze względu na wykorzystanie w dalszych rozważaniach metody parametrycznej, zostanie ona teraz szczerzej omówiona.

Zakłada się, że każdy pomiar geodezyjny obarczony jest błędem ε_i, zatem wielkość obserwowana x_i^{obs} wyrażona jest wzorem:

$$x_i^{obs} = x + \varepsilon_i \tag{2.4}$$

przy czym:

x – wartość prawdziwa

oraz

$$\varepsilon_i = -V_i \tag{2.5}$$

gdzie: $i = 1,\ldots n$.

Przekształcając zależność (2.4) otrzymamy:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^{obs} + \mathbf{V} \tag{2.6}$$

gdzie:

$\mathbf{x} = [x_1,\ldots,x_n]^T$ – wektor prawdziwych wartości mierzonych wielkości,

$\mathbf{x}^{obs} = \left[x_1{}^{obs},\ldots,x_n{}^{obs}\right]^T$ – wektor obserwacji,

$\mathbf{V}$ – wektor poprawek do wyników pomiaru.

Równanie (2.3) powinno być spełnione zarówno przez wielkości $\mathbf{x}$ i $\mathbf{X}$, jak i ich estymatory $\hat{\mathbf{x}}$ i $\hat{\mathbf{X}}$. Zatem przyjmując, że:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^{obs} + \hat{\mathbf{V}} \tag{2.7}$$

zależność (2.3) będzie miała postać $\mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right) = \mathbf{x}^{obs} + \hat{\mathbf{V}}$. Stąd model funkcjonalny określany jest następująco (2.8):

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right) - \mathbf{x}^{obs} \Leftrightarrow \begin{cases} \hat{V}_1 = F_1\left(\hat{\mathbf{X}}\right) - x_1{}^{obs} = F_1\left(\hat{X}_1, \hat{X}_2,\ldots,\hat{X}_r\right) - x_1{}^{obs} \\ \hat{V}_2 = F_2\left(\hat{\mathbf{X}}\right) - x_2{}^{obs} = F_2\left(\hat{X}_1, \hat{X}_2,\ldots,\hat{X}_r\right) - x_2{}^{obs} \\ \vdots \\ \hat{V}_n = F_n\left(\hat{\mathbf{X}}\right) - x_n{}^{obs} = F_n\left(\hat{X}_1, \hat{X}_2,\ldots,\hat{X}_r\right) - x_n{}^{obs} \end{cases} \tag{2.8}$$

Najczęściej funkcje $\mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right)$ występujące w modelu są funkcjami nieliniowymi, przez co cały model staje się także modelem nieliniowym. Nie stwarza to dużych problemów podczas wykonywania obliczeń, jednak najczęściej funkcje te sprowadzane są postaci liniowej poprzez rozwinięcie w szereg Taylora – z ograniczeniem do pierwszych wyrazów rozwinięcia. Podczas przekształcania funkcji $\mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right)$ do postaci liniowej wykorzystuje się znane przybliżone wartości parametrów, np. przybliżone współrzędne punktów wyznaczane z obliczeń na niewyrównanych obserwacjach. W otoczeniu punktu $\mathbf{X}^0$ liniowe rozwinięcie funkcji $\mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right)$ zapisywane jest zgodnie z zależnością:

$$\mathbf{F}\left(\hat{\mathbf{X}}\right) = \left.\frac{\partial \mathbf{F(X)}}{\partial \mathbf{X}}\right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^0} \hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} + \mathbf{F}\left(\mathbf{X}^0\right) \tag{2.9}$$

Podstawiając rozwinięcie do modelu (2.8) otrzymamy liniowy model funkcjonalny o postaci:

$$\hat{\mathbf{V}} = \left.\frac{\partial \mathbf{F(X)}}{\partial \mathbf{X}}\right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^0} \hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} + \mathbf{F}\left(\mathbf{X}^0\right) - \mathbf{x}^{obs} \tag{2.10}$$

co można zapisać jako:

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{A}\,\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} + \mathbf{L} \tag{2.11}$$

gdzie:

$\mathbf{A}$ – macierz współczynników,

$\mathbf{L}$ – wektor wyrazów wolnych,

$\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}}$ – estymator wektora przyrostów do przybliżonych parametrów modelu,

$\mathbf{X}^0$ – wektor przybliżonych wartości parametrów.

Dla wprowadzonego modelu funkcjonalnego w postaci (2.11) zadanie optymalizacyjne przyjmie postać:

$$\left.\begin{aligned} \hat{\mathbf{V}} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} + \mathbf{L} \\ \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{x}^{pom}} &= \hat{\sigma}_0{}^2\mathbf{P}^{-1} \\ \hat{\mathbf{V}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{V}} &= \min \end{aligned}\right\} \tag{2.12}$$

gdzie:

$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{x}^{pom}}$ – estymator macierzy kowariancji wyników pomiaru,

$\hat{\sigma}_0{}^2$ – estymator globalnego współczynnika wariancji,

$\mathbf{P} = \mathrm{Diag}\left(\frac{1}{m_1{}^2}, \frac{1}{m_2{}^2}, \ldots, \frac{1}{m_n{}^2}\right)$ – macierz wag (m_i – wartości błędów średnich pomiaru).

Estymator wektora przyrostów $\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}}$, niezbędny to wyznaczenia estymatora wektora poprawek $\hat{\mathbf{V}}$ oraz wektora wyrównanych parametrów $\hat{\mathbf{X}}$, obliczany jest zgodnie z formułą:

$$\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{L} \tag{2.12}$$

stąd:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{X}} \tag{2.13}$$

gdzie:

Podczas analiz dokładności wyników wyrównania, istotną rolę odgrywa globalny współczynnik wariancji $m_0{}^2$ $\left(m_0{}^2 = \hat{\sigma}_0{}^2\right)$ wyznaczany z zależności:

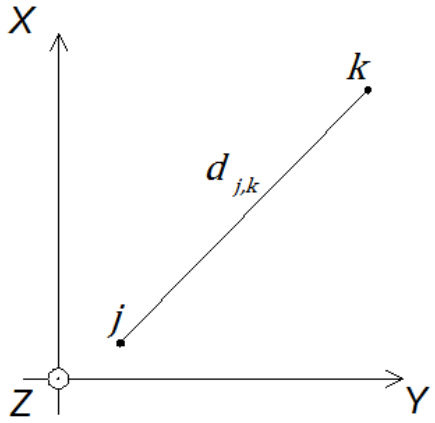
$$m_0{}^2 = \frac{\hat{\mathbf{V}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{V}}}{n-r} \tag{2.14}$$

Ocenę dokładności wykonuje się w oparciu o macierz kowariancji wyrównanych parametrów – $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{X}}}$, którą oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{X}}} = m_0{}^2\left(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\right)^{-1} \tag{2.15}$$

Do praktycznych analiz wykorzystano dane pochodzące z pomiaru zapory Czorsztyn-Niedzica. Podczas pomiarów obserwacjom podlegały długości skośne oraz kierunki poziome. Jednak ze względu na redukcje wykonane przed wyrównaniem długości skośnych, warunki wiążące obserwacje i wyznaczane niewiadome oraz liniowe równania poprawek przedstawione zostaną dla odległości poziomych zamiast skośnych.

Odległości skośne przed wyrównaniem poddane zostały trzem redukcjom – ze względu na stan atmosfery, następnie na poziom stanowiska, a na koniec wykonana została redukcja na poziom odniesienia. W efekcie pozwoliło to na uzyskanie odległości poziomych (rys. 2.13.), dla których równania obserwacyjne przedstawia zależność (2.16).



Rys. 2.13. Długość pozioma (źródło: opracowanie własne)

$$d_{j,k} = \sqrt{\left(X_k - X_j\right)^2 + \left(Y_k - Y_j\right)^2} \tag{2.16}$$

stąd liniowe równanie poprawki ma postać następującą:

$$\hat{V}_{d_{j,k}} = -\frac{X_k - X_j}{d_{k,j}}\hat{d}X_j + \frac{X_k - X_j}{d_{k,j}}\hat{d}X_k - \frac{Y_k - Y_j}{d_{k,j}}\hat{d}Y_j + \frac{Y_k - Y_j}{d_{k,j}}\hat{d}Y_k + d_{k,j} - d_{k,j}^{pom} \tag{2.17}$$

co po przekształceniach daje:

$$\hat{V}_{d_{j,k}} = -\cos\left(A_{j,k}\right)\hat{d}X_j - \sin\left(A_{j,k}\right)\hat{d}X_k + \cos\left(A_{j,k}\right)\hat{d}Y_j + \sin\left(A_{j,k}\right)\hat{d}Y_k + d_{j,k} - d_{j,k}^{pom} \tag{2.18}$$

gdzie:

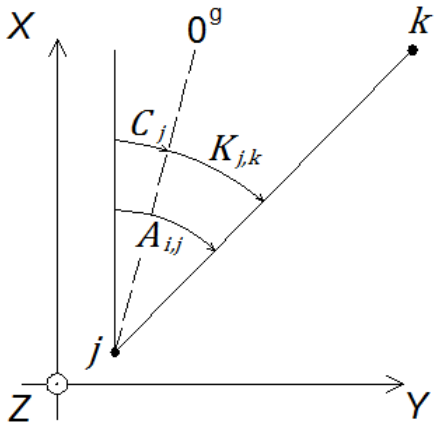
$\hat{d}X, \hat{d}Y$ – estymatory wektora przyrostów do współrzędnych przybliżonych,

$d_{j,k}$ – odległość pozioma obliczona ze współrzędnych przybliżonych,

$d_{j,k}^{obs}$ – obserwowana wartość odległości poziomej,

$A_{j,k}$ – azymut linii j, k obliczony ze współrzędnych przybliżonych [20].

Drugą z wykonywanych obserwacji jest kierunek poziomy przedstawiony na rys. 2.14., gdzie $A_{j,k}$ – azymut linii j, k, C_j – azymut zera limbusa (inaczej niewiadoma orientacyjna) oraz $K_{j,k}$ – obserwowany kierunek linii j, k.



Rys. 2.14. Kierunek (źródło: opracowanie własne)

Warunek wiążący obserwację kierunku $K_{j,k}$ oraz współrzędne punktów j i k ma postać (2.19):

$$K_{j,k} = A_{j,k} - C_j = \text{arctg}\frac{Y_k - Y_j}{X_k - X_j} - C_j \tag{2.19}$$

zatem liniowe równanie poprawki jest następujące:

$$\hat{V}_{K_{j,k}} = \frac{(Y_k - Y_j)\rho^{cc}}{d_{j,k}^2}\hat{dX}_j - \frac{(Y_k - Y_j)\rho^{cc}}{d_{j,k}^2}\hat{dX}_k - \frac{(X_k - X_j)\rho^{cc}}{d_{j,k}^2}\hat{dY}_j + \\ + \frac{(X_k - X_j)\rho^{cc}}{d_{j,k}^2}\hat{dY}_k + A_{j,k} - C_j - K_{j,k}^{obs} \tag{2.20}$$

gdzie:

$K_{j,k}^{obs}$ – obserwowana wartość kierunku poziomego.

2.2.2. Transformacje poszukiwawcze

Efektem wyrównania sieci geodezyjnej są zarówno wyrównane obserwacje, jak i wyrównane współrzędne z ich macierzami kowariancji. Korzystając z wyrównanych współrzędnych pochodzących z pomiaru wyjściowego i aktualnego, możliwe jest wyznaczenie przemieszczeń pozornych (rys. 2.15) poszczególnych punktów kontrolowanych zgodnie z zależnością (2.21):

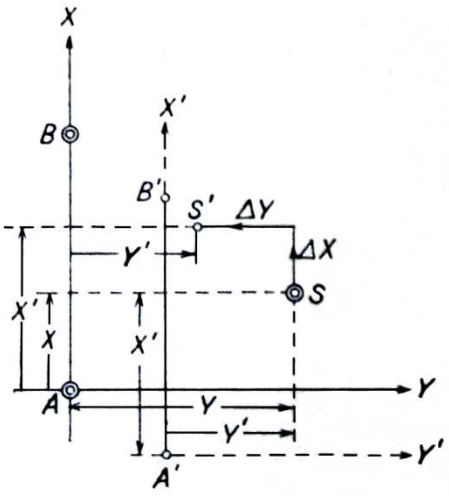
$$\Delta X = X' - X \qquad \Delta Y = Y' - Y \tag{2.21}$$

gdzie:

ΔX, ΔY – przemieszczenia pozorne punktów sieci otrzymane na podstawie różnic odpowiednich współrzędnych,

X, Y – współrzędne punktów sieci, wyrażone w układzie pierwotnym,

X', Y' – współrzędne punktów sieci, wyrażone w układzie aktualnym.



Rys. 2.15. Graficzna interpretacja przemieszczenia pozornego (źródło: opracowanie własne na podstawie [17])

Wart zaznaczenia jest fakt, że wartości przemieszczeń pozornych nie są ostatecznymi poszukiwanymi wartościami przemieszczeń poziomych punktów sieci – na przemieszczenie pozorne składa się przemieszczenie rzeczywiste punktu oraz przemieszczenie związane ze zmianą położenia punktów uznanych za stałe. Aby uzyskać poprawne wartości przemieszczeń należy wykonać transformację figury reprezentującej układ aktualny w taki sposób, aby pokryła się ona jak najlepiej z figurą reprezentującą układ odniesienia. Często w tym celu wykorzystuje się transformację 4-parametrową przez podobieństwo, w której wyznaczanymi parametrami są dwie składowe translacji, obrót oraz skala. Dopiero po wykonanym przeliczeniu możliwe jest wyznaczenie poprawnych, ostatecznych przemieszczeń punktów należących do sieci.

Przyjmuje się, że punkty dostosowania wykorzystywane do wykonania transformacji powinny być rozmieszczone równomiernie w całej sieci, która podlega pomiarowi. Najlepiej, aby znajdowały się na przekątnych monitorowanego obszaru, co pozwoli na późniejsze wyznaczenie przemieszczeń z jak najmniejszymi błędami. Nierównomierne rozmieszczenie punktów dostosowania, np. gdyby punkty te znajdowały się blisko siebie, w jednej części sieci, mogłoby spowodować wzrost błędów wyznaczonych przemieszczeń na pozostałym obszarze. Fakt ten należy uwzględniać na etapie projektowania sieci obserwacyjnej.

Podczas obliczeń wykonywanych na potrzeby mniejszej monografii posłużono się transformacjami, nazywanymi transformacjami poszukiwawczymi, zgodnie z przekształconymi wzorami J. Ryšavego. Wzory te, zaczerpnięte z publikacji [17], zamieszczono poniżej:

$$a = \frac{\sum_1^s X}{s} - \frac{\sum_1^s X'}{s} = -\frac{\sum_1^s \Delta X}{s} = -\Delta X_0 \tag{2.22}$$

$$b = \frac{\sum_1^s Y}{s} - \frac{\sum_1^s Y'}{s} = -\frac{\sum_1^s \Delta Y}{s} = -\Delta Y_0 \tag{2.23}$$

$$\alpha = \frac{\sum_1^s \left(Y_r' \Delta X_r - X_r' \Delta Y_r\right)}{\sum_1^s \left(X_r'^2 + Y_r'^2\right)} = q \cdot \sin \varepsilon \tag{2.24}$$

$$\beta = -\frac{\sum_1^s \left(Y_r' \Delta Y_r - X_r' \Delta X_{rr}\right)}{\sum_1^s \left(X_r'^2 + Y_r'^2\right)} = q \cdot \cos \varepsilon - 1 \tag{2.25}$$

gdzie:

s – liczba punktów dostosowania,

a, b – współrzędne główne (X , Y) początku układu aktualnego po sprowadzeniu jego osi do równoległości z osiami układu pierwotnego przez obrót dookoła punktu o współrzędnych $(X_0', Y_0',)$,

ε – skręt układu aktualnego, liczony od osi X układu pierwotnego,

q– zmiana skali figury utworzonej przez przyjęte punkty dostosowania,

α , β – parametry transformacji zależne od skrętu i zmiany skali,

$\Delta X_0, \Delta Y_0$ – składowe przemieszczenia pierwotnego środka ciężkości, wyznaczane z zależności:

$$\Delta X_0 = X_0' - X_0 \tag{2.26}$$

$$\Delta Y_0 = Y_0' - Y_0 \tag{2.27}$$

gdzie:

X_0', Y_0' – współrzędne środka ciężkości w układzie aktualnym, wyznaczone na podstawie współrzędnych punktów dostosowania,

X_0, Y_0 – współrzędne środka ciężkości w układzie pierwotnym, wyznaczone na podstawie współrzędnych punktów dostosowania,

X_r', Y_r' – zredukowane współrzędne punktów dostosowania wyrażone w układzie aktualnym, obliczane w oparciu o zależności:

$$X_r' = X' - X_0' \tag{2.28}$$

$$Y_r' = Y' - Y_0' \tag{2.29}$$

$\Delta X_r, \Delta Y_r$ – zredukowane składowe przemieszczeń punktów dostosowania, wyznaczane jako:

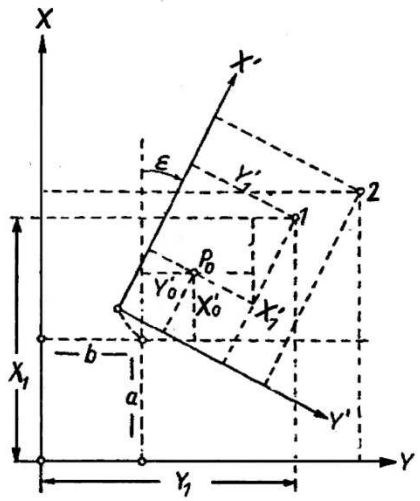
$$\Delta X_r = X_r' - X_r \tag{2.30}$$

$$\Delta Y_r = Y_r' - Y_r \tag{2.31}$$

gdzie:

X_r, Y_r – zredukowane współrzędne punktów dostosowania wyrażone w układzie pierwotnym.

Graficzne przedstawienie parametrów transformacji wg J. Ryšavego pokazano na rys. 2.16.



Rys. 2.16. Graficzna interpretacja transformacji wg J. Ryšavego (źródło: opracowanie własne na podstawie [17])

Dzięki wyznaczeniu parametrów transformacji istnieje możliwość obliczenia rzeczywistych składowych przemieszczenia dX, dY dla dowolnego punktu sieci P, który nie był włączony do grupy punktów dostosowania. W tym celu należy najpierw wykonać transformację współrzędnych z układu aktualnego do układu pierwotnego zgodnie ze wzorami (2.32) i (2.33):

$$x_P = X'_P + a - \alpha(Y'_P - Y'_0) + \beta(X'_P - X'_0) \tag{2.32}$$

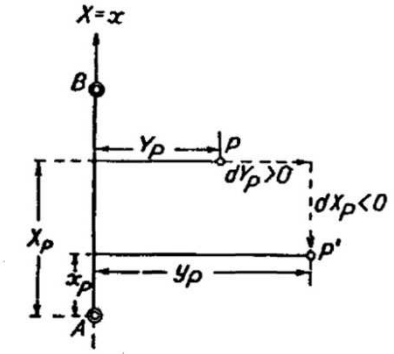
$$y_P = Y'_P + b + \alpha(X'_P - X'_0) + \beta(Y'_P - Y'_0) \tag{2.33}$$

gdzie:

x_P, y_P – współrzędne dowolnego punktu P transformowane z układu aktualnego do układu pierwotnego,

x'_P, y'_P – współrzędne dowolnego punktu P w układzie aktualnym.

Wykonanie transformacji wszystkich punktów sieci pozwala na określenie ich przemieszczeń rzeczywistych. Graficzna interpretacja wyznaczania przemieszczenia dowolnego punktu P przedstawiona została na rys. 2.17.



Rys. 2.17. Graficzna interpretacja przemieszczenia punktu P (źródło: [17])

Przemieszczenia wyznacza się jako różnicę współrzędnych aktualnych transformowanych do układu pierwotnego oraz współrzędnych pierwotnych, co pokazane jest za pomocą zależności (2.34) i (2.35):

$$dX_P = x_p - X_P \tag{2.34}$$

$$dY_P = y_p - Y_P \tag{2.35}$$

gdzie:

X_P, Y_P – współrzędne dowolnego punktu P w układzie pierwotnym.

Uzyskane dla każdego punktu składowe przemieszczenia dX, dY umożliwiają wyznaczenie całkowitego przemieszczenia poziomego d_{Hz} dowolnego punktu P, co realizowane jest zgodnie ze wzorem (2.36):

$$d_{Hz_P} = \sqrt{(dX_P)^2 + (dY_P)^2} \tag{2.36}$$

Dodatkowo obliczany jest także azymut całkowitego przemieszczenia poziomego. Jest on ważny ze względu na to, że pokazuje kierunek ruchu poszczególnych punktów sieci. Analizując kierunek i wielkość przemieszczeń wszystkich punktów sieci możliwa jest interpretacja zmian zachodzących na obszarze podlegającym pomiarowi.

Podczas wykonywania transformacji poszukiwawczych warto jest także przeprowadzić analizę dokładności wpasowania figury reprezentującej układ aktualny w figurę reprezentującą układ pierwotny. Wykonuje się to na podstawie wielkości dX, dY

wszystkich punktów dostosowania. Wzory na błędy wpasowania sieci względem osi X i Y, a także na łączny błąd wpasowania m_W przedstawiono poniżej:

$$m_X = \sqrt{\frac{\sum_1^s \left(dX^2\right)}{s}} \tag{2.36}$$

$$m_Y = \sqrt{\frac{\sum_1^s \left(dY^2\right)}{s}} \tag{2.37}$$

$$m_W = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2} \tag{2.38}$$

W przypadku idealnego wpasowania punktów dostosowania, wartości obliczone z powyższych wzorów powinny wynosić zero. Jest to jednak sytuacja niemożliwa ze względu na występowanie błędów pomiarowych, a także ze względu na niewielkie przemieszczenia punktów dostosowania o wielkości na granicy wspomnianych błędów pomiarowych [17].

3. Zapora Czorsztyn-Niedzica

Obiektem, dla którego wykonano testy praktyczne jest zapora ziemna Czorsztyn-Niedzica wchodząca w skład zapór administrowanych przez Zespół Elektrowni Wodnych Niedzica S.A. z siedzibą w Niedzicy.

3.1. Lokalizacja

Obiekt ten położony jest w południowej części Polski, bezpośrednio przy granicy państwa z Republiką Słowacji, która jest oddalona o około 3 km (patrz rys. 3.1.). Zapora leży w południowej części województwa małopolskiego, w powiecie nowotarskim, na granicy gmin Łapsze Niżne i Czorsztyn. Pod względem hydrograficznym zlokalizowana jest w dorzeczu górnej Wisły, na rzece Dunajec, w górnej części zlewni tej rzeki [32].

Rys. 3.1. Umiejscowienie zapory na tle sieci rzecznej Polski (źródło: opracowanie własne na podstawie [41])

Lokalizacja ta została wybrana spośród trzech wariantów (pozostałe dwa leżały w niższym biegu rzeki) jako optymalne umiejscowienie w systemie rzecznym. Warto wspomnieć, że obszar, z którego wody spływają do Dunajca, jest kluczowy dla całego dorzecza górnej Wisły, zajmuje bowiem 34% jego powierzchni liczonej od połączenia obu rzek w górę. Należy także zaznaczyć, że Dunajec w jego górnym biegu charakteryzuje znacząca zmienność przepływów, czego wyrazem jest powszechnie przyjęty przydomek "harnaś polskich rzek". Dowodem tego może być stosunek skrajnych przepływów obserwowanych w wieloleciu dla tego cieku, który wynosi ponad 1000. Powyżej przekroju Czorsztyn-Niedzica znajduje się około 16% powierzchni całego obszaru zlewni, jednak rzeka do tego miejsca zbiera aż 25% gromadzącej się w tej zlewni wody, zatem zapora ma ogromne znaczenie dla retencji i ochrony przeciwpowodziowej. Ponadto analizy przeprowadzone dla wielolecia 1951-2003 wykazały słabą, jednakże wzrostową tendencję dla wysokich przepływów Dunajca, które określa wartość kwantyla 5% przepływów dobowych w danym roku. Dodatnia wartość omawianej zmiany wyniosła dla wodowskazu w Nowym Targu

Kowańcu 0.91 $m^3/(s \cdot rok)$. Wodowskaz ten jest położony bezpośrednio poniżej połączenia Czarnego i Białego Dunajca, około 22 km powyżej zapory Czorsztyn-Niedzica [29], [32].

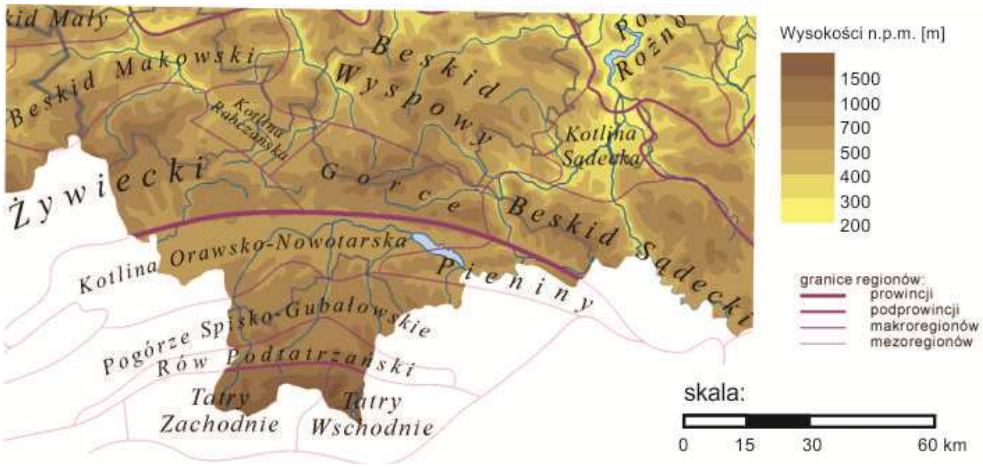
Znaczącą rolę w kształtowaniu gospodarki wodnej na rozpatrywanym obszarze ma także ochrona dolin rzecznych przed katastrofalnymi wezbraniami. Oddanie do użytku opisywanej zapory miało wpływ na redukcję zagrożenia powodziowego powodowanego przez rzekę, która stanowi jeden z obfitszych zasobów wodnych dorzecza Wisły (aż 20%). Najbardziej znaczącym przykładem działania przeciwpowodziowego obiektu jest redukcja fali wezbraniowej z 9 lipca 1997 roku, kiedy przepływ przez przekrój zapory został zredukowany z 1450 m^3/s do około 600 m^3/s (patrz rys. 3.2.) [32].

