

**Politechnika Warszawska**  
Wydział Geodezji i Kartografii

**Janina Zaczek-Peplinska**

**KONCEPCJA MODERNIZACJI  
KLASYCZNYCH SIECI POZIOMYCH  
DO WYZNACZANIA PRZEMIESZCZEŃ  
OBIEKTÓW HYDROTECHNICZNYCH**

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Promotor:**

**Prof. dr hab. inż. Witold Prószyński**

**Warszawa 2007**



*Promotorowi*

*Panu prof. dr hab. inż. Witoldowi Prószyńskiemu składam serdeczne podziękowanie za udzieloną pomoc, cierpliwość i życzliwość oraz za cenne i wnikliwe uwagi w trakcie pisania niniejszej rozprawy.*

*Panu dr inż. Pawłowi Popielskiemu serdecznie dziękuję za wspólną pracę i cenne uwagi.*

*Pracownikom Zakładu Geodezji Inżynieryjno-Przemysłowej bardzo dziękuję za życzliwą atmosferę i cenne uwagi.*

*Kierownictwu Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW dziękuję za udostępnienie materiałów i dokumentacji dotyczącej geodezyjnych pomiarów przemieszczeń.*

*Serdecznie dziękuję wszystkim, których nie wymieniłam, a którzy w jakikolwiek sposób przyczynili się do powstania niniejszej pracy.*



**SPIS TREŚCI**

1	Wprowadzenie.....	7
1.1	Wstęp.....	7
1.2	Bezpieczeństwo i kontrola obiektów hydrotechnicznych.....	9
1.3	Pomiary geodezyjne w Technicznej Kontroli Zapór (TKZ).....	13
1.4	Cel pracy.....	16
2	Modernizacja geodezyjnych sieci kontrolnych.....	20
2.1	Rys ewolucyjny sieci kontrolnych do badania przemieszczeń poziomych zapór wodnych.....	20
2.1.1	<i>Sieć trygonometryczna pełna</i> .....	21
2.1.2	<i>Sieć kątowno-liniowa</i> .....	23
2.1.3	<i>Sieć hybrydowa</i> .....	25
2.1.4	<i>Automatyczne pomiary kontrolne kątowno-liniowe</i> .....	29
2.2	Lokalizacja i zabudowa punktów sieci trygonometrycznych i kątowno-liniowych do badania przemieszczeń poziomych.....	33
2.3	Potrzeby modernizacji sieci kontrolnej.....	36
2.4	Cele i zakres modernizacji sieci kontrolnej.....	41
2.5	Podstawowe założenia i ograniczenia procesu modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej.....	44
2.5.1	<i>Podstawowe założenia procesu modernizacji</i> .....	44
2.5.2	<i>Ograniczenia dla modernizacji sieci geodezyjnych</i> .....	45
3	Możliwości wykorzystania metody elementów skończonych (MES) w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej.....	46
3.1	Podstawowe pojęcia z zakresu teorii MES.....	46
3.2	Przykłady zastosowań MES w hydrotechnice.....	53
3.3	Dokładność modelowania MES.....	60
3.4	Wyniki modelowania numerycznego a wyniki pomiaru geodezyjnego.....	65
3.5	Syntetyczny opis programu HYDRO-GEO.....	70
4	Uzupełnienie zbioru punktów kontrolowanych (celowników) na podstawie modelowania pracy sekcji zapory betonowej za pomocą MES.....	72
4.1	Opis problemu.....	72
4.2	Przygotowanie modeli numerycznych.....	75
4.3	Wskazanie nowych lokalizacji punktów kontrolowanych.....	81
5	Terenowa kontrola geodezyjnego pomiaru kontrolnego na podstawie wyników modelowania numerycznego – program własny SuDam.....	84
5.1	Opis problemu.....	84
5.2	Związek poziomu zwierciadła wody górnej (ZWG) ze wskazaniami czujników hydrotechnicznych.....	90
5.3	Baza Wiedzy o przemieszczeniach punktów kontrolnych obiektu.....	95
5.3.1	<i>Archiwalne wyniki pomiarów geodezyjnych</i> .....	95
5.3.2	<i>Wyniki modelowania numerycznego pracy obiektu</i> .....	96
5.3.3	<i>Prognozowanie przemieszczeń punktów kontrolowanych – współczynniki funkcji aproksymujących</i> .....	97
5.4	Algorytm kontrolny wykorzystujący funkcje aproksymujące.....	99
5.5	Algorytm kontrolny wykorzystujący modelowanie równoległe.....	103

5.6	Program ekspertowy SuDam (Survey of Dam) – opis i instrukcja użytkownika .....	106
5.6.1	Program ekspertowy .....	106
5.6.2	O programie SuDam .....	108
5.6.3	Tryby pracy programu SuDam.....	109
5.6.4	Parametry programu SuDam.....	111
5.6.5	Raport z pracy programu - wyniki .....	115
6	Syntetyczne ujęcie etapów modernizacji sieci kontrolnej.....	118
7	Projekt modernizacji sieci kontrolnej zapory besko.....	121
7.1	Opis obiektu .....	121
7.1.1	Zapora betonowa.....	121
7.1.2	Podłoże .....	123
7.1.3	Pomiary kontrolne zapory .....	124
7.1.4	Parametry materiałowe.....	125
7.2	Geodezyjna sieć pozioma do wyznaczania przemieszczeń.....	125
7.3	Pomiary GPS na punktach odniesienia .....	129
7.4	Model numeryczny MES pracy sekcji 6 zapory .....	136
7.5	Uzupełnienie zbioru celowników na ścianie odpowietrznej (od strony wody dolnej).....	143
7.5.1	Symulacja stanów awaryjnych konstrukcji .....	145
7.5.2	Analiza wielkości zmian przemieszczeń .....	147
7.6	Kontrola okresowego pomiaru geodezyjnego – pliki danych dla programu SuDam wykorzystującego wyniki modelowania MES .....	150
7.6.1	Pliki stanu odniesienia (pomiar kalibrujący) – dane uzyskane z OTKZ.....	151
7.6.2	Pliki parametrów funkcji modelujących (funkcji aproksymujących) .....	152
7.6.3	Pliki obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń (symulacja modelowania równoległego) .....	157
7.6.4	Pliki obserwacji aktualnych (kontrolowanych przy użyciu programu SuDam) – dane uzyskane z OTKZ.....	158
7.6.5	Wyniki kontroli obserwacji przy użyciu programu SuDam (raport). .....	161
8	Podsumowanie i wnioski.....	163
9	Literatura .....	166

# **1 WPROWADZENIE**

## **1.1 Wstęp**

Budowle piętrzące należą do najstarszych i największych obiektów inżynierskich na świecie, zarówno pod względem rozmiarów, jak i masy. Celowość budowy takich obiektów hydrotechnicznych wynika ze stale wzrastających potrzeb energetycznych oraz podstawowych zadań gospodarki wodnej makroregionu oraz kraju. Budowla hydrotechniczna, jaką jest zapora wodna wraz z urządzeniami towarzyszącymi, podlega statycznym i dynamicznym obciążeniom, których efektem jest powstawanie odkształceń i przemieszczeń elementów jej konstrukcji. Ze statystyk wynika, że na każde sto zapór w ciągu stu lat dwie ulegają katastrofie [ICOLD, 1995].

Rzeczywiste zachowanie się budowli piętrzącej można stwierdzić wyłącznie za pomocą specjalistycznej aparatury kontrolno-pomiarowej oraz precyzyjnych pomiarów geodezyjnych. Systematyczne pozyskiwanie, przetwarzanie i analizowanie informacji pomiarowych umożliwia stałą kontrolę charakterystyk przestrzennych oraz wyznaczanie bieżących zmian parametrów geometrycznych zapory. W przypadku przekroczenia projektowych wartości granicznych pozwala to na rozpoczęcie działań mających na celu zapobiegnięcie ewentualnej katastrofie, uruchomienie systemów ostrzegawczych lub sygnalizacji alarmowej.

Stan techniczny, a tym samym bezpieczeństwo przeważającej liczby budowli piętrzących w kraju, z uwagi na ich wiek przekraczający 50 lat oraz malejące nakłady finansowe na ich remonty i efektywną konserwację, wymaga zwiększonego nadzoru i kontroli. Dla tych obiektów ważnym zagadnieniem staje się modernizacja geodezyjnej sieci kontrolnej - często nie odnawianej od momentu oddania obiektu do eksploatacji.

Geodezyjne pomiary przemieszczeń poziomych punktów kontrolnych konstrukcji zapory i jej najbliższego otoczenia należą do szerokiego wachlarza pomiarów obowiązkowych wykonywanych w celu zapewnienia bezpieczeństwa budowli piętrzącej. W zależności od klasy obiektu, podłoża gruntowego, na którym jest on posadowiony, konstrukcji obiektu oraz jego zachowania się w poprzednich okresach eksploatacyjnych precyzyjne pomiary geodezyjne przemieszczeń wykonywane są dwa (najczęściej wiosną i jesienią), cztery lub więcej razy w ciągu roku.

W celu wieloletnich, precyzyjnych obserwacji budowli i obiektów inżynierskich zakładane są sieci trygonometryczne pełne. Sieci te składają się z punktów odniesienia usytuowanych poza zasięgiem oddziaływania badanego obiektu oraz z punktów

kontrolowanych umieszczonych na elementach konstrukcji badanego obiektu. Do niedawna sieci te były typowymi sieciami kątowymi, a wyznaczenie przemieszczeń punktów kontrolowanych opierało się na obserwacji zmian kierunków do celowników między kolejnymi pomiarami okresowymi. Wraz z rozwojem metod pomiaru odległości i wzrostem dokładności tego typu pomiarów wprowadzono je do pomiarów istniejących sieci przekształcając je w sieci kąto-liniowe i podnosząc wiarygodność oraz dokładność uzyskiwanych wyników. Obecnie dysponujemy coraz nowocześniejszymi technologiami pomiarowymi (np. satelitarne pomiary GPS) i metodami obliczeniowymi (np. szeroko-pojęte metody modelowania numerycznego). Naturalne jest korzystanie w procesie oceny bezpieczeństwa obiektów hydrotechnicznych z ostatnich osiągnięć nauki i techniki, co jest możliwe poprzez modernizację istniejących systemów kontrolnych. Przeprowadzona w sposób planowy modernizacja geodezyjnej sieci kontrolnej może przyczynić się do większej wiarygodności i niezawodności wyników geodezyjnych pomiarów przemieszczeń punktów kontrolowanych budowli hydrotechnicznej.

O stopniu wiarygodności wyników badań przemieszczeń decydują głównie takie czynniki, jak: lokalizacja i stabilizacja punktów sieci, dokładność pomiarów geodezyjnych, moment i czas trwania pomiarów (zaplanowanie terminu pomiarów oraz ustalenie spodziewanych w tym czasie warunków atmosferycznych), stałość układu odniesienia, wykorzystane algorytmy obliczeniowe i sposoby opracowania wyników pomiarów. Wszystkie wymienione elementy sieci geodezyjnej powinny być brane pod uwagę w procesie przeprojektowywania/modernizacji sieci kontrolnej.

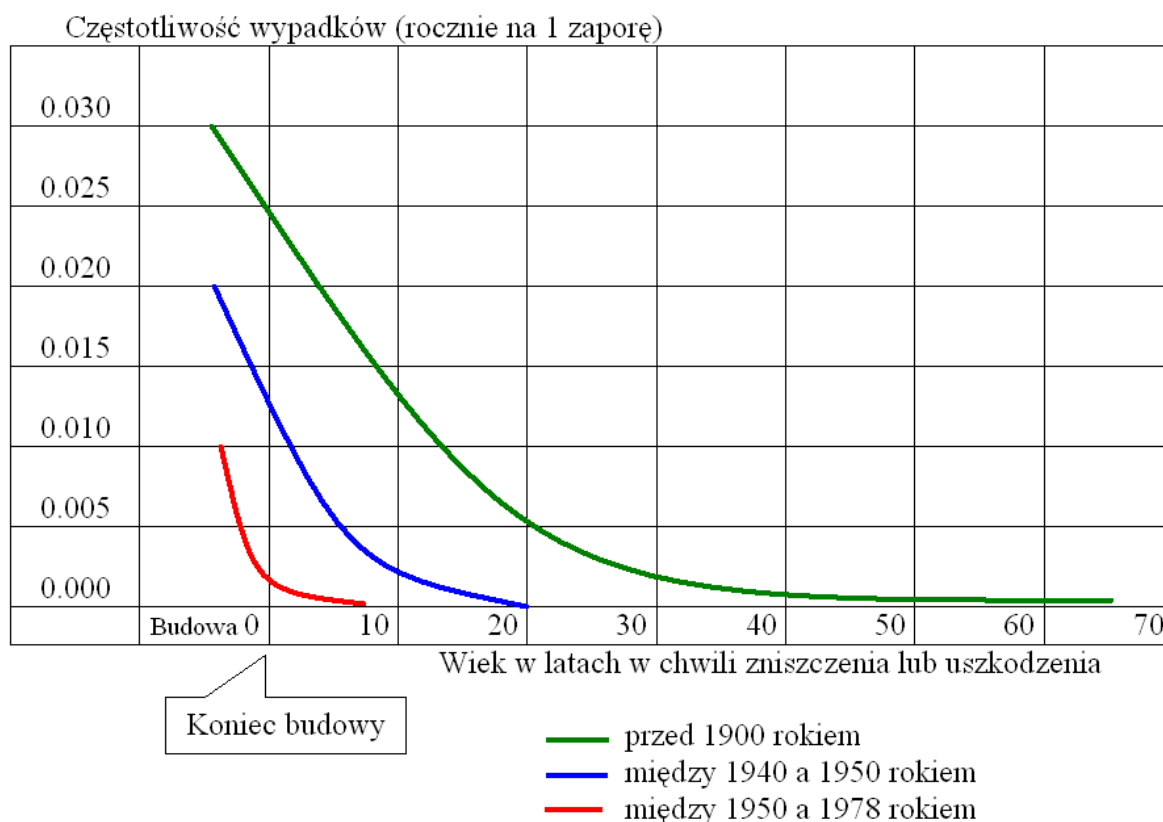
Niniejsza praca zwraca uwagę na obecne potrzeby modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej, potrzeby wynikające nie tylko ze stanu obecnego urządzeń kontrolnych zaprojektowanych i zainstalowanych wiele lat temu na eksploatowanych obiektach, ale też potrzeb związanych z dostosowywaniem sieci do coraz bardziej nowoczesnych technologii pomiarowych i obliczeniowych wykorzystywanych we współczesnej geodezji inżynierskiej. Ważne także jest podejście Władz Państwowych do kontroli obiektów hydrotechnicznych. Ustawodawcy poprzez wydawane akty prawne kładą szczególny nacisk na bieżącą i stale rozwijaną kontrolę obiektów istniejących. W najnowszym Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać budowle techniczne i ich usytuowanie z 20 kwietnia 2007r. [1, dział VII, rozdział 5, § 118] możemy przeczytać: „budowle hydrotechniczne i ich otoczenie wyposaża się w urządzenia do kontroli stanu technicznego przez cały okres użytkowania, od momentu rozpoczęcia budowy”, co można



interpretować jako wskazanie do ciągłej rozbudowy - modernizacji systemu kontrolnego obiektu hydrotechnicznego.

## 1.2 Bezpieczeństwo i kontrola obiektów hydrotechnicznych.

Zapory i zbiorniki wodne budowano od czasów starożytnych dla celów zaopatrzenia w wodę miast, ochrony przed powodzią oraz dla potrzeb rolnictwa. Zapory wznoszono ze wszystkich dostępnych materiałów – kamienne, murowane i ziemne. Jednak dopiero w ostatnim stuleciu konstruowanie zapór bazuje na coraz lepszej wiedzy o zachowaniu się materiałów, z których są one wznoszone. Spowodowało to zarówno znaczne zmniejszenie się liczby awarii lub katastrof tego typu obiektów – (Rys. 1) [Londe, 1981], coraz powszechniejsze ich wznoszenie, oraz projektowanie obiektów coraz większych, wyżej piętrzących wodę.