Rys. 3.2. Charakterystyka przepływów Dunajca dla Zbiornika Czorsztyńskiego i Sromowieckiego w dniach 7–12 lipca 1997 roku (źródło: [32])

Niebywałym okazał się fakt oficjalnego oddania do użytku zapory w dniu fali opadów nienotowanych od 1934 roku, których skutki określane są mianem "powodzi stulecia". Było to okazją do generalnego testu obiektu w warunkach przepływu wody dla stanów ekstremalnych, który, co warto podkreślić, obiekt pomyślnie przeszedł. Niestety, ze względu na niekompletną infrastrukturę pomiarową na budowli, nie są znane dokładne dane dotyczące przemieszczenia elementów składowych, jak i samej zapory w tamtym czasie, co byłoby uzupełnieniem wiedzy o obiekcie [32].

Pod względem fizycznogeograficznym zapora wraz ze spiętrzonym zbiornikiem wodnym znajduje się w dwóch mezoregionach (patrz rys. 3.3.), których klasyfikacja podawana jest w układzie dziesiętnym (oznaczenia podano w nawiasach). Część południowa obszaru zajmowanego przez omawiany obiekt znajduje się w północno-zachodniej części Regionu Karpackiego (5), w południowej części prowincji Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym (51), na północnym skraju podprowincji Centralne Karpaty Zachodnie (514), na północno-wschodnim krańcu makroregionu Obniżenie Orawsko-Nowotarskie (514.1), we wschodniej części mezoregionu Kotlina Orawsko-Nowotarska (514.11). Część północna obszaru zespołu zapory i zbiornika znajduje się w tym samym makroregionie, jednak zlokalizowana jest w zachodniej części mezoregionu Pieniny (514.12). Cześć zachodnia północnych brzegów Zbiornika Czorsztyńskiego graniczy także

z mezoregionem Gorce (513.52) wychodzącym w skład makroregionu Beskidy Zachodnie (513.5) [16].



Rys. 3.3. Lokalizacja zapory na tle regionów fizycznogeograficznych Polski (źródło: opracowanie własne na podstawie [38])

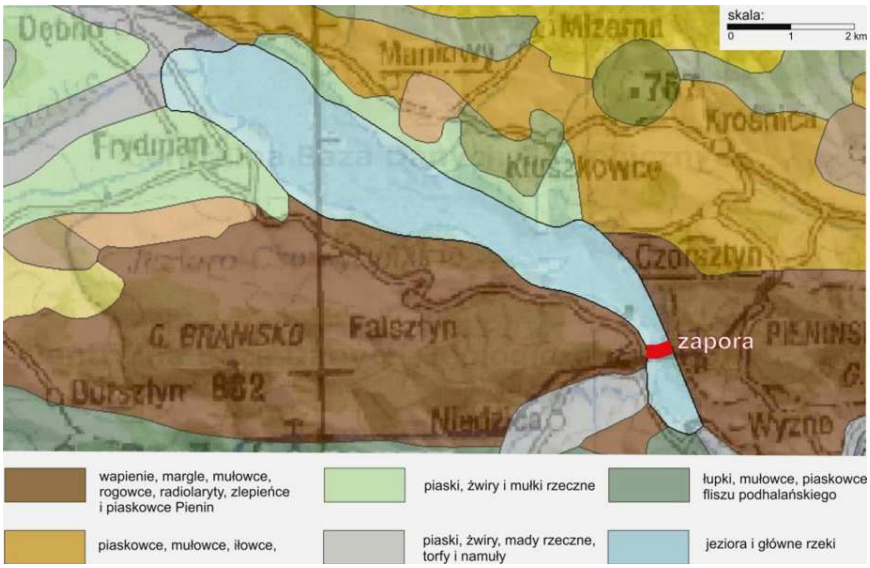
3.2. Budowa geologiczna podłoża i tektonika

Opisana lokalizacja wiąże się z posadowieniem analizowanej zapory na podłożu skalnym o określonej budowie geologicznej. W skali podprowincji budowla położona jest na granicy regionów o odmiennej budowie geologicznej.

Teren na północ od zapory zbudowany jest głównie z form piaskowcowych, zlepieńcowych, marglowych i łupków. Mieszanina charakterystycznych form skalnych dla tego regionu nazywana jest fliszem karpackim. Formowały się one od późnej kredy do końca paleogenu (oligocen). Następnie formacja ta zaczęła podlegać licznym orogenezom w kierunku północnym. Ruchy fałdowe doprowadziły do powstania spękań wielkoobszarowych osadów dna morskiego (skały osadowe), które uformowały pakiety skalne o znaczących rozmiarach ukształtowane w płaszczowiny, spośród których należy wymienić płaszczowinę magurską. Kolejnymi ruchami były wypiętrzenia, które doprowadziły do wykształcenia morfologii terenu. Ruchy te określane mianem neotektonicznych, miały miejsce głównie na styku form wielkoobszarowych [13], [21].

Na południu i wschodzie dominuje formacja określana jako Pieniński Pas Skałkowy. Powstała ona wskutek kompresji niecki, w której następowała sedymentacja materiałów transportowanych z południa, głównie fliszu podhalańskiego. Eocen na tym obszarze charakteryzował się wypełnianiem niecki, która w neogenie zaczęła podlegać orogenezie. Datowanie formacji pienińskich sprowadza się do wskazania mezozoiku (trias i kreda) i paleogenu jako głównych okresów przynależności stratygraficznej formacji skalnych. Obszar Pienińskiego Pasa Skałkowego podlegał ruchom ściskającym (o kierunku południkowym), które uformowały jednostkę z izolowanymi wzniesieniami w kształcie stożków. Powstałe w ten sposób doliny są kręte, o stromych stokach z licznym podcięciami. Należy jednak podkreślić, że utwory tworzące Pieniński Pas Skałkowy wykazują intensywne pofałdowanie, powstanie złuskowaceń i brekcji, które uniemożliwiają jednoznaczne rozpoznanie geologii tego terenu [13].

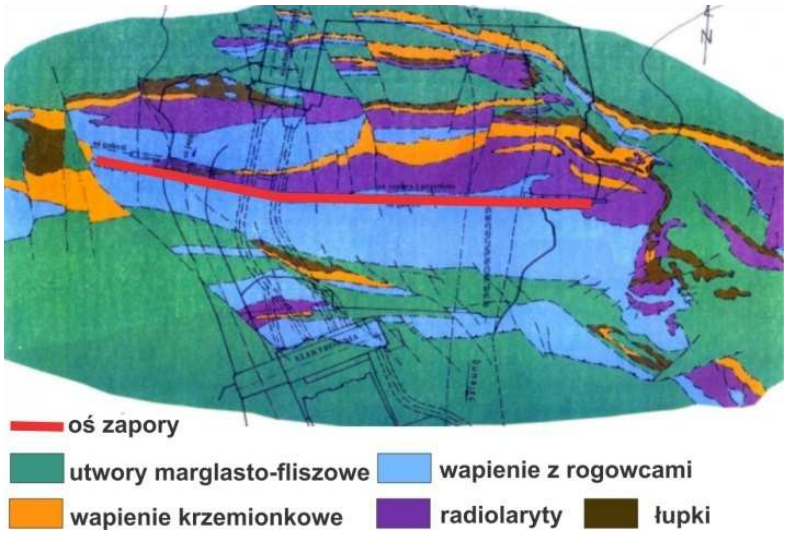
Formacje powierzchniowe w skali lokalnej różnią się od budowy ogólnej poprzez wydzielenie mniejszych form zwanych jednostkami lub seriami, które są samodzielne tektonicznie. Seriami występującymi na analizowanym obszarze są, powstałe w rejonie Pienińskiego Pasa Skałkowego, seria braniska, niedzicka i czorsztyńska. Formacjami na północ od tych serii, różniącymi się zasadniczo, są jednostka Grajcarka, zapadliska wypełnione osadami jeziora z neogenu i plejstocenu oraz płaszczowina magurska z pęknięciami i intruzjami andezytowymi. Seriom tym odpowiada podział zamieszczony na rys. 3.4. [13].



Rys. 3.4. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych (źródło: opracowanie własne na podstawie [23])

Podział ten wskazuje na dominację skał wapiennych w seriach braniskiej, niedzickiej oraz czorsztyńskiej. Jednostka niedzicka posiada także łupki, mułowce oraz wyższą zawartość piaskowców fliszu podhalańskiego. W przypadku jednostki Grajcarka oraz zapadliska wypełnionego osadami jeziora z neogenu i plejstocenu, materiałem charakterystycznym są piaski, żwiry i muły rzeczne różniące się okresem przetransportowania i uformowania. Płaszczowina magurska charakteryzuje się przewagą piaskowców, mułowców i iłowców, które tworzą wspomniany flisz karpacki.

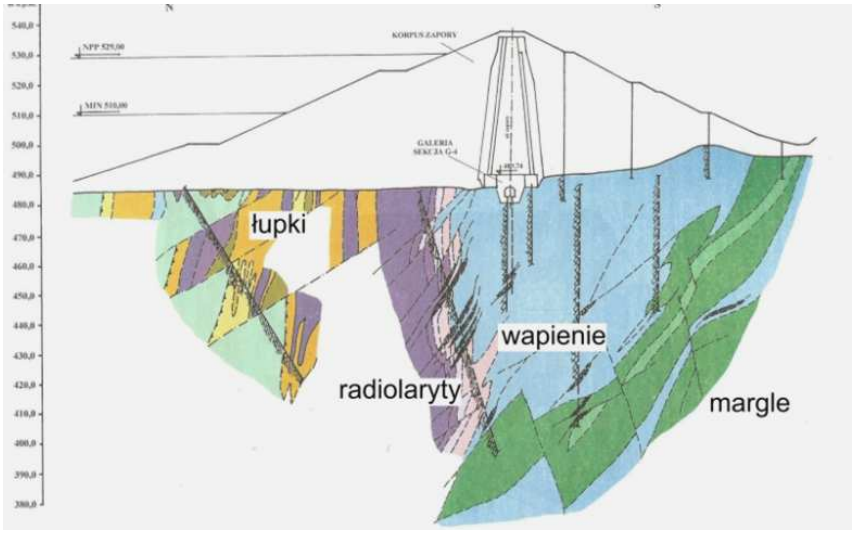
Dokładniejsze badania rejonu projektowanej wtedy zapory przeprowadzono w latach 1968-1969, w których skupiono się na właściwościach mechanicznych podłoża skalnego i stref styku. Owocem tych prac jest mapa geologiczna strukturalna rejonu osi zapory czołowej w Niedzicy stworzona przez Zakład Nauk Geologicznych PAN. Badania te przeprowadzono metodą "in situ" (tj. wiercenia, wykopy, szybiki oraz pomiary geofizyczne i specjalistyczne) oraz laboratoryjną. Szczególnemu uwzględnieniu w badaniach terenu pod zachodni przyczółek zapory podlegał wpływ stoku na stateczność i przepuszczalność zapory. W miejscu tym wyszczególniono radiolaryty czerwone oraz strefę łączenia się wapieni krzemionkowych z łupkami i marglami, która stwarzała możliwość przemieszczeń ze względu na swe właściwości (patrz rys. 3.5.) [13].



Rys. 3.5. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych na mapie geologicznej strukturalnej rejonu osi zapory czołowej w Niedzicy (źródło: opracowanie własne na podstawie [13])

Zatem ze względu na budowę geologiczną newralgicznym miejscem jest zachodni przyczółek zapory, który przy niekorzystnych warunkach może podlegać przemieszczeniom spowodowanym obecnością łupków w podłożu. Oczywiście taki scenariusz uwzględniono podczas budowy poprzez modelowanie zachowania się masywu skalnego. W czasie prac geologiczno-inżynierskich, polegających głównie na przemieszczaniu wierzchnich warstw skalnych oraz budowie danych elementów strukturalnych, poszerzono litologiczno-stratygraficzne rozpoznanie posadowienia zapory. Na podstawie tych badań potwierdziły się wcześniejsze modele zakładające pasmowe (w poprzek doliny) rozmieszczenie utworów z przegrodzeniem pasm twardych (wapieni i radiolarytów) pasmami skał miękkich (łupki i margle). Ponadto stwierdzono pionowe i strome zapadnie warstw skalnych w kierunku północnym, co jest związane z dyslokacjami i nieciągłościami tektonicznymi. Poszczególne ławice są także spękane i zbrekcjonowane (głównie wapienie), a dla utworów marglasto-łupkowych charakterystyczne są wrzecionowate nieciągłości [13].

Poza tym, wyszczególniono płytkie posadowienie skał wapiennych w rejonie wlotów do sztolni na zachodnim brzegu, dyslokację przecinającą skośnie przelew stokowy i skierowaną do fundamentu zapory oraz skałę z dyslokacją od dołu przy północnej ścianie fundamentu elektrowni, kontaktującą się ze skałami marglasto-łupkowymi. W rejonie wież zamknięć zlokalizowano istnienie uskoków o stromych płaszczyznach zapadania (przemieszczenia warstw) i lokalne nieciągłości. Jako przykład, na rys. 3.6. przedstawiono profil zlokalizowany na 50. metrze zapory obrazujący liczne brekcje, spękania i uskoki o stromych nachyleniach skierowanych ku północy lub pionowo [13].



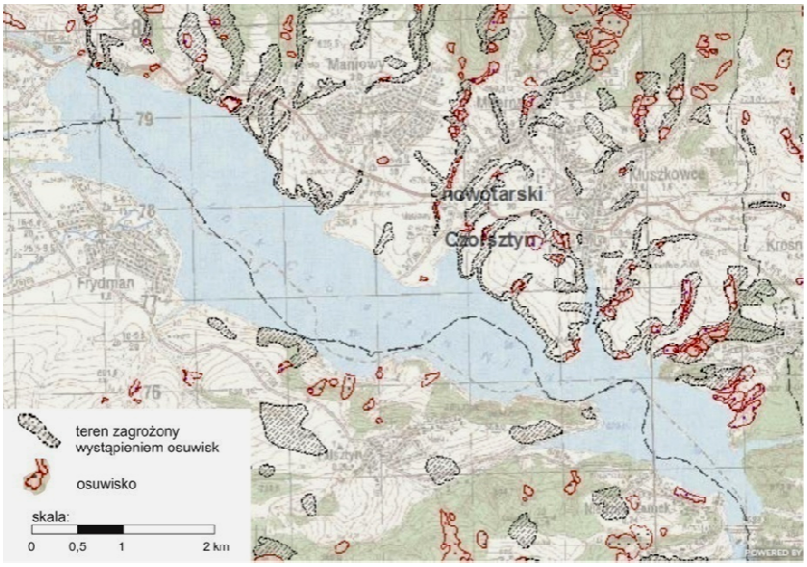
Rys. 3.6. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych w przekroju poprzecznym (źródło: opracowanie własne na podstawie [13])

Uzupełnieniem badań geologicznych było wyznaczenie właściwości mechanicznych masywu skalnego zlokalizowanego w podłożu zapory i jej otoczeniu. Przy skomplikowanych uwarunkowaniach i pofragmentowaniu zadanie wiązało się z wykorzystaniem badań sejsmicznych dla określenia wytrzymałości materiału na ściskanie, ścinanie czy zmienności modułów statycznych i dynamicznych ze zmianą głębokości. Największe naprężenia skał stwierdzono w rejonach występowania formacji wapiennych. W domenie podatności na ścinanie najmniejszą odpornością charakteryzują się łupki i iły (spójność na poziomie 0.5 kg/cm^3), najodporniejsze są natomiast wapienie. Charakterystykę tę potwierdzają także badania modułów sprężystości dynamicznych i statycznych. Dane te wskazują na podatność podłoża na przemieszczenia spowodowane ruchami wierzchnich warstw [13].

Według badaczy obszar, na którym zlokalizowana jest zapora podlega okresowym trzęsieniom ziemi o magnitudzie 4÷6 w skali Richtera [21]. Ostatni tak mocny ruch, o sile około 4.7 w skali Richtera i epicentrum 35 km od zapory, miał miejsce 30.11.2004 roku. Niestety stacja sejsmograficzna Instytutu Geofizyki PAN zlokalizowana za wzgórzem zamkowym w Niedzicy nie zarejestrowała prawidłowo odczytów. Nieco słabsze zjawisko wstrząsowe miało miejsce 01.03.2013 roku [24], [26].

Opisywane wstrząsy towarzyszą ruchom górotwórczym i są ważnym czynnikiem uaktywniającym ruchy masowe. W przypadku wystąpienia dodatkowych sprzyjających warunków, jakimi są nachylenie stoków i zawilgotnienie, ruchy masowe uruchamiają się mogąc powodować zagrożenie dla zapory, jeżeli ich skala będzie odpowiednio duża lub będą wpływać jedynie na lokalne przemieszczenia. Badania prowadzone przez Państwowy Instytut Geologiczny wskazują na istnienie 12 zsuwów na północnych brzegach Jeziora Czorsztyńskiego, które zajmują łączną powierzchnię 11.99 ha, 3 spełzań o powierzchni 1.83 ha oraz 9 terenów zagrożonych ruchami masowymi. Największy zdiagnozowany zsuw ma powierzchnię 4.68 ha i znajduje się na północ od zapory w rejonie Nadzamcza w Czorsztynie. Wśród głównych przyczyn powstania tych zagrożeń wymienia się budowę geologiczną podłoża (głównie kontakt piaskowców z łupkami oraz iły, gliny i flisz), opady atmosferyczne, erozję rzeczną, sejsmikę oraz abrazję (podcinanie zboczy zbiornika

przez wodę). Ostatniemu z wymienionych zjawisk przypisuje się powstanie 6 zsuwów w bezpośrednim kontakcie z brzegami jeziora. Ponadto osuwiska wykazują się zagrożeniem dla infrastruktury (drogowej i komunalnej) oraz mogą być przyczyną przemieszczeń punktów osnowy zastabilizowanych w miejscach wykazujących się ruchami masowymi [22].



Rys. 3.7. Lokalizacja osuwisk i terenów zagrożonych zsuwaniem w rejonie Jeziora Czorsztyńskiego (źródło: opracowanie własne na podstawie [23])

Jak wynika z przedstawionych analiz, posadowienie budowli hydrotechnicznej piętrzącej wodę w znacznym stopniu uzależnione jest od geologii, stratygrafii, tektoniki, sejsmiki i ruchów masowych. Należy także pamiętać, że w takich warunkach należy zwrócić szczególną uwagę na pojawiające się przypuszczenia o niestabilności podłoża, których przyczyną mogą być wymienione procesy, a które w efekcie mogą prowadzić do zmian geometrii sieci pomiarowych oraz niestabilności poszczególnych punktów pomiarowych [9].

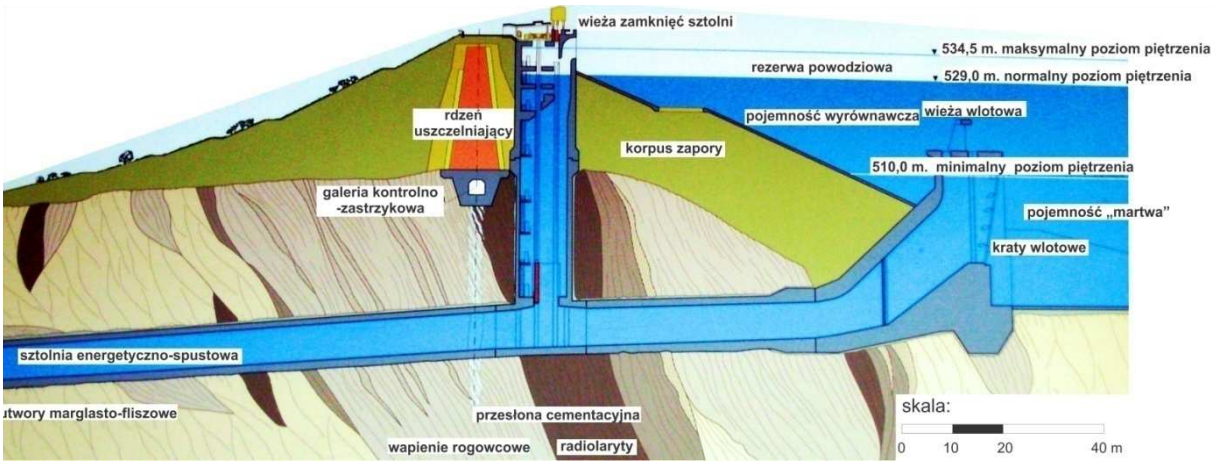
3.3. Budowa i struktura zapory

Wspomniane we wcześniejszych podrozdziałach aspekty stały się czynnikami determinującymi podstawowe parametry powstałej zapory, które zamieszczono w tabeli 3.1. Ze względu na istnienie licznych uskoków tektonicznych i występującą w regionie aktywność sejsmiczną zdecydowano się na wybór zapory ziemnej (zgodnie z podziałem przedstawionym w podrozdziale 1.1.2.), która jest mniej wrażliwa na tego typu zjawiska. Wysokość maksymalna korpusu zapory wynosi 56 m, co pozwala ją zakwalifikować jako *large dam* (zgodnie z międzynarodowymi standardami zawartymi w podrozdziale 1.1.). Rozciąga się na długości 404 m w poprzek doliny Dunajca w kierunku wschód-zachód z nieznaczną zmianą kierunku po stronie zachodniej (w miejscu występowania sztolni spustowych) z wypukłością skierowaną na południe, czyli w stronę wody dolnej. Strona północna (odwodna) zabezpieczona jest betonowymi płytami, natomiast skarpy południowe (odpowietrzne) pokryte są gruntem z roślinnością [32].

Tabela 3.1. Parametry techniczne zapory ziemnej Czorsztyn-Niedzica (źródło: [32])

Długość	404 m
Wysokość maksymalna (od chodnika galerii)	56 m
Szerokość korony	7 m
Wydatek przelewu stokowego	975 m^3 wody /s
Wydatek spustów dennych (2-spusty)	360 m^3 wody /s
Wydatek turbin (2-turbiny)	250 m^3 wody /s
Nachylenie skarpy odwodnej do poziomu 20 m	1 : 3.5
Nachylenie skarpy odwodnej powyżej poziomu 20 m	1 : 2.25
Nachylenie skarpy odpowietrznej	zmienne od 1 : 2.5 do 1 : 1.85
Ubezpieczenie skarpy odwodnej	płyty betonowe o grubości 0.3 m
Ubezpieczenie skarpy odpowietrznej	zazielenienie z instalacją do zraszania ziemi
Drenaż zapory	rurowy ϕ100 cm ze studniami kontrolnymi
Galeria kontrolno-zastrzykowa – długość	256.2 m
Galeria kontrolno-zastrzykowa – światło chodnika	3 na 3 m

Woda spiętrzona przez zaporę gromadzona jest w Jeziorze Czorsztyńskim (zbiornik północny z naturalnymi dopływami), którego pojemność całkowita wynosi 231.9 mln m^3, a powierzchnia waha się od 378 ha (minimalna), poprzez 1051 ha (normalna) do maksymalnie 1226 ha (przy poziomie piętrzenia powodziowego do 534.5 m n.p.m.). Elementem integralnym zapory jest elektrownia szczytowo-pompowa, która wykorzystuje zgromadzoną wodę w celu produkcji energii elektrycznej przez dwa, zainstalowane wewnątrz korpusu, turbozespoły. Ich moc może osiągać ponad 46 MW dla każdego, natomiast generowane napięcie jest na poziomie ponad 15 kV. Należy dodać, że elektrownia prowadzi także przepompowywanie wody ze zbiornika dolnego do górnego w czasie mniejszego zapotrzebowania na energię, co prowadzi do zmniejszenia strat energetycznych i stabilizacji napięcia w sieci. Jednak najważniejszym z czynników wpływających na monitoring stateczności zapory jest fakt generowania wstrząsów przez obracające się synchronicznie z prędkością 166.7 obr./min turbozespoły, których drgania uniemożliwiają przeprowadzanie większości pomiarów w galerii kontrolno-zastrzykowej podczas ich pracy. Podstawowym elementem struktury zapory jest niewidoczna przesłona przeciwfiltracyjna, uszczelniająca podłoże, ciągnąca się na długości około 500 m. Sięga ona na głębokość 50 m, a powstała przez iniekcje mleka cementowego przez dwa rzędy otworów, rozstawionych w galerii kontrolno-pomiarowej w siatce 1.5 m na 2 m. Ze względu na swą genezę nazywana jest także przesłoną cementacyjną, gdyż ma na celu dodatkowe uszczelnienie konstrukcji i stabilizację podłoża (patrz rys. 3.8.). Znajduje się bezpośrednio pod galerią kontrolno-zastrzykową oraz pod powierzchnią płyt betonowych na przyczółkach [13], [32].



Rys. 3.8. Profil poprzeczny przez zaporę w Niedzicy z uwzględnieniem elementów strukturalnych (źródło: opracowanie własne na podstawie niepublikowanych materiałów ZEW Niedzica S.A.)

Oprócz elektrowni zlokalizowanej przy zakończeniu dwóch sztolni energetyczno-spustowych, zapora posiada także inne elementy hydrotechniczne. Po zachodniej stronie, do przyczółka przylega przelew stokowy, który przy maksymalnym poziomie piętrzenia odprowadza nadmiar wody do zbiornika dolnego (Sromowieckiego). Woda podczas takiego przelewu przepływa po jazie zlokalizowanym na poziomie 534.5 m n.p.m. dostając się na bystrze przelewu stokowego i dalej na odskocznie, kierujące strumień wody na bezpieczną dla fundamentów konstrukcji odległość. Na wschód od przelewu na poziomie dna zbiornika górnego znajduje się system wlotowy (wieża i kraty wlotowe) do dwóch sztolni energetyczno-spustowych o przekroju 6 m każda. Przepływ w nich regulują wieże zamknięć sztolni, które są betonowymi blokami o wysokości ponad 50 m, zlokalizowanymi w rejonie osi zapory. Woda ze sztolni dostaje się do elektrowni (na turbiny), a dalej do zbiornika dolnego, gdzie odpływ jest oddzielony od odskoczni filarem działowym. Jak już wspomniano, wewnątrz zapory w rejonie jej osi zlokalizowana jest galeria kontrolno-zastrzykowa (cementacyjna) położona pod rdzeniem, łącząca się po zachodniej stronie z galerią jazu, natomiast w środkowej części z galerią pod stokiem odpowietrznym (pod kątem prostym) oraz na wschodnim krańcu z szybem pionowym. Elementem centralnym korpusu zapory (w osi zapory) na całej długości jest rdzeń wykonany z zagęszczonej gliny, który nie przepuszcza wsiąkającej wody. Rdzeń uszczelniający od strony odwodnej okala korpus statyczny zapory zbudowany z lokalnych odpowiednio zagęszczonych materiałów żwirowych [32].

3.4. Aparatura kontrolno-pomiarowa

Wśród wymienionych elementów strukturalnych najważniejszą rolę w badaniu stałości zapory pełni galeria kontrolno-zastrzykowa. Rozciągając się na całej długości zapory oraz tworząc system korytarzy połączonych z zewnętrzną siecią pomiarową pozwala stworzyć jednolity obraz przemieszczeń budowli.

We fragmencie przebiegającym wzdłuż osi zapory i w poprzek rozlokowanych jest kilkaset reperów i punktów pośrednich (po obu stronach galerii na wysokości około 0.2 m nad posadzką, jak również w posadzce), które służą do pomiarów związanych z przemieszczeniami pionowymi (patrz podrozdział 2.1.1.). Podczas pomiarów realizowanych

za pomocą niwelacji precyzyjnej, przede wszystkim w szybie pionowym (ponad 40 m wysokości) na wschodnim przyczółku i stromym fragmencie galerii przebiegającym (we wschodniej części) do połączenia się z galerią jazu, wyznaczane są wychylenia pionowe i nachylenia. Pomiary te są prowadzone z częstotliwością dopasowaną do potrzeb zlecającego, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa (patrz rozdział 2.). Pomiary osiadań realizowane są w głównej mierze w oparciu o punkty rozmieszczone poza galerią – na zboczach doliny poza stokami zapory. Pomimo nawiązania na zewnątrz budowli najbardziej kluczowymi wynikami są te uzyskane dla reperów stabilizowanych na ścianach galerii, gdyż potencjalny ruch elementów betonowych w najlepszym stopniu oddaje niestabilność korpusu zapory. Ruchy te określają także szczelinomierze – w tym przypadku jest to 10 stanowisk przygotowanych dla szczelinomierzy nasadkowych. Są one zamontowane w miejscach dylatacji pomiędzy poszczególnymi blokami galerii. Prowadzony jest także pomiar wychyleń przy użyciu inklinometru, jednak dane te są tylko uzupełnieniem wcześniej opisanych pomiarów niwelacyjnych. We wspomnianej galerii prowadzone są też pomiary ciśnienia formacji skalnych znajdujących się pod jej posadzką (w celu sprawdzenia naprężeń i pojawiania się nieszczelności w przesłonie cementacyjnej). Ciśnieniomierze rozmieszczone są co kilka metrów wzdłuż całej galerii (także w galerii jazu), przy nieco większym rozstawie na schodach w części zachodniej. Wewnątrz zapory prowadzony jest także pomiar sejsmiczny wstrząsów – rejestrator krótkookresowy typu SM-3 umieszczony jest u nasady szybu pionowego przy wschodnim przyczółku. Obsługiwany jest on przez Instytut Geofizyki PAN jako punkt pomocniczy dla pobliskiej stacji sejsmologicznej w Niedzicy. Ponadto elektrownia dysponuje systemem monitorującym parametry hydrotechniczne zbiornika, które także w pośredni sposób wpływają na przemieszczenia zapory.

Na zewnątrz, na stokach zapory zlokalizowane są nie tylko repery, ale także piezometry otwarte (patrz rozdział 2.), które służą do sprawdzania ciśnień filtracyjnych i diagnozowania potencjalnych przesiąknięć przez rdzeń. Ponadto korona zapory i wszystkie brzegi monitorowane są za pomocą wspomnianej niwelacji precyzyjnej – badane punkty rozlokowane są wzdłuż nich (zarówno dla Jeziora Czorsztyńskiego, jak i Sromowieckiego). Pomiary przemieszczeń poziomych realizowane są za pomocą wyznaczania stałej prostej (patrz rozdział 2.1.1.) wzdłuż południowego brzegu Jeziora Sromowieckiego na długości ponad 1000 m. Wszystkie wspomniane pomiary realizowane są zgodnie z obowiązującymi normami i pod stałym nadzorem zleceniodawcy, który w przypadku pojawiania się niepokojących danych może zarządzić częstszy pomiar [3].

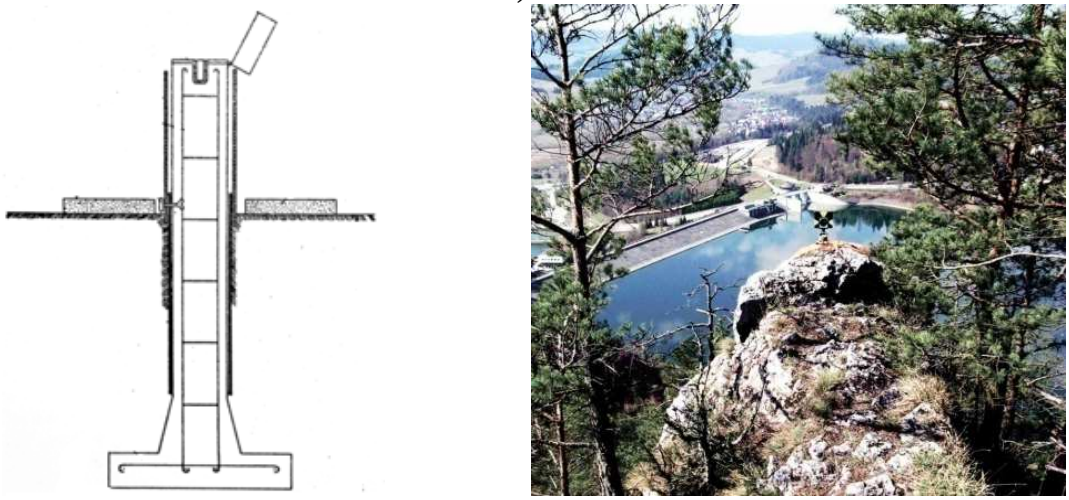
3.5. Osnowa geodezyjna i metodyka jej pomiaru

Monitoring przemieszczeń punktów osnowy zapory czorsztyńskiej rozpoczęty został w roku 1997, gdy zakończono jej budowę i prowadzony jest w rocznych odstępach czasu.

Główną składową wyznaczenia przemieszczeń poziomych stanowi pomiar sieci kątowo-liniowej zastabilizowanej na koronie zapory (jako głównym obiekcie podlegającym pomiarowi), na wszystkich możliwych elementach strukturalnych zapory dostępnych z powierzchni terenu, a także w bezpośrednim jej sąsiedztwie (wszystkie brzegi wokół jezior). Koncepcja pomiaru opiera się na sieci pełnej (patrz podrozdział 2.1.1.1.) wyznaczanej

z maksymalną liczbą obserwacji możliwych do zarejestrowania w oparciu o dostępny sprzęt pomiarowy i w określonych warunkach terenowych. Punkty sieci zostały zastabilizowane za pomocą słupów posadowionych poniżej głębokości przemarzania gruntu zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.9.a. Jednak w istniejącej sieci pojawiły się wyjątki spowodowane trudnymi warunkami terenowymi (stabilizacja w skale bez filara): na punkcie nr 14 (rys. 3.9. b) i na punkcie nr 23.

a) b)

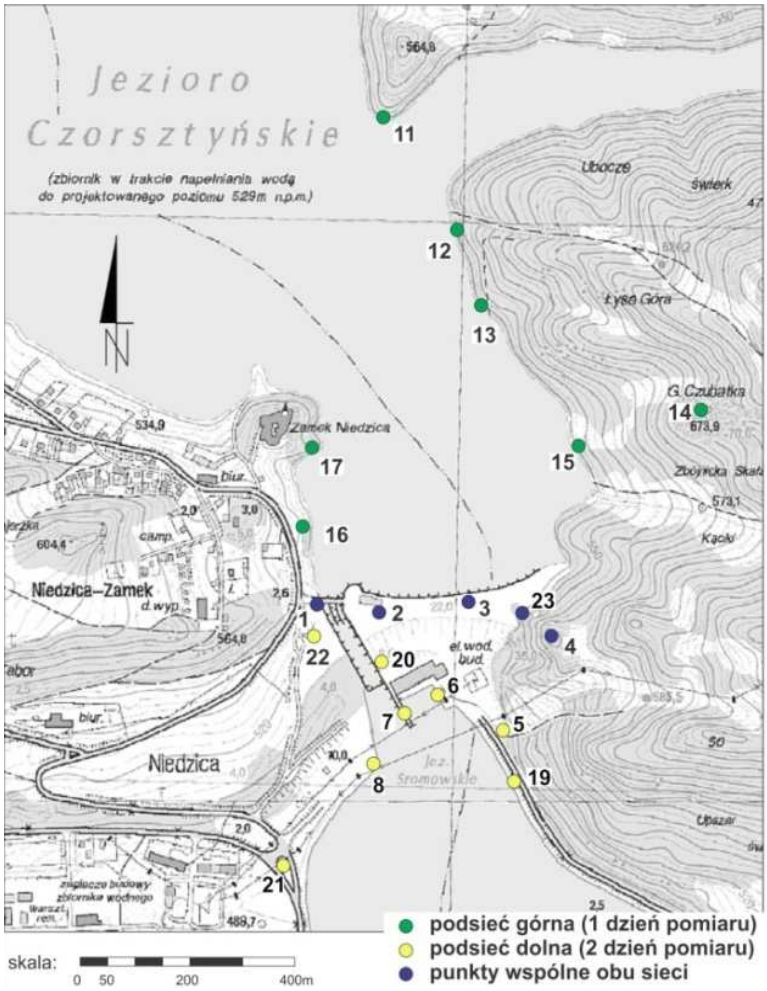


Rys. 3.9. a) Schemat stabilizacji punktów sieci, b) sposób stabilizacji dla punktu nr 14 (po prawej) (źródło: [18] oraz własne)

Na górnej części wszystkich słupów pomiarowych znajdują się metalowe płytki z zamontowanymi tulejami do jednoznacznego (wymuszonego) centrowania spodarek, które posiadają specjalnie dopasowane do tego celu śruby zakończone kulistymi głowicami. Płyty te są chronione przed wpływem warunków atmosferycznych specjalnie wykonanymi pokrywami. Rozlokowanie punktów w sieci z podziałem na dany dzień pomiarowy (podsieci) przedstawia rys. 3.10. Wynika z niego, że punkty nr 11, 12, 13 oraz 15 są położone w bliskim sąsiedztwie północnego brzegu Jeziora Czorsztyńskiego. Punkty nr 16 i 17 położone są na zachodnim brzegu jeziora, przy czym filar drugiego z nich umiejscowiony jest na wapiennej skale. Odmienną lokalizację posiada wspomniany punkt nr 14 umiejscowiony na zachodniej skale szczytu Czubatka położonego ponad 140 m nad punktami na koronie zapory (1, 2, 3). Wspomniane punkty na koronie oraz punkty nr 23 oraz 4 (punkt 4 znajduje się 55 m ponad koroną zapory), położone na wapiennych wychodniach skalnych, stanowią połączenie dwóch podsieci. Punkty nr 20 i 22 położone są na skarpie południowej, usypanej podczas formowania zboczy opisywanej zapory. U podnóża skarpy na południowym krańcu płyty kończącej elektrownię zlokalizowane są punkty nr 6 oraz 7 (punkt 7 znajduje się na filarze działowym przelewu stokowego i odpływu elektrowni). Punkty nr 5 i 19 znajdują się na wschodnim brzegu Jeziora Sromowieckiego – punkt nr 5 leży u podnóża stoków wapiennych formacji Pienin. Punkty na południowo-zachodnim krańcu sieci to punkty nr 8 i 21 odpowiednio umiejscowione na nasypie tuż przy brzegu Jeziora Sromowieckiego i

w środku przebudowanego skrzyżowania dróg powiatowych 1642K oraz 1640K, zatem ich lokalizacja jest niekorzystna.

Pomiar sieci podzielony jest na dwa dni, odpowiadające wskazanym podsieciom z uwzględnieniem właściwych warunków atmosferycznych. Pomimo przemyślanego ulokowania wszystkich stanowisk pomiarowych, nie wszystkie punkty zachowały wzajemną widoczność. Powodem jest ciągły rozwój zadrzewienia oraz infrastruktury na terenie pomiaru. Dodatkowo punkty nr 11 i 14 okazały się niemożliwe do wykorzystania jako stanowiska pomiarowe, odpowiednio, ze względu na skrajne położenie w sieci oraz niewystarczającą przestrzeń manewrową na niebezpiecznej wysokości.



Rys. 3.10. Lokalizacja punktów sieci z uwzględnieniem przynależności do podsieci (źródło: własne)

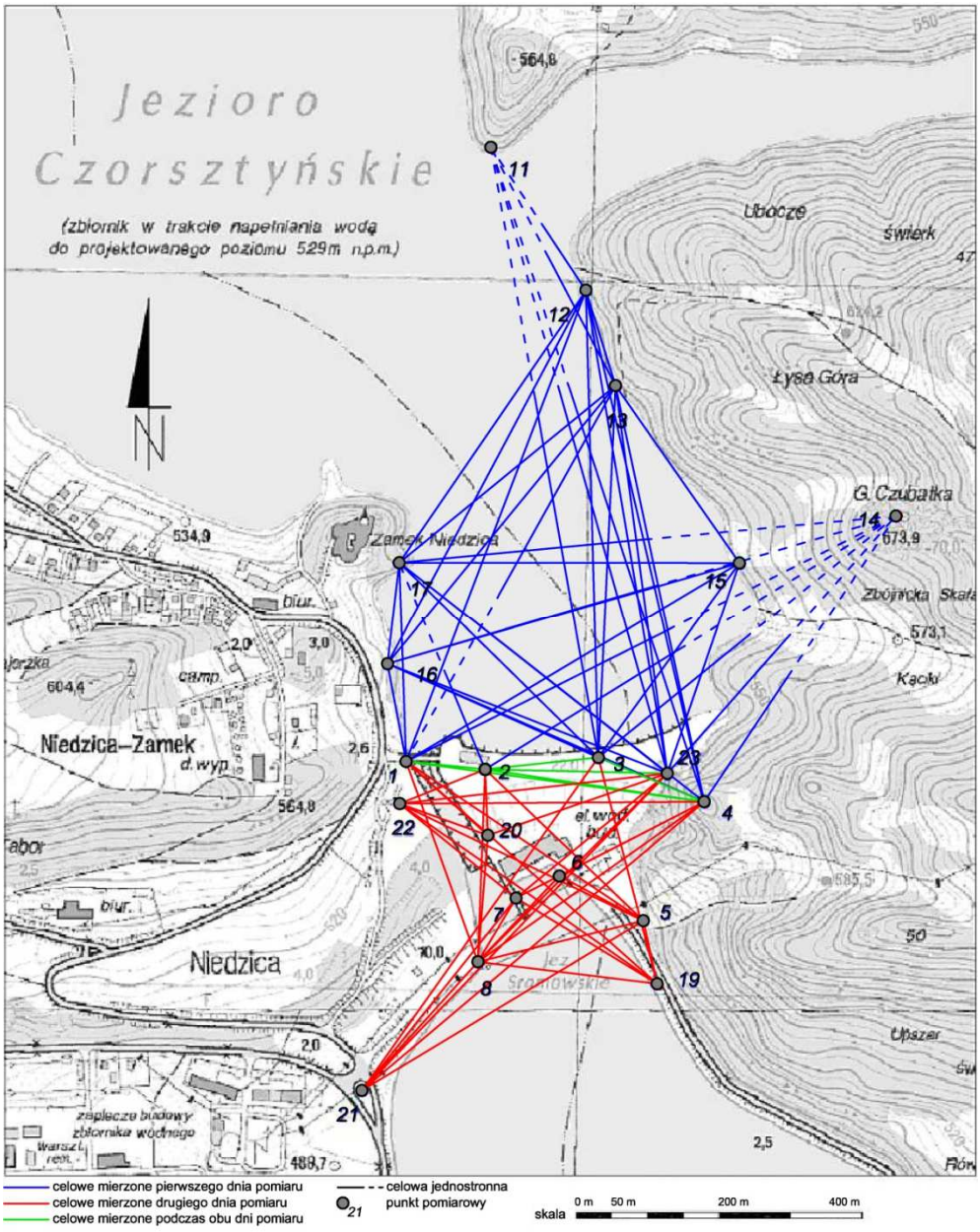
Do pomiaru omawianej zapory zastosowano zrobotyzowany tachimetr elektroniczny TCA2003 firmy Leica oraz komplet pryzmatów dalmierczych tej samej firmy. Rejestrowanymi obserwacjami podczas pomiaru były odczyty kierunków poziomych i długości skośnych pomiędzy stanowiskiem i celem. Rozdzielczość odczytu mierzonych tym instrumentem parametrów wynosi odpowiednio $0.1''$ (0.1^{cc}) oraz 0.1 mm, a błąd pomiaru $0.5''$ (1.5^{cc}) oraz 1.0 mm + 1 ppm. Do celowania w kolejnych seriach użyto program wewnętrzny instrumentu wykorzystujący serwomotory, który usprawnił przybliżone nacelowanie na kolejne pryzmaty, jednak ostateczne nacelowanie wykonywano ręcznie,

bez zastosowania systemu automatycznego rozpoznawania celu (ATR) [43]. Dobór instrumentu spowodowany był jego funkcjonalnością oraz najwyższej klasy dokładnością, adekwatną do przeprowadzanego pomiaru. Powtórne nacelowania w drugim położeniu lunety oraz co najmniej 2 serie pomiarowe z błędami pojedynczych kierunków na poziomie nieprzekraczającym $2-3^{cc}$ uzyskanymi z wyrównania stacyjnego oraz różnice odczytów długości na poziomie do 1 mm pozwoliły na uzyskanie satysfakcjonująco dokładnych danych (patrz rozdział 4.). Ewentualne dane obserwacyjne nieosiągające zamierzonego poziomu uzupełniano o kolejne serie pomiarowe.

4. Wyznaczanie przemieszczeń poziomych punktów sieci pomiarowej

4.1. Wyrównanie pomiaru aktualnego

Zgodnie z informacjami zawartymi w podrozdziale 2.2. pierwszym etapem podczas wyznaczania przemieszczeń jest wykonanie wyrównania dla pomiaru aktualnego. Dane przyjęte jako pomiar aktualny pozyskane zostały w kwietniu 2015 r. Na rys. 4.1. przedstawiono zaobserwowane podczas tego pomiaru celowe.



Rys. 4.1. Celowe pomiędzy punktami sieci pomiarowej (źródło: opracowanie własne)

Jak można zauważyć, cała sieć przeznaczona do pomiarów geodezyjnych podzielona jest na dwie podsieci – jedna wokół zbiornika górnego, druga poniżej zapory. Na rys. 4.1. celowe pomiędzy punktami sieci górnej oznaczone zostały kolorem niebieskim, zaś między punktami sieci dolnej kolorem czerwonym. Punktami łączącymi obie te sieci były punkty

na koronie zapory – 1, 2, 3 oraz punkty nr 23 i 4 znajdujące się na skale powyżej zapory. Na rysunku można zauważyć także celowe jednostronne, są to celowe w kierunku punktów nr 11 i 14, na których nie wykonuje się pomiarów tachimetrycznych, a jedynie ustawia się pryzmaty dalmiercze.

W celu wykonania wstępnego wyrównania sieci pomiarowej, obserwacje podzielono na dwie grupy – osobno obserwacje kierunków oraz osobno obserwacje odległości. Rozdział tych dwóch typów obserwacji wykonano za pomocą programu, który został udostępniony, tak jak również pozostałe wykorzystane programy, przez Katedrę Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa AGH.

Prace rozpoczęto od wyrównania kierunków. W efekcie działania programu otrzymano plik z uśrednionymi kierunkami pomierzonymi na każdym stanowisku. Na jego podstawie wykonano plik wsadowy do wyrównania kierunków w programie realizującym MNK metodą parametryczną. Jako współrzędne przybliżone punktów podlegających pomiarowi przyjęto współrzędne ostateczne uzyskane dla pomiaru z roku 2014.

W procesie obliczeniowym wykonano kilkukrotne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej wyłącznie z obserwacji kierunków. Podczas całej procedury, w celu eliminacji defektu sieci triangulacyjnej, jako punkty stałe obrano punkty nr 1 i 4 wyznaczające oś zapory. W wyniku kolejnych wyrównań odrzucono obserwacje odstające w taki sposób, aby podczas ostatecznego wyrównania pozostałe kierunki posiadały poprawki o wartości mniejszej niż 4^{cc}. W tabeli 4.1. przedstawiono statystykę ostatniego z wyrównań sieci poziomej, podczas których założony *á priori* błąd średni pomiaru kierunku wynosił $m_K = 1^{cc}$.

Tabela 4.1. Statystyka wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków (źródło: opracowanie własne)

Liczba obserwacji	153, w tym 0 obserwowanych współrzędnych punktów
Liczba niewiadomych	60, w tym 36 współrzędnych, 0 stałych dalmierzy, 24 orientacji pęków kierunków
Liczba stopni swobody	93
m_0^2	6.138127
m_0	2.477524

Jak wynika z powyższej tabeli, podczas wyrównania z wykorzystaniem kierunków $m_0^2 > 1$. Oznacza to, że założone *á priori* błędy pomiaru były mniejsze niż te, które występowały rzeczywiście. W związku z tym, wyznaczono błędy pomiaru *á posteriori* poprzez pomnożenie uzyskanego z obliczeń globalnego współczynnika wariancji i błędu średniego pomiaru przyjętego *á priori*. W oparciu o tak wyznaczone błędy wykonano docelowe wyrównanie kierunków, którego statystykę przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków (źródło: opracowanie własne)

Liczba obserwacji	153, w tym 0 obserwowanych współrzędnych punktów
Liczba niewiadomych	60, w tym 36 współrzędnych, 0 stałych dalmierzy, 24 orientacji pęków kierunków
Liczba stopni swobody	93
m_0^2	1.000003
m_0	1.000002

Kolejnym etapem wykonanych obliczeń było wyrównanie sieci pomiarowej zbudowanej jedynie z obserwacji długości. Pierw jednak, konieczne było wykonanie redukcji pomierzonych odległości skośnych. Przeprowadzono następujące rodzaje redukcji:

- redukcja atmosferyczna,
- redukcja na poziom stanowiska,
- redukcja na wspólny dla całej sieci poziom odniesienia.

Pierwszy rodzaj redukcji – redukcja atmosferyczna, związana jest z wpływem na wykonywany pomiar takich wielkości atmosferycznych, jak temperatura, wilgotność i ciśnienie. W celu wyznaczenia jej wartości na każdym stanowisku konieczne jest wykonanie odczytu temperatury i ciśnienia – zarówno na początku, jak i końcu pomiaru. Wartości te następnie podstawia się do równania charakterystycznego dla danego rodzaju dalmierza. W efekcie otrzymuje się wartość redukcji – w ppm, o jaką należy skorygować każdą pomierzoną długość na danym stanowisku. Redukcję atmosferyczną oraz redukcję na poziom stanowiska wykonano w dedykowanym do tego celu programie. Wykorzystywany w pomiarach tachimetr Leica TCA2003 posiada dalmierz o tak dobranej długości fali nośnej, by wpływ wilgotności powietrza był zaniedbywalnie mały.

Przeprowadzenie dwóch wymienionych powyżej redukcji nie daje w efekcie odległości, które można by wykorzystać do wyrównania. Przykładowo odległości, zredukowane ze względu na wpływ atmosfery i na poziom stanowiska, pomiędzy punktami nr 21 i 4 oraz między punktami nr 4 i 21 byłyby różne, co spowodowane jest różną wysokością, na jakiej znajdują się te punkty. Aby zniwelować wpływ wysokości stanowiska, wykonuje się ostatnią redukcję – redukcję na poziom odniesienia. Rozpoczynając od roku 1997 pomiary stabilności osnowy zapory, przyjęto poziom odniesienia bliski geoidzie.