Rys. 1 Częstotliwość występowania awarii zapór w zależności od ich wieku (wg [Londe,1981])

W materiałach Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór (International Commission on Large Dams – ICOLD) opublikowanych w roku 1973 [ICOLD, 1973] opracowano statystycznie większość awarii lub katastrof zapór. Pozwoliło to na stwierdzenie, że około 1/3 tego typu zdarzeń powstała z powodu błędów konstrukcyjnych, 1/3 spowodowana była

nieprawidłową eksploatacją a pozostała 1/3 przelaniem się wody przez koronę zapory. W ostatnich dziesięcioleciach proporcje te radykalnie się zmieniły. Przelanie się wody przez koronę zapory oznaczające jej zniszczenie i poważną katastrofę zdarza się obecnie niezmiernie rzadko, z reguły tam, gdzie podczas projektowania zapory dysponowano słabym rozpoznaniem hydrologicznym, bądź charakterystyka zlewni zmieniła się znacznie po wybudowaniu zapory. Również błędy konstrukcyjne wraz z postępem metod projektowania są rzadsze i z reguły eliminowane podczas wznoszenia obiektów. Najpoważniejszą, zatem przyczyną występowania awarii lub katastrof zapór jest nieprawidłowa eksploatacja połączona z pewnymi, na ogół trudnymi do wcześniejszego wykrycia błędami w projekcie lub wykonawstwie. Dotyczy to zarówno zaniedbań w prowadzeniu konserwacji i bieżących remontów obiektów, jak niedostatecznej bieżącej kontroli ich stanu technicznego pozwalającej na jak najwcześniejsze zaobserwowanie niepokojących zjawisk, mogących w konsekwencji doprowadzić do poważnej awarii.

W 1995 r. Międzynarodowa Komisja Wielkich Zapór opublikowała Biuletyn nr 99 „Katastrofy zapór – analiza statystyczna” [ICOLD, 1995] obejmujący katastrofy zapór na świecie, z wyłączeniem Chin, z uwagi na brak wiarygodności danych uzyskanych z tego kraju. Generalne wnioski z tej analizy są następujące [Fiedler i inni, 2007]:

1. W ciągu ostatnich 40 lat zagrożenie katastrofą zmalało: ze wszystkich zapór wybudowanych przed r. 1950 zniszczeniu uległo 2,2%, natomiast wśród wybudowanych od r. 1951 – zaledwie 0,5%.
2. W liczbach bezwzględnych większość katastrof dotyka zapór mniejszych, które stanowią zdecydowaną większość wznoszonych budowli. Natomiast wartość ilorazu: **zniszczone zapory o wysokości H / wybudowane zapory o wysokości H**, zmienia się w niewielkim stopniu wraz z wysokością H.
3. Większość katastrof dotyczy zapór niedawno wybudowanych – 70% katastrof następuje w ciągu pierwszych 10 lat, a najczęściej w pierwszym roku eksploatacji.
4. Po kilkudziesięciu (40-50) latach eksploatacji liczba katastrof ponownie wzrasta wskutek starzenia się budowli.
5. Największą (procentowo) liczbę katastrof zanotowano w grupie zapór wybudowanych w dziesięcioleciu 1910-1920.

W Polsce posiadamy 174 obiekty piętrzące wodę zaliczane, wg obowiązującej od 3 kwietnia 1997 roku klasyfikacji ważności, do klas od I do III, których katastrofa pociągnie za sobą istotne zniszczenia materialne oraz zagrazi życiu i zdrowiu wielu ludzi. Również wobec

stale postępującej urbanizacji kraju, awaria szeregu obiektów IV klasy ważności (piętrzących wodę poniżej 10 lub 5 m w zależności od typu podłoża), może przynieść znaczne straty ludzkie i materialne, czego przykładem może być powódź w lecie 1997 r. Obiektów wodnych IV klasy mamy w Polsce około 650.

Głównymi użytkownikami obiektów piętrzących wodę są Okręgowe Dyrekcje Gospodarki Wodnej, Zakłady Energetyczne, Zespoły Elektrowni Wodnych, Elektrownie Pompowe S.A.

W Polsce bezpieczeństwem budowli piętrzących zajmuje się od 1973 roku Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW). Służbę Technicznej Kontroli Zapór (TKZ) Instytutu działającą głównie dla potrzeb Ministerstwa Środowiska reprezentuje Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór (OTKZ). Ośrodek skupia kadre inżynierską z różnych specjalności (hydrotechnika, geotechnika, geologia, geodezja, informatyka, matematyka i inne) niezbędnych dla wykonania właściwych ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli piętrzących. W ramach rocznych umów na pełnienie Służby Technicznej Kontroli Zapór Ośrodek wykonuje pomiary, badania, ekspertyzy oraz oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli piętrzących będących w zarządzie Regionalnych Zarządów Gospodarki Wodnej a także innych użytkowników, oraz wykonuje roczne raporty o stanie technicznym i bezpieczeństwie budowli piętrzących w Polsce. Ośrodek prowadzi od wielu lat bazy danych obiektów piętrzących. Wymienioną działalność Ośrodka TKZ realizuje 8 pracowni tematycznych, w tym Pracownia Pomiarów Przemieszczeń, której pracownicy wykonują precyzyjne geodezyjne pomiary przemieszczeń zapór.

Wg badań i ocen stanu technicznego budowli piętrzących w Polsce wykonywanych przez Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór IMGW [Raport1] głównymi przyczynami uszkodzeń i zagrożeń budowli wodnych jest ich starzenie się i oddziaływanie sił przyrody, potęgowane niejednokrotnie przez niedostateczne rozpoznanie geologiczne i hydrologiczne podłoża, błędy w projektowaniu, słaba jakość wykonawstwa, niekonsekwentna realizacja programów zabudowy rzek, opóźnienia w podejmowaniu prac remontowych. Na zwiększenie możliwości pojawienia się zagrożeń istotny wpływ ma wzrost wielkości fal powodziowych, wywołany postępującym rozwojem gospodarczym i urbanizacją w rejonach zlewni. Spowoduje to dla niektórych obiektów konieczność zwiększenia przepustowości urządzeń służących do przepuszczania wody i przygotowania dolnych stanowisk do przyjęcia przepływów o większym natężeniu. Należy przypuszczać, że poddanie takim obciążeniom starych budowli piętrzących wodę może spowodować konieczność przebudowy dolnych stanowisk i części urządzeń upustowych, a co za tym idzie modernizację systemów

pomiarowo-kontrolnych obiektów uwzględniającą zmiany w obserwowanej kontrolnej sieci geodezyjnej.

Problem uszkodzeń spowodowanych starzeniem się zapór dotyczy większości rozpatrywanych w raportach Ośrodka TKZ obiektów piętrzących. Spośród obiektów ocenianych w 2001 roku, na których wystąpił niedostateczny stan techniczny ponad połowa przekroczyła 50 lat eksploatacji, a ponad 10% 25 lat swego funkcjonowania, co w warunkach polskich, z uwagi na niski poziom wykonawstwa, jest równoznaczne z wejściem w okres intensywnych prac remontowych, spowodowanych starzeniem się budowli i ich elementów. Niepokojącym jest jednak fakt, że zły stan techniczny odnotowano na obiektach, których wiek nie przekroczył 25 lat. W Tabeli 1.1 przedstawiono wykaz wieku obiektów piętrzących wodę użytkowanych w resorcie Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa (MOŚZNiL) wg stanu na 2001 rok. [Raport2].

Na podstawie „Raportów o stanie technicznym i bezpieczeństwie budowli piętrzących wodę w Polsce” wykonywanych corocznie przez Ośrodek TKZ można stwierdzić, że stan techniczny urządzeń kontrolno-pomiarowych zainstalowanych i użytkowanych na wielu obiektach jest niedostateczny. Dla przykładu w roku 1998 taki stan odnotowano w 36 przypadkach co stanowi 20,1% całości rozpatrywanych obiektów. Chodzi tu głównie o wymianę uszkodzonych reperów, piezometrów, o stabilność wskazań sieci kontrolno-pomiarowych (stałość punktów odniesienia) i dla stosunkowo dużej ilości o założenie nowej lub wzmocnienie istniejącej sieci pomiarowo-kontrolnej. Wszystkie wymienione wyżej prace dotyczące kontrolnej sieci geodezyjnej można wykonać w ramach modernizacji sieci, modernizując jeden lub więcej elementów sieci w zależności od potrzeb i środków finansowych przewidzianych przez użytkownika/właściciela obiektu na ten cel.

Wiek obiektu (lata)	Liczba obiektów (%)
0-5	3
6-10	8
11-15	9
16-20	8
21-24	6
25	1
26-30	4
31-50	11
50-100	32
>100	18

Tabela 1 Wykaz wieku obiektów piętrzących wodę użytkowanych w resorcie MOŚZNiL objętych raportem o stanie ich bezpieczeństwa w roku 2001.

Bezpieczeństwo budowli wodnych w trakcie eksploatacji zależy od prawidłowej realizacji wielu przedsięwzięć technicznych i rozwiązania problemów pomiarowych, takich jak:

- właściwa analiza zachowania się konstrukcji budowli wodnej podczas jej pracy,
- kontrola procesu starzenia się budowli wodnej lub kontrola uszkodzenia przeprowadzona tak, aby zawnazsu można było podjąć najodpowiedniejsze kroki i prace zapobiegawcze,
- sygnalizacja pojawienia się nieoczekiwanych zagrożeń,
- kontrola oraz obserwacja zmian zachodzących w górnym i dolnym stanowisku budowli wodnej.

### **1.3 Pomiary geodezyjne w Technicznej Kontroli Zapór (TKZ)**

Kompleksowa kontrola techniczna zapór wodnych obejmuje następując podstawowe zakresy:

- kontrolę wszystkich urządzeń eksploatacyjnych, której celem jest ocena prawidłowego funkcjonowania wraz z systematyczną konserwacją mechanizmów upustu dennego oraz przelewu powierzchniowego,
- kontrolę wizualną, której celem jest systematyczna obserwacja samej zapory wraz z jej galeriami, szybkami, sztolniami, zboczami zbiornika oraz przedpola od strony odpowietrznej. Wyniki obserwacji wizualnych dokumentowane są w specjalnych protokołach obchodu. W szczególności istotne są zauważone rysy, szczeliny, przecieki wody, abrazja zboczy i brzegów zbiornika, wypłukiwanie materiału spod zapory (zjawisko sufozji) itp. W celu umożliwienia porównań wykonywane są często zdjęcia fotogrametryczne odpowiednio udokumentowane częścią opisową,
- kontrolę pomiarowo-techniczną, której zadania służą dwóm zasadniczym celom:
  - I. kontroli i porównywaniu parametrów projektowych w początkowych latach eksploatacji (wartości obliczonych i zaobserwowanych przemieszczeń poziomych i pionowych, wychyleń korpusu zapory, zmian rozwartości szczelin dylatacyjnych, zmian pochyleń sekcji betonowych),
  - II. rejestracji wszelkich zmian zachodzących w budowli oraz w przestrzeni posadowienia w całym okresie eksploatacji.

Zakres działań pracowni Pomiarów Przemieszczeń Ośrodka TKZ obejmuje:

- opracowywanie projektów wyposażania obiektów hydrotechnicznych w aparaturę kontrolno-pomiarową do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń,
- projektowanie sieci geodezyjnych w zakresie:
  - ◆ rozmieszczenia punktów kontrolnych na badanych obiektach,
  - ◆ rozmieszczenia i stabilizacji punktów odniesienia,
- kompleksowe i precyzyjne pomiary metodami geodezyjnymi sieci do wyznaczania bezwzględnych przemieszczeń dużych obiektów inżynierskich i ich otoczenia, w tym:
  - ◆ wyznaczanie przemieszczeń pionowych,
  - ◆ okresowe pomiary metodą niwelacji precyzyjnej,
  - ◆ wyznaczanie przemieszczeń poziomych,
  - ◆ okresowe pomiary kątowno-liniowe,
- komputerowa obróbka danych pomiarowych, analiza i geometryczna interpretacja wielkości przemieszczeń,
- inwentaryzacja budowli hydrotechnicznych, plany sytuacyjno-wysokościowe, dokumentacja fotograficzna.

Zarówno pomiary geodezyjne jak i fizyczne wymagają systemowego i planowego przygotowania. Projekt zabudowy elementów dla przyszłych geodezyjnych pomiarów odkształceń i przemieszczeń opracowuje się równoległe z projektem budowlanym, który musi uwzględniać wszystkie urządzenia, aparaturę i przyrządy pomiarowe, nisze i ich zabudowę, szybiki pionowe, galerie kontrolno-pomiarowe, stabilizacje znaków osnowy geodezyjnej (poziomej i pionowej), lokalizację punktów kontrolowanych na ścianie strony odpowietrznej oraz wewnątrz zapory, jak również przebieg magistrali telemetrycznej z elementami komunikacji automatycznego systemu kontrolno-pomiarowego.

Wybór metod pomiarowych oraz rozmieszczenie i rodzaj stabilizacji punktów pomiarowych uzależnione są od specyfiki danego obiektu piętrzącego, jego rozmiarów oraz od postulowanej dokładności pomiarów, ustalanej dla każdej zapory indywidualnie przez Komisję Ekspertów lub przez Zespół Ekspertów z Ośrodka TKZ w Warszawie.

Punkty geodezyjnej sieci kontrolnej (repery, celowniki, bolce luster) powinny być rozmieszczone w taki sposób, aby wyznaczone przemieszczenia jak najlepiej obrazowały przemieszczenia elementów konstrukcji obiektu, jednocześnie lokalizacja tych punktów powinna spełniać następujące warunki:

- dojście do nich powinno być bezpieczne i wygodne,
- możliwość prowadzenia obserwacji w każdych warunkach i w dowolnej chwili,
- zapewnienie pełnego bezpieczeństwa w czasie prowadzenia obserwacji,
- zainstalowane urządzenia kontrolno-pomiarowe oraz wykonywanie obserwacji nie może kolidować z normalną eksploatacją obiektu,
- możliwość wzajemnego uzupełniania pomiarów.

Liczba i rodzaj punktów kontrolnych powinna być dopasowana do istniejących warunków hydrologicznych, geologicznych i geotechnicznych oraz do opracowanego numerycznego modelu obliczeniowego wartości przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, filtracji itp.

Prawidłowo zorganizowane obserwacje geodezyjne tych obiektów dostarczają niezbędnych danych do branżowych interpretacji wyników tych pomiarów. Interpretacje takie stanowią podstawę do oceny stanu bezpieczeństwa tych budowli. Należy zwrócić uwagę na fakt, że na merytoryczną wartość wyników geodezyjnych pomiarów przemieszczeń mogą wpływać określone czynniki związane z procesem pomiarowym, mogą one mieć charakter błędów systematycznych i przypadkowych, trudnych do jednoznacznego rozpoznania. Istotne są przede wszystkim takie elementy procesu pomiarowego jak:

- czas rozpoczęcia pomiarów geodezyjnych oraz interwał czasowy między poszczególnymi pomiarami kontrolnymi,
- data samego pomiaru okresowego,
- stosowanie odpowiedniego sprzętu i metod pomiaru,
- wykorzystane algorytmy kontrolne,
- ocena i dokładność (wyrażenie niepewności) wyników pomiarów.

Metodami geodezyjnymi w wyniku pomiarów kontrolnych wyznacza się:

- osiadania, wypiętrzenia, pochylenia (precyzyjna niwelacja geometryczna i hydrostatyczna, trygonometryczna),
- przemieszczenia poziome, prostopadłe do osi głównej zapory (prosta odniesienia zwana też stałą prostą),
- przemieszczenia poziome punktów na ścianie odpowietrznej zapory (sieci trygonometryczne pełne, sieci kątowno-liniowe)
- przestrzenne ruchy określonych punktów budowli (precyzyjne pomiary trygonometryczne i elektroniczne pomiary odległości, fotogrametria naziemna).

## 1.4 Cel pracy

Okresowe geodezyjne pomiary przemieszczeń są jednym z obowiązkowych elementów harmonogramu pomiarów kontrolnych obiektu hydrotechnicznego, mających zapewnić bezpieczeństwo użytkowania tego obiektu, a tym samym zapewnić bezpieczeństwo pracowników zatrudnionych na obiekcie oraz ludzi mieszkających i pracujących na terenie narażonym na zniszczenie w razie katastrofy tego obiektu.

Obecnie nie ma sformułowanych i zebranych zasad postępowania w przypadku modernizacji kontrolnej sieci geodezyjnej, w literaturze można spotkać jedynie wskazówki odnoszące się do szczególnych przypadków. Brak jest opracowań o charakterze ogólnym – zbioru zasad modernizacji odnoszących się do poszczególnych elementów sieci geodezyjnej i sposobów opracowania wyników pomiaru, które można stosować w zależności od stopnia degradacji sieci, wyposażenia obiektu w instrumenty i czujniki oraz od wprowadzanej nowej technologii pomiarowej.

Ze względu na średni wiek zapór wodnych w Polsce przekraczający 50 lat, modernizacja sieci geodezyjnej jest procesem, który poprawnie przeprowadzony może przyczynić się do podwyższenia wiarygodności i niezawodności geodezyjnych pomiarów kontrolnych a co za tym idzie podniesienie bezpieczeństwa obiektów.

Geodezyjne pomiary przemieszczeń zapory wodnej można podzielić na trzy niezależnie od siebie opracowywane zagadnienia:

- Wyznaczanie przemieszczeń poziomych – pomiary sieci kątowno-liniowej, których wynikiem jest wyznaczenie przemieszczeń celowników rozmieszczonych na zewnętrznych odsłoniętych powierzchniach obiektu, głównie na ścianie odpowietrznej (od strony wody dolnej) i rzadko obiektach towarzyszących znajdujących się w bezpośredniej bliskości obiektu. Ponieważ punkty te są zawsze widoczne pozwalają na monitoring zachowania się obiektu niezależnie od poziomu piętrzenia w zbiorniku, co niemożliwe byłoby w przypadku lokalizacji ich po stronie odwodnej (od strony wody górnej) obiektu.
- Wyznaczanie przemieszczeń poziomych punktów usytuowanych na koronie obiektu – pomiary specjalnie w tym celu zastabilizowanych punktów (w każdej sekcji zapory minimum jeden punkt), w linii prostej, w osi korony, lub ze względów praktycznych równoległe do osi (np. w sytuacji kiedy przez koronę przebiega droga, punkty te lokalizowane są na pasie dla pieszych lub poboczu). Pomiary te wykonywane są metodą



stałej prostej i pozwalają wyznaczyć wychylenia poszczególnych sekcji w płaszczyźnie prostopadłej do osi korony zapory.

- Wyznaczanie przemieszczeń pionowych metodą niwelacji precyzyjnej reperów zlokalizowanych – na powierzchniach zewnętrznych, przy skarpach obiektu, we wnętrzu obiektu – w galeriach pomiarowo-kontrolnych, na klatkach schodowych i w części pomieszczeń technicznych, na koronie obiektu oraz w bezpośredniej bliskości obiektu w celu kontroli stabilności gruntów podłoża, samego obiektu jak i jego otoczenia.

Ze względu na różne zadania każdego z wymienionych wyżej zagadnień, wykorzystywanych zupełnie różnych technologii pomiarowych i różnej (odpowiedniej dla wymogów danej technologii) stabilizacji punktów kontrolnych w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej zagadnienia te mogą być rozważane oddzielnie i w razie potrzeby zakres przebudowy, unowocześnienia i uzupełnienia może ograniczyć się tylko do jednego z nich. Dobrze przemyślane opracowanie częściowe, jeżeli będzie wykonywane z uwzględnieniem występujących części wspólnych (np. lokalizacji reperów w podstawach słupów obserwacyjnych) nie pociągnie ze sobą skutków niekorzystnych natomiast będzie ze względu na mniejsze nakłady finansowe, oraz mniejsze zmiany w strukturze całego systemu kontrolnego obiektu łatwiejsze do przeprowadzenia. Projekt sieci dla nowego obiektu oraz projekt modernizacji kompleksowej powinny obejmować całą kontrolną sieć geodezyjną zarówno kątowno-liniową, niwelacyjną jak i punkty stałej prostej.

Celem tej pracy jest wykazanie potrzeb modernizacji sieci, następnie opisanie procesu modernizacji oraz wskazanie możliwych działań. Ze względu na bardzo wiele elementów wchodzących w skład sieci geodezyjnej, rozumianej jako: punkty sieci (ich lokalizację, zabudowę i wyposażenie), elementy geometryczne sieci (mierzone kąty, kierunki, odległości, różnice wysokości), technologie pomiaru i sposoby opracowania wyników w pracy tej ograniczyłam się do opisania trzech praktycznych aspektów modernizacji sieci poziomej. Są to:

1. Wskazywanie nowych/dodatkowych lokalizacji punktów kontrolowanych na ścianie odpowietrznej zapory betonowej - uzupełnienie sieci celowników, na podstawie danych archiwalnych o zachowaniu się konstrukcji oraz modelowania numerycznego metodą elementów skończonych (MES).
2. Włączenie do opracowania wyników pomiaru niezależnych elementów kontrolnych przez opracowanie procedur kontroli terenowej pomiaru okresowego, bazujących na

porównaniu niewyrównanych obserwacji geodezyjnych z obserwacjami oczekiwanymi, wyliczonymi na podstawie modelu numerycznego aktualnego stanu obiektu. Wykonanie takich niezależnych kontroli opartych na modelowanych wielkościach fizykalnych może podnieść wiarygodność wyników pomiarów geodezyjnych.

3. Wprowadzenia nowoczesnej technologii pomiarów satelitarnych GPS do pomiarów w sieci punktów odniesienia (kontrola stałości punktów odniesienia) – w sposób syntetyczny, tylko w przypadku sieci hybrydowej łączącej pomiary klasyczne z pomiarami wektorów GPS.

Ograniczenie zakresu pracy do modernizacji sieci poziomej jest przeze mnie traktowane jako rozpoczęcie prac w zakresie problematyki modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej do badania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych, wypracowanie podejść i procedur pozwalających w przyszłości na sformułowanie rozwiązań kompleksowych. Argumentem przemawiającym za rozpoczęciem prac od zagadnień związanych z modernizacją sieci poziomej jest specyfika zmian obiektu w czasie normalnej, bezawaryjnej pracy – ruch w płaszczyźnie prostopadłej do osi korony obiektu, którego kierunek zależy od zmian poziomu wody w zbiorniku (napełnianie i opróżnianie). Dla wysokich betonowych obiektów, badanie wielkości tych zmian uznaje się za priorytetowe z punktu widzenia dbałości o bezpieczeństwo obiektu.

Opisane teoretycznie w tej pracy, elementy procesu modernizacji sieci poziomej zostały praktycznie przedstawione w opracowanym przeze mnie projekcie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej dla zapory BESKO.

Na podstawie piśmiennictwa krajowego i światowego oraz dyskusji w czasie Międzynarodowych Konferencji Technicznej Kontroli Zapór odbywających się cyklicznie w Polsce i gromadzących specjalistów w tej dziedzinie można stwierdzić, że praca ta wpisuje się w trend rozwojowy w zakresie geodezyjnego monitorowania przemieszczeń, który polega na wykorzystywaniu doświadczeń z okresu eksploatacji zapory i wyników modelowania numerycznego jej stanu, w pomiarach i modernizacji sieci geodezyjnych. Trend ten jest reprezentowany m. in. w pracach prof. Adam Chrzanowskiego i prof. Anny Szostak-Chrzanowski z Kanadyjskiego Centrum Geodezji Inżynieryjnej (Canadian Centre of Geodetic Engineering, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick) [Chrzanowski, 2002], [Szostak-Chrzanowski, 1992], [Szostak-Chrzanowski, 1994], [Szostak-Chrzanowski, 2002], [Szostak-Chrzanowski, 2004], [Szostak-Chrzanowski,

2006], [Szostak-Chrzanowski, 2007]. Badania prowadzone w Instytucie Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej [Popielski, Stasierski, 2005] i w innych polskich ośrodkach akademickich [Urbański, 2005], [Sorbjan, 2004] dają podbudowę teoretyczną i technologiczną od strony wykorzystania modelowania numerycznego w prognozowaniu pracy konstrukcji geotechnicznej.

## 2 MODERNIZACJA GEODEZYJNYCH SIĘCI KONTROLNYCH

### 2.1 Rys ewolucyjny sieci kontrolnych do badania przemieszczeń poziomych zapór wodnych

Lokalna, kontrolna sieć geodezyjna do celów badania przemieszczeń poziomych punktów zapór wodnych zakładana jest od strony wody dolnej zapory (na przedpolu zapory) i zboczach doliny. Sieci te mogą obejmować znaczne powierzchnie – od kilku hektarów dla małych obiektów do kilkudziesięciu i więcej hektarów w przypadku zapór wodnych o dużych rozmiarach.

W ostatnich kilkudziesięciu latach XX wieku, ze względu na rozwój nowoczesnych technologii pomiarowych nastąpiła duża ewolucja poziomych sieci kontrolnych głównie w zakresie struktury sieci. Obecnie możemy wyróżnić następujące rodzaje sieci:

1. Sieć trygonometryczna pełna, w której obserwowane są kierunki i kąty poziome, jedynie dla kontroli skali wykonywanych jest w niej kilka obserwacji liniowych – takie sieci uważane są za klasyczne. Wraz z rozwojem technologii pomiarów odległości, dla wzmocnienia struktury sieci w sieciach tych zaczęto wykonywać więcej pomiarów liniowych między punktami odniesienia.
2. Sieć kątowno-liniowa, w której obserwacje liniowe, ze względu na ich dokładność, obecnie porównywalną z dokładnością pomiarów kątowych, wykonywane są w całej sieci, także do punktów kontrolowanych na obiekcie.
3. Sieć hybrydowa – (sieć kątowno-liniowa + wektory GPS) lub (sieć liniowa + wektory GPS).
4. Sieci w których wykonywane są automatyczne pomiary kątowno-liniowe – sieci nowoczesne, których pomiary wykonywane są bez udziału obserwatora, przy pomocy nowoczesnych tachimetrów zmotoryzowanych o najwyższej klasie dokładności.

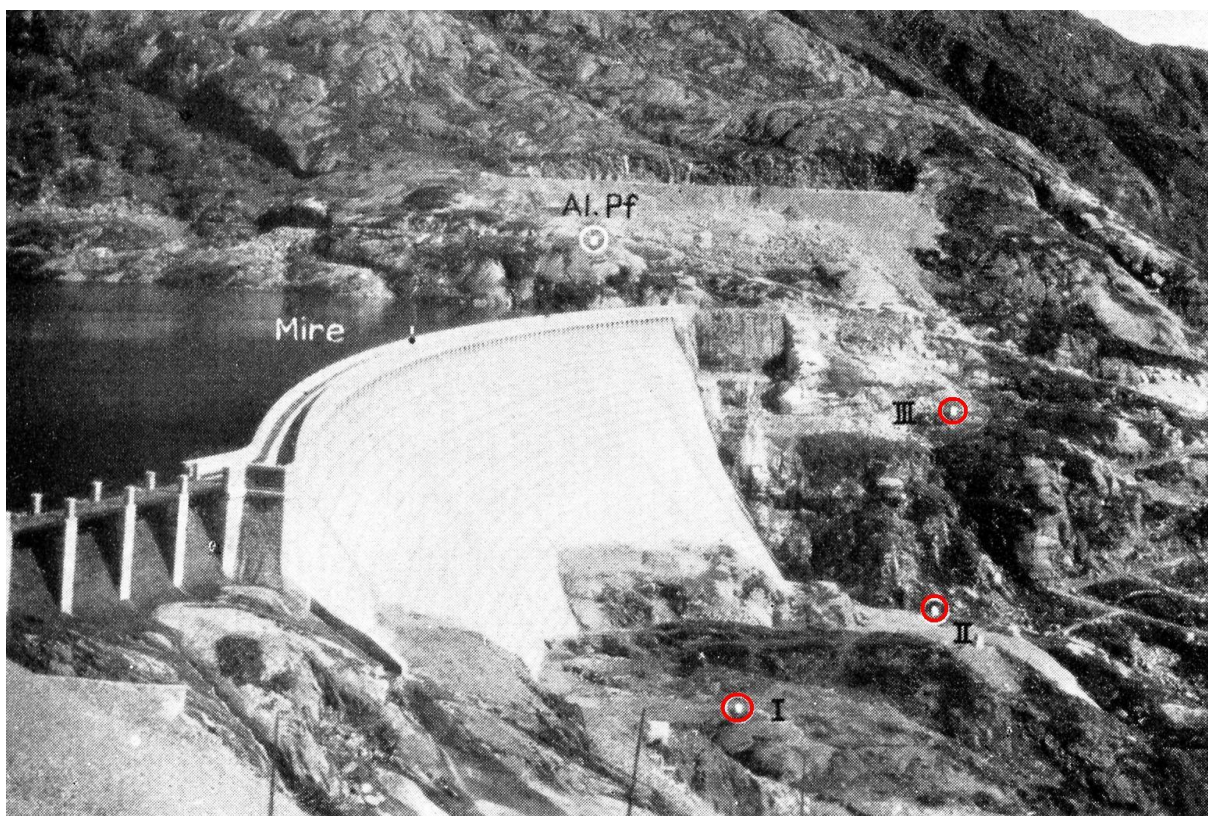
W ostatnich latach pojęcie sieci geodezyjnej uległo rozszerzeniu i w licznych opracowaniach oprócz geometrii i punktów sieci (ich lokalizacji, zabudowy i wyposażenia) obejmuje także: elementy geometryczne sieci (mierzone kąty, kierunki, odległości, różnice wysokości), technologie pomiaru oraz sposoby kontroli i opracowania wyników pomiaru [Prószyński, Zaczek-Peplinska, 2005].

### 2.1.1 Sieć trygonometryczna pełna

Jako sieć klasyczną dla obserwacji zapory wodnej uważa się sieć trygonometryczną pełną. Pełne definicje pojęcia „sieć trygonometryczna pełna” oraz opisy punktów: odniesienia, wiązanych i kontrolowanych wchodzących w skład takiej sieci można znaleźć w [Lazzarini, 1977], [Bryś, 1998], [Prószyński, Kwaśniak, 2006].

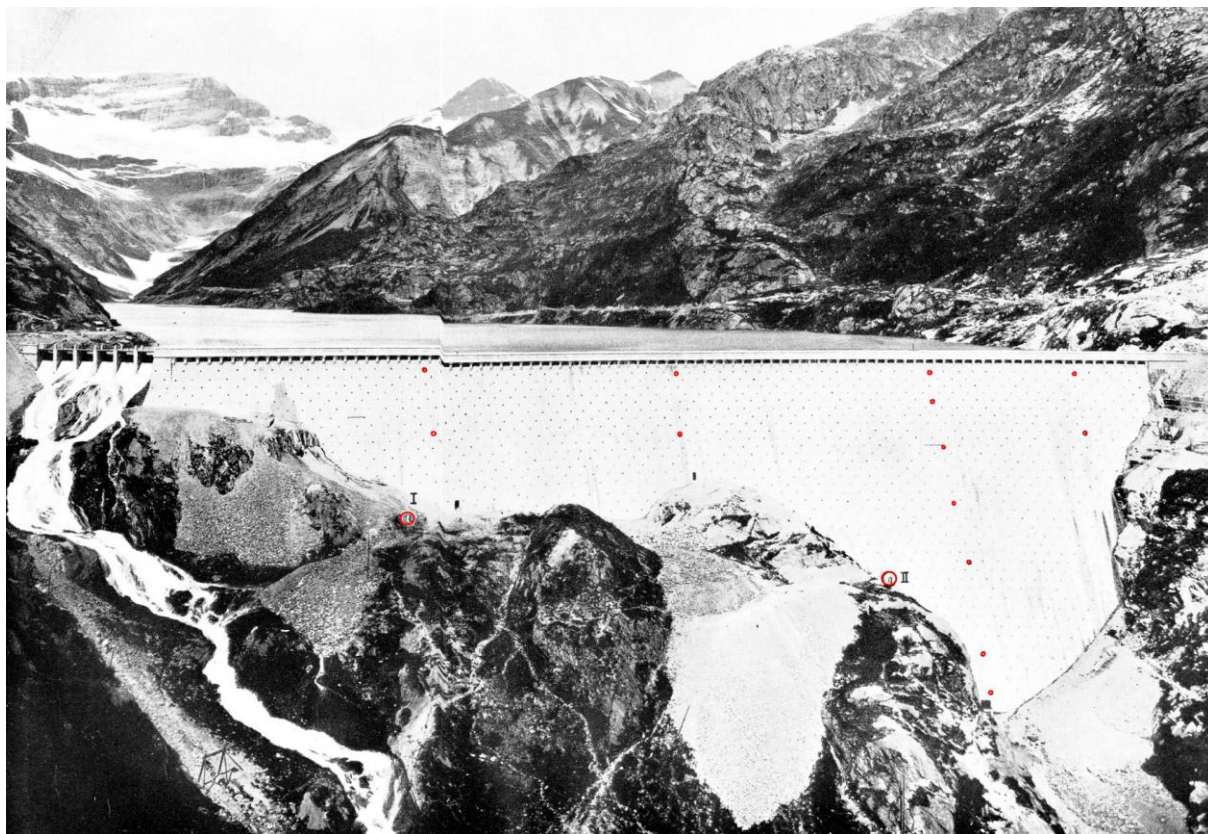
Oryginalne przykłady klasycznych sieci geodezyjnych zakładanych w latach 20-tych ubiegłego stulecia można znaleźć w [Lang, 1929]. Jedną z nich – dla kontroli zapory Barberine prezentuję poniżej.