Dopiero przeprowadzenie trzech wyżej wymienionych rodzajów redukcji pozwala na uzyskanie długości możliwych do wykorzystania podczas wyrównania sieci geodezyjnej. Obliczenia związane z redukcją wyników na poziom odniesienia wykonane zostały za pomocą specjalnego oprogramowania przy założeniu, że punkty sieci posiadają znane wysokości względem poziomu odniesienia, takie jak podano w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Wysokości punktów osnowy względem poziomu odniesienia (źródło: opracowanie własne)

Nazwa	H [m]	Nazwa	H [m]	Nazwa	H [m]
1	577.00	8	530.00	17	587.00
2	577.00	11	574.00	18	598.00
3	577.00	12	574.00	19	531.00
4	634.00	13	574.00	20	545.00
5	535.00	14	713.00	21	535.00
6	533.00	15	574.00	22	567.00
7	533.00	16	577.00	23	581.00

Korzystając ze zredukowanych na poziom odniesienia odległości między punktami, przeprowadzono kilkukrotne wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości – jako wartości stałe przyjęto współrzędne punktu nr 1 oraz azymut linii 1-4, co stanowiło bazę minimalną do eliminacji defektu sieci trilateracyjnej. Realizując obliczenia, tak jak w przypadku wyrównania z wykorzystaniem kierunków, podczas kolejnych iteracji odrzucano obserwacje odstające. Podczas ostatecznego wyrównania maksymalne poprawki dla odległości nie przekraczały 1.2 mm. Analogicznie do obliczeń wykonywanych w oparciu o pomierzone kierunki, początkowo wyrównania prowadzone były z pewnym założonym *á priori* błędem – nie była to jednak wartość sztywna. Dla każdej długości podczas redukcji na poziom odniesienia wyznaczono jej błąd pomiaru na podstawie wielokrotnych obserwacji. W przypadku, gdy był on mniejszy niż 1 mm, do wyrównania przyjmowano błąd pomiaru m_d o wartości 1 mm. Gdy wyznaczany błąd był większy od założonego 1 mm, m_d równało się obliczonej wielkości. Działanie takie pozwala zapobiegać sytuacjom, w których odległości, które z założenia nie mogą być dobre (celowe długie, przebiegające nad zbiornikiem wodnym) posiadają bardzo mały błąd, co w efekcie powoduje deformację sieci. Poniżej przedstawiono dwie statystyki z wyrównania sieci zbudowanej wyłącznie z obserwacji odległości. Pierwsza ze statystyk odnosi się do ostatniego wyrównania sieci, w którym wykorzystywano błędy *á priori* wyznaczone zgodnie z powyższym opisem. Druga statystyka odnosi się do wyrównania docelowego, w którym błędy *á priori* zastąpiono błędami wynikającymi z obliczonego współczynnika wariancji.

Tabela 4.4. Statystyka wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości (źródło: opracowanie własne)

Liczba obserwacji	82, w tym 0 obserwowanych współrzędnych punktów
Liczba niewiadomych	38, w tym 38 współrzędnych, 0 stałych dalmierzy, 0 orientacji pęków kierunków
Liczba stopni swobody	44
$m_0{}^2$	0.254565
m_0	0.504544

Jak można zauważyć, w przypadku wyrównania sieci zbudowanej z obserwacji długości m_0^2 jest znacznie mniejsze niż 1, co oznacza, że przyjęte *á priori* błędy były zawyżone.

Tabela 4.5. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości (źródło: opracowanie własne)

Liczba obserwacji	82, w tym 0 obserwowanych współrzędnych punktów
Liczba niewiadomych	38, w tym 38 współrzędnych, 0 stałych dalmierzy, 0 orientacji pęków kierunków
Liczba stopni swobody	44
m_0^2	1.000013
m_0	1.000007

Wykonanie odrębnych wyrównań dla kierunków oraz dla długości było działaniem celowym. Dzięki temu możliwe było odrzucenie części obserwacji odstających oraz obliczenie rzeczywistego błędu każdej obserwacji. Tak opracowane dane stanowią podstawę wykonania wyrównania łącznego kierunków i odległości, które powinny być poprawnie zawagowane. Wielka liczba obserwacji nadliczbowych (zarówno kierunków, jak i długości) pozwala wyznaczyć odchylenia standardowe obserwacji w sposób wysoce wiarygodny, przy czym ich estymacja powinna być przeprowadzona w niezależnym, homogenicznym pod względem typów obserwacji wyrównaniu.

W podrozdziale 4.1.3. przedstawiono przygotowane dane wyjściowe do wyrównania sieci kątowo-liniowej. Obserwacje oznaczone symbolem „c" zostały odrzucone podczas oddzielnych wyrównań kierunków oraz długości, zaś obserwacje z oznaczeniem „cc" – podczas łącznego wyrównania obserwacji. Eliminacji podczas łącznego wyrównania podlegały obserwacje, dla których poprawka miała wartość większą niż 5.0^{cc} dla mierzonych kierunków lub 1.2 mm dla długości.

Wykonując łączne wyrównanie sieci geodezyjnej założonej wokół zbiornika i zapory Czorsztyn-Niedzica, jako współrzędne przybliżone przyjęto te same współrzędne, jakie podczas wyrównania sieci z wykorzystaniem jedynie odległości. W taki sam sposób obrano także wartości stałe – współrzędne (X, Y) punktu nr 1 oraz azymut linii 1-4. Poniżej przedstawiono statystykę z ostatecznego wyrównania sieci poziomej (tabela 4.6.).

Tabela 4.6. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości i kierunków (źródło: opracowanie własne)

Liczba obserwacji	219, w tym 0 obserwowanych współrzędnych punktów
Liczba niewiadomych	62, w tym 38 współrzędnych, 0 stałych dalmierzy, 24 orientacji pęków kierunków
Liczba stopni swobody	157
m_0^2	1.017649
m_0	1.008786

Analizując statystykę wyrównania warto zwrócić uwagę na wartość m_0 – wynosi ona 1.008786. Przyrównując tę wartość do m_0 uzyskanych dla ostatecznych wyrównań kierunków i długości, można zauważyć, że jest ona od nich nieco większa. Oznacza to, że wystąpiła pewna niewielka niezgodność w równoważeniu kierunków i długości. Jest ona prawdopodobnie uwarunkowana czynnikami związanymi z pomiarem, które nie są możliwe do eliminacji podczas opracowania kameralnego. Można zaliczyć do nich: refrakcję boczną – przy pomiarze kierunków, refrakcję pionową – przy redukcji długości na stromych celowych, oraz błąd określenia temperatury – najtrudniejszy do uwzględnienia parametr przy pomiarze długości, zwłaszcza nad zbiornikiem wodnym. Zatem współrzędne uzyskane z przedstawionego wyrównania uznano za ostateczne współrzędne aktualne. Obliczone współrzędne wszystkich punktów przedstawiono w tabeli 4.7. Dodatkowo w tabeli zamieszczone zostały błędy wyznaczenia współrzędnych poszczególnych punktów (m_X , m_Y) oraz parametry elips ufności (a', b' – półosie elipsy ufności, $Az(a')$ – kąt skręcenia elipsy).

Tabela 4.7. Współrzędne punktów sieci geodezyjnej aktualne na rok 2015 (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [g]
1	33282.49450	81811.18080	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	33266.52672	81909.22267	0.20	0.26	0.33	0.26	0.20	95.37
3	33272.35914	82061.16512	0.21	0.30	0.37	0.30	0.21	107.97
4	33219.00233	82212.21113	0.04	0.25	0.26	0.26	0.00	110.00
5	33045.67682	82134.35752	0.38	0.34	0.51	0.43	0.27	42.84
6	33103.03407	82001.17961	0.30	0.38	0.48	0.38	0.29	87.27
7	33075.51619	81938.42474	0.29	0.33	0.44	0.33	0.29	104.05
8	32975.54720	81892.19521	0.26	0.38	0.46	0.39	0.25	113.59
11	34137.06116	81920.65603	0.38	1.04	1.11	1.07	0.29	84.92
12	33938.58949	82052.08871	0.23	0.65	0.70	0.66	0.23	105.41
13	33804.49295	82093.42543	0.26	0.54	0.60	0.54	0.25	107.18
14	33614.91615	82484.51860	0.75	0.55	0.93	0.88	0.28	162.14
15	33554.23958	82251.13886	0.41	0.39	0.57	0.49	0.28	153.54
16	33391.16006	81770.36649	0.33	0.26	0.42	0.33	0.26	199.02
17	33548.61742	81783.84874	0.30	0.36	0.46	0.39	0.26	66.13
19	32961.51287	82144.24156	0.39	0.44	0.59	0.53	0.27	56.16
20	33150.97232	81905.84390	0.28	0.28	0.40	0.29	0.27	152.96
21	32830.74396	81737.24660	0.58	0.63	0.86	0.79	0.35	145.88

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [^{g}]
22	33220.06328	81788.55852	0.36	0.30	0.47	0.37	0.29	23.67
23	33248.76204	82164.68067	0.28	0.31	0.42	0.31	0.28	119.88

4.1.1. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków

Tabela 4.8. Współrzędne wyjściowe do wyrównania sieci zbudowanej z kierunków (źródło: opracowanie własne)

Nr	X [m]	Y [m]	
1	33282.4945	81811.1808	PUNKT STAŁY
2	33266.5274	81909.2236	
3	33272.3595	82061.1668	
4	33219.0020	82212.2133	PUNKT STAŁY
5	33045.6770	82134.3595	
6	33103.0347	82001.1807	
7	33075.5159	81938.4251	
8	32975.5484	81892.1930	
11	34137.0656	81920.6561	
12	33938.5949	82052.0921	
13	33804.4967	82093.4262	
14	33614.9176	82484.5237	
15	33554.2412	82251.1404	
16	33391.1603	81770.3667	
17	33548.6175	81783.8479	
19	32961.5118	82144.2402	
20	33150.9729	81905.8441	
21	32830.7453	81737.2438	
22	33220.0650	81788.5594	
23	33248.7610	82164.6831	

Tabela 4.9. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52740	81909.22360	0.00041	-0.00123	33266.52781	81909.22237
3	3	33272.35950	82061.16680	0.00087	-0.00031	33272.36037	82061.16649
4	4	33219.00200	82212.21330	0.00000	0.00000	33219.00200	82212.21330
5	5	33045.67700	82134.35950	-0.00172	0.00109	33045.67528	82134.36058
6	6	33103.03470	82001.18070	-0.00129	-0.00133	33103.03341	82001.17937
7	7	33075.51590	81938.42510	-0.00021	-0.00007	33075.51569	81938.42503
8	8	32975.54840	81892.19300	-0.00240	0.00210	32975.54600	81892.19510
9	11	34137.06560	81920.65610	0.01126	0.00234	34137.07686	81920.65844
10	12	33938.59490	82052.09210	0.01032	0.00003	33938.60522	82052.09213
11	13	33804.49670	82093.42620	0.00594	0.00440	33804.50264	82093.43060
12	14	33614.91760	82484.52370	0.00247	0.01430	33614.92007	82484.53800
13	15	33554.24120	82251.14040	0.00280	0.00711	33554.24400	82251.14751
14	16	33391.16030	81770.36670	0.00325	-0.00077	33391.16355	81770.36593
15	17	33548.61750	81783.84790	0.00336	-0.00034	33548.62086	81783.84756
16	19	32961.51180	82144.24020	-0.00163	0.00481	32961.51017	82144.24501
17	20	33150.97290	81905.84410	-0.00107	0.00031	33150.97183	81905.84441
18	21	32830.74530	81737.24380	-0.00530	-0.00038	32830.74000	81737.24342
19	22	33220.06500	81788.55940	-0.00102	-0.00193	33220.06398	81788.55747
20	23	33248.76100	82164.68310	0.00179	0.00030	33248.76279	82164.68340

Tabela 4.10. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52781	81909.22237	0.00000	0.00000	33266.52781	81909.22237
3	3	33272.36037	82061.16649	0.00000	0.00000	33272.36037	82061.16649
4	4	33219.00200	82212.21330	0.00000	0.00000	33219.00200	82212.21330
5	5	33045.67528	82134.36058	0.00000	0.00000	33045.67528	82134.36058
6	6	33103.03341	82001.17937	0.00000	0.00000	33103.03341	82001.17937
7	7	33075.51569	81938.42503	0.00000	0.00000	33075.51569	81938.42503
8	8	32975.54600	81892.19510	0.00000	0.00000	32975.54600	81892.19510
9	11	34137.07686	81920.65844	0.00000	0.00000	34137.07686	81920.65844
10	12	33938.60522	82052.09213	0.00000	0.00000	33938.60522	82052.09213
11	13	33804.50264	82093.43060	0.00000	0.00000	33804.50264	82093.43060
12	14	33614.92007	82484.53800	0.00000	0.00000	33614.92007	82484.53800
13	15	33554.24400	82251.14751	0.00000	0.00000	33554.24400	82251.14751
14	16	33391.16355	81770.36593	0.00000	0.00000	33391.16355	81770.36593
15	17	33548.62086	81783.84756	0.00000	0.00000	33548.62086	81783.84756
16	19	32961.51017	82144.24501	0.00000	0.00000	32961.51017	82144.24501

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
17	20	33150.97183	81905.84441	0.00000	0.00000	33150.97183	81905.84441
18	21	32830.74000	81737.24342	0.00000	0.00000	32830.74000	81737.24342
19	22	33220.06398	81788.55747	0.00000	0.00000	33220.06398	81788.55747
20	23	33248.76279	82164.68340	0.00000	0.00000	33248.76279	82164.68340

Tabela 4.11. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane kierunki (źródło: opracowanie własne)

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [g]	m_K $^{a\ priori}$ [cc]	Obs. wyr. [g]	m_K $^{a\ post}$ [cc]	V [cc]
1	KIER.	17	12	PEK# 1	0.00000	2.48	0.00000	1.73	1.77
2	KIER.	17	13	PEK# 1	17.67068	2.48	17.67055	1.72	0.46
3	KIER.	17	14	PEK# 1	55.63718	2.48	55.63695	1.86	-0.54
4	KIER.	17	15	PEK# 1	60.87675	2.48	60.87673	1.58	1.58
5	KIER.	17	23	PEK# 1	104.10500	2.48	104.10473	1.36	-0.67
6	KIER.	17	4	PEK# 1	103.39570	2.48	103.39560	1.20	0.87
7	KIER.	17	3	PEK# 1	111.52140	2.48	111.52103	1.25	-2.20
8	KIER.	17	16	PEK# 1	167.08060	2.48	167.08029	1.87	-1.27
9	KIER.	16	17	PEK# 2	0.00000	2.48	0.00000	1.68	2.81
10	KIER.	16	12	PEK# 2	24.81976	2.48	24.81958	1.37	1.03
11	KIER.	16	13	PEK# 2	36.79718	2.48	36.79701	1.39	1.07
12	KIER.	16	14	PEK# 2	75.23347	2.48	75.23331	1.45	1.21
13	KIER.	16	15	PEK# 2	73.74435	2.48	73.74373	1.47	-3.40
14	KIER.	16	4	PEK# 2	118.21620	2.48	118.21568	1.18	-2.15
15	KIER.	16	3	PEK# 2	119.25390	2.48	119.25346	1.32	-1.94
16	KIER.	16	1	PEK# 2	171.68970	2.48	171.68957	1.92	1.37
17	KIER.	1	16	PEK# 3	0.00000	2.48	0.00000	1.77	-0.61
18	KIER.	1	17	PEK# 3	16.35750	2.48	16.35717	1.34	-3.9
19	KIER.	1	12	PEK# 3	45.27525	2.48	45.27543	1.27	1.14
20	KIER.	1	15	PEK# 3	87.64861	2.48	87.64853	1.45	-1.41
21	KIER.	1	14	PEK# 3	93.67844	2.48	93.67867	1.31	1.68
22	KIER.	1	4	PEK# 3	132.86870	2.48	132.86906	1.27	3.39
23	KIER.	1	2	PEK# 3	133.15040	2.48	133.15043	1.52	-0.29
24	KIER.	2	1	PEK# 4	0.00000	2.48	0.00000	1.68	1.77
25	KIER.	2	17	PEK# 4	63.09733	2.48	63.09746	1.68	3.07
26	KIER.	2	14	PEK# 4	155.05870	2.48	155.05833	1.51	-2.28
27	KIER.	2	4	PEK# 4	199.62790	2.48	199.62750	1.53	-2.56
28	KIER.	3	2	PEK# 5	0.00000	2.48	0.00000	1.64	0.26
29	KIER.	3	16	PEK# 5	27.13332	2.48	27.13354	1.56	2.49
30	KIER.	3	17	PEK# 5	52.32109	2.48	52.32083	1.43	-2.39
31	KIER.	3	11	PEK# 5	92.18750	2.48	92.18772	1.84	2.43
32	KIER.	3	12	PEK# 5	101.57550	2.48	101.57551	1.18	0.59
33	KIER.	3	13	PEK# 5	106.29780	2.48	106.29769	1.28	-0.72
34	KIER.	3	14	PEK# 5	159.13470	2.48	159.13463	1.43	-0.14

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [g]	$m_K^{\,a\ priori}$ [cc]	Obs. wyr. [g]	$m_K^{\,a\ post}$ [cc]	V [cc]
35	KIER.	3	4	PEK# 5	224.06080	2.48	224.06047	1.59	-2.51
36	KIER.	23	2	PEK# 6	0.00000	2.48	0.00000	1.58	-0.24
37	KIER.	23	16	PEK# 6	17.64242	2.48	17.64254	1.43	0.95
38	KIER.	23	11	PEK# 6	78.51282	2.48	78.51269	1.47	-1.51
39	KIER.	23	13	PEK# 6	87.46199	2.48	87.46203	1.16	0.12
40	KIER.	23	12	PEK# 6	85.28063	2.48	85.28035	1.14	-3.05
41	KIER.	23	15	PEK# 6	113.13930	2.48	113.13973	1.66	3.86
42	KIER.	23	14	PEK# 6	141.28960	2.48	141.28961	1.72	-0.12
43	KIER.	23	2	PEK# 7	0.00000	2.48	0.00000	1.88	-3.30
44	KIER.	23	17	PEK# 7	38.04131	2.48	38.04197	1.88	3.30
45	KIER.	4	2	PEK# 8	0.00000	2.48	0.00000	1.18	2.41
46	KIER.	4	1	PEK# 8	0.09154	2.48	0.09113	1.16	-1.68
47	KIER.	4	3	PEK# 8	11.71290	2.48	11.71290	1.32	2.41
48	KIER.	4	16	PEK# 8	13.74831	2.48	13.74819	1.21	1.20
49	KIER.	4	17	PEK# 8	31.84816	2.48	31.84782	1.19	-0.99
50	KIER.	4	11	PEK# 8	70.51940	2.48	70.51898	1.30	-1.75
51	KIER.	4	12	PEK# 8	76.15678	2.48	76.15643	1.13	-1.11
52	KIER.	4	13	PEK# 8	77.35290	2.48	77.35257	1.20	-0.91
53	KIER.	4	14	PEK# 8	128.4523	2.48	128.45208	1.91	0.41
54	KIER.	12	13	PEK# 9	0.00000	2.48	0.00000	1.81	3.76
55	KIER.	12	4	PEK# 9	5.09779	2.48	5.09750	1.33	0.89
56	KIER.	12	23	PEK# 9	8.73687	2.48	8.73640	1.26	-0.94
57	KIER.	12	3	PEK# 9	18.16943	2.48	18.16902	1.16	-0.38
58	KIER.	12	1	PEK# 9	41.43912	2.48	41.43857	1.22	-1.72
59	KIER.	12	17	PEK# 9	57.39388	2.48	57.39330	1.62	-2.09
60	KIER.	12	11	PEK# 9	181.79900	2.48	181.79862	2.32	0.48
61	KIER.	13	15	PEK# 10	0.00000	2.48	0.00000	1.80	-0.49
62	KIER.	13	23	PEK# 10	27.68141	2.48	27.68177	1.30	3.15
63	KIER.	13	3	PEK# 10	39.65445	2.48	39.65489	1.24	3.93
64	KIER.	13	1	PEK# 10	67.35531	2.48	67.35540	1.17	0.42
65	KIER.	13	16	PEK# 10	78.03456	2.48	78.03428	1.28	-3.26
66	KIER.	13	17	PEK# 10	91.82755	2.48	91.82754	1.54	-0.57
67	KIER.	13	11	PEK# 10	205.29770	2.48	205.29768	1.59	-0.47
68	KIER.	13	12	PEK# 10	216.76390	2.48	216.76370	1.87	-2.71
69	KIER.	15	23	PEK# 11	0.00000	2.48	0.00000	1.75	-3.23
70	KIER.	15	3	PEK# 11	20.19432	2.48	20.19446	1.57	-1.79
71	KIER.	15	16	PEK# 11	61.62112	2.48	61.62153	1.37	0.86
72	KIER.	15	17	PEK# 11	81.67390	2.48	81.67425	1.50	0.22
73	KIER.	15	1	PEK# 11	47.21518	2.48	47.21590	1.26	3.94
74	KIER.	15	13	PEK# 11	146.64020	2.48	146.64052	1.86	-0.01
75	KIER.	7	8	PEK# 12	0.00000	2.48	0.00000	1.78	-0.63
76	KIER.	7	21	PEK# 12	16.22140	2.48	16.22130	1.73	-1.68
77	KIER.	7	22	PEK# 12	121.27460	2.48	121.27472	1.87	0.71
78	KIER.	7	23	PEK# 12	230.82280	2.48	230.82318	1.63	3.48

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [g]	$m_K^{\ a\ priori}$ [cc]	Obs. wyr. [g]	$m_K^{\ a\ post}$ [cc]	V [cc]
79	KIER.	7	4	PEK# 12	241.69350	2.48	241.69365	1.59	0.98
80	KIER.	7	19	PEK# 12	304.62780	2.48	304.62753	1.79	-2.86
81	KIER.	6	8	PEK# 13	0.00000	2.48	0.00000	1.77	1.73
82	KIER.	6	7	PEK# 13	28.66325	2.48	28.66298	2.27	-0.94
83	KIER.	6	4	PEK# 13	222.98260	2.48	222.98240	2.04	-0.54
84	KIER.	6	5	PEK# 13	280.86080	2.48	280.86060	2.02	-0.25
85	KIER.	5	21	PEK# 14	75.85867	2.48	75.85867	1.78	1.05
86	KIER.	5	8	PEK# 14	89.49568	2.48	89.49574	1.61	1.67
87	KIER.	5	6	PEK# 14	133.33050	2.48	133.33026	1.94	-0.89
88	KIER.	5	22	PEK# 14	137.17630	2.48	137.17624	1.29	0.45
89	KIER.	5	1	PEK# 14	147.70020	2.48	147.69994	1.26	-1.38
90	KIER.	5	2	PEK# 14	156.82930	2.48	156.82914	1.44	-0.89
91	KIER.	19	8	PEK# 15	0.00000	2.48	0.00000	1.68	2.90
92	KIER.	19	7	PEK# 15	28.66141	2.48	28.66126	1.49	1.45
93	KIER.	19	22	PEK# 15	36.47446	2.48	36.47396	1.28	-2.14
94	KIER.	19	1	PEK# 15	45.28325	2.48	45.28287	1.26	-0.93
95	KIER.	19	3	PEK# 15	79.83305	2.48	79.83268	1.70	-0.84
96	KIER.	19	5	PEK# 15	89.01644	2.48	89.01611	2.41	-0.44
97	KIER.	21	3	PEK# 16	0.00000	2.48	0.00000	1.59	0.08
98	KIER.	21	7	PEK# 16	3.50791	2.48	3.50807	1.58	1.72
99	KIER.	21	8	PEK# 16	11.86559	2.48	11.86547	1.47	-1.12
100	KIER.	21	5	PEK# 16	28.12945	2.48	28.12937	2.01	-0.68
101	KIER.	8	21	PEK# 17	0.00000	2.48	0.00000	1.88	2.05
102	KIER.	8	1	PEK# 17	131.41800	2.48	131.41814	1.49	3.01
103	KIER.	8	2	PEK# 17	151.56720	2.48	151.56714	1.20	1.17
104	KIER.	8	20	PEK# 17	152.79000	2.48	152.78947	1.44	-3.61
105	KIER.	8	7	PEK# 17	175.42140	2.48	175.42131	1.66	1.03
106	KIER.	8	3	PEK# 17	180.79320	2.48	180.79291	1.30	-0.97
107	KIER.	8	6	PEK# 17	192.87500	2.48	192.87489	1.77	0.63
108	KIER.	8	23	PEK# 17	197.76150	2.48	197.76112	1.31	-1.69
109	KIER.	8	5	PEK# 17	229.90120	2.48	229.90098	1.78	0.31
110	KIER.	8	19	PEK# 17	251.38800	2.48	251.38757	1.76	-1.94
111	KIER.	4	21	PEK# 18	0.00000	2.48	0.00000	1.19	-1.99
112	KIER.	4	8	PEK# 18	2.22425	2.48	2.22424	1.16	-2.05
113	KIER.	4	6	PEK# 18	11.63764	2.48	11.63800	1.29	1.58
114	KIER.	4	7	PEK# 18	12.89551	2.48	12.89567	1.16	-0.44
115	KIER.	4	22	PEK# 18	43.78616	2.48	43.78639	1.07	0.31
116	KIER.	4	1	PEK# 18	53.62262	2.48	53.62297	1.13	1.47
117	KIER.	4	2	PEK# 18	53.53140	2.48	53.53184	1.12	2.36
118	KIER.	4	3	PEK# 18	65.24466	2.48	65.24474	1.48	-1.24
119	KIER.	23	21	PEK# 19	0.79355	2.48	0.79355	1.41	-1.32
120	KIER.	23	7	PEK# 19	8.48262	2.48	8.48287	1.44	1.15
121	KIER.	23	20	PEK# 19	27.08779	2.48	27.08795	1.48	0.32
122	KIER.	23	22	PEK# 19	45.23616	2.48	45.23640	1.28	1.05