Zapora Barberine (rysunki (Rys. 2), (Rys. 3)), na rzece Barberine, w miejscowości Finhaut (kanton: Valais/Wallis) została wybudowana w 1925 roku. Jest to zapora betonowa, łukowa o koronie długości 284 m i wysokości piętrzenia 79 m. Sieć trygonometryczna tej zapory składa się z 3 filarów obserwacyjnych, 8 punktów kontrolnych (odniesienia) i 13 celowników zlokalizowanych w czterech liniach pionowych na ścianie odpowietrznej. Szkic sieci przedstawia rysunek (Rys. 4).

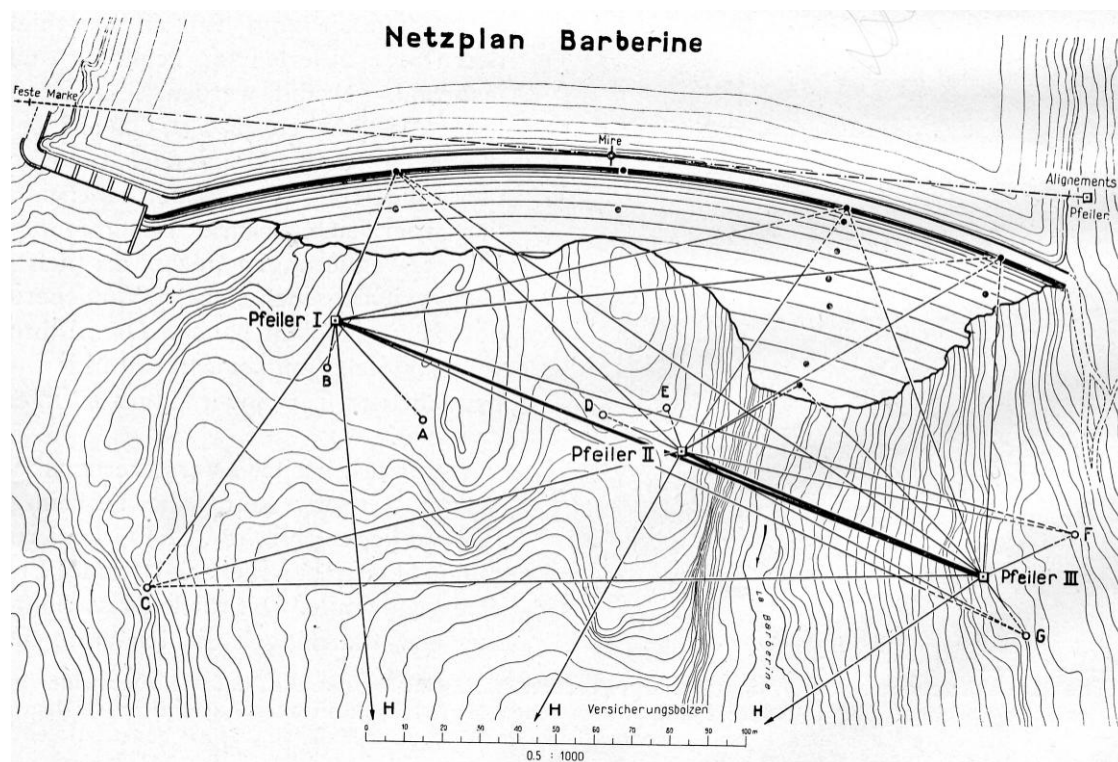


Rys. 2 Zapora Barberine, na zdjęciu kolorem czerwonym zaznaczono filary obserwacyjne [Lang, 1929].





Rys. 3 Zapora Barberine, na zdjęciu kolorem czerwonym zaznaczono filary obserwacyjne i celowniki na ścianie odpowietrznej [Lang, 1929].



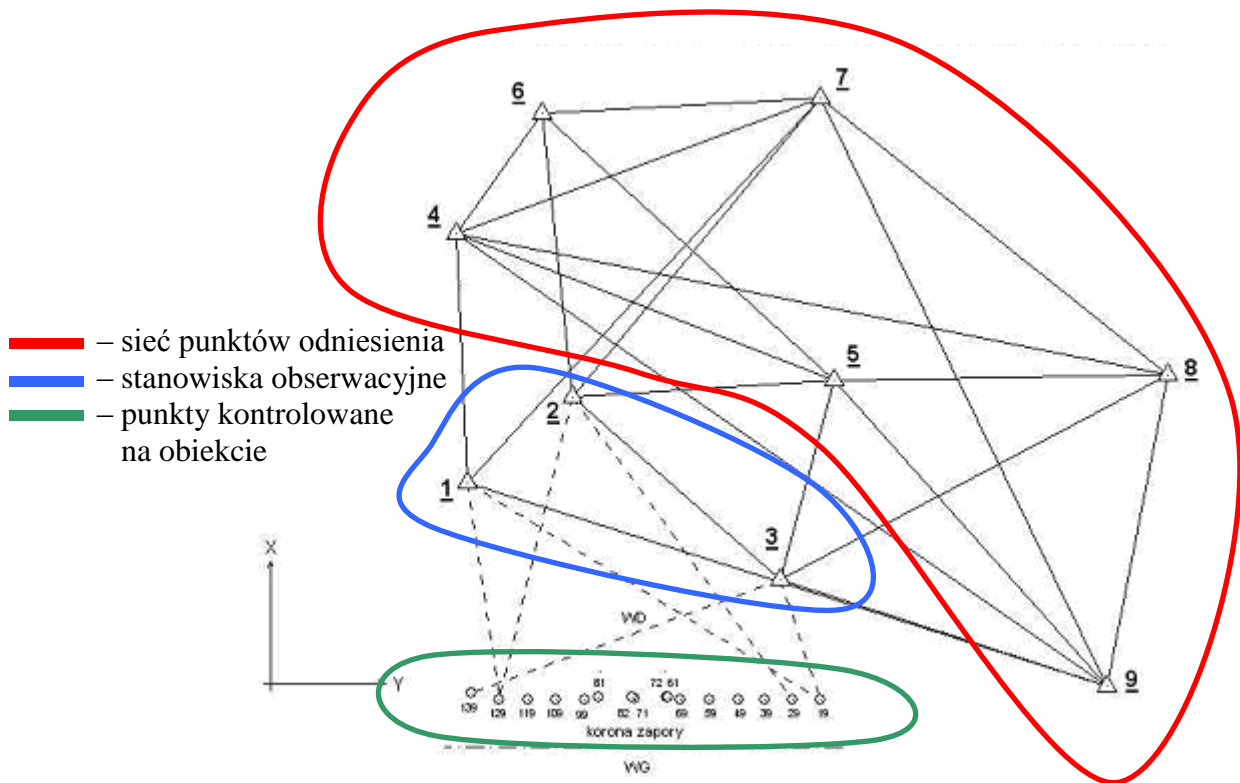
Rys. 4 Zapora Barberine – sieć trygonometryczna do wyznaczania przemieszczeń poziomych celowników zlokalizowanych na ścianie odpowietrznej zapory [Lang, 1929].

### 2.1.2 Sieć kątowno-liniowa

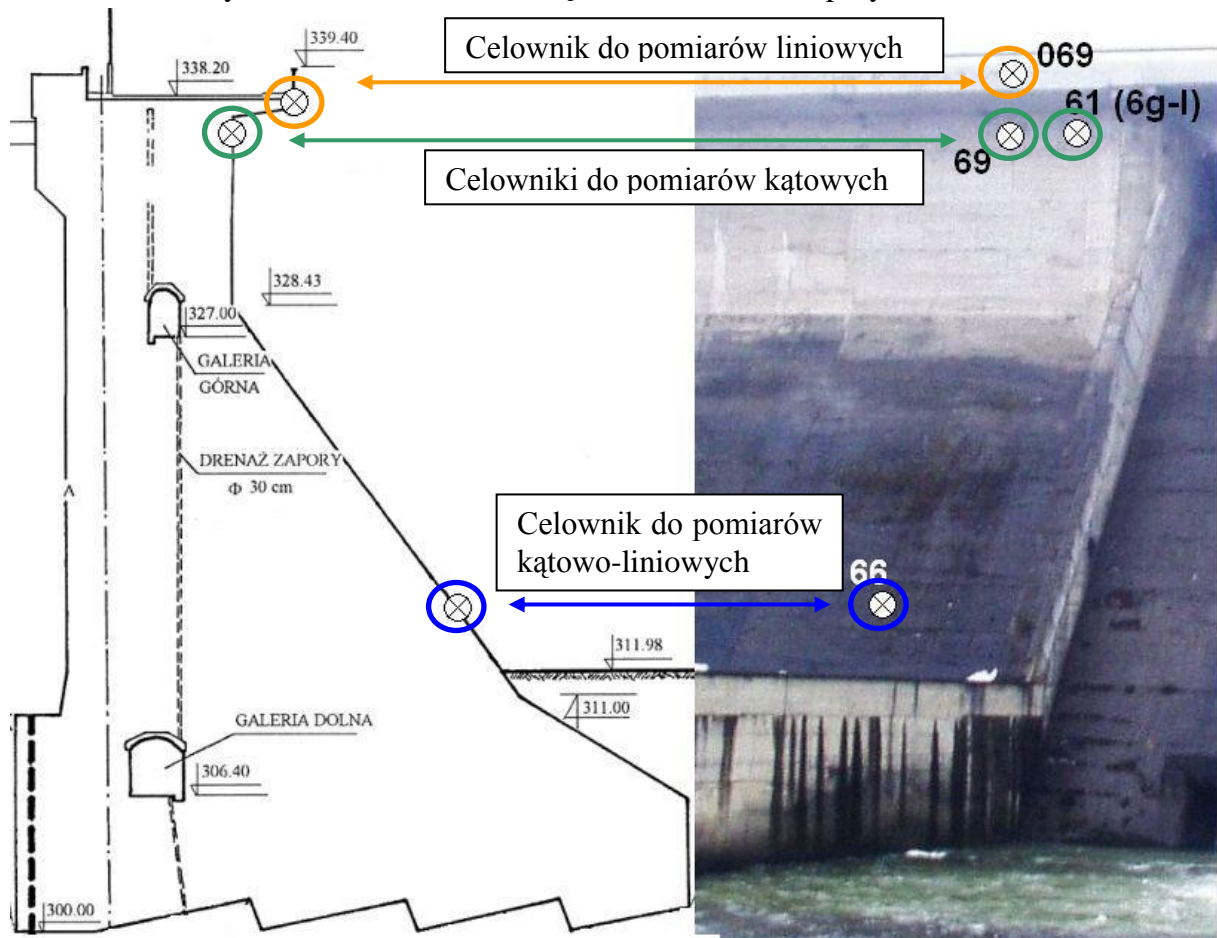
W drugiej połowie XX w. nastąpił duży postęp w konstrukcji dalmierzy elektrooptycznych. Dokładność pomiarów odległości zaczęła być porównywalna z dokładnością pomiarów kątowych. Sieci trygonometryczne pełne zaczęto uzupełniać pomiarami odległości. Ze względu na specyfikę konstrukcji oraz charakter pracy obiektów hydrotechnicznych kształt sieci i jej zasięg w większości przypadków pozostał bez zmian. W sieci punktów odniesienia, zamiast pomiaru tylko pojedynczych odległości potrzebnych do wyznaczania skali zaczęto mierzyć wszystkie odległości między punktami i filarami obserwacyjnymi. W projektach sieci dla nowych obiektów sieć kontrolna zaczęła mieć charakter powierzchniowej mikrosieci kątowno-liniowej. Cały czas można wyróżnić w sieci następujące rodzaje punktów: punkty odniesienia, stanowiska obserwacyjne, punkty kontrolowane na obiekcie.

Tam gdzie było to możliwe celowniki na obiekcie uzupełniono tak, aby możliwy był do nich pomiar odległości. Tam gdzie nie było takiej możliwości, zdecydowano na uzupełnienie sieci punktów kontrolowanych celownikami dostosowanymi do takich pomiarów. Przykładem takiej sieci, uzupełnionej w latach 1988-1989, jest sieć kontrolna zapory Besko (rysunki (Rys. 5), (Rys. 6)). Sieć ta jest szczegółowo opisana w rozdziale 7 tej pracy.

W Polsce najczęściej wykorzystywana do geodezyjnych pomiarów przemieszczeń jest klasyczna sieć trygonometryczna rozbudowana do sieci kątowno-liniowej.



Rys. 5 Kontrolna sieć kątowno-liniowa dla zapory Besko.



Rys. 6 Fragment sieci punktów kontrolowanych zapory Besko (sekcja 6). Na rysunku zaznaczono dodatkowy celownik do pomiaru odległości (069), celowniki w formie pierwotnej (61, 69) i celownik uzupełniony (66).



### 2.1.3 Sieć hybrydowa

W ostatnich latach w różnego rodzaju zastosowaniach inżynierskich zaczęły odgrywać coraz większą rolę pomiary GPS. Do wzrostu ich znaczenia przyczyniła się niewątpliwie rosnąca ciągle dokładność i niezawodność tych pomiarów.

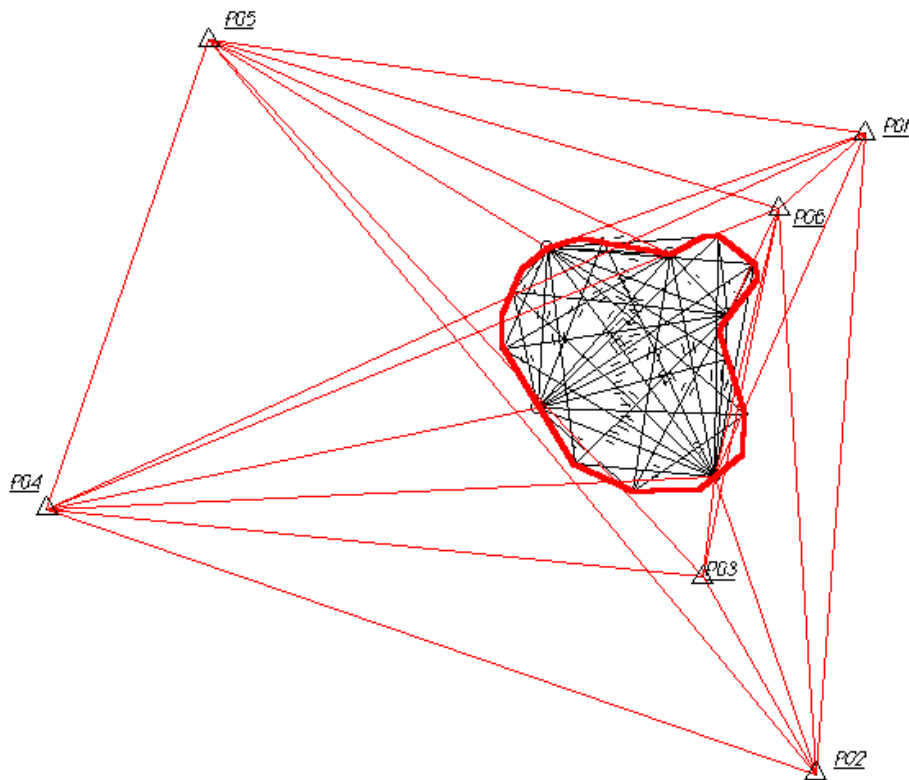
Obserwacje satelitarne stają się atrakcyjne głównie tam, gdzie potrzebna niezawodna i niezależna sieć odniesienia. Ich atrakcyjność wynika co najmniej z kilku powodów:

1. Pozwalają na posadowienie punktów odniesienia kontrolowanego obiektu poza strefą oddziaływania tego obiektu (1-5 km) bez istotnej straty dokładności;
2. Nie jest konieczna widoczność pomiędzy punktami odniesienia i punktami kontrolowanymi (łatwość wyboru punktów);
3. Jest możliwe wykonywanie pomiarów w warunkach słabej widoczności (np. mgła, opady atmosferyczne, noc);
4. Przy założeniu niezależności dokładności pomiarów od długości wektora geometria konstrukcji nie ma istotnego znaczenia z punktu widzenia dokładności wyznaczenia współrzędnych punktu kontrolowanego (punkty odniesienia mogą znajdować się po jednej stronie obiektu);
5. Pomiar GPS jest bardziej ekonomiczny, przy wykorzystaniu czterech lub więcej odbiorników często dużo mniej czasochłonny niż pomiar klasyczny;
6. Łatwość nawiązania kontrolnej sieci lokalnej do osnowy państwowej.

Niestety oprócz niewątpliwych zalet, z pomiarami GPS wiążą się też pewne ograniczenia. Pierwszym z nich jest konieczność wyboru punktów tak, by zapewnić odkryty horyzont na wysokości 10-15°. Jest to warunek, który często trudno spełnić bądź to z uwagi na ukształtowanie terenu i zadrzewienie, bądź z uwagi na istniejącą infrastrukturę. Drugim ograniczeniem jest dokładność pomiarów satelitarnych, która obecnie waha się od około 2 mm do 5 cm, w zależności od metody pomiaru i klasy wykorzystywanych odbiorników. Te ograniczenia sprawiają, że w geodezji stosuje się odpowiednie połączenie pomiarów GPS i pomiarów klasycznych (odległości, kąty, kierunki itp.). Punkty obserwowane metodą GPS obejmują wtedy zazwyczaj duży obszar stanowiąc odniesienie sieci pomierzonych klasycznie. W polskiej literaturze można znaleźć przykłady łącznego wykorzystania pomiarów klasycznych i obserwacji GPS w pomiarach przemieszczeń [Bałut, 1998], geodezji inżynierskiej [Wasilewski, 2001], tachymetrii i pracach tyczeniowych [Bałut, 1997], zakładaniu sieci [Gajderowicz, 1997].

Zastosowanie pomiarów przy użyciu GPS dla kontroli obiektów hydrotechnicznych przedstawiono poniżej na przykładzie zbiornika EW Żarnowiec [Walo, 1999], [Woźniak, 1998], [Woźniak, 2003]. Wyznaczanie przemieszczeń poziomych obwałowań zbiornika górnego było utrudnione z powodu braku stabilnych i położonych blisko obiektu punktów odniesienia. Dla celów badawczych posłużono się techniką GPS do powiązania układu odniesienia (związanego z odległymi i stabilnymi punktami) z siecią punktów kontrolowanych. Zaprojektowano i zrealizowano sieć 6 punktów odniesienia zastabilizowanych poza strefą oddziaływania zbiornika górnego. Wykonano obserwacje technologią GPS na punktach odniesienia i kilku punktach węzłowych sieci punktów kontrolowanych (Rys. 7). Pozostałe punkty sieci powiązano klasycznymi obserwacjami geodezyjnymi. Tak skonstruowaną sieć nazwano „siecią hybrydową”.

Obserwacje GPS przeprowadzono metodą statyczną przy zastosowaniu odbiorników dwuczęstotliwościowych centrowanych w sposób wymuszony. Obserwacje długości w sieci liniowo-kątowej wykonano z błędem  $m_d = \pm(0.5 \text{ mm} + 1\text{mm/km})$ . Dla wyznaczenia współrzędnych punktów sieci wykonano łączne wyrównania pomiarów GPS i obserwacji klasycznych.



Rys. 7 Hybrydowa sieć pomiarowa zbiornika górnego EW Żarnowiec [Walo, 1999]

Metodę zastosowano w 3 kolejnych cyklach pomiarów. W efekcie uzyskano składowe przemieszczeń punktów kontrolowanych ze średnimi błędami w granicach  $m_{\Delta x} \Delta y \leq \pm 2.0$  mm. Takie parametry dokładnościowe potwierdzają przydatność tej technologii w pomiarach kontrolnych, szczególnie w przypadku, gdy punkty odniesienia muszą być znacznie oddalone od badanego obiektu, poza strefę jego oddziaływania. Wartości przemieszczeń bezwzględnych uzyskane tą metodą są bardziej wiarygodne niż klasyczne pomiary kąto- liniowe, gdyż wyznaczane są w stosunku do większej liczby stabilnych punktów odniesienia posadowionych w korzystnych warunkach geologicznych.

Przykład ten potwierdza celowość włączenia do procesu modernizacji poziomej sieci kontrolnej prac związanych z wprowadzeniem technologii satelitarnych pomiarów GPS do kontroli obiektów hydrotechnicznych.

Bazując na doświadczeniach własnych zdobytych w trakcie testowych pomiarów GPS na następujących obiektach hydrotechnicznych: zbiornik górny ESP Porąbka-Żar, zapora w Niedzicy, zapora Besko, oraz na podstawie badań literaturowych na potrzeby tej pracy zebrałam i opisałam następujące problemy, najczęściej występujące przy pomiarach satelitarnych GPS na punktach istniejących sieci kontrolnych budowli hydrotechnicznych na terenie Polski:

- Duże nachylenie zboczy (strome skarpy), nie pozwalające na uzyskanie wolnego horyzontu na wysokości 10-15°, oraz kierunek południkowy dolin przegradzanych przez zapory – problem głównie występujący na południu kraju (w obszarach górzystych).
- Zadrzewienia i zakrzaczenia punktów – problem występujący nie tylko na terenach górzystych, gdzie wykonane zostały pomiary próbne, ale też na terenach nizinnych. W wyniku częściowego przysłonięcia horyzontu przez roślinność występują zakłócenia w odbiorze sygnału GPS. W Polsce większość obiektów hydrotechnicznych jest położonych w Parkach Narodowych lub Krajobrazowych bądź w ich otulinie (szczególnie na południu kraju), gdzie duża ingerencja w szatę roślinną byłaby utrudniona, ze względu na obowiązujące tam przepisy prawne dotyczące ochrony przyrody. Ten problem można częściowo wyeliminować poprzez wykonywanie pomiarów GPS w okresie jesienno-zimowym, kiedy drzewa nie mają liści i przysłonięcie występowałoby tylko przez gałęzie drzew i krzewów. Na obiektach hydrotechnicznych pomiary kontrolne wykonuje się w okresie wiosennym, po roztopach pokrywy lodowo-śnieżnej (bada się stan konstrukcji obiektu po okresie zimowym, w którym występują duże różnice temperatur oraz zamarzanie wody w szparach, pęknięciach i dylatacjach obiektu, dlatego

wyniki pomiarów wykonywanych tylko w okresach jesienno-zimowych nie oddawałyby w pełni pracy elementów budowli. Problem pomiarów wiosennych można rozwiązać tylko przez odsłonięcie horyzontu – usunięcie krzewów i gałęzi. Takie rozwiązanie jest możliwe na terenach, które nie są objęte szczególną ochroną przyrody.

- Zakłócenia spowodowane emisją sygnału radiowego przez bezprzewodowe urządzenia elektroniczne monitorujące obiekt lub służące do porozumiewania się pracowników ochrony obiektu (kamery, głośniki itp.). Źródła takich zakłóceń można wyeliminować poprzez przeniesienie urządzeń emitujących sygnał radiowy w inne miejsce lub przez zastosowanie anten GPS o odpowiedniej konstrukcji (np. anteny Leica AT 503 i AT 504 (obie w wersji chokering)).
- Małe, zwarte sieci do badania przemieszczeń, bez nawiązań zewnętrznych słabo wyznaczalne metodą GPS – sieci do badania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych najczęściej są sieciami lokalnymi, zakładanymi tylko dla kontroli tych obiektów, ze względu na dotychczas stosowane metody pomiaru (pomiaru kątowno-liniowe) punkty sieci są zlokalizowane w pobliżu obiektu w celu zapewnienia bezpośrednich obserwacji punkt odniesienia – stanowisko obserwacyjne, punkt – obiekt kontrolowany. W celu poprawienia dokładności pomiarów wektorów GPS sieci takie powinny zostać rozbudowane i uzupełnione punktami położonymi w większej odległości od obiektu (powyżej 1000 m) oraz dowiązane do punktów sieci Euref/Polref.
- Stabilizacja punktów kontrolnych usytuowanych na obiekcie (najczęściej są to celowniki (nie można ustawić anteny GPS) lub urządzenia do pomiaru metodą stałej prostej, nie ma słupów z urządzeniami do centrowania wymuszonego) – włączenie tych punktów do monitoringu GPS wymaga wykonania nowej stabilizacji punktów kontrolnych co wiąże się z przeprojektowaniem sieci punktów kontrolowanych po uprzedniej analizie dotychczasowych ruchów (przemieszczeń i odkształceń) elementów obiektu.
- Niemożliwe do pomiarów GPS są punkty umieszczone w załamaniach i miejscach osłoniętych obiektu np. elementy techniczne śluz, przepustów, zbiorników dolnych, dylatacje, budynków elektrowni wodnych – punkty te powinny być monitorowane dotychczasowymi metodami (sieć trygonometryczna pełna, sieć kątowno-liniowa), a ich zmiany wyznaczone w odniesieniu do punktów na których wykonywane są pomiary GPS.

Plan prac modernizacyjnych sieci kontrolnej powinien uwzględniać:

- odsłonięcie horyzontów na punktach otoczonych gęstą roślinnością, lub rezygnacja z pomiaru na punktach gdzie nie jest to możliwe i uzupełnienie sieci nowymi punktami,

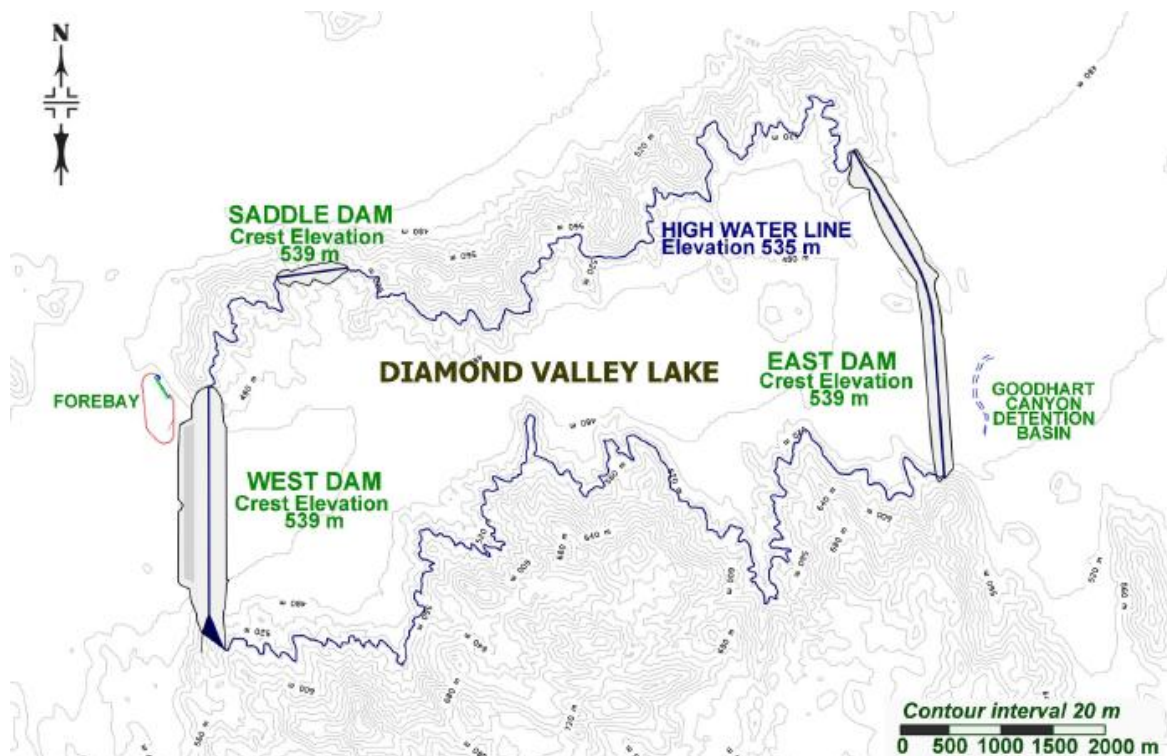
- wyłączenie z pomiarów satelitarnych punktów u podnóży stromych zboczy i skarp,
- włączenie do mierzonej sieci (nowa stabilizacja: z urządzeniami do centrowania wymuszonego) punktów dalekich oraz punktów na koronie obiektu,
- dowiązanie sieci kontrolnej do sieci państwowej (np. I klasy, Euref/Polref).

#### 2.1.4 Automatyczne pomiary kontrolne kątowno-liniowe

Automatyczne geodezyjne pomiary kontrolne nie są jeszcze często stosowane. Najlepiej opisany jest zrealizowany przez Kanadyjskie Centrum Geodezji Inżynierskiej (Canadian Centre of Geodetic Engineering) projekt systemu pomiarowego Diamond Valley Lake.

Diamond Valley Lake jest to największy zbiornik w południowej Kalifornii. Zbiornik tworzą trzy zapory (Rys. 8):

- West Dam – 87 m wysokości i 2,7 km długości,
- East Dam – 56 m wysokości i 3,2 km długości,
- Saddle Dam – 39 m wysokości i 0,8 km długości.

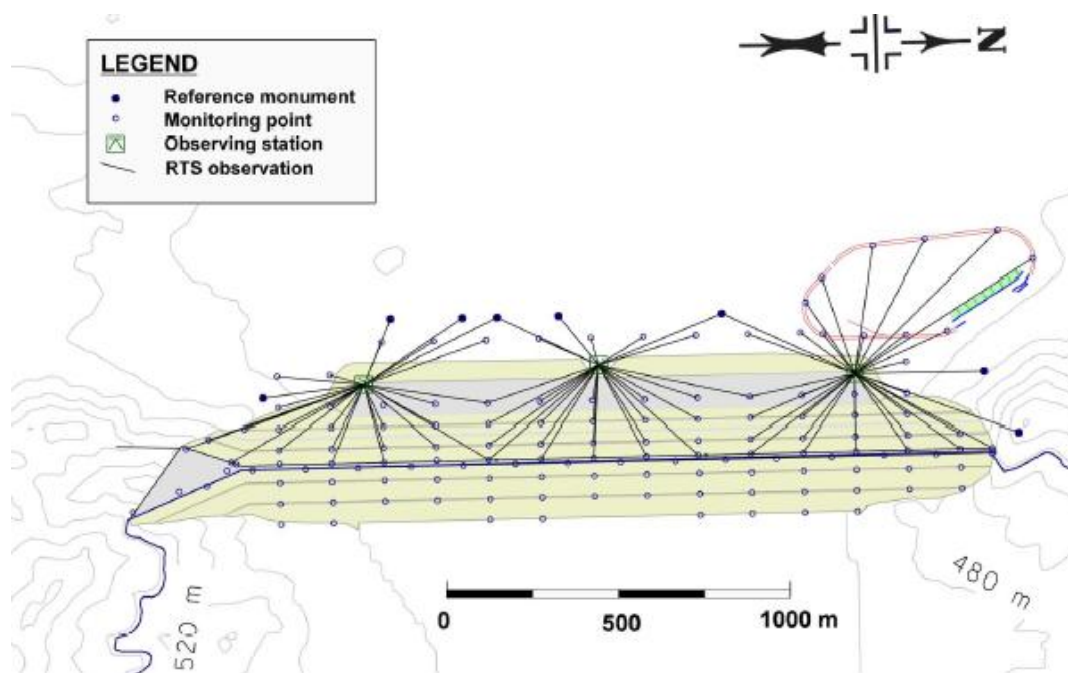


Rys. 8 Zbiornik Diamond Valley Lake [Lutes, 2002].