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [g]	$m_K^{\,a\ priori}$ [cc]	Obs. wyr. [g]	$m_K^{\,a\ post}$ [cc]	V [cc]
123	KIER.	23	2	PEK# 19	54.50447	2.48	54.50448	1.55	-1.2
124	KIER.	3	4	PEK# 20	0.00000	2.48	0.00000	1.73	1.77
125	KIER.	3	19	PEK# 20	61.75604	2.48	61.75622	1.76	3.54
126	KIER.	3	8	PEK# 20	111.32950	2.48	111.32888	1.51	-4.04
127	KIER.	3	2	PEK# 20	175.93980	2.48	175.93953	1.70	-1.26
128	KIER.	2	3	PEK# 21	0.00000	2.48	0.00000	1.51	3.34
129	KIER.	2	23	PEK# 21	6.86287	2.48	6.86255	1.56	0.12
130	KIER.	2	4	PEK# 21	12.34801	2.48	12.34757	1.21	-1.03
131	KIER.	2	5	PEK# 21	51.83093	2.48	51.83081	1.47	2.18
132	KIER.	2	20	PEK# 21	104.30350	2.48	104.30300	1.75	-1.79
133	KIER.	2	8	PEK# 21	106.16370	2.48	106.16359	1.29	2.30
134	KIER.	2	22	PEK# 21	179.04310	2.48	179.04261	1.91	-1.41
135	KIER.	2	1	PEK# 21	212.72080	2.48	212.72008	1.61	-3.70
136	KIER.	20	2	PEK# 22	0.00000	2.48	0.00000	1.86	1.59
137	KIER.	20	23	PEK# 22	75.14345	2.48	75.14302	1.86	-2.68
138	KIER.	20	8	PEK# 22	203.08310	2.48	203.08292	1.90	0.2
139	KIER.	20	22	PEK# 22	332.03040	2.48	332.03040	1.93	1.95
140	KIER.	20	1	PEK# 22	358.42370	2.48	358.42344	1.87	-1.05
141	KIER.	1	4	PEK# 23	0.00000	2.48	0.00000	1.33	-3.34
142	KIER.	1	2	PEK# 23	0.28076	2.48	0.28137	1.57	2.78
143	KIER.	1	5	PEK# 23	30.26244	2.48	30.26291	1.30	1.37
144	KIER.	1	19	PEK# 23	38.82780	2.48	38.82818	1.26	0.44
145	KIER.	1	20	PEK# 23	50.28766	2.48	50.28773	1.60	-2.66
146	KIER.	1	8	PEK# 23	73.57540	2.48	73.57588	1.50	1.41
147	KIER.	22	2	PEK# 24	0.00000	2.48	0.00000	1.79	0.15
148	KIER.	22	23	PEK# 24	18.55151	2.48	18.55186	1.26	3.62
149	KIER.	22	4	PEK# 24	23.55962	2.48	23.55952	1.19	-0.83
150	KIER.	22	5	PEK# 24	53.13557	2.48	53.13531	1.29	-2.43
151	KIER.	22	20	PEK# 24	57.29089	2.48	57.29079	1.73	-0.87
152	KIER.	22	19	PEK# 24	63.41513	2.48	63.41536	1.27	2.49
153	KIER.	22	7	PEK# 24	72.25010	2.48	72.24987	1.55	-2.14

Tabela 4.12. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [g]
1	33282.49450	81811.18080	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	33266.52781	81909.22237	0.22	0.65	0.68	0.66	0.19	110.83
3	33272.36037	82061.16649	0.31	0.79	0.85	0.81	0.26	113.54
4	33219.00200	82212.21330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [g]
5	33045.67528	82134.36058	0.91	1.09	1.42	1.21	0.75	136.86
6	33103.03341	82001.17937	0.61	0.87	1.06	0.90	0.56	78.42
7	33075.51569	81938.42503	0.64	0.70	0.95	0.70	0.64	98.75
8	32975.54600	81892.19510	0.94	0.82	1.25	0.96	0.80	23.67
11	34137.07686	81920.65844	7.30	3.66	8.16	7.89	2.09	174.18
12	33938.60522	82052.09213	2.61	1.37	2.95	2.64	1.32	10.59
13	33804.50264	82093.43060	2.03	1.24	2.38	2.08	1.16	17.15
14	33614.92007	82484.53800	2.61	3.17	4.11	3.92	1.22	57.57
15	33554.24400	82251.14751	1.50	1.42	2.07	1.72	1.15	45.50
16	33391.16355	81770.36593	1.04	0.51	1.16	1.09	0.38	178.70
17	33548.62086	81783.84756	1.33	0.65	1.48	1.34	0.63	190.79
19	32961.51017	82144.24501	1.16	1.18	1.65	1.41	0.87	148.56
20	33150.97183	81905.84441	0.65	0.64	0.91	0.78	0.47	151.79
21	32830.74000	81737.24342	3.16	3.36	4.61	4.45	1.20	52.30
22	33220.06398	81788.55747	0.51	0.83	0.97	0.83	0.51	102.44
23	33248.76279	82164.68340	0.63	1.14	1.30	1.15	0.61	90.96

4.1.2. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji długości

Tabela 4.13. Współrzędne wyjściowe podczas wyrównania sieci zbudowanej z odległości (źródło: opracowanie własne)

Nr	X [m]	Y [m]	
1	33282.4945	81811.1808	PUNKT STAŁY
2	33266.5279	81909.2222	
3	33272.3606	82061.1659	
4	33219.0020	82212.2133	
5	33045.6764	82134.3594	
6	33103.0340	82001.1792	
7	33075.5162	81938.4249	
8	32975.5473	81892.1953	
11	34137.0769	81920.6579	
12	33938.6057	82052.0915	
13	33804.5031	82093.4301	
14	33614.9212	82484.5385	
15	33554.2439	82251.1474	
16	33391.1638	81770.3657	
17	33548.6210	81783.8472	
19	32961.5116	82144.2438	
20	33150.9720	81905.8444	
21	32830.7422	81737.2456	

22	33220.0641	81788.5576
23	33248.7632	82164.6835

Tabela 4.14. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52790	81909.22223	-0.00144	0.00047	33266.52646	81909.22270
3	3	33272.36057	82061.16585	-0.00195	-0.00097	33272.35862	82061.16488
4	4	33219.00200	82212.21330	0.00035	-0.00226	33219.00235	82212.21104
5	5	33045.67640	82134.35936	-0.00036	-0.00218	33045.67604	82134.35718
6	6	33103.03395	82001.17924	-0.00077	0.00071	33103.03318	82001.17994
7	7	33075.51621	81938.42487	-0.00043	-0.00026	33075.51578	81938.42461
8	8	32975.54725	81892.19532	-0.00034	-0.00072	32975.54691	81892.19461
9	11	34137.07687	81920.65792	-0.01530	-0.00040	34137.06157	81920.65752
10	12	33938.60574	82052.09149	-0.01668	-0.00338	33938.58906	82052.08811
11	13	33804.50313	82093.43008	-0.01065	-0.00553	33804.49248	82093.42455
12	14	33614.92122	82484.53847	-0.00444	-0.02070	33614.91678	82484.51777
13	15	33554.24393	82251.14735	-0.00449	-0.00907	33554.23944	82251.13828
14	16	33391.16383	81770.36566	-0.00434	0.00025	33391.15949	81770.36591
15	17	33548.62095	81783.84719	-0.00402	0.00092	33548.61693	81783.84811
16	19	32961.51157	82144.24381	0.00078	-0.00282	32961.51235	82144.24099
17	20	33150.97203	81905.84438	0.00012	-0.00099	33150.97215	81905.84339
18	21	32830.74222	81737.24556	0.00251	-0.00032	32830.74473	81737.24524
19	22	33220.06406	81788.55755	-0.00093	0.00083	33220.06313	81788.55838
20	23	33248.76320	82164.68352	-0.00152	-0.00300	33248.76168	82164.68052

Tabela 4.15. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52646	81909.22270	0.00000	0.00000	33266.52646	81909.22270
3	3	33272.35862	82061.16488	0.00000	0.00000	33272.35862	82061.16488
4	4	33219.00235	82212.21104	0.00000	0.00000	33219.00235	82212.21104
5	5	33045.67604	82134.35718	0.00000	0.00000	33045.67604	82134.35718
6	6	33103.03318	82001.17994	0.00000	0.00000	33103.03318	82001.17994
7	7	33075.51578	81938.42461	0.00000	0.00000	33075.51578	81938.42461
8	8	32975.54691	81892.19461	0.00000	0.00000	32975.54691	81892.19461
9	11	34137.06157	81920.65752	0.00000	0.00000	34137.06157	81920.65753
10	12	33938.58906	82052.08811	0.00000	0.00000	33938.58906	82052.08811
11	13	33804.49248	82093.42455	0.00000	0.00000	33804.49248	82093.42455

12	14	33614.91678	82484.51777	0.00000	0.00000	33614.91678	82484.51777
13	15	33554.23944	82251.13828	0.00000	0.00000	33554.23944	82251.13828
14	16	33391.15949	81770.36591	0.00000	0.00000	33391.15949	81770.36591
15	17	33548.61693	81783.84811	0.00000	0.00000	33548.61693	81783.84811
16	19	32961.51235	82144.24099	0.00000	0.00000	32961.51235	82144.24099
17	20	33150.97215	81905.84339	0.00000	0.00000	33150.97215	81905.84339
18	21	32830.74473	81737.24524	0.00000	0.00000	32830.74473	81737.24524
19	22	33220.06313	81788.55838	0.00000	0.00000	33220.06313	81788.55838
20	23	33248.76168	82164.68052	0.00000	0.00000	33248.76168	82164.68052

Tabela 4.16. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane odległości (źródło: opracowanie własne)

Lp.	Pomiar	Od	Do	Obs. [g] /[m]	$m_d^{\,a\ priori}$ [cc]/[mm]	Obs. wyr. [g] /[m]	$m_d^{\,a\ post}$ [cc]/[mm]	V [cc]/[mm]
1	AZYMUT	1	4	109.99616	0.00	109.99616	0.00	0.00
2	DŁUG.	1	2	99.33310	0.50	99.33374	0.32	0.64
3	DŁUG.	1	4	406.02530	0.50	406.02525	0.29	-0.05
4	DŁUG.	1	5	400.65690	0.50	400.65690	0.31	0.00
5	DŁUG.	1	8	317.45870	0.50	317.45875	0.39	0.05
6	DŁUG.	1	12	698.92530	0.50	698.92518	0.33	-0.12
7	DŁUG.	1	14	750.92430	0.50	750.92427	0.34	-0.03
8	DŁUG.	1	15	517.11520	0.50	517.11498	0.33	-0.22
9	DŁUG.	1	16	116.07710	0.50	116.07728	0.34	0.18
10	DŁUG.	1	17	267.52240	0.50	267.52238	0.31	-0.02
11	DŁUG.	1	19	462.55710	0.50	462.55663	0.32	-0.47
12	DŁUG.	1	20	162.04660	0.50	162.04670	0.34	0.10
13	DŁUG.	2	3	152.05390	0.50	152.05406	0.33	0.16
14	DŁUG.	2	4	306.69270	0.50	306.69280	0.28	0.10
15	DŁUG.	2	5	315.37310	0.50	315.37350	0.34	0.40
16	DŁUG.	2	8	291.47790	0.56	291.47737	0.37	-0.53
17	DŁUG.	2	17	308.69690	0.50	308.69697	0.36	0.07
18	DŁUG.	2	20	115.60350	0.61	115.60372	0.40	0.22
19	DŁUG.	2	22	129.30050	0.50	129.30089	0.41	0.39
20	DŁUG.	2	23	256.07430	0.50	256.07476	0.31	0.46
21	DŁUG.	3	4	160.19330	0.56	160.19312	0.30	-0.18
22	DŁUG.	3	8	341.53770	0.50	341.53791	0.32	0.21
23	DŁUG.	3	11	876.04390	0.50	876.04423	0.40	0.33
24	DŁUG.	3	12	666.29270	0.50	666.29226	0.30	-0.44
25	DŁUG.	3	13	533.11110	0.66	533.11080	0.32	-0.30
26	DŁUG.	3	14	544.58510	0.56	544.58587	0.34	0.77
27	DŁUG.	3	15	339.92160	0.50	339.92160	0.33	0.00
28	DŁUG.	3	16	314.12990	0.50	314.13005	0.33	0.15
29	DŁUG.	3	17	391.43760	0.50	391.43740	0.31	-0.2
30	DŁUG.	3	19	321.75630	0.50	321.75619	0.41	-0.11
31	DŁUG.	4	6	240.79570	0.76	240.79653	0.41	0.83

Lp.	Pomiar	Od	Do	Obs. [g] /[m]	$m_d^{\ a\ priori}$ [cc]/[mm]	Obs. wyr. [g] /[m]	$m_d^{\ a\ post}$ [cc]/[mm]	V [cc]/[mm]
32	DŁUG.	4	7	309.10740	0.76	309.10743	0.36	0.03
33	DŁUG.	4	8	402.09700	1.41	402.09584	0.40	-1.16
34	DŁUG.	4	11	963.24290	0.50	963.24254	0.32	-0.36
35	DŁUG.	4	12	737.18700	0.50	737.18680	0.32	-0.20
36	DŁUG.	4	13	597.41780	0.50	597.41855	0.31	0.75
37	DŁUG.	4	14	480.52020	0.56	480.51972	0.44	-0.48
38	DŁUG.	4	16	474.19920	0.50	474.19954	0.32	0.34
39	DŁUG.	4	17	540.50010	0.50	540.50029	0.29	0.19
40	DŁUG.	4	20	313.83070	0.50	313.82995	0.35	-0.75
41	DŁUG.	4	21	613.46170	1.11	613.46270	0.43	1.00
42	DŁUG.	4	22	423.65460	0.81	423.65398	0.34	-0.62
43	DŁUG.	5	6	145.00320	0.50	145.00351	0.48	0.31
44	DŁUG.	5	8	252.11290	0.50	252.11269	0.41	-0.21
45	DŁUG.	5	19	84.74160	0.50	84.74206	0.42	0.46
46	DŁUG.	5	21	451.54570	0.50	451.54553	0.48	-0.17
47	DŁUG.	5	22	387.28260	0.50	387.28241	0.34	-0.19
48	DŁUG.	6	7	68.52230	0.50	68.52328	0.36	0.98
49	DŁUG.	6	8	167.72210	0.50	167.72165	0.42	-0.45
50	DŁUG.	7	8	110.14030	0.50	110.14076	0.35	0.46
51	DŁUG.	7	19	235.28080	0.50	235.28104	0.38	0.24
52	DŁUG.	7	21	316.83780	0.50	316.83750	0.41	-0.30
53	DŁUG.	7	22	208.21520	0.50	208.21581	0.39	0.61
54	DŁUG.	7	23	284.96730	0.50	284.96645	0.32	-0.85
55	DŁUG.	8	19	252.43650	0.50	252.43683	0.42	0.33
56	DŁUG.	8	20	175.95510	0.50	175.95540	0.35	0.30
57	DŁUG.	8	21	212.07790	0.50	212.07776	0.31	-0.14
58	DŁUG.	8	23	385.86940	0.86	385.86899	0.34	-0.41
59	DŁUG.	11	12	238.04490	0.50	238.04482	0.43	-0.08
60	DŁUG.	11	13	374.76710	0.50	374.76746	0.36	0.36
61	DŁUG.	11	23	921.20810	0.50	921.20786	0.33	-0.24
62	DŁUG.	12	13	140.32250	0.50	140.32318	0.30	0.68
63	DŁUG.	12	16	615.66760	0.50	615.66755	0.34	-0.05
64	DŁUG.	12	17	473.31870	0.50	473.31908	0.37	0.38
65	DŁUG.	12	23	698.95580	0.50	698.95555	0.31	-0.25
66	DŁUG.	13	15	295.80400	0.50	295.80433	0.40	0.33
67	DŁUG.	13	16	524.60550	0.50	524.60561	0.37	0.11
68	DŁUG.	13	17	401.63410	0.50	401.63399	0.39	-0.11
69	DŁUG.	13	23	560.28030	0.50	560.28041	0.29	0.11
70	DŁUG.	14	16	748.38560	0.50	748.38507	0.37	-0.53
71	DŁUG.	14	17	703.79900	0.76	703.79943	0.51	0.43
72	DŁUG.	14	23	486.17400	0.81	486.17428	0.42	0.28
73	DŁUG.	15	16	507.67830	0.50	507.67819	0.34	-0.11
74	DŁUG.	15	17	467.32400	0.50	467.32399	0.36	-0.01

Lp.	Pomiar	Od	Do	Obs. [g] /[m]	$m_d^{\,a\ priori}$ [cc]/[mm]	Obs. wyr. [g] /[m]	$m_d^{\,a\ post}$ [cc]/[mm]	V [cc]/[mm]
75	DŁUG.	15	23	317.47650	0.50	317.47695	0.35	0.45
76	DŁUG.	16	17	158.03310	0.50	158.03359	0.32	0.49
77	DŁUG.	17	23	484.71320	0.50	484.71279	0.33	-0.41
78	DŁUG.	19	22	439.72590	0.50	439.72563	0.33	-0.27
79	DŁUG.	20	22	136.12260	0.50	136.12251	0.36	-0.09
80	DŁUG.	20	23	276.69300	0.50	276.69378	0.36	0.78
81	DŁUG.	21	23	597.86170	0.50	597.86209	0.33	0.39
82	DŁUG.	22	23	377.21550	0.50	377.21541	0.34	-0.09

Tabela 4.17. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [g]
1	33282.49450	81811.18080	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	33266.52646	81909.22270	0.39	0.34	0.51	0.42	0.29	37.23
3	33272.35862	82061.16488	0.29	0.36	0.46	0.36	0.29	100.44
4	33219.00235	82212.21104	0.05	0.29	0.29	0.29	0.00	110.00
5	33045.67604	82134.35718	0.60	0.48	0.77	0.70	0.31	39.65
6	33103.03318	82001.17994	0.65	0.47	0.80	0.68	0.43	175.60
7	33075.51578	81938.42461	0.45	0.43	0.62	0.49	0.38	158.16
8	32975.54691	81892.19461	0.33	0.53	0.63	0.55	0.31	118.45
11	34137.06157	81920.65753	0.66	1.84	1.96	1.93	0.33	80.62
12	33938.58906	82052.08811	0.25	0.81	0.84	0.81	0.25	104.58
13	33804.49248	82093.42455	0.28	0.72	0.77	0.72	0.28	102.47
14	33614.91678	82484.51777	0.82	0.61	1.02	0.98	0.31	161.42
15	33554.23944	82251.13828	0.46	0.46	0.65	0.57	0.32	150.66
16	33391.15949	81770.36591	0.36	0.37	0.52	0.40	0.34	56.79
17	33548.61693	81783.84811	0.33	0.45	0.55	0.48	0.28	69.88
19	32961.51235	82144.24099	0.57	0.62	0.85	0.79	0.31	53.49
20	33150.97215	81905.84339	0.38	0.39	0.54	0.42	0.34	50.69
21	32830.74473	81737.24524	1.85	1.77	2.56	2.53	0.40	151.48
22	33220.06313	81788.55838	0.70	0.38	0.80	0.72	0.33	19.57
23	33248.76168	82164.68052	0.32	0.37	0.49	0.38	0.31	121.95

4.1.3. Obliczenia – dane wyjściowe do wyrównania poziomej sieci kątowo-liniowej

Tabela 4.18. Kierunki i odległości wykorzystane do łącznego wyrównania sieci (źródło: opracowanie własne)

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
1	AZYMUT	1	4	0.00100	109.99616	
2	DŁUG.	1	2	0.50454	99.33310	
3	DŁUG.	1	4	0.50454	406.02530	
4	DŁUG.	1	5	0.50454	400.65690	
5	DŁUG.	1	8	0.50454	317.45870	
6	DŁUG.	1	12	0.50454	698.92530	
7	DŁUG.	1	14	0.50454	750.92430	
8	DŁUG.	1	15	0.50454	517.11520	
9	DŁUG.	1	16	0.50454	116.07710	
10	DŁUG.	1	17	0.50454	267.52240	
11	DŁUG.	1	19	0.50454	462.55710	
12	DŁUG.	1	20	0.50454	162.04660	
13	DŁUG.	2	3	0.50454	152.05390	
14	DŁUG.	2	4	0.50454	306.69270	
15	DŁUG.	2	5	0.50454	315.37310	
16	DŁUG.	2	8	0.55500	291.47790	
17	DŁUG.	2	14	1.00000	672.56590	c
18	DŁUG.	2	17	0.50454	308.69690	
19	DŁUG.	2	20	0.60545	115.60350	
20	DŁUG.	2	22	0.50454	129.30050	
21	DŁUG.	2	23	0.50454	256.07430	
22	DŁUG.	3	4	0.55500	160.19330	
23	DŁUG.	3	8	0.50454	341.53770	
24	DŁUG.	3	11	0.50454	876.04390	
25	DŁUG.	3	12	0.50454	666.29270	
26	DŁUG.	3	13	0.65591	533.11110	
27	DŁUG.	3	14	0.55500	544.58510	
28	DŁUG.	3	15	0.50454	339.92160	
29	DŁUG.	3	16	0.50454	314.12990	
30	DŁUG.	3	17	0.50454	391.43760	
31	DŁUG.	3	19	0.50454	321.75630	
32	DŁUG.	4	6	0.75682	240.79570	
33	DŁUG.	4	7	0.75682	309.10740	
34	DŁUG.	4	8	1.41272	402.09700	cc
35	DŁUG.	4	11	0.50454	963.24290	
36	DŁUG.	4	12	0.50454	737.18700	
37	DŁUG.	4	13	0.50454	597.41780	
38	DŁUG.	4	14	0.55500	480.52020	
39	DŁUG.	4	16	0.50454	474.19920	
40	DŁUG.	4	17	0.50454	540.50010	
41	DŁUG.	4	20	0.50454	313.83070	

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
42	DŁUG.	4	21	1.11000	613.46170	
43	DŁUG.	4	22	0.80727	423.65460	
44	DŁUG.	5	6	0.50454	145.00320	
45	DŁUG.	5	8	0.50454	252.11290	
46	DŁUG.	5	19	0.50454	84.74160	
47	DŁUG.	5	21	0.50454	451.54570	
48	DŁUG.	5	22	0.50454	387.28260	
49	DŁUG.	6	7	0.50454	68.52230	
50	DŁUG.	6	8	0.50454	167.72210	
51	DŁUG.	7	8	0.50454	110.14030	
52	DŁUG.	7	19	0.50454	235.28080	
53	DŁUG.	7	21	0.50454	316.83780	
54	DŁUG.	7	22	0.50454	208.21520	
55	DŁUG.	7	23	0.50454	284.96730	
56	DŁUG.	8	19	0.50454	252.43650	
57	DŁUG.	8	20	0.50454	175.95510	
58	DŁUG.	8	21	0.50454	212.07790	
59	DŁUG.	8	23	0.85772	385.86940	
60	DŁUG.	11	12	0.50454	238.04490	
61	DŁUG.	11	13	0.50454	374.76710	
62	DŁUG.	11	23	0.50454	921.20810	
63	DŁUG.	12	13	0.50454	140.32250	
64	DŁUG.	12	16	0.50454	615.66760	
65	DŁUG.	12	17	0.50454	473.31870	
66	DŁUG.	12	23	0.50454	698.95580	
67	DŁUG.	13	15	0.50454	295.80400	
68	DŁUG.	13	16	0.50454	524.60550	
69	DŁUG.	13	17	0.50454	401.63410	
70	DŁUG.	13	23	0.50454	560.28030	
71	DŁUG.	14	16	0.50454	748.38560	
72	DŁUG.	14	17	0.75682	703.79900	
73	DŁUG.	14	23	0.80727	486.17400	
74	DŁUG.	15	16	0.50454	507.67830	
75	DŁUG.	15	17	0.50454	467.32400	
76	DŁUG.	15	23	0.50454	317.47650	
77	DŁUG.	16	17	0.50454	158.03310	
78	DŁUG.	16	23	1.10000	419.24230	c
79	DŁUG.	17	23	0.50454	484.71320	
80	DŁUG.	19	22	0.50454	439.72590	
81	DŁUG.	20	22	0.50454	136.12260	
82	DŁUG.	20	23	0.50454	276.69300	
83	DŁUG.	21	23	0.50454	597.86170	
84	DŁUG.	22	23	0.50454	377.21550	
85	KIER.	17	12	2.47752	0.00000	cc

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
86	KIER.	17	13	2.47752	17.67068	
87	KIER.	17	14	2.47752	55.63718	
88	KIER.	17	15	2.47752	60.87675	
89	KIER.	17	23	2.47752	104.10497	
90	KIER.	17	4	2.47752	103.39569	
91	KIER.	17	3	2.47752	111.52143	
92	KIER.	17	1	1.00000	155.12614	c
93	KIER.	17	16	2.47752	167.08059	
94	KIER.	16	17	2.47752	0.00000	cc
95	KIER.	16	12	2.47752	24.81976	cc
96	KIER.	16	13	2.47752	36.79718	
97	KIER.	16	14	2.47752	75.23347	
98	KIER.	16	15	2.47752	73.74435	
99	KIER.	16	23	1.00000	116.62711	c
100	KIER.	16	4	2.47752	118.21618	
101	KIER.	16	3	2.47752	119.25394	
102	KIER.	16	1	2.47752	171.68971	
103	KIER.	1	16	2.47752	0.00000	
104	KIER.	1	17	2.47752	16.35750	
105	KIER.	1	12	2.47752	45.27525	
106	KIER.	1	15	2.47752	87.64861	
107	KIER.	1	14	2.47752	93.67844	
108	KIER.	1	4	2.47752	132.86866	
109	KIER.	1	2	2.47752	133.15040	cc
110	KIER.	2	1	2.47752	0.00000	
111	KIER.	2	17	2.47752	63.09733	
112	KIER.	2	14	2.47752	155.05874	cc
113	KIER.	2	3	1.00000	187.28166	c
114	KIER.	2	23	1.00000	194.14343	c
115	KIER.	2	4	2.47752	199.62793	cc
116	KIER.	3	2	2.47752	0.00000	
117	KIER.	3	16	2.47752	27.13332	
118	KIER.	3	17	2.47752	52.32109	
119	KIER.	3	11	2.47752	92.18750	
120	KIER.	3	12	2.47752	101.57548	
121	KIER.	3	13	2.47752	106.29779	
122	KIER.	3	15	1.00000	140.19601	c
123	KIER.	3	14	2.47752	159.13467	cc
124	KIER.	3	4	2.47752	224.06075	cc
125	KIER.	23	2	2.47752	0.00000	
126	KIER.	23	16	2.47752	17.64242	
127	KIER.	23	11	2.47752	78.51282	
128	KIER.	23	13	2.47752	87.46199	
129	KIER.	23	12	2.47752	85.28063	