W pierwszej fazie pracy nad projektem przeprowadzono symulację zachowania się zapór podczas napełniania zbiornika. Analizę wykonano metodą modelowania metodą elementów skończonych. [Szostak-Chrzanowski, 2001], [Szostak-Chrzanowski, 2002]. Na podstawie wyników modelowania zaprojektowano sieć kontrolną.

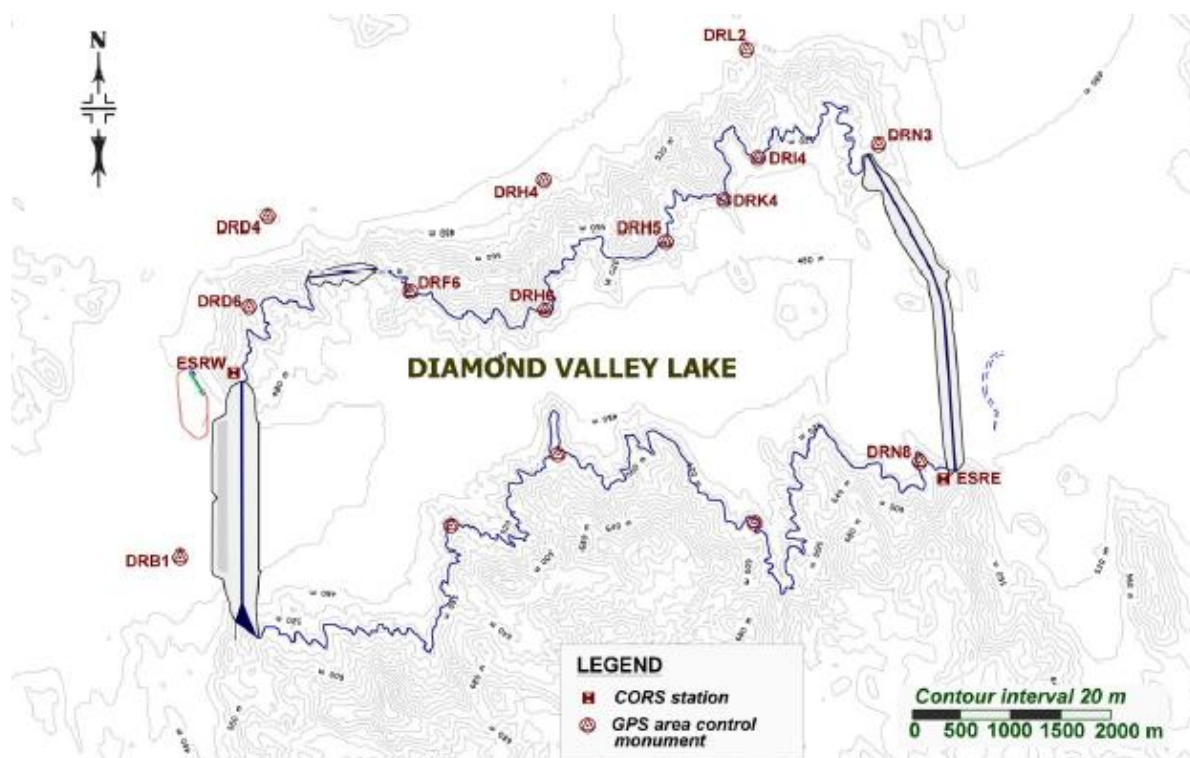
Na koronach oraz na skarpach odpowietrznych zapór (od strony wody dolnej) zainstalowano 300 celowników do pomiarów kąto-liniowych (luster pozwalających na automatyczne rozpoznawanie celu przez instrumenty samonaprowadzające). Lokalizacja celowników i punktów kontrolnych dla stanowisk obserwacyjnych zapory West Dam jest przedstawiona na rysunku (Rys. 9). W październiku 2000 r. rozpoczęto automatyczne pomiary przemieszczeń. Pomiary te są realizowane przez sieć pracujących bez przerw odbiorników GPS oraz 8 zautomatyzowanych tachimetrów Leica TCA 1800S. Rozmieszczenie stacji GPS i stanowisk tachimetrów jest przedstawione na rysunkach (Rys. 10) i (Rys. 11). Na rysunku (Rys. 12) przedstawiono zabudowę punktów.

Proces pomiarowy jest całkowicie zautomatyzowany. Pomiary geodezyjne wykonywane są zgodnie z ustalonym wcześniej harmonogramem, dodatkowo pomiary kąto-liniowe są uruchamiane, kiedy wyniki obserwacji GPS wykazują przemieszczenia przekraczające przemieszczenia prognozowane [Lutes, 2002]. Wszystkie analizy i obliczenia wykonywane są w centrum obliczeniowym zlokalizowanym w odległości 100 km od badanych obiektów.

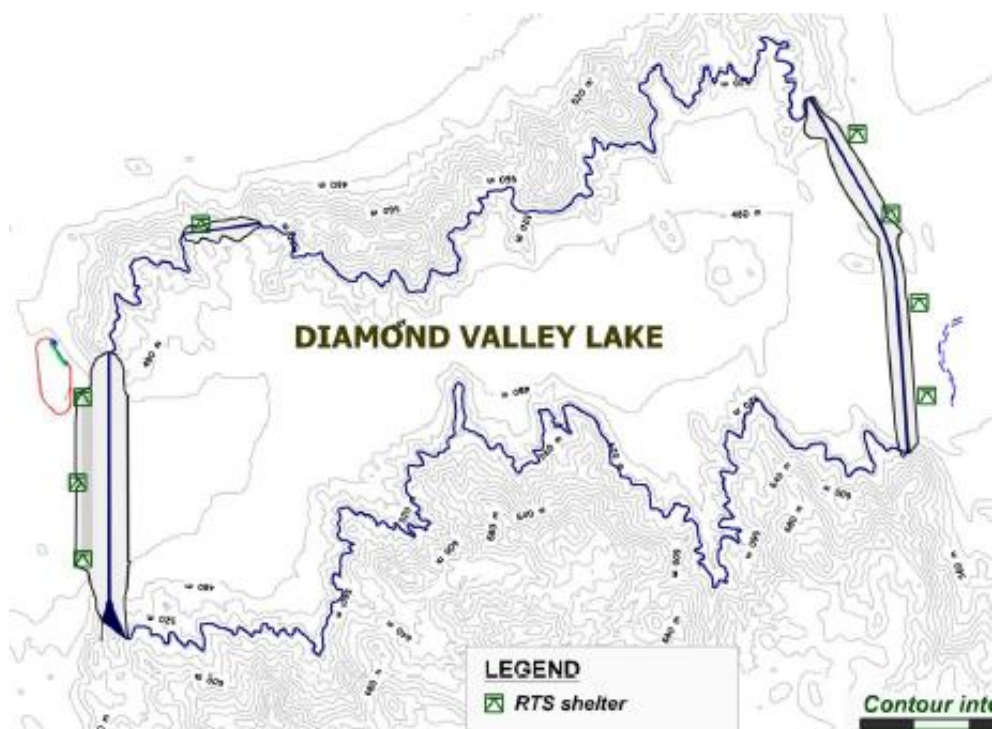


Rys. 9 Szkic rozmieszczenia stanowisk obserwacyjnych, celowników i punktów kontrolnych dla zapory West Dam [Lutes, 2002].

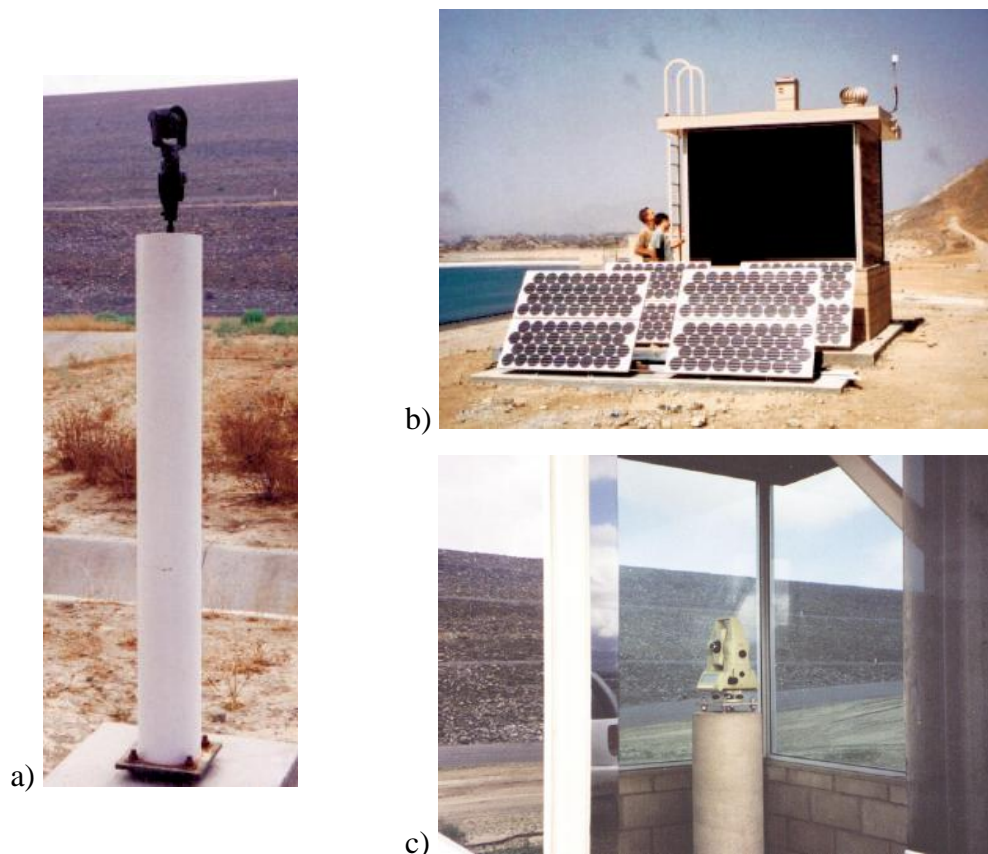




Rys. 10 Rozmieszczenie stacji GPS wokół zbiornika Diamond Valley Lake [Lutes, 2002].



Rys. 11 Rozmieszczenie stanowisk obserwacyjnych tachimetrów Leica TCA 1800S dla kontroli zapór zbiornika Diamond Valley Lake [Lutes, 2002].



Rys. 12 Rys. 2.14 Zabudowa punktów sieci kontrolnej Diamond Valley Dam  
a) filar z lustrem (celownik do kontroli skarpy odpowietrznej,  
b) jeden z pawilonów w których umieszczone są filary obserwacyjne,  
c) filar obserwacyjny z tachimetrem Leica TCA 1800S.

Opisane w następnych rozdziałach tej pracy elementy modernizacji sieci kontrolnych można zastosować w każdym z opisanych wyżej rodzajów sieci. Sposoby wyznaczania prawidłowych lokalizacji punktów kontrolnych pod kątem rejestracji zmian kluczowych elementów konstrukcji oraz niezależna kontrola okresowego pomiaru geodezyjnego są ważnymi zagadnieniami niezależnie od tego, jakiego rodzaju sieć jest modernizowana.

W systemach automatycznych, gdzie rola człowieka w czasie wykonywania pomiaru jest ograniczona albo żadna, brak jest bezpośredniej, wizualnej kontroli stanu obiektu (zastępuje je monitoring poprzez kamery telewizji przemysłowej), a co za tym idzie subiektywna ocena prawidłowości pomiaru dokonywana przez członków zespołu pomiarowego w czasie jego realizacji jest ograniczona. Wprowadzenie bieżącej kontroli wykonywanych obserwacji może podnieść wiarygodność oraz przyspieszyć reakcję systemu w razie zmian niezgodnych z prognozowanymi (możemy mówić tu o tzw. podniesieniu wrażliwości systemu). Prawidłowo wykonywana kontrola powinna bazować na wynikach modelowania numerycznego pracy obiektu, wykonanego przez specjalistów w zakresie



hydrotechniki i pracy konstrukcji przy współpracy geodety odpowiedzialnego za okresowe pomiary przemieszczeń.

Obecnie w Polsce do badania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych wykorzystuje się sieci trygonometryczne pełne oraz sieci kątowno-liniowe. Wprowadzanie pomiarów GPS oraz automatyzacja pomiarów geodezyjnych są cały czas przedmiotem badań w ośrodkach naukowych. Jednostkowe realizacje sieci hybrydowych (np. Żarnowiec, Porąbka-Żar) i uzyskane obiecujące wyniki pomiarów wskazują na to, że w latach następnych będą podejmowane prace mające na celu przebudowę istniejących sieci pod tym kątem.

## **2.2 Lokalizacja i zabudowa punktów sieci trygonometrycznych i kątowno-liniowych do badania przemieszczeń poziomych.**

Każdy punkt kontrolowany zapory powinien być zaobserwowany z trzech stanowisk, a w wyjątkowych przypadkach z dwóch [Bryś, Przewłocki, 1998]. Celowe wcinające powinny być zaprojektowane w ten sposób, aby przemieszczenia punktów skutkowały uchwytą zmianą kierunków obserwowanych na stanowiskach. Dlatego też długości celowych wcinających powinny się mieścić w przedziale od 50 do 150 m, gdyż wówczas składowe przemieszczenia punktu badanego w kierunkach prostopadłych do celowych, wynoszące 1 mm, odpowiadają zmianie kątów wcinających w granicach od  $12^{\text{cc}}$  do  $4^{\text{cc}}$ . Długości celowych w sieci punktów odniesienia powinny wynosić od 50 do 100 m.

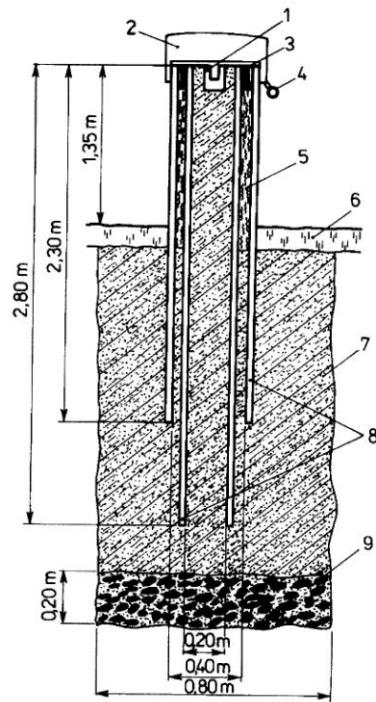
Celowniki do obserwacji punktów kontrolowanych na obiekcie zakłada się na betonowych elementach zapory od strony powietrznej (wody dolnej). Zalecane jest takie rozmieszczenie stanowisk obserwacyjnych, aby przecięcia celowych nie tworzyły kątów mniejszych od  $15^{\circ}$ . Celowe nie mogą tworzyć również ostrego kąta ze ścianą betonową, z uwagi na niebezpieczeństwo występowania deformacji refrakcyjnych celowych [Bryś, Przewłocki, 1998].

Filarami obserwacyjnymi z głowicami wyposażonymi w urządzenia do centrowania wymuszonego instrumentu (teodolitu) i tarcz celowniczych (luster) zabudowuje się wszystkie stanowiska obserwacyjne i punkty odniesienia w sieci. Górna część filaru powinna się wznosić ok. 1,2 m ponad powierzchnię terenu. Głębokość jego posadowienia może wynosić w zależności od warunków hydro-geologicznych, nawet do 4 m, jednak w żadnym przypadku nie mniej niż 2,5 m. Filary te składają się z podwójnych, zabetonowanych rur azbestowo-betonowych (rysunki (Rys. 13, Rys. 14)). Punkty odniesienia powinny być zlokalizowane poza obszarem oddziaływania badanego obiektu, w miejscach zapewniających stałość ich

położenia. Lokalizacja punktów odniesienia powinna być poprzedzona badaniami geologicznymi podłoża gruntowego na obszarze objętym siecią geodezyjną.