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
130	KIER.	23	15	2.47752	113.13932	
131	KIER.	23	14	2.47752	141.28960	cc
132	KIER.	23	2	2.47752	0.00000	
133	KIER.	23	17	2.47752	38.04131	
134	KIER.	4	2	2.47752	0.00000	
135	KIER.	4	1	2.47752	0.09154	
136	KIER.	4	3	2.47752	11.71290	
137	KIER.	4	16	2.47752	13.74831	
138	KIER.	4	17	2.47752	31.84816	
139	KIER.	4	11	2.47752	70.51940	
140	KIER.	4	12	2.47752	76.15678	
141	KIER.	4	13	2.47752	77.35290	
142	KIER.	4	14	2.47752	128.45228	cc
143	KIER.	12	13	2.47752	0.00000	
144	KIER.	12	4	2.47752	5.09779	
145	KIER.	12	23	2.47752	8.73687	
146	KIER.	12	3	2.47752	18.16943	
147	KIER.	12	1	2.47752	41.43912	
148	KIER.	12	16	1.00000	49.29443	c
149	KIER.	12	17	2.47752	57.39388	
150	KIER.	12	11	2.47752	181.79895	
151	KIER.	13	15	2.47752	0.00000	
152	KIER.	13	4	1.00000	23.05642	c
153	KIER.	13	23	2.47752	27.68141	
154	KIER.	13	3	2.47752	39.65445	
155	KIER.	13	1	2.47752	67.35531	
156	KIER.	13	16	2.47752	78.03456	
157	KIER.	13	17	2.47752	91.82755	
158	KIER.	13	11	2.47752	205.29768	
159	KIER.	13	12	2.47752	216.76392	
160	KIER.	15	23	2.47752	0.00000	cc
161	KIER.	15	3	2.47752	20.19432	cc
162	KIER.	15	16	2.47752	61.62112	
163	KIER.	15	17	2.47752	81.67390	
164	KIER.	15	1	2.47752	47.21518	
165	KIER.	15	13	2.47752	146.64020	
166	KIER.	7	8	2.47752	0.00000	
167	KIER.	7	21	2.47752	16.22140	
168	KIER.	7	22	2.47752	121.27459	
169	KIER.	7	23	2.47752	230.82277	
170	KIER.	7	4	2.47752	241.69349	
171	KIER.	7	6	1.00000	246.11523	c
172	KIER.	7	19	2.47752	304.62775	
173	KIER.	6	8	2.47752	0.00000	

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
174	KIER.	6	7	2.47752	28.66325	
175	KIER.	6	4	2.47752	222.98263	
176	KIER.	6	5	2.47752	280.86080	
177	KIER.	5	19	1.00000	0.00000	c
178	KIER.	5	21	2.47752	75.85867	
179	KIER.	5	8	2.47752	89.49568	
180	KIER.	5	6	2.47752	133.33045	
181	KIER.	5	22	2.47752	137.17630	
182	KIER.	5	1	2.47752	147.70018	
183	KIER.	5	2	2.47752	156.82933	
184	KIER.	19	8	2.47752	0.00000	
185	KIER.	19	7	2.47752	28.66141	
186	KIER.	19	22	2.47752	36.47446	
187	KIER.	19	1	2.47752	45.28325	
188	KIER.	19	3	2.47752	79.83305	
189	KIER.	19	5	2.47752	89.01644	
190	KIER.	21	3	2.47752	0.00000	
191	KIER.	21	7	2.47752	3.50791	
192	KIER.	21	23	1.00000	10.42138	c
193	KIER.	21	8	2.47752	11.86559	
194	KIER.	21	4	1.00000	16.08537	c
195	KIER.	21	5	2.47752	28.12945	
196	KIER.	8	21	2.47752	0.00000	
197	KIER.	8	1	2.47752	131.41804	
198	KIER.	8	2	2.47752	151.56723	
199	KIER.	8	20	2.47752	152.79004	
200	KIER.	8	7	2.47752	175.42141	
201	KIER.	8	3	2.47752	180.79321	
202	KIER.	8	6	2.47752	192.87503	
203	KIER.	8	23	2.47752	197.76149	
204	KIER.	8	4	1.00000	206.44445	c
205	KIER.	8	5	2.47752	229.90115	
206	KIER.	8	19	2.47752	251.38797	
207	KIER.	4	21	2.47752	0.00000	
208	KIER.	4	8	2.47752	2.22425	
209	KIER.	4	6	2.47752	11.63764	
210	KIER.	4	7	2.47752	12.89551	
211	KIER.	4	22	2.47752	43.78616	
212	KIER.	4	1	2.47752	53.62262	
213	KIER.	4	2	2.47752	53.53140	
214	KIER.	4	3	2.47752	65.24466	
215	KIER.	23	8	1.00000	0.00000	c
216	KIER.	23	21	2.47752	0.79355	
217	KIER.	23	7	2.47752	8.48262	

Lp.	Pomiar	Od	Do	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obserwacja [m]/ [g]	
218	KIER.	23	20	2.47752	27.08779	
219	KIER.	23	22	2.47752	45.23616	
220	KIER.	23	2	2.47752	54.50447	
221	KIER.	3	4	2.47752	0.00000	
222	KIER.	3	19	2.47752	61.75604	cc
223	KIER.	3	8	2.47752	111.32946	
224	KIER.	3	2	2.47752	175.93983	
225	KIER.	2	3	2.47752	0.00000	
226	KIER.	2	23	2.47752	6.86287	
227	KIER.	2	4	2.47752	12.34801	
228	KIER.	2	5	2.47752	51.83093	
229	KIER.	2	20	2.47752	104.30351	
230	KIER.	2	8	2.47752	106.16369	
231	KIER.	2	22	2.47752	179.04308	
232	KIER.	2	1	2.47752	212.72078	
233	KIER.	20	2	2.47752	0.00000	c
234	KIER.	20	23	2.47752	75.14345	
235	KIER.	20	8	2.47752	203.08306	
236	KIER.	20	22	2.47752	332.03036	
237	KIER.	20	1	2.47752	358.42370	
238	KIER.	1	4	2.47752	0.00000	
239	KIER.	1	2	2.47752	0.28076	cc
240	KIER.	1	5	2.47752	30.26244	
241	KIER.	1	19	2.47752	38.82780	
242	KIER.	1	20	2.47752	50.28766	
243	KIER.	1	8	2.47752	73.57540	
244	KIER.	22	2	2.47752	0.00000	
245	KIER.	22	23	2.47752	18.55151	
246	KIER.	22	4	2.47752	23.55962	
247	KIER.	22	5	2.47752	53.13557	
248	KIER.	22	20	2.47752	57.29089	
249	KIER.	22	19	2.47752	63.41513	
250	KIER.	22	7	2.47752	72.25010	

4.1.4. Obliczenia – ostateczne wyrównanie sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości i kierunków

Tabela 4.19. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52790	81909.22223	-0.00118	0.00045	33266.52672	81909.22267
3	3	33272.36057	82061.16585	-0.00143	-0.00073	33272.35914	82061.16512
4	4	33219.00200	82212.21330	0.00033	-0.00217	33219.00233	82212.21113
5	5	33045.67640	82134.35936	0.00042	-0.00184	33045.67682	82134.35752
6	6	33103.03395	82001.17924	0.00012	0.00037	33103.03407	82001.17961
7	7	33075.51621	81938.42487	-0.00003	-0.00013	33075.51619	81938.42474
8	8	32975.54725	81892.19532	-0.00005	-0.00011	32975.54720	81892.19521
9	11	34137.07687	81920.65792	-0.01571	-0.00189	34137.06116	81920.65603
10	12	33938.60574	82052.09149	-0.01625	-0.00278	33938.58949	82052.08871
11	13	33804.50313	82093.43008	-0.01018	-0.00465	33804.49295	82093.42543
12	14	33614.92122	82484.53847	-0.00507	-0.01987	33614.91615	82484.51860
13	15	33554.24393	82251.14735	-0.00435	-0.00849	33554.23958	82251.13886
14	16	33391.16383	81770.36566	-0.00377	0.00083	33391.16006	81770.36649
15	17	33548.62095	81783.84719	-0.00353	0.00155	33548.61742	81783.84874
16	19	32961.51157	82144.24381	0.00130	-0.00225	32961.51287	82144.24156
17	20	33150.97203	81905.84438	0.00029	-0.00048	33150.97232	81905.84390
18	21	32830.74222	81737.24556	0.00174	0.00104	32830.74396	81737.24660
19	22	33220.06406	81788.55755	-0.00078	0.00097	33220.06328	81788.55852
20	23	33248.76320	82164.68352	-0.00116	-0.00285	33248.76204	82164.68067

Tabela 4.20. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne)

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
1	1	33282.49450	81811.18080	0.00000	0.00000	33282.49450	81811.18080
2	2	33266.52672	81909.22267	0.00000	0.00000	33266.52672	81909.22267
3	3	33272.35914	82061.16512	0.00000	0.00000	33272.35914	82061.16512
4	4	33219.00233	82212.21113	0.00000	0.00000	33219.00233	82212.21113
5	5	33045.67682	82134.35752	0.00000	0.00000	33045.67682	82134.35752
6	6	33103.03407	82001.17961	0.00000	0.00000	33103.03407	82001.17961
7	7	33075.51619	81938.42474	0.00000	0.00000	33075.51619	81938.42474
8	8	32975.54720	81892.19521	0.00000	0.00000	32975.54720	81892.19521
9	11	34137.06116	81920.65603	0.00000	0.00000	34137.06116	81920.65603
10	12	33938.58949	82052.08871	0.00000	0.00000	33938.58949	82052.08871
11	13	33804.49295	82093.42543	0.00000	0.00000	33804.49295	82093.42543
12	14	33614.91615	82484.51860	0.00000	0.00000	33614.91615	82484.51860
13	15	33554.23958	82251.13886	0.00000	0.00000	33554.23958	82251.13886

Punkt		Współrzędne początkowe		Przyrosty		Współrzędne nowe	
Nr	Nazwa	X [m]	Y [m]	δX [m]	δY [m]	X [m]	Y [m]
14	16	33391.16006	81770.36649	0.00000	0.00000	33391.16006	81770.36649
15	17	33548.61742	81783.84874	0.00000	0.00000	33548.61742	81783.84874
16	19	32961.51287	82144.24156	0.00000	0.00000	32961.51287	82144.24156
17	20	33150.97232	81905.84390	0.00000	0.00000	33150.97232	81905.84390
18	21	32830.74396	81737.24660	0.00000	0.00000	32830.74396	81737.24660
19	22	33220.06328	81788.55852	0.00000	0.00000	33220.06328	81788.55852
20	23	33248.76204	82164.68067	0.00000	0.00000	33248.76204	82164.68067

Tabela 4.21. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane odległości i kierunki (źródło: opracowanie własne)

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
1	AZYMUT	1	4		109.99616	0.00	109.99616	0.00	0.00
2	DŁUG.	1	2		99.33310	0.50	99.33368	0.26	0.58
3	DŁUG.	1	4		406.02530	0.50	406.02535	0.26	0.05
4	DŁUG.	1	5		400.65690	0.50	400.65672	0.27	-0.18
5	DŁUG.	1	8		317.45870	0.50	317.45863	0.28	-0.07
6	DŁUG.	1	12		698.92530	0.50	698.92579	0.28	0.49
7	DŁUG.	1	14		750.92430	0.50	750.92473	0.30	0.43
8	DŁUG.	1	15		517.11520	0.50	517.11554	0.29	0.34
9	DŁUG.	1	16		116.07710	0.50	116.07762	0.32	0.52
10	DŁUG.	1	17		267.52240	0.50	267.52280	0.28	0.40
11	DŁUG.	1	19		462.55710	0.50	462.55667	0.28	-0.43
12	DŁUG.	1	20		162.04660	0.50	162.04686	0.29	0.26
13	DŁUG.	2	3		152.05390	0.50	152.05434	0.29	0.44
14	DŁUG.	2	4		306.69270	0.50	306.69296	0.26	0.26
15	DŁUG.	2	5		315.37310	0.50	315.37339	0.27	0.29
16	DŁUG.	2	8		291.47790	0.56	291.47729	0.26	-0.61
17	DŁUG.	2	17		308.69690	0.50	308.69692	0.27	0.02
18	DŁUG.	2	20		115.60350	0.61	115.60378	0.28	0.28
19	DŁUG.	2	22		129.30050	0.50	129.30077	0.30	0.27
20	DŁUG.	2	23		256.07430	0.50	256.07493	0.28	0.63
21	DŁUG.	3	4		160.19330	0.56	160.19316	0.28	-0.14
22	DŁUG.	3	8		341.53770	0.50	341.53793	0.27	0.23
23	DŁUG.	3	11		876.04390	0.50	876.04360	0.30	-0.30
24	DŁUG.	3	12		666.29270	0.50	666.29217	0.25	-0.53
25	DŁUG.	3	13		533.11110	0.66	533.11079	0.27	-0.31
26	DŁUG.	3	14		544.58510	0.56	544.58560	0.32	0.50
27	DŁUG.	3	15		339.92160	0.50	339.92147	0.31	-0.13
28	DŁUG.	3	16		314.12990	0.50	314.12975	0.30	-0.15
29	DŁUG.	3	17		391.43760	0.50	391.43711	0.27	-0.49

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
30	DŁUG.	3	19		321.75630	0.50	321.75628	0.32	-0.02
31	DŁUG.	4	6		240.79570	0.76	240.79647	0.36	0.77
32	DŁUG.	4	7		309.10740	0.76	309.10720	0.31	-0.20
33	DŁUG.	4	11		963.24290	0.50	963.24264	0.29	-0.26
34	DŁUG.	4	12		737.18700	0.50	737.18713	0.29	0.13
35	DŁUG.	4	13		597.41780	0.50	597.41887	0.28	1.07
36	DŁUG.	4	14		480.52020	0.56	480.51962	0.41	-0.58
37	DŁUG.	4	16		474.19920	0.50	474.19930	0.28	0.10
38	DŁUG.	4	17		540.50010	0.50	540.50018	0.27	0.08
39	DŁUG.	4	20		313.83070	0.50	313.82951	0.27	-1.19
40	DŁUG.	4	21		613.46170	1.11	613.46220	0.36	0.50
41	DŁUG.	4	22		423.65460	0.81	423.65394	0.30	-0.66
42	DŁUG.	5	6		145.00320	0.50	145.00418	0.31	0.98
43	DŁUG.	5	8		252.11290	0.50	252.11257	0.27	-0.33
44	DŁUG.	5	19		84.74160	0.50	84.74234	0.35	0.74
45	DŁUG.	5	21		451.54570	0.50	451.54537	0.33	-0.33
46	DŁUG.	5	22		387.28260	0.50	387.28231	0.27	-0.29
47	DŁUG.	6	7		68.52230	0.50	68.52304	0.32	0.74
48	DŁUG.	6	8		167.72210	0.50	167.72150	0.30	-0.60
49	DŁUG.	7	8		110.14030	0.50	110.14067	0.26	0.37
50	DŁUG.	7	19		235.28080	0.50	235.28136	0.28	0.56
51	DŁUG.	7	21		316.83780	0.50	316.83764	0.31	-0.16
52	DŁUG.	7	22		208.21520	0.50	208.21563	0.29	0.43
53	DŁUG.	7	23		284.96730	0.50	284.96643	0.28	-0.87
54	DŁUG.	8	19		252.43650	0.50	252.43677	0.30	0.27
55	DŁUG.	8	20		175.95510	0.50	175.95528	0.30	0.18
56	DŁUG.	8	21		212.07790	0.50	212.07794	0.29	0.04
57	DŁUG.	8	23		385.86940	0.86	385.86872	0.28	-0.68
58	DŁUG.	11	12		238.04490	0.50	238.04527	0.32	0.37
59	DŁUG.	11	13		374.76710	0.50	374.76777	0.30	0.67
60	DŁUG.	11	23		921.20810	0.50	921.20755	0.30	-0.55
61	DŁUG.	12	13		140.32250	0.50	140.32323	0.28	0.73
62	DŁUG.	12	16		615.66760	0.50	615.66743	0.29	-0.17
63	DŁUG.	12	17		473.31870	0.50	473.31902	0.31	0.32
64	DŁUG.	12	23		698.95580	0.50	698.95555	0.28	-0.25
65	DŁUG.	13	15		295.80400	0.50	295.80445	0.38	0.45
66	DŁUG.	13	16		524.60550	0.50	524.60571	0.29	0.21
67	DŁUG.	13	17		401.63410	0.50	401.63418	0.32	0.08
68	DŁUG.	13	23		560.28030	0.50	560.28042	0.28	0.12
69	DŁUG.	14	16		748.38560	0.50	748.38495	0.34	-0.65
70	DŁUG.	14	17		703.79900	0.76	703.79953	0.46	0.53
71	DŁUG.	14	23		486.17400	0.81	486.17398	0.39	-0.02

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
72	DŁUG.	15	16		507.67830	0.50	507.67805	0.30	-0.25
73	DŁUG.	15	17		467.32400	0.50	467.32394	0.33	-0.06
74	DŁUG.	15	23		317.47650	0.50	317.47685	0.33	0.35
75	DŁUG.	16	17		158.03310	0.50	158.03351	0.30	0.41
76	DŁUG.	17	23		484.71320	0.50	484.71250	0.30	-0.70
77	DŁUG.	19	22		439.72590	0.50	439.72575	0.28	-0.15
78	DŁUG.	20	22		136.12260	0.50	136.12282	0.29	0.22
79	DŁUG.	20	23		276.69300	0.50	276.69351	0.28	0.51
80	DŁUG.	21	23		597.86170	0.50	597.86202	0.31	0.32
81	DŁUG.	22	23		377.21550	0.50	377.21544	0.29	-0.06
82	KIER.	17	13	PEK# 1	17.67068	2.48	17.67068	1.09	1.48
83	KIER.	17	14	PEK# 1	55.63718	2.48	55.63683	1.13	-2.06
84	KIER.	17	15	PEK# 1	60.87675	2.48	60.87686	1.04	2.53
85	KIER.	17	23	PEK# 1	104.10497	2.48	104.10477	0.99	-0.48
86	KIER.	17	4	PEK# 1	103.39569	2.48	103.39550	0.98	-0.45
87	KIER.	17	3	PEK# 1	111.52143	2.48	111.52108	1.00	-2.03
88	KIER.	17	16	PEK# 1	167.08059	2.48	167.08054	1.37	1.01
89	KIER.	16	13	PEK# 2	36.79718	2.48	36.79718	1.13	3.91
90	KIER.	16	14	PEK# 2	75.23347	2.48	75.23310	1.18	0.17
91	KIER.	16	15	PEK# 2	73.74435	2.48	73.74373	1.12	-2.32
92	KIER.	16	4	PEK# 2	118.21618	2.48	118.21560	1.07	-1.92
93	KIER.	16	3	PEK# 2	119.25394	2.48	119.25345	1.09	-1.01
94	KIER.	16	1	PEK# 2	171.68971	2.48	171.68944	1.49	1.18
95	KIER.	1	16	PEK# 3	0.00000	2.48	0.00000	1.47	-3.68
96	KIER.	1	17	PEK# 3	16.35750	2.48	16.35775	1.15	-1.14
97	KIER.	1	12	PEK# 3	45.27525	2.48	45.27601	1.10	3.97
98	KIER.	1	15	PEK# 3	87.64861	2.48	87.64882	1.12	-1.57
99	KIER.	1	14	PEK# 3	93.67844	2.48	93.67863	1.19	-1.80
100	KIER.	1	4	PEK# 3	132.86866	2.48	132.86945	1.15	4.22
101	KIER.	2	1	PEK# 4	0.00000	2.48	0.00000	1.89	2.81
102	KIER.	2	17	PEK# 4	63.09733	2.48	63.09677	1.89	-2.81
103	KIER.	3	2	PEK# 5	0.00000	2.48	0.00000	1.34	1.89
104	KIER.	3	16	PEK# 5	27.13332	2.48	27.13324	1.12	1.05
105	KIER.	3	17	PEK# 5	52.32109	2.48	52.32083	1.09	-0.70
106	KIER.	3	11	PEK# 5	92.18750	2.48	92.18744	1.15	1.33
107	KIER.	3	12	PEK# 5	101.57548	2.48	101.57527	1.08	-0.24
108	KIER.	3	13	PEK# 5	106.29779	2.48	106.29727	1.09	-3.33
109	KIER.	23	2	PEK# 6	0.00000	2.48	0.00000	1.20	2.99
110	KIER.	23	16	PEK# 6	17.64242	2.48	17.64235	1.09	2.27
111	KIER.	23	11	PEK# 6	78.51282	2.48	78.51247	1.13	-0.50
112	KIER.	23	13	PEK# 6	87.46199	2.48	87.46165	1.06	-0.39
113	KIER.	23	12	PEK# 6	85.28063	2.48	85.28010	1.06	-2.33

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
114	KIER.	23	15	PEK# 6	113.13932	2.48	113.13882	1.21	-2.04
115	KIER.	23	2	PEK# 7	0.00000	2.48	0.00000	1.80	-3.66
116	KIER.	23	17	PEK# 7	38.04131	2.48	38.04204	1.80	3.66
117	KIER.	4	2	PEK# 8	0.00000	2.48	0.00000	0.98	3.36
118	KIER.	4	1	PEK# 8	0.09154	2.48	0.09135	0.94	1.41
119	KIER.	4	3	PEK# 8	11.71290	2.48	11.71263	1.17	0.68
120	KIER.	4	16	PEK# 8	13.74831	2.48	13.74806	0.94	0.82
121	KIER.	4	17	PEK# 8	31.84816	2.48	31.84792	0.93	0.96
122	KIER.	4	11	PEK# 8	70.51940	2.48	70.51886	1.02	-2.03
123	KIER.	4	12	PEK# 8	76.15678	2.48	76.15623	0.95	-2.11
124	KIER.	4	13	PEK# 8	77.35290	2.48	77.35225	0.95	-3.10
125	KIER.	12	13	PEK# 9	0.00000	2.48	0.00000	1.53	3.43
126	KIER.	12	4	PEK# 9	5.09779	2.48	5.09714	1.02	-3.05
127	KIER.	12	23	PEK# 9	8.73687	2.48	8.73616	1.02	-3.63
128	KIER.	12	3	PEK# 9	18.16943	2.48	18.16885	1.02	-2.40
129	KIER.	12	1	PEK# 9	41.43912	2.48	41.43882	1.01	0.42
130	KIER.	12	17	PEK# 9	57.39388	2.48	57.39377	1.02	2.31
131	KIER.	12	11	PEK# 9	181.79895	2.48	181.79890	1.91	2.92
132	KIER.	13	15	PEK# 10	0.00000	2.48	0.00000	1.13	0.82
133	KIER.	13	23	PEK# 10	27.68141	2.48	27.68134	0.99	0.13
134	KIER.	13	3	PEK# 10	39.65445	2.48	39.65447	0.98	1.04
135	KIER.	13	1	PEK# 10	67.35531	2.48	67.35538	0.96	1.52
136	KIER.	13	16	PEK# 10	78.03456	2.48	78.03417	0.97	-3.07
137	KIER.	13	17	PEK# 10	91.82755	2.48	91.82764	0.99	1.68
138	KIER.	13	11	PEK# 10	205.29768	2.48	205.29760	1.44	0.03
139	KIER.	13	12	PEK# 10	216.76392	2.48	216.76362	1.64	-2.15
140	KIER.	15	16	PEK# 11	61.62112	2.48	61.62112	1.29	-2.47
141	KIER.	15	17	PEK# 11	81.67390	2.48	81.67421	1.28	0.66
142	KIER.	15	1	PEK# 11	47.21518	2.48	47.21565	1.30	2.24
143	KIER.	15	13	PEK# 11	146.64020	2.48	146.64040	1.39	-0.44
144	KIER.	7	8	PEK# 12	0.00000	2.48	0.00000	1.58	-0.21
145	KIER.	7	21	PEK# 12	16.22140	2.48	16.22124	1.44	-1.83
146	KIER.	7	22	PEK# 12	121.27459	2.48	121.27478	1.48	1.72
147	KIER.	7	23	PEK# 12	230.82277	2.48	230.82311	1.27	3.18
148	KIER.	7	4	PEK# 12	241.69349	2.48	241.69354	1.25	0.28
149	KIER.	7	19	PEK# 12	304.62775	2.48	304.62746	1.40	-3.13
150	KIER.	6	8	PEK# 13	0.00000	2.48	0.00000	1.51	2.90
151	KIER.	6	7	PEK# 13	28.66325	2.48	28.66287	2.13	-0.92
152	KIER.	6	4	PEK# 13	222.98263	2.48	222.98200	1.78	-3.38
153	KIER.	6	5	PEK# 13	280.86080	2.48	280.86065	1.80	1.40
154	KIER.	5	21	PEK# 14	75.85867	2.48	75.85867	1.26	-0.07
155	KIER.	5	8	PEK# 14	89.49568	2.48	89.49556	1.14	-1.31

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
156	KIER.	5	6	PEK# 14	133.33045	2.48	133.33059	1.44	1.37
157	KIER.	5	22	PEK# 14	137.17630	2.48	137.17633	1.13	0.27
158	KIER.	5	1	PEK# 14	147.70018	2.48	147.70015	1.12	-0.41
159	KIER.	5	2	PEK# 14	156.82933	2.48	156.82935	1.12	0.14
160	KIER.	19	8	PEK# 15	0.00000	2.48	0.00000	1.20	-0.36
161	KIER.	19	7	PEK# 15	28.66141	2.48	28.66148	1.19	0.38
162	KIER.	19	22	PEK# 15	36.47446	2.48	36.47427	1.16	-2.29
163	KIER.	19	1	PEK# 15	45.28325	2.48	45.28326	1.15	-0.30
164	KIER.	19	3	PEK# 15	79.83305	2.48	79.83320	1.16	1.13
165	KIER.	19	5	PEK# 15	89.01644	2.48	89.01662	1.92	1.44
166	KIER.	21	3	PEK# 16	0.00000	2.48	0.00000	1.35	0.15
167	KIER.	21	7	PEK# 16	3.50791	2.48	3.50805	1.29	1.53
168	KIER.	21	8	PEK# 16	11.86559	2.48	11.86552	1.43	-0.58
169	KIER.	21	5	PEK# 16	28.12945	2.48	28.12933	1.32	-1.10
170	KIER.	8	21	PEK# 17	0.00000	2.48	0.00000	1.81	2.68
171	KIER.	8	1	PEK# 17	131.41804	2.48	131.41808	0.98	3.04
172	KIER.	8	2	PEK# 17	151.56723	2.48	151.56724	0.94	2.75
173	KIER.	8	20	PEK# 17	152.79004	2.48	152.78929	1.14	-4.79
174	KIER.	8	7	PEK# 17	175.42141	2.48	175.42129	1.35	1.51
175	KIER.	8	3	PEK# 17	180.79321	2.48	180.79291	0.93	-0.27
176	KIER.	8	6	PEK# 17	192.87503	2.48	192.87508	1.19	3.19
177	KIER.	8	23	PEK# 17	197.76149	2.48	197.76103	0.94	-1.87
178	KIER.	8	5	PEK# 17	229.90115	2.48	229.90069	1.04	-1.88
179	KIER.	8	19	PEK# 17	251.38797	2.48	251.38727	1.13	-4.36
180	KIER.	4	21	PEK# 18	0.00000	2.48	0.00000	1.09	-0.84
181	KIER.	4	8	PEK# 18	2.22425	2.48	2.22420	0.95	-1.39
182	KIER.	4	6	PEK# 18	11.63764	2.48	11.63783	1.07	1.02
183	KIER.	4	7	PEK# 18	12.89551	2.48	12.89557	0.97	-0.20
184	KIER.	4	22	PEK# 18	43.78616	2.48	43.78629	0.98	0.50
185	KIER.	4	1	PEK# 18	53.62262	2.48	53.62303	0.96	3.23
186	KIER.	4	2	PEK# 18	53.53140	2.48	53.53168	0.96	1.98
187	KIER.	4	3	PEK# 18	65.24466	2.48	65.24431	1.17	-4.30
188	KIER.	23	21	PEK# 19	0.79355	2.48	0.79355	1.28	-1.78
189	KIER.	23	7	PEK# 19	8.48262	2.48	8.48284	1.21	0.40
190	KIER.	23	20	PEK# 19	27.08779	2.48	27.08812	1.22	1.55
191	KIER.	23	22	PEK# 19	45.23616	2.48	45.23644	1.19	1.00
192	KIER.	23	2	PEK# 19	54.50447	2.48	54.50453	1.21	-1.16
193	KIER.	3	4	PEK# 20	0.00000	2.48	0.00000	1.68	-0.30
194	KIER.	3	8	PEK# 20	111.32946	2.48	111.32934	1.54	-1.47
195	KIER.	3	2	PEK# 20	175.93983	2.48	175.94004	1.64	1.78
196	KIER.	2	3	PEK# 21	0.00000	2.48	0.00000	1.26	2.23
197	KIER.	2	23	PEK# 21	6.86287	2.48	6.86249	1.12	-1.61

Lp.	Pomiar	Od	Do	Nr pęku	Obs. [m]/ [g]	$m^{a\ priori}$ [mm] /[cc]	Obs. wyr. [m]/ [g]	$m^{a\ post}$ [mm] /[cc]	V [mm] / [cc]
198	KIER.	2	4	PEK# 21	12.34801	2.48	12.34733	1.08	-4.57
199	KIER.	2	5	PEK# 21	51.83093	2.48	51.83088	1.10	1.73
200	KIER.	2	20	PEK# 21	104.30351	2.48	104.30344	1.51	1.52
201	KIER.	2	8	PEK# 21	106.16369	2.48	106.16363	1.04	1.60
202	KIER.	2	22	PEK# 21	179.04308	2.48	179.04262	1.54	-2.37
203	KIER.	2	1	PEK# 21	212.72078	2.48	212.72070	1.70	1.47
204	KIER.	20	23	PEK# 22	75.14345	2.48	75.14345	1.56	-0.96
205	KIER.	20	8	PEK# 22	203.08306	2.48	203.08306	1.65	-1.00
206	KIER.	20	22	PEK# 22	332.03036	2.48	332.03062	1.71	1.68
207	KIER.	20	1	PEK# 22	358.42370	2.48	358.42382	1.58	0.28
208	KIER.	1	4	PEK# 23	0.00000	2.48	0.00000	1.23	-3.01
209	KIER.	1	5	PEK# 23	30.26244	2.48	30.26300	1.19	2.59
210	KIER.	1	19	PEK# 23	38.82780	2.48	38.82824	1.20	1.37
211	KIER.	1	20	PEK# 23	50.28766	2.48	50.28778	1.37	-1.85
212	KIER.	1	8	PEK# 23	73.57540	2.48	73.57579	1.19	0.90
213	KIER.	22	2	PEK# 24	0.00000	2.48	0.00000	1.33	1.00
214	KIER.	22	23	PEK# 24	18.55151	2.48	18.55177	1.06	3.62
215	KIER.	22	4	PEK# 24	23.55962	2.48	23.55932	1.07	-1.97
216	KIER.	22	5	PEK# 24	53.13557	2.48	53.13524	1.07	-2.28
217	KIER.	22	20	PEK# 24	57.29089	2.48	57.29063	1.39	-1.58
218	KIER.	22	19	PEK# 24	63.41513	2.48	63.41530	1.10	2.74
219	KIER.	22	7	PEK# 24	72.25010	2.48	72.24985	1.17	-1.53

Tabela 4.22. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne		Błędy współrzędnych i parametry elipsy błędów średnich					
Nr	X [m]	Y [m]	m_X [mm]	m_Y [mm]	m_P [mm]	a' [mm]	b' [mm]	$Az(a')$ [g]
1	33282.49450	81811.18080	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	33266.52672	81909.22267	0.20	0.26	0.33	0.26	0.20	95.37
3	33272.35914	82061.16512	0.21	0.30	0.37	0.30	0.21	107.97
4	33219.00233	82212.21113	0.04	0.25	0.26	0.26	0.00	110.00
5	33045.67682	82134.35752	0.38	0.34	0.51	0.43	0.27	42.84
6	33103.03407	82001.17961	0.30	0.38	0.48	0.38	0.29	87.27
7	33075.51619	81938.42474	0.29	0.33	0.44	0.33	0.29	104.05
8	32975.54720	81892.19521	0.26	0.38	0.46	0.39	0.25	113.59
11	34137.06116	81920.65603	0.38	1.04	1.11	1.07	0.29	84.92
12	33938.58949	82052.08871	0.23	0.65	0.70	0.66	0.23	105.41
13	33804.49295	82093.42543	0.26	0.54	0.60	0.54	0.25	107.18
14	33614.91615	82484.51860	0.75	0.55	0.93	0.88	0.28	162.14

15	33554.23958	82251.13886	0.41	0.39	0.57	0.49	0.28	153.54
16	33391.16006	81770.36649	0.33	0.26	0.42	0.33	0.26	199.02
17	33548.61742	81783.84874	0.30	0.36	0.46	0.39	0.26	66.13
19	32961.51287	82144.24156	0.39	0.44	0.59	0.53	0.27	56.16
20	33150.97232	81905.84390	0.28	0.28	0.40	0.29	0.27	152.96
21	32830.74396	81737.24660	0.58	0.63	0.86	0.79	0.35	145.88
22	33220.06328	81788.55852	0.36	0.30	0.47	0.37	0.29	23.67
23	33248.76204	82164.68067	0.28	0.31	0.42	0.31	0.28	119.88

4.2. Wyznaczenie przemieszczeń osnowy w okresie 2014-2015

Uzyskane w epoce aktualnej wyrównane współrzędne po odniesieniu ich do współrzędnych uzyskanych z pomiarów wcześniejszych, pozwalają na obliczenie zaistniałych przemieszczeń monitorowanych punktów osnowy.

Bazując na współrzędnych filarów obserwacyjnych z roku 2014 możliwe było wykonanie krótkookresowej analizy przemieszczeń zapory oraz otaczającego ją terenu.

Do wyznaczania przemieszczeń posłużono się opisywanymi wcześniej transformacjami poszukiwawczymi. Obliczenia wykonane zostały w programie realizującym dwuwymiarową transformację Helmerta, który jak pozostałe programy został udostępniony przez Katedrę Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa AGH.

Punktem wyjściowym transformacji było założenie, że wszystkie mierzone punkty mogą zostać przyjęte jako punkty dostosowania. W poszczególnych iteracjach odrzucano kolejne punkty, dla których obliczone według wzoru (2.36) przemieszczenie całkowite d_{Hz} było większe niż założona wartość 1 mm. Jednocześnie dopuszczano możliwość zaakceptowania takiego punktu dostosowania, dla którego d_{Hz} byłoby nieznacznie większe od 1 mm. Jednak ewentualność taka istniała jedynie w przypadku, gdy odrzucenie opisywanego punktu mogłoby spowodować zaburzenie geometrii całej sieci.

Poniżej przedstawiono parametry ostatecznej transformacji – wyznaczone ze wzorów na transformację 4-parametrową przez podobieństwo w ujęciu J. Ryšavego. Zgodnie z tym, co napisano wcześniej, podczas pierwszej iteracji jako punkty dostosowania przyjęto wszystkie punkty sieci pomiarowej, zaś podczas transformacji ostatecznej jedynie punkty: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16 oraz 20.

Tabela 4.23. Parametry transformacji dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne)

Translacja X	0.0011 m	
Translacja Y	0.0008 m	
Translacja wypadkowa	0. 00137 m,	w kierunku 39.909142 ^{g}
Kąt obrotu	– 0.000056381203 ^{g},	czyli 399.999943618797 ^{g}
Kąt obrotu	– 0.000000885634 rad,	czyli –0.886 $^{mm}/_{km}$
Skala	1.000004249578,	czyli 4.250 $^{mm}/_{km}$

Tabela 4.24. Współczynniki transformacji w ujęciu J. Ryšavego dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne)

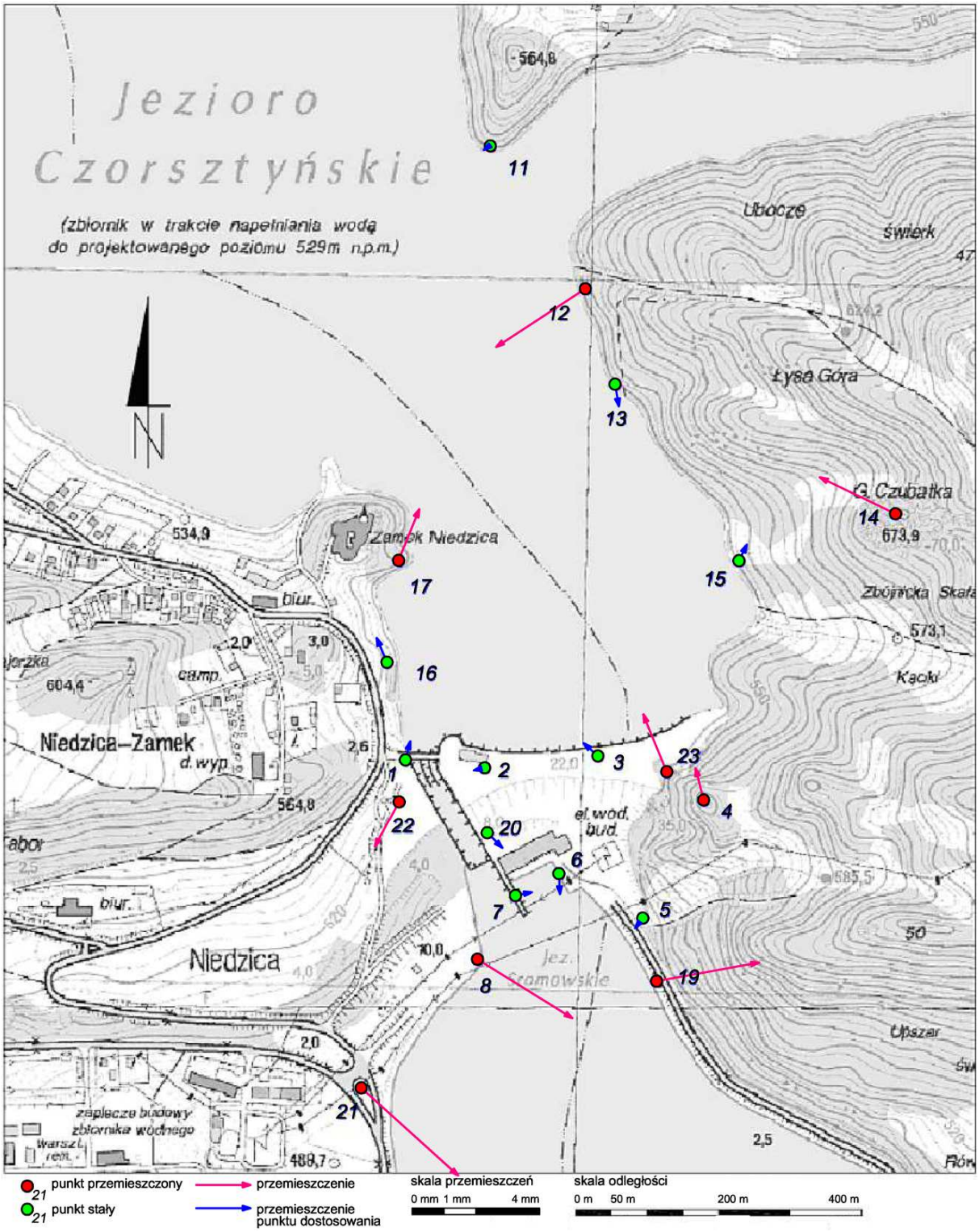
a	0.00111 m
b	0.00080 m
α	– 0.0000008856376359
β	0.0000042495778181

Na podstawie wyznaczonych parametrów transformacji obliczono aktualne współrzędne punktów po transformacji (współrzędne ostateczne na rok 2015) oraz rzeczywiste przemieszczenia tych punktów. Wyniki transformacji zaprezentowano w tabeli 4.25., przy czym symbolem „*” oznaczono punkty dostosowania.

Tabela 4.25. Wyniki ostatecznej transformacji dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne – układ aktualny po transformacji		Współrzędne – układ pierwotny		Przemieszczenie [mm]			$Az(d_{Hz})$ [g]	
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	dX	dY	d_{Hz}		
1	33282.4951	81811.1810	33282.4945	81811.1808	0.6	0.2	0.6	16.86	*
2	33266.5273	81909.2233	33266.5274	81909.2236	-0.1	-0.3	0.4	285.22	*
3	33272.3599	82061.1664	33272.3595	82061.1668	0.4	-0.5	0.6	346.05	*
4	33219.0030	82212.2131	33219.0020	82212.2133	1.0	-0.3	1.0	384.21	
5	33045.6767	82134.3593	33045.6770	82134.3595	-0.3	-0.2	0.4	240.91	*
6	33103.0341	82001.1807	33103.0347	82001.1807	-0.6	0.0	0.7	196.67	*
7	33075.5160	81938.4256	33075.5159	81938.4251	0.1	0.5	0.5	87.54	*
8	32975.5466	81892.1960	32975.5484	81892.1930	-1.9	3.0	3.5	135.37	
11	34137.0655	81920.6559	34137.0656	81920.6561	-0.1	-0.2	0.2	263.63	*
12	33938.5931	82052.0893	33938.5949	82052.0921	-1.8	-2.8	3.3	263.07	
13	33804.4960	82093.4263	33804.4967	82093.4262	-0.7	0.1	0.7	188.82	*
14	33614.9187	82484.5213	33614.9176	82484.5237	1.1	-2.4	2.6	328.47	
15	33554.2417	82251.1407	33554.2412	82251.1404	0.5	0.3	0.6	28.91	*
16	33391.1611	81770.3664	33391.1603	81770.3667	0.8	-0.3	0.8	374.64	*
17	33548.6191	81783.8486	33548.6175	81783.8479	1.6	0.7	1.7	24.32	
19	32961.5124	82144.2434	32961.5118	82144.2402	0.6	3.2	3.3	88.62	
20	33150.9724	81905.8446	33150.9729	81905.8441	-0.5	0.5	0.7	149.92	*
21	32830.7426	81737.2468	32830.7453	81737.2438	-2.8	3.0	4.1	146.72	
22	33220.0636	81788.5586	33220.0650	81788.5594	-1.4	-0.8	1.6	231.31	
23	33248.7628	82164.6824	33248.7610	82164.6831	1.8	-0.7	1.9	375.03	

Jak można zauważyć, punkty które nie zachowały stałości posiadają przemieszczenia rzeczywiste o wartościach od 1.0 mm do 4.1 mm. W celu lepszego zobrazowania przemieszczeń zaistniałych na badanym obszarze, wykonano mapę z wartościami i kierunkami przesunięć poszczególnych punktów (rys.4.2.). Punkty, które uznane zostały za stałe i włączone do grupy punktów odniesienia oznaczono kolorem zielonym, zaś te, które uległy przemieszczeniu – kolorem czerwonym. Aby bardziej uwidocznić występujące przemieszczenia narysowano je w skali 5:1. Dodatkowo, dla punktów uznanych za stałe, zaznaczono ich obliczone przemieszczenia. Wykonano to z zamierzeniem późniejszego porównania ich wartości i kierunków z przemieszczeniami, które zaobserwowano w ciągu ostatnich 10 lat.



Rys. 4.2. Przemieszczenia punktów w okresie 2014-2015 (źródło: opracowanie własne)

Jak można zauważyć na rys. 4.2. punkty osnowy znajdujące się na korpusie zapory i obszarze elektrowni nie wykazują przemieszczeń znaczących. Obliczone dla nich przesunięcia można z dużą pewnością uznać za zgodne z rzeczywistością, co związane jest z korzystnym usytuowaniem punktów w sieci – pomiar z równomiernie rozłożonych kierunków. Przeciwna sytuacja występuje w przypadku punktu nr 21 – na wyznaczoną

wartość przemieszczenia wpływ może mieć nie tylko rzeczywisty ruch punktu, ale także niekorzystne, skrajne położenie w sieci pomiarowej.

4.3. Wyznaczenie przemieszczeń osnowy w okresie 2005-2015

W celu wyznaczenia przemieszczeń długookresowych, w tym przypadku przemieszczeń, które zaszły w czasie 10 lat, wykorzystano ostateczne współrzędne filarów obserwacyjnych z roku 2015 oraz współrzędne z roku 2005.

Analogicznie do wyznaczeń wykonanych dla okresu 2014-2015, w pierwszej kolejności jako punkty dostosowania przyjęto wszystkie punkty podlegające pomiarowi w porównywanych latach. Posiłkując się wartościami d_{Hz} poszczególnych punktów, podczas kolejnych iteracji odrzucono wszystkie punkty odstające. Do ostatecznej grupy punktów dostosowania przyjęto tylko te punkty, dla których wartość d_{Hz} nie była większa niż 1 mm.

W poniższych tabelach przedstawiono parametry ostatecznej transformacji. Podczas ostatecznej iteracji skorzystano z jedynie 7-punktowej grupy punktów dostosowania – liczebność grupy jest o 4 punkty mniejsza niż w przypadku ostatecznej transformacji dla rocznego okresu czasu. Jako punkty stałe wybrano: 4, 6, 7, 12, 16, 17 oraz 23.

W przypadku, gdyby wykonywane obliczenia nie służyły jedynie dla celów niniejszej monografii, prawdopodobnie grupa punktów odniesienia byłaby liczniejsza o 4 punkty – 1, 19, 20 oraz 15, a obliczenia skończyłyby się po 10. iteracji. Jest to związane z tym, że punkt nr 1 nie powinien zostać usunięty z grupy punktów dostosowania ze względu na jego położenie na przyczółku zapory. W takim przypadku nie zostałby jednak zachowany założony warunek zaliczenia punktów do grupy punktów odniesienia. Zakończenie obliczeń po 10. iteracji w pewnym stopniu zmieniłoby wyznaczone parametry transformacji – głównie translację po osi X (0.00129 m) oraz kierunek translacji wypadkowej (94.698096 ^{g}).

Tabela 4.26. Parametry transformacji dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne)

Translacja X	0.00468 m	
Translacja Y	0.01508 m	
Translacja wypadkowa	0.01579 m,	w kierunku 80.837700 ^{g}
Kąt obrotu	0.000212766819 ^{g},	czyli 0.000212766819 ^{g}
Kąt obrotu	0.000003342133 rad,	czyli 3.342 $^{mm}/_{km}$
Skala	1.000077270839,	czyli 77.271 $^{mm}/_{km}$

Tabela 4.27. Współczynniki transformacji w ujęciu J. Ryšavego dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne)

a	0.00468 m
b	0.01508 m
α	0.0000033423916224
β	0.0000772708332415

Porównując parametry transformacji dla okresu rocznego i 10-letniego, zauważa się różnicę w wielkości translacji wypadkowej – nie jest to jednak dziwne biorąc pod uwagę, że w drugim przypadku analizujemy dłuższy czasookres. Zasadniczą jednak przyczyną jest przyjęcie innych współrzędnych przybliżonych na etapie wyrównania sieci, jednak w procesie badania stałości punktów współrzędne są jedynie wartościami pomocniczymi, a przyjęcie różnej orientacji układu współrzędnych nie ma wpływu na wyznaczane wartości przemieszczeń.

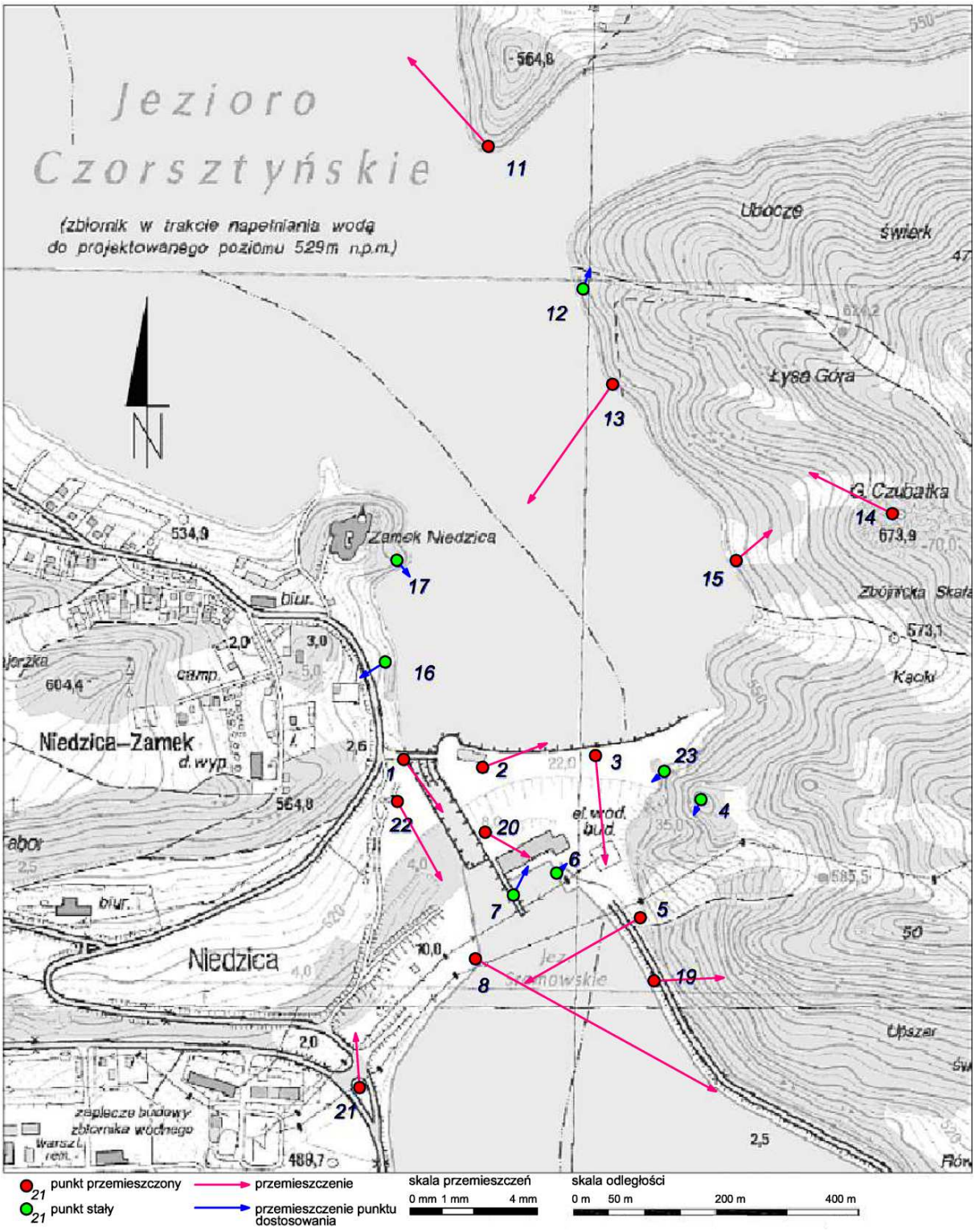
Na podstawie obliczonych parametrów transformacji wyznaczono rzeczywiste przemieszczenia filarów obserwacyjnych w okresie 10-letnim. Wyniki przeprowadzonej transformacji zaprezentowano w tabeli 4.28., przy czym symbolem „*” ponownie oznaczono punkty dostosowania.