Punkty kontrolowane na obiekcie stanowią celowniki jedno- lub/ oraz dwupłaszczyznowe (najczęściej) z koncentrycznymi pierścieniami czarno-białymi (rysunki (Rys. 15) i (Rys. 16)). Wielkości średnic pierścieni powinny być dostosowane do odległości celu i kątowej wartości rozstawu kresek siatki celowniczej lunety teodolitu.

W trakcie wprowadzania do pomiarów sieci pomiarów odległości wiele obiektów wyposażono w dodatkowe bolce do czasowego mocowania luster, umieszczone nad celownikiem (na pionowej osi przebiegającej przez celownik), odległość pionowa między celownikiem koncentrycznym a bolcem bywa różna w zależności od geometrii ściany betonowej zapory i dogodności podejścia do bolca w celu zamocowania lustra. (Rys. 16, Rys. 17).



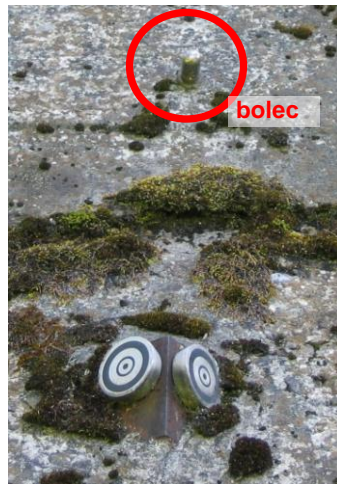
Rys. 13 Dwururowy betonowy słup obserwacyjny:  
 1 – urządzenie do centrowania wymuszonego,  
 2 – blaszana pokrywa ochronna głowicy znaku,  
 3 – uszczelnienie asfaltowe, 4 – kłódka,  
 5 – wata z włókna szklanego, 6 – darń, 7 – beton,  
 8 – rury betonowo-azbestowe, 9 – ubity tłuczeń  
 (wg [Bryś, Przewłocki, 1998]).



Rys. 14 Słup obserwacyjny – zaporą Besko (fot. autorka)



Rys. 15 Celownik dwupłaszczyznowy (wg [Bryś, Przewłocki, 1998]).

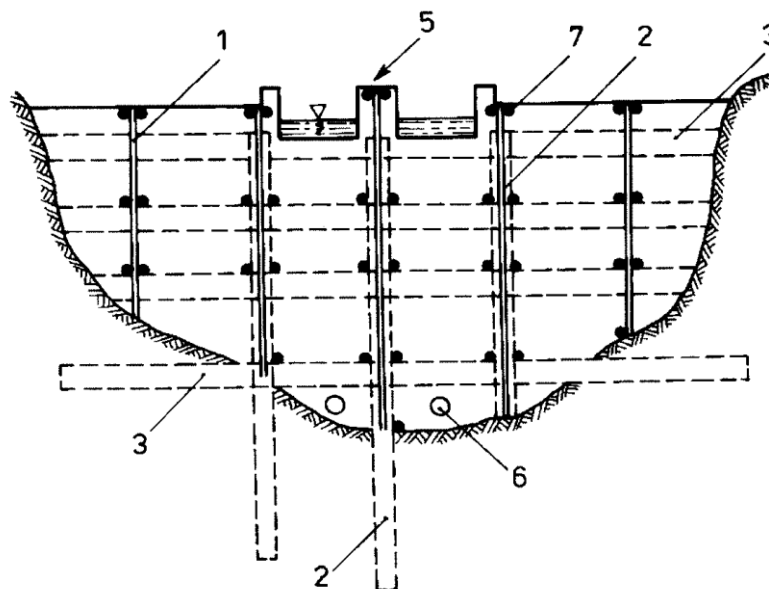


Rys. 16 Celownik i bolec lustra – zapora Besko (fot. OTKZ)



Rys. 17 Lustro na bolcu (fot. OTKZ)

Przeciętna liczba punktów kontrolowanych dla zapór betonowych o wysokości do 50 m (takie przeważają w Polsce) wynosi 20-30. Celowniki przede wszystkim stabilizuje się na tych sekcjach zapory, które narażone są na największe przemieszczenia powodowane zmianami poziomu wypełnienia zbiornika, tzn. na sekcjach przelewów powierzchniowych i spustu dennego, wieżach przelewowych oraz na budynku hydroelektrowni. Celowniki najczęściej tworzą regularne poziome linie obejmujące wszystkie sekcje zapory (Rys. 18).



Rys. 18 Rys. 2.7 Schemat rozmieszczenia celowników na ścianie odpowietrznej zapory:  
 1 – szczeliny dylatacyjne, 2 – szyby pionowe, 3 – galerie pomiarowo-kontrolne,  
 5 – sekcje przelewowo-spustowe, 6 – rury spustu dennego, 7 – celowniki trygonometryczne (wg [Bryś, Przewłocki, 1998]).

### 2.3 Potrzeby modernizacji sieci kontrolnej

Pod pojęciem modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej, istniejącej i będącej w użytkowaniu należy rozumieć jej przeprojektowanie i dostosowanie do aktualnych potrzeb w zakresie monitorowania obiektu. Modernizacja sieci powinna uwzględniać bieżące zadania obiektu, takie jak np. gospodarcze, przeciwpowodziowe, turystyczne, rekreacyjne i sportowe.

Konieczność modernizacji sieci może wynikać z:

a) Degradacji sieci - niszczenia sieci wraz z upływem czasu, ale także zniszczenia przez okoliczną ludność z chęci pozyskania elementów wyposażenia punktów (np. płyt i głowic, które często zostają sprzedane na złom), przykładem może być punkt odniesienia w sieci kontrolnej dla zapory Besko, zlokalizowany w miejscowości Odrzechowa (Rys. 19).

Innym przykładem zniszczenia punktów sieci może być sytuacja zaistniała w Dębem (na rzece Narew), w czasie regulacji prawego brzegu rzeki po stronie odpowietrznej zapory zostały zniszczone punkty sieci. Mimo iż prace te wykonywane były w roku 1995 do tej pory zapora może być kontrolowana tylko z punktów po lewej stronie.

Oprócz zniszczeń wynikających z działalności człowieka bardzo ważnym czynnikiem jest działalność przyrody objawiająca się na kilka sposobów:

- niszczenie punktów spowodowane wpływem warunków atmosferycznych,
- zarastanie punktów przez bujnie rozwijającą się roślinność,
- niszczenie punktów na skutek wietrzenia podłoża (przykładem może być punkt sieci kontrolnej zapory w Niedzicy w Pieninach, znajdujący się na skałkach zbocza góry Czubatki, gdzie w roku 2003 nastąpiło odszczepienie fragmentu skałki w sąsiedztwie punktu (Rys. 20).



Rys. 19 Punkt odniesienia w Odrzechowej - zapora w Besku (fot. autorki).



Rys. 20 Punkt odniesienia na Czubatce - zapora w Niedzicy (fot. autorki).

b) Przyczyn natury ekonomicznej:

- wynikających z potrzeby zmniejszenia po modernizacji kosztów utrzymania sieci,
- wynikających z potrzeby zmniejszenia kosztów i czasochłonności wykonywanych pomiarów okresowych.

c) Wprowadzenia do pomiarów nowych technologii (m.in. pomiarów odległości, pomiarów satelitarnych GPS) - od czasu projektowania i realizacji sieci kontrolnych dla tych obiektów stały się dostępne nowe technologie pomiarowe, w szczególności dotyczy to metod satelitarnych (wykorzystujących sygnały emitowane przez satelity systemów: GPS -Global Positioning System, GLONASS i GALILEO). Metody te oprócz swoich zalet takich jak łatwość i szybkość (GPS RTK – Real Time Kinematic) wykonania pomiaru, większą dowolność w lokalizacji punktów (brak konieczności zachowania wzajemnej widoczności między punktami sieci), możliwość zwiększenia zasięgu sieci bez konieczności większych nakładów dla uzyskania porównywalnych dokładności, mają swoje ograniczenia np. długi czas obserwacji dla osiągnięcia dużej dokładności (GPS Static), ograniczenia dotyczące miejsca wykonania pomiaru: wolny horyzont, teren o małej gęstości zabudowy, umiejscowienie punktów w oddaleniu od linii elektroenergetycznych, osi radiolinii, masztów telekomunikacyjnych itp.

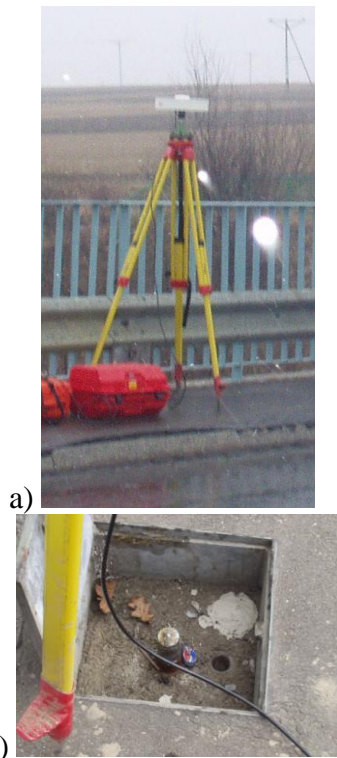
Przy projektowaniu już istniejących sieci kontrolnych nie brano pod uwagę możliwości wykonywania pomiarów satelitarnych, punkty tych sieci często umieszczone są w sąsiedztwie urządzeń emitujących zakłócenia powodujące przerwania lub zniekształcenia odbieranego sygnału lub w miejscach nie zapewniających odpowiedniego horyzontu, np. na stromych zboczach (to problem występujący głównie na obiektach położonych na terenach górzystych), w sąsiedztwie bujnej roślinności, gdzie nie ma możliwości jej wycięcia (dotyczy to obiektów położonych na terenie Parków Krajobrazowych lub Narodowych i w ich strefach ochronnych).

Osobnym problemem jest usytuowanie i sposób stabilizacji znaków pomiarowych na badanym obiekcie. Oprócz samych koron zapór, gdzie wykonywanie pomiarów satelitarnych nie stwarza problemów, kontroluje się np. elementy techniczne śluz, zbiorników dolnych, budynków elektrowni wodnych. W miejscach tych często nie ma możliwości wykonania poprawnego pomiaru satelitarnego i na skutek tego włączenia zainstalowanych tam znaków do sieci mierzonej tą metodą.



Przykłady:

- zlokalizowanie samych tylko punktów do pomiaru metodą stałej prostej między punktami odniesienia znajdującymi się w osi korony zapory poza samym obiektem (Rys. 21 a,b),
- nieodpowiednia zabudowa punktów odniesienia – przykładem może być punkt odniesienia w sieci kontrolnej dla zbiornika górnego ESP Porąbka-Żar – oryginalny punkt został zniszczony, do wykonywania pomiarów została zaadaptowany sąsiedni punkt osnowy II klasy (Rys. 22),



Rys. 21 Pomiar GPS na koronie zapory Besku:  
a) pomiar, b) punkt kontrolny – do metody stałej prostej (fot. autorki).



Rys. 22 Pomiar na punkcie sieci dla zbiornika górnego ESP Porąbka-Żar (fot. autorki).

- lokalizacja punktów przy stromych skarpach - najczęściej od strony odpowietrznej zapory,
- zadrzewienie i zakrzaczenie punktów – w wyniku częściowego przysłonięcia horyzontu przez roślinność występują zakłócenia w odbiorze sygnału satelitarne (Rys. 23) - ten problem można by częściowo wyeliminować przez wykonywanie pomiarów w okresie jesienno-zimowym, kiedy drzewa nie mają liści i przysłonięcie występowałoby tylko przez gałęzie drzew i krzewów. Niestety ze względu na charakter obiektów hydrotechnicznych ich pomiary kontrolne wykonuje się w okresie wiosennym, po roztopach pokrywy lodowo-śnieżnej (bada się stan konstrukcji obiektu po okresie zimowym, w którym występują duże różnice temperatur oraz zamarzanie wody w

szparach, pęknięciach i dylatacjach obiektu, dlatego wyniki pomiarów wykonywanych tylko w okresach jesienno-zimowych nie oddawałyby w pełni pracy elementów konstrukcji budowli). Problem pomiarów wiosennych można rozwiązać tylko przez odsłonięcie horyzontu – usunięcie krzewów i gałęzi (niestety nie zawsze takie rozwiązanie jest możliwe na terenach, które są objęte szczególną ochroną przyrody),



Rys. 23 Zarośnięty punkt odniesienia - zapora Besko (fot. autorki).

- małe, lokalne sieci, o krótkich bokach, nie mające nawiązań zewnętrznych (także do układów państwowych), w celu poprawienia dokładności pomiaru wektorów powinny zostać rozbudowane i uzupełnione punktami położonymi w większej odległości od obiektu (powyżej 1000 m) oraz dowiązane do punktów sieci Euref,
- niemożliwe do pomiarów GPS są punkty umieszczone w załamaniach i miejscach osłoniętych obiektu np. elementy techniczne śluz, przepustów, dylatacje, zbiorników dolnych, budynków elektrowni wodnych – punkty te powinny być monitorowane klasycznymi metodami (sieć trygonometryczna), a ich zmiany wyznaczone w odniesieniu do punktów kontrolowanych pomiarem satelitarnym.

d) rozwoju możliwości komunikacji między różnego rodzaju instrumentami pomiarowymi i jednostką sterującą – prace nad takim systemem prowadzone są w Zakładzie Geodezji Inżynieryjno-Przemysłowej Instytutu Geodezji Gospodarczej Politechniki Warszawskiej, pod kierownictwem dr inż. Marka Woźniaka [Woźniak, 2005].

e) coraz powszechniejszego stosowania metod modelowania numerycznego zachowania konstrukcji inżynierskich – wykorzystanie zaawansowanych programów komputerowych do prognozowania zachowania poszczególnych elementów konstrukcji (np. wychyleń sekcji, procesów filtracji, pracy przesłony cementacyjnej) oraz zastosowanie analizy wstecz

(tarowania modelu numerycznego na podstawie danych pomiarowych) do weryfikacji modelu stwarza możliwości prognozowania/przewidywania obszarów narażonych na największe deformacje. Znajomość tych obszarów pozwala na uzupełnienie sieci celowników, tak aby wykonywane pomiary jak najlepiej obrazowały zachowanie obiektu.

f) potrzeby podniesienia dokładności, niezawodności i wiarygodności pomiarów geodezyjnych – modernizacja geodezyjnej sieci kontrolnej oraz uzupełnienie opracowania wyników pomiarów przez dołączenie danych dodatkowych (pochodzących z czujników hydro- i geotechnicznych) może być podstawą podniesienia niezawodności w tzw. szerszym sensie obejmującym różne „praktyczne” aspekty technologii pomiarowej (np. kwalifikacje personelu, okresowa kontrola instrumentów pomiarowych, wprowadzanie korekt z tytułu zaburzających wpływów warunków zewnętrznych). Ponieważ teoria niezawodności operująca konkretnymi miarami tego pojęcia ogranicza się do rozpatrywania konstrukcji pomiarowych i trudno jest mówić o zwiększeniu niezawodności w aspekcie praktycznego wykonania pomiaru – udoskonalenie elementów kontroli terenowej podniesie tzw. wiarygodność pomiaru geodezyjnego. Przy większej liczbie przeprowadzonych kontroli bazujących na doświadczeniach różnych dziedzin inżynierskich (w rozpatrywanym przypadku: geodezja, hydrotechnika, geotechnika) proces wyznaczania przemieszczeń będzie budził większe zaufanie odbiorców wyników pomiarów.

g) zmian struktury własności gruntów i nieruchomości na obszarach bezpośrednio sąsiadujących z obiektem oraz brakiem uregulowań prawnych dot. konieczności uwzględniania w umowie kupna –sprzedaży gruntu zapisów mówiących o zachowaniu infrastruktury sieci i możliwości wstępu na grunt oraz budynki w celu wykonania pomiarów kontrolnych.

Taka sytuacja ma miejsce w Solinie: w roku 1998 sprzedano budynek socjalny elektrowni wodnej, na którego dachu został umieszczony jeden z punktów wiążących sieci kontrolnej. Budynek po przebudowie pełni funkcje hotelu (Rys. 24). Nowy właściciel, nie uwzględnił potrzeb nadzoru zapory i wobec braku odpowiednich zapisów w umowie, oraz braku wpisu w dziale III KW (ciężary i ograniczenia) w czasie przebudowy budynku punkt kontrolny wprawdzie został, ale wykonywanie obserwacji ze względu na brak widoczności oraz brak zgody właściciela na wykonywanie pomiarów musiało zostać zaniechane. Od roku 2001 Zarząd Zespołu EW Solina-Myczkowce S.A. procesuje się z obecnym właścicielem budynku i nie wiadomo kiedy i z jakim skutkiem postępowanie sądowe zostanie zakończone.





Budynek na którym  
zlokalizowany był punkt  
odniesienia sieci

Rys. 24 Zapora i Elektrownia Wodna Solina (fot. autorki).

## 2.4 Cele i zakres modernizacji sieci kontrolnej

Wyniki pomiarów kontrolnych, nie tylko geodezyjnych, ale przede wszystkim hydrotechnicznych prowadzonych regularnie przez lata, często dziesięciolecia eksploatacji obiektu mają duże znaczenie w czasie projektowania zmian w istniejącym systemie kontroli. Krótko i długookresowe tendencje zmian, dające się zauważyć zależności między poszczególnymi zjawiskami, analiza przemieszczeń elementów obiektu (np. sekcji zapory) z uwzględnieniem panujących warunków zewnętrznych tworzą bardzo dobry materiał do prognoz dalszego zachowania obiektu oraz wyznaczenia pewnych parametrów diagnostycznych, mogących dać podstawę do dodatkowej kontroli wykonywanych pomiarów bieżących.

Modernizacja sieci powinna być podejmowana wtedy, gdy z różnych przyczyn (ekonomicznych, związanych z ochroną środowiska naturalnego, technicznych) planowana jest zmiana dotychczasowego sposobu użytkowania obiektu lub też w okresie jego rozbudowy, dodania innych funkcji użytkowych (np. wykorzystanie energii wody przez dobudowanie elektrowni na stopniu), lub też w okresie planowanego remontu.

Czas prac technicznych, często związanych z przebudową korony (np. zmianą nawierzchni, renowacją i uzupełnieniem drenażu) jest dobrym momentem na stabilizację nowych punktów kontrolnych: stanowisk do pomiarów satelitarnych GPS, zmiany znaczków celowniczych na umożliwiające oprócz pomiarów kierunków precyzyjne pomiary odległości. Prace na ścianie odpowietrznej także dają możliwość rozszerzenia zbioru punktów kontrolowanych.

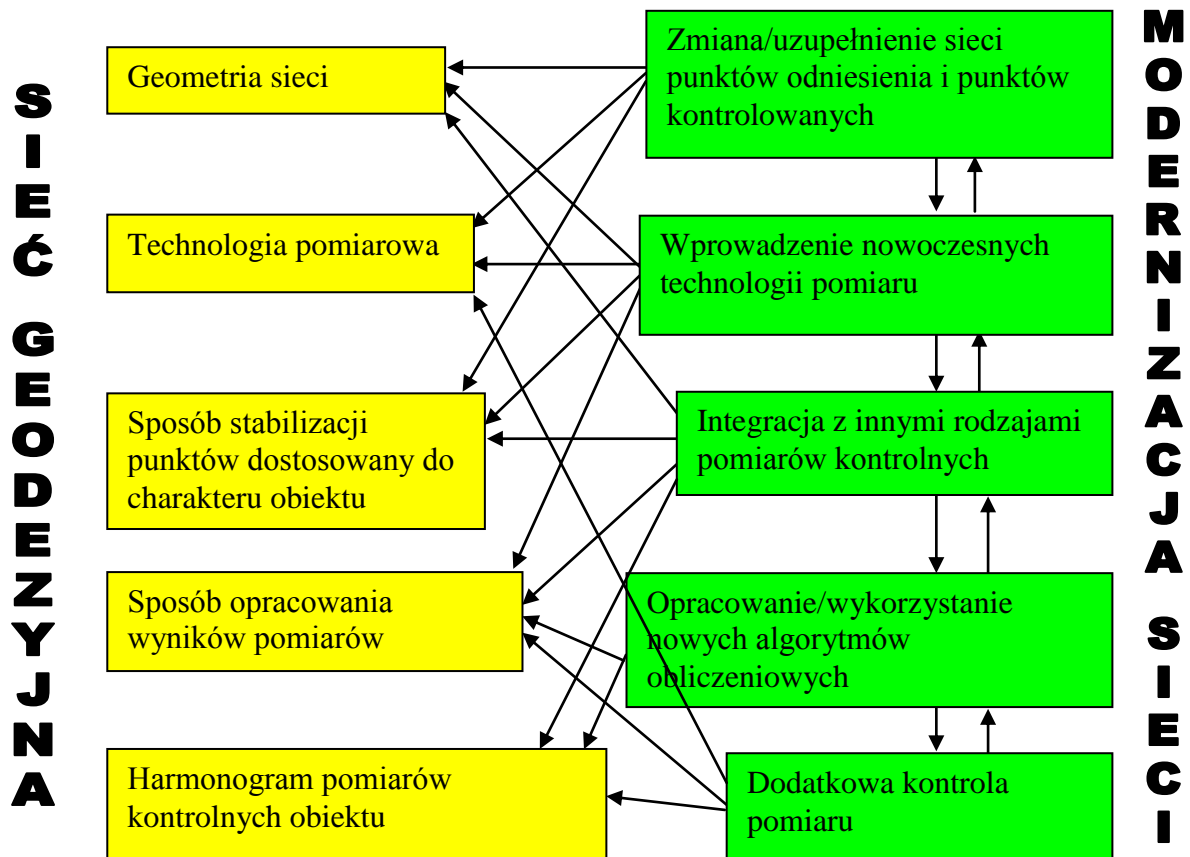
W takiej sytuacji modelowanie zachowania obiektu i wyznaczanie nowych lokalizacji punktów kontrolnych przy uwzględnieniu parametrów podłoża i konstrukcji oraz zmiennych

wartości zwierciadła wody górnej może być dobrym rozwiązaniem problemu dostosowania sieci punktów kontrolnych do nowych warunków pracy obiektu, a co za tym idzie podniesieniem jakości bieżącego monitoringu.

Zakres modernizacji sieci zawsze będzie zależny od potrzeb i możliwości finansowo-technicznych właściciela i użytkowników obiektu. Modernizacja sieci może obejmować:

- tylko jeden element składowy sieci – np. zmiana geometrii sieci, usprawnienie procesu pomiarowego, opracowanie nowych algorytmów obliczeniowych uwzględniających dodatkowe dane pomiarowe,
- unowocześnienie kilku bezpośrednio związanych ze sobą składników procesu wyznaczania przemieszczeń (np. technologia pomiaru i sposób obliczania przemieszczeń),
- dołączenie nowych elementów do sieci istniejącej – np. rozszerzenie sieci o dodatkowe punkty, czujniki pomiarowe, uwzględnienie pomiarów dodatkowych i/lub nowych metod kontroli poprawności wykonania pomiaru.

Modernizacja sieci kontrolnej przy generalnym remoncie i przebudowie obiektu może mieć charakter kompleksowy i uwzględniać wszystkie wymienione powyżej aspekty. Wprowadzenie zmian tylko w jednym z elementów sieci, zawsze będzie miało wpływ na inne elementy, ściśle z nim powiązane poprzez charakter sieci oraz specyfikę wykonywanych pomiarów geodezyjnych (Rys. 25).



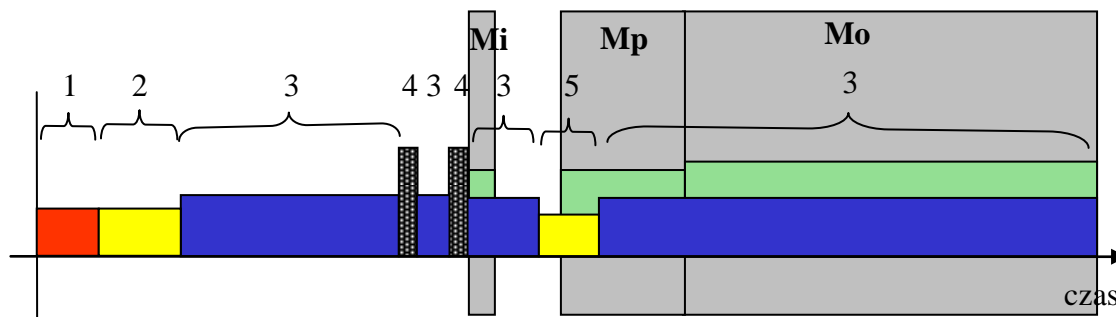
Rys. 25 Wpływ wybranych aspektów modernizacji na różne elementy sieci geodezyjnej.

W zależności od potrzeb możemy wyróżnić trzy rodzaje modernizacji kontrolnej sieci geodezyjnej (Rys. 26):

Modernizacja interwencyjna – będąca następstwem zmian obiektu koniecznych po sytuacji awaryjnej lub pracy obiektu w warunkach nie przewidzianych w projekcie (np. wody większej niż stuletnia dla której przyjmuje się obciążenia przy projektowaniu obiektu, zwiększenie ruchu po koronie (przy udostępnieniu korony na drogę publiczną), itp.),

Modernizacja planowa – związana z modernizacją lub przebudową samego obiektu, a także zmianą funkcji użytkowej. Taka modernizacja powinna być kompleksowa i bazować na danych z poprzedzającego przebudowę okresu eksploatacyjnego (od momentu oddania obiektu do eksploatacji). Modernizacja planowa, jeżeli zostanie ograniczona tylko do wybranych elementów sieci geodezyjnej powinna być tak przeprowadzona, aby modernizacja kolejnych elementów była w pełni możliwa, a kolejne zmiany elementów już zmodernizowanych mogły odbywać się w zależności od potrzeb i możliwości inwestora w sposób nie wymagający dużych nakładów finansowych, ani poważnych zmian technicznych. Te kolejne zmiany sieci można określić mianem modernizacji „otwartej”.

**Modernizacja otwarta** – bez zmian geometrii sieci, pozwalająca na unowocześnianie technologii pomiarów, sposobów obliczeń, algorytmów kontrolnych, integrowanie różnych metod kontroli obiektu (geodezyjnych i typowo hydrotechnicznych).



1. Okres projektowania obiektu
2. Okres budowy
3. Okres normalnej eksploatacji
4. Okres tzw. eksploatacji wyjątkowej (np. w czasie wielkiej wody)
5. Okres przebudowy obiektu (remont, zmiana funkcji)

- Mi** – modernizacja interwencyjna
- Mp** – modernizacja planowa
- Mo** – modernizacja „otwarta”

Rys. 26 Okresy modernizacji sieci geodezyjnej na tle okresów budowy, eksploatacji i przebudowy obiektu.

## 2.5 Podstawowe założenia i ograniczenia procesu modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej

### 2.5.1 Podstawowe założenia procesu modernizacji

Modernizacja sieci powinna opierać się na następujących założeniach:

1. Wprowadzanie tylko uzasadnionych zmian przy najmniejszych nakładach finansowych.
2. Rozszerzenie procesu pomiarowego o inne dane o charakterze geometrycznym nie wykorzystywane w sieci klasycznej np. odczyty szczelinomierzy, pochyłomierzy i inklinometrów oraz danych o charakterze innym niż geodezyjny np. hydrologicznych (wskazania piezometrów, wielkość filtracji itp.), w celach kontrolnych, dla podniesienia wiarygodności wyników pomiaru – w przypadku istniejącego na obiekcie Automatycznego Systemu Technicznej Kontroli Zapór (ASTKZ), do sieci powinny zostać włączone nowe punkty pozwalające na powiązanie pomiaru geodezyjnego z pomiarami

hydrotechnicznymi i geometrycznymi obserwowanymi lokalnie (pomiarы względne, nie odnoszone do zewnętrznego układu odniesienia).

3. Lokalizacja nowych punktów kontrolowanych na obiekcie powinna być poprzedzona analizą wykorzystującą najnowsze badania dot. podłoża gruntowego, właściwości materiałów (betonu), poziomem filtracji (prawidłowości działania drenażu). Analiza pracy konstrukcji powinna być wykonana przy użyciu nowoczesnych programów komputerowych wykorzystujących zaawansowane metody modelowania numerycznego (np. metoda elementów skończonych) pozwalające na uwzględnienie parametrów podłoża, naprężeń konstrukcji, wielkości filtracji, wysokości zwierciadła wody górnej i dolnej oraz innych ważnych parametrów hydrotechnicznych.
4. w przyszłości powinna być możliwa dalsza modernizacja sieci związana z wykorzystaniem nowych technologii pomiarowych i opracowaniem nowych sposobów opracowania wyników pomiaru co zapewniłoby otwartość systemu pomiarowo-kontrolnego.

#### 2.5.2 Ograniczenia dla modernizacji sieci geodezyjnych

Podstawowymi ograniczeniami w procesie modernizacji sieci są:

- a) ograniczenia wynikające z lokalizacji i sposobu stabilizacji punktów sieci geodezyjnej oraz rozmieszczenia i rodzaju czujników do pomiarów niegeodezyjnych,
- b) ograniczenia wynikające ze specyfiki konstrukcji obiektów hydrotechnicznych,
- c) uwarunkowania geologiczne występujące wokół obiektu,
- d) ograniczenia związane z prawami własności nieruchomości (głównie terenów przyległych do obiektu, na których mają być lokalizowane nowe punkty sieci),
- e) ograniczenia wynikające z przepisów o ochronie przyrody, związane z pozyskaniem koniecznej widoczności między punktami sieci,
- f) ograniczenia w lokalizacji nowych punktów wynikające z lokalizacji zaplecza gospodarczo-socjalnego obiektu oraz zabudowy mieszkalnej i gospodarczej sąsiednich miejscowości (często będących ośrodkami turystyki, rekreacji i sportów wodnych),
- g) ograniczenia finansowe, związane z wielkością funduszy przeznaczanych na modernizację sieci przez właściciela obiektu.

### **3 MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (MES) W PROCESIE MODERNIZACJI GEODEZYJNEJ SIECI KONTROLNEJ**

#### **3.1 Podstawowe pojęcia z zakresu teorii MES**

Poniższy rozdział został opracowany na podstawie publikacji [Zienkiewicz, 1972], [Szostak-Chrzanowski, 1992], [Szostak-Chrzanowski, 1994], [Szostak-Chrzanowski, 2005], [Kacprzyk, 2005], [Stasiński, 2003].

Modelowanie numeryczne stanowi bardzo ważne i przydatne narzędzie zarówno do prawidłowego projektowania budowli hydrotechnicznych, jak i do oceny ich funkcjonowania w trakcie eksploatacji [Sorbjan, 2004]. Modelowanie numeryczne może być też bardzo przydatne w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej której pomiary są podstawą wyznaczania przemieszczeń punktów budowli hydrotechnicznej, dlatego też przedstawię pokrótce jego ważniejsze własności i sposoby realizacji obliczeń.

Podstawowymi zaletami modelowania numerycznego są:

- możliwość zastosowania odpowiedniego modelu matematycznego dla materiału z którego wykonywana jest budowla oraz możliwość wyodrębnienia stref charakteryzujących się różnymi parametrami teoretycznie tego samego materiału, ale kładzionego (np. wylewanego betonu) w różnych warunkach, w trakcie poszczególnych etapów budowy,
- możliwość wiernego odwzorowania skomplikowanych kształtów budowli oraz jej styków z innymi konstrukcjami betonowymi i podłożem,
- możliwość łączenia ze sobą w jednym procesie modelowania różnych zjawisk takich jak konsolidacja, filtracja nieustalona, filtracja ustalona itp.,
- łatwość powtórzenia obliczeń przy konieczności zmiany np. na skutek wyników nowych badań oceny parametrów gruntowych. Prawidłowa ocena parametrów gruntowych ma kluczowe znaczenie przy modelowaniu numerycznym zachowania się zapory.

Metoda elementów skończonych (MES) jest obok