Tabela 4.28. Wyniki ostatecznej transformacji dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne)

Punkt	Współrzędne – układ aktualny po transformacji		Współrzędne – układ pierwotny		Przemieszczenie [mm]			$Az(d_{Hz})$ [g]	
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	dX	dY	d_{Hz}		
1	33282.4943	81811.1820	33282.4960	81811.1808	-1.7	1.2	2.0	159.24	
2	33266.5250	81909.2319	33266.5242	81909.2298	0.8	2.0	2.2	77.30	
3	33272.3575	82061.1867	33272.3610	82061.1864	-3.4	0.3	3.4	194.10	
4	33218.9960	82212.2449	33218.9965	82212.2451	-0.5	-0.2	0.5	227.56	*
5	33045.6565	82134.3845	33045.6586	82134.3881	-2.1	-3.6	4.2	267.28	
6	33103.0188	82001.1959	33103.0185	82001.1956	0.3	0.3	0.4	52.77	*
7	33075.4988	81938.4358	33075.4979	81938.4354	0.9	0.5	1.0	30.05	*
8	32975.5218	81892.2023	32975.5260	81892.1947	-4.2	7.6	8.6	131.99	
11	34137.1304	81920.6683	34137.1276	81920.6708	2.8	-2.5	3.8	353.28	
12	33938.6422	82052.1112	33938.6416	82052.1110	0.6	0.2	0.7	21.61	*
13	33804.5346	82093.4510	33804.5384	82093.4536	-3.8	-2.7	4.6	239.13	
14	33614.9414	82484.5755	33614.9401	82484.5781	1.3	-2.6	2.9	329.09	
15	33554.2605	82251.1766	33554.2595	82251.1755	0.9	1.1	1.5	55.25	
16	33391.1688	81770.3647	33391.1693	81770.3655	-0.5	-0.8	0.9	264.62	*

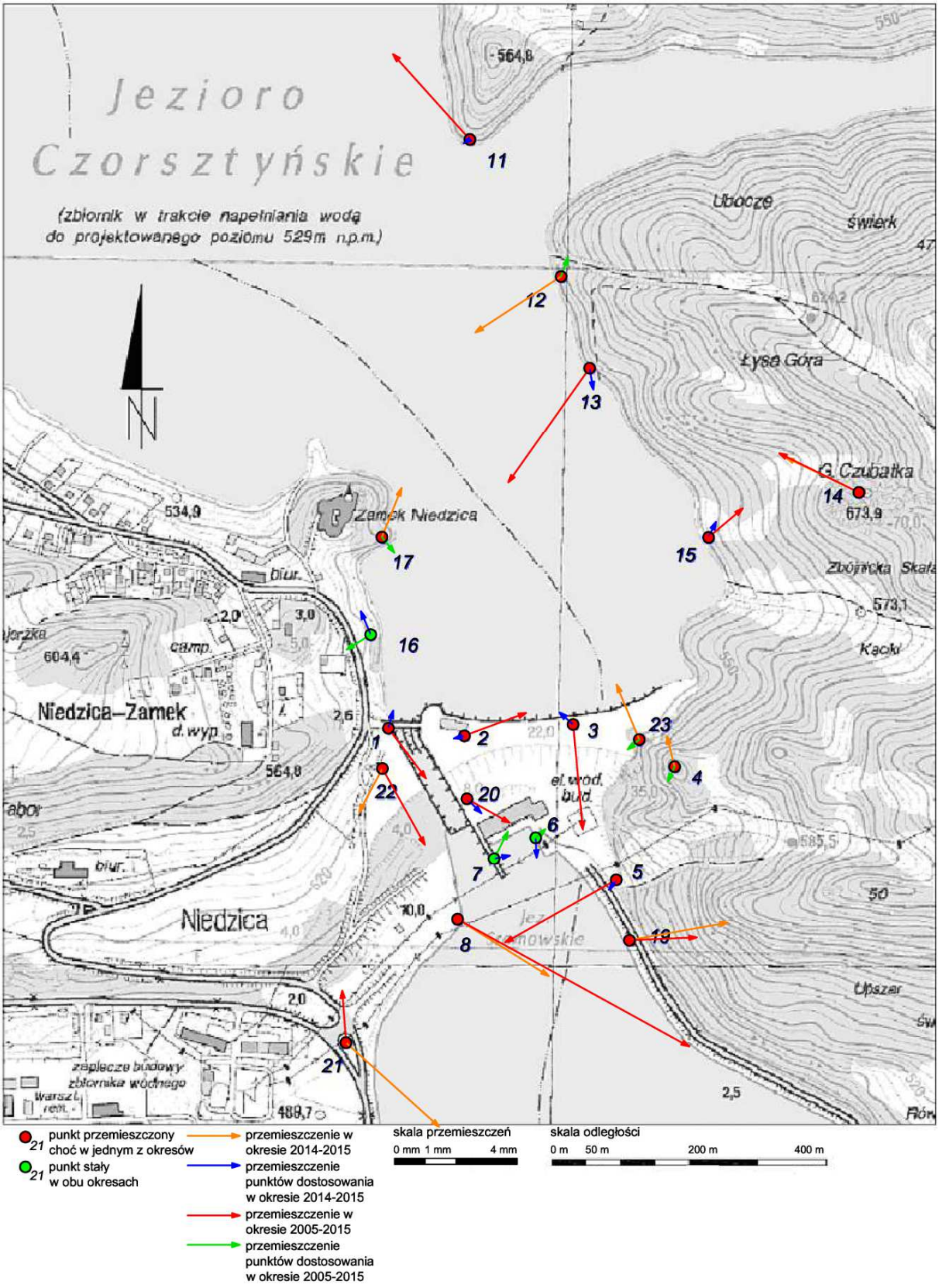
Punkt	Współrzędne – układ aktualny po transformacji		Współrzędne – układ pierwotny		Przemieszczenie [mm]			$Az(d_{Hz})$ [g]	
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	dX	dY	d_{Hz}		
17	33548.6390	81783.8484	33548.6395	81783.8480	-0.5	0.4	0.6	157.45	*
19	32961.4857	82144.2692	32961.4856	82144.2670	0.1	2.2	2.2	97.17	
20	33150.9612	81905.8525	33150.9620	81905.8511	-0.8	1.4	1.6	132.72	
21	32830.7071	81737.2407	32830.7054	81737.2408	1.7	-0.1	1.7	395.28	
22	33220.0581	81788.5578	33220.0606	81788.5564	-2.5	1.4	2.9	167.65	
23	33248.7582	82164.7106	33248.7586	82164.7110	-0.3	-0.4	0.5	255.10	*

Odwołując się do powyższej tabeli, zauważyć można bardziej zróżnicowane wartości przemieszczeń niż dla analizy okresu jednorocznego – z wyłączeniem przemieszczeń punktów dostosowania, występujący ruch punktów zawiera się w zakresie 1.5÷8.6 mm. Graficzną interpretację obliczonych przesunięć punktów przedstawiono na rys. 4.3., przy czym schemat oznaczeń zastosowano jak dla rys. 4.2.



Rys. 4.3. Przemieszczenia punktów w okresie 2005-2015 (źródło: opracowanie własne)

Dla lepszego zobrazowania i możliwości porównania wartości i kierunków przemieszczeń, w obu okresach pomiarowych, wszystkich filarów obserwacyjnych należących do monitorowanej sieci na rys. 4.4. wykonano złożenie tych wielkości.



Rys. 4.4. Porównanie przemieszczeń w okresie 2014-2015 oraz 2005-2015 (źródło: opracowanie własne)

Analizując informacje zawarte na rys. 4.4. można zauważyć, że punkty określone jako stałe w dwóch badanych czasookresach są różne. Dla przypomnienia, dla okresu 2014-2015 są to punkty nr 1, 2, 3, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16 oraz 20, zaś dla okresu 2005-2015 są to punkty nr 4, 6, 7, 12, 16, 17 oraz 23. Jak widać, jedynie trzy z wymienionych powyżej punktów uznano za stałe w obu okresach pomiarowych – są to punkty nr 6, 7 oraz 16. Na podstawie porównywanych danych można zatem stwierdzić, że są one stałe długookresowo.

Lewy brzeg zbiornika Czorsztyńskiego (punkty nr 11, 13, 15) podlega przemieszczeniom nawet do 4.5 mm, choć są to ruchy długoletnie. Podczas analizy jednorocznej punkty te przejawiały jedynie przemieszczenia resztkowe.

Warto zwrócić uwagę na ruch punktu nr 14 znajdującego się na górze Czubatka – wartości uzyskane w odniesieniu do pomiaru z roku poprzedzającego i pomiaru sprzed 10 lat wskazują na przemieszczenia podobnej wielkości, co może oznaczać pewne ruchy górotworu, które rozpoczęły się w ostatnim okresie. Jako poparcie tej tezy można wskazać dużą zbieżność wektorów przemieszczeń w obu analizowanych okresach – różnica kierunków jest mniejsza od 1^{g}.

Podobną sytuację można zauważyć w przypadku punktu nr 8 – różnica pomiędzy kierunkami przemieszczeń, jakie wystąpiły w okresie rocznym i dziesięcioletnim kształtuje się w granicy 3.5^{g}. Pozwala to wnioskować, że punkt ten przemieszcza się jednostajnym ruchem w kierunku jeziora.

Podczas rozpatrywania ruchu samego korpusu zapory, można zauważyć, że obecnie ruchy te są niewielkie, jednak w czasie ostatnich 10 lat niektóre punkty doznały przemieszczeń w granicach 3 mm (punkt nr 3) – w kierunku wody dolnej.

Godne uwagi są także punkty nr 23 i 4, które stricte nie należą do punktów na korpusie (punkty na górotworze), ale w przybliżeniu znajdują się w osi zapory. Zgodnie z rys. 4.2., w czasie ostatniego roku punkty te doznały przemieszczenia w kierunku wody górnej o wartości około 1 lub 2 mm, zaś w okresie 10 lat wykazują jedynie przemieszczenia resztkowe. Bardzo prawdopodobne jest, że przemieszczenia uzyskane w ostatnim okresie są wynikiem wpływu refrakcji na obserwacje, a nie rzeczywistym przemieszczeniem górotworu, na jakim punkty te się znajdują.

5. Podsumowanie i wnioski

Głównym celem monografii było przedstawienie całokształtu metod pomiarowych, jakie mogą zostać wykorzystane w celu wyznaczenia szeroko pojętych przemieszczeń zapór wodnych oraz terenu je otaczającego. Szczególnemu uwzględnieniu, zarówno teoretycznemu, jaki i praktycznemu, podlegały pomiary geodezyjne, a zwłaszcza zastosowanie w nich sieci pomiarowych. Poprzez wykonywanie wielu obserwacji nadliczbowych w tego typu strukturach, możliwe jest osiągnięcie wysokiej dokładności oraz wiarygodności uzyskanych wyników. Wykorzystanie w procesie obliczeniowym transformacji poszukiwawczych pozwala lepiej, niż w przypadku bezpośredniego porównania współrzędnych uzyskanych w poszczególnych epokach pomiarowych, odwzorować rzeczywiste przemieszczenia. Tym samym wyniki uzyskane tą metodą stanowią bardziej wiarygodne źródło informacji o stabilności obiektu.

Wykorzystane w przykładzie praktycznym dane pochodzące z pomiaru sieci geodezyjnej założonej dla zapory Czorsztyn-Niedzica pozwalają stwierdzić, że zarówno w okresie rocznym, jak i 10-letnim zaobserwowane przemieszczenia nie stanowią zagrożenia dla bezpieczeństwa obiektu – nie zaobserwowano występowania nadmiernych i nierównomiernych przemieszczeń, które mogłyby zagrozić stateczności zapory. Ważne jest jednak dalsze kontynuowanie pomiarów, aby na bieżąco monitorować przestrzenne zmiany badanego obszaru, a tym samym, dostarczać informacje dla ekspertów z innych dziedzin, którzy będą mogli podjąć ewentualne działania zaradcze.

6. Literatura

[1] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414 ze zm. (tekst jednolity Dz.U. 2016 nr 0 poz. 290)

[2] Ustawa z dnia 17 lipca 2001 r. Prawo wodne. Dz.U. 2001 Nr 115 poz. 1229 ze zm. (tekst jednolity Dz.U. 2015 poz. 469)

[3] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579

[4] Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2004). Projektowanie geotechniczne -- Część 1: Zasady ogólne

[5] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. 2012 poz. 463

[6] Budownictwo hydrotechniczne – Obciążenia budowli w obliczeniach statycznych. (1980). BN-67/8811-01 [online] http://bc.pollub.pl/dlibra/docmetadata?id=1405&from=pubstats [dostęp: 26.11.2016]

[7] Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zapory ziemne. Wytyczne projektowania. (1975). Warszawa: Wydawnictwo Katalogów i cenników.

[8] Bednarczyk S., Bolt A., Mackiewicz S. (2009). Stateczność oraz bezpieczeństwo jazów i zapór. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. ISBN 978-7348-264-7

[9] Bharat S., Varshney R. S. (1995). Engineering for embankment dams. Rotterdam: A. A. Balkema

[10] Bryś H. (1996). Geodezyjne pomiary przemieszczeń i odkształceń zapór wodnych. Kraków: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

[11] Czyżewski, K., i inni. (1973). Zapory ziemne. Warszawa: Wydawnictwo Arkady.

[12] Depczyński W., Szamowski A. (1999). Budowle i zbiorniki wodne. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 83-87012-66-1

[13] Dziewański J. (1998). Warunki geologiczno-inżynierskie podłoża Zespołu Zbiorników Wodnych Czorsztyn-Niedzica i Sromowce Wyżne im. Gabriela Narutowicza na Dunajcu. Studia, Rozprawy, Monografie. Kraków: IGSMiE PAN, ISSN 0860-7419

[14] Gocał J. (2010). Geodezja Inżynieryjno-Przemysłowa, część III. Kraków: Wydawnictwo AGH. ISBN 978-83-7464-327-6

[15] Kłopociński W. (1962). Geodezja w projektowaniu elektrowni wodnych. Warszawa: Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych

[16] Kondracki J., (2002). Geografia regionalna Polski. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN. s. 333-334, 353-357. ISBN 83-01-13897-1

[17] Lazzarini T., i inni. (1977). Geodezyjne pomiary przemieszczeń i odkształceń budowli i ich otoczenia. Warszawa: Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych.

[18] Płatek A. (1989). Geodezyjne pomiary przemieszczeń i badania odkształceń [w:] Geodezja inżynieryjno-przemysłowa; wykłady; część III, praca zbiorowa pod redakcją Franciszka Roli, wyd. 2 zm., skrypt uczelniany AGH nr 1146. Kraków

[19] Szydłowski M., red. (2003). Matematyczne modelowanie hydraulicznych skutków awarii zapór wodnych. Warszawa: Komitet Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk.
[20] Wiśniewski Z. (2009). Rachunek wyrównawczy z geodezji (z przykładami). Olsztyn: Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. ISBN83-7299-399-8
[21] Zuchlewicz W. (1989). Neotectonics versus gravity and crustal thickness: a case study of the Polish Flysh Carpathians, Tectonophysics 163 (1989). s.277-284
[22] Borecka A., Daniel W., Wasiluk R. (2011). Objaśnienia do Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1:10000, gm. Czorsztyn, pow. nowotarski, woj. małopolskie. [online] http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO [dostęp: 28. 11.2016]
[23] Centralna Baza Danych Geologicznych. [online] http://bazagis.pgi.gov.pl/website/cbdg/viewer.htm [dostęp: 26. 11.2016]
[24] Cholewicki A., Janowski R., Szulc J., Zembaty Z. (2007). Trzęsienia ziemi w Polsce w 2004 roku. Kraków: Czasopismo Techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. [online] https://suw.biblos.pk.edu.pl/resources/i2/i5/i9/r259/ZembatyZ_TrzesieniaZiemi.pdf [dostęp: 28. 11.2016]
[25] Dams Information. [online] www.ancold.org.au/?page_id=24 [dostęp: 03. 11.2016]
[26] Dobowe sejsmogramy z pionowych składowych stacji. [online] http://hp.igf.edu.pl/~pwiejacz/c/staindex-pol.php3 [dostęp: 29. 11.2016]
[27] International Commission on large dams. [online] http://www.icold-cigb.org/ [dostęp: 03. 11.2016]
[28] Jinping. [online] www.chincold.org.cn/dams/rootfiles/2010/07/20/1279253974067375-1279253974073905.pdf [dostęp: 03. 11.2016]
[29] Kasina M., Pociask-Karteczka J., Nieckarz Z. (2007). Tendencje występowania wysokich przepływów w dorzeczu Dunajca w II połowie XX wieku, Folia Geographica, ser. Geogr.-Phys., XXXV-XXXVI. s. 5-36. [online] http://www.geo.uj.edu.pl/foliageographica/index.php?id=2007&lang=0 [dostęp: 29. 11.2016]
[30] Kledyński, Z. Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych, cz.1. W: Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. Marzec-Kwiecień 2011. http://www.nbi.com.pl/assets/NBI-pdf/2011/2_35_2011/pdf/18_monitoring_budowli_hydrotechnicznych_kledynski.pdf [dostęp: 21. 11.2016]
[31] Nurek Dam In Tajikistan. [online] www.chincold.org.cn/dams/MilestoneProject/webinfo/2010/4/1281577326113569.htm [dostęp: 04.11.2016]
[32] Serwis Zespołu Elektrowni Wodnych Niedzica S.A. [online] http://www.zzw-niedzica.com.pl/ [dostęp: 16. 11.2016]
[33] Swissdams. [online] http://swissdams2.epfl.ch/index.php/fr/component/gmapfp/?view=gmapfp&start=108 [dostęp: 04. 11.2016]
[34] The world's oldest dams still in use. [online]

http://www.water-technology.net/features/feature-the-worlds-oldest-dams-still-in-use/ [dostęp: 04.11.2016]
[35] Zapora wodna. [online] www.pl.wikipedia.org/wiki/Zapora_wodna [dostęp: 03.11.2016]
[36] Zapory| Artykuły| Odnawialne Źródła Energii. [online] www.ioze.pl/energetyka–wodna/zapory [dostęp: 04.11.2016]
[37] http://en.iwpco.ir/Bakhtiari/ [dostęp: 04.11.2016]
[38] https://pl.wikipedia.org/wiki/Regionalizacja_fizycznogeograficzna_Polski#/media/File:Regiony_Kondrackiego-hipsometria.png [dostęp: 29.11.2016]
[39] http://static.panoramio.com/photos/large/59514028.jpg [dostęp: 04.11.2016]
[40] http://www.cggc.cc/attachement/jpg/site1/20141205/286ed488c7d515ebb8480b.jpg [dostęp: 04.11.2016]
[41] http://www.geografia24.eu/index.php?strona=120_mapa_polski [dostęp: 29.11.2016]
[42] www.swissinfo.ch/image/30361050/3x2/640/426/df922d4731fe7b65eaaf213f9adc4b72/Ht/9935460-30361066.jpg [dostęp: 04.11.2016]
[43] http://www.wild-heerbrugg.com/inside%20Leica%20TCA2003.htm [dostęp: 29. 11.2016]

Spis tabel

Tabela 1.1. Zagrożenia zapór betonowych (źródło: opracowanie własne na podstawie [3]) .. 18
Tabela 3.1. Parametry techniczne zapory ziemnej Czorsztyn-Niedzica (źródło: [32]) 52
Tabela 4.1. Statystyka wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków (źródło: opracowanie własne) 59
Tabela 4.2. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji kierunków (źródło: opracowanie własne) 60
Tabela 4.3. Wysokości punktów osnowy względem poziomu odniesienia (źródło: opracowanie własne) 61
Tabela 4.4. Statystyka wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości (źródło: opracowanie własne) 61
Tabela 4.5. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości (źródło: opracowanie własne) 62
Tabela 4.6. Statystyka ostatecznego wyrównania sieci poziomej zbudowanej z obserwacji odległości i kierunków (źródło: opracowanie własne) 62
Tabela 4.7. Współrzędne punktów sieci geodezyjnej aktualne na rok 2015 (źródło: opracowanie własne) 63
Tabela 4.8. Współrzędne wyjściowe do wyrównania sieci zbudowanej z kierunków (źródło: opracowanie własne) 64
Tabela 4.9. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne) 65
Tabela 4.10. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne) 65
Tabela 4.11. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane kierunki (źródło: opracowanie własne) 66
Tabela 4.12. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne) 69
Tabela 4.13. Współrzędne wyjściowe podczas wyrównania sieci zbudowanej z odległości (źródło: opracowanie własne) 70
Tabela 4.14. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne) 71
Tabela 4.15. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne) 71
Tabela 4.16. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane odległości (źródło: opracowanie własne) 72
Tabela 4.17. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne) 74
Tabela 4.18. Kierunki i odległości wykorzystane do łącznego wyrównania sieci (źródło: opracowanie własne) 75
Tabela 4.19. Wynik 1. iteracji (źródło: opracowanie własne) 81
Tabela 4.20. Wynik 2. iteracji (źródło: opracowanie własne) 81
Tabela 4.21. Ostateczne wyniki wyrównania – wyrównane odległości i kierunki (źródło: opracowanie własne) 82
Tabela 4.22. Wyniki ostatecznego wyrównania (źródło: opracowanie własne) 87
Tabela 4.23. Parametry transformacji dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne) .. 88
Tabela 4.24. Współczynniki transformacji w ujęciu J. Ryšavego dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne) 89
Tabela 4.25. Wyniki ostatecznej transformacji dla okresu 2014-2015 (źródło: opracowanie własne) 89

Tabela 4.26. Parametry transformacji dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne) ... 92
Tabela 4.27. Współczynniki transformacji w ujęciu J. Ryšavego dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne) ... 93
Tabela 4.28. Wyniki ostatecznej transformacji dla okresu 2005-2015 (źródło: opracowanie własne) ... 93

Spis rysunków

Rys. 1.1. Schemat wyboru rodzaju zapory w zależności od warunków terenowych (źródło: [8]) 8
Rys. 1.2. Zapora Nurek (źródło: [39]) 11
Rys. 1.3. Zapora Grande Dixence (źródło: [42]) 12
Rys. 1.4. Zapora Jinping–I (źródło: [40]) 12
Rys. 1.5. Podział zapór ziemnych ze względu na konstrukcję (źródło: opracowanie własne na podstawie [7]) 13
Rys. 1.6. Zapory ziemne bez elementów uszczelniających: a) jednorodna, b) strefowana – układ niesymetryczny, c) strefowana – układ symetryczny (źródło: [8]) 15
Rys. 1.7. Zapory ziemne z elementami uszczelniającymi: a) z ekranem z gruntu nieprzepuszczalnego, b) z ekranem z materiału sztucznego, c) z rdzeniem z gruntu nieprzepuszczalnego, d) z rdzeniem z materiału sztucznego (źródło: [8]) 16
Rys. 2.1. Piezometr otwarty (źródło: własne) 24
Rys. 2.2. Podział metod pomiaru przemieszczeń (źródło: opracowanie własne na podstawie [14]) 25
Rys. 2.3. Rozmieszczenie reperów kontrolowanych na korpusie zapory ziemnej (źródło: [14]) 26
Rys. 2.4. Schemat wyznaczania przemieszczeń poziomych metodą stałej prostej (źródło: [14]) 27
Rys. 2.5. Punkty występujące w sieciach pomiarowych (źródło: opracowanie własne na podstawie [17]) 28
Rys. 2.6. Sieć pełna (źródło: [17]) 30
Rys. 2.7. Sieć niepełna (źródło: [17]) 31
Rys. 2.8. Sieć powierzchniowa (źródło: [17]) 31
Rys. 2.9. Przymiar sztywny Huggenbergera (źródło: [14]) 32
Rys. 2.10. Szczelinomierz płaski (źródło: [17]) 33
Rys. 2.11. Wahadła pomiarowe: a) wahadło proste, b) wahadło dyferencyjne, c) wahadło odwrotne „mokre”, d) wahadło odwrotne „suche” (źródło: [14]) 34
Rys. 2.12. Pochyłomierz (źródło: opracowanie własne na podstawie [14]) 35
Rys. 2.13. Długość pozioma (źródło: opracowanie własne) 39
Rys. 2.14. Kierunek (źródło: opracowanie własne) 39
Rys. 2.15. Graficzna interpretacja przemieszczenia pozornego (źródło: opracowanie własne na podstawie [17]) 40
Rys. 2.16. Graficzna interpretacja transformacji wg J. Ryšavego (źródło: opracowanie własne na podstawie [17]) 42
Rys. 2.17. Graficzna interpretacja przemieszczenia punktu P (źródło: [17]) 43
Rys. 3.1. Umiejscowienie zapory na tle sieci rzecznej Polski (źródło: opracowanie własne na podstawie [41]) 45
Rys. 3.2. Charakterystyka przepływów Dunajca dla Zbiornika Czorsztyńskiego i Sromowieckiego w dniach 7–12 lipca 1997 roku (źródło: [32]) 46
Rys. 3.3. Lokalizacja zapory na tle regionów fizycznogeograficznych Polski (źródło: opracowanie własne na podstawie [38]) 47

Rys. 3.4. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych (źródło: opracowanie własne na podstawie [23]) 48
Rys. 3.5. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych na mapie geologicznej strukturalnej rejonu osi zapory czołowej w Niedzicy (źródło: opracowanie własne na podstawie [13]) 49
Rys. 3.6. Lokalizacja zapory na tle utworów geologicznych w przekroju poprzecznym (źródło: opracowanie własne na podstawie [13]) 50
Rys. 3.7. Lokalizacja osuwisk i terenów zagrożonych zsuwaniem w rejonie Jeziora Czorsztyńskiego (źródło: opracowanie własne na podstawie [23]) 51
Rys. 3.8. Profil poprzeczny przez zaporę w Niedzicy z uwzględnieniem elementów strukturalnych (źródło: opracowanie własne na podstawie niepublikowanych materiałów ZEW Niedzica S.A.) 53
Rys. 3.9. a) Schemat stabilizacji punktów sieci, b) sposób stabilizacji dla punktu nr 14 (po prawej) (źródło: [18] oraz własne) 55
Rys. 3.10. Lokalizacja punktów sieci z uwzględnieniem przynależności do podsieci (źródło: własne) 56
Rys. 4.1. Celowe pomiędzy punktami sieci pomiarowej (źródło: opracowanie własne) 58
Rys. 4.2. Przemieszczenia punktów w okresie 2014-2015 (źródło: opracowanie własne) 91
Rys. 4.3. Przemieszczenia punktów w okresie 2005-2015 (źródło: opracowanie własne) 95
Rys. 4.4. Porównanie przemieszczeń w okresie 2014-2015 oraz 2005-2015 (źródło: opracowanie własne) 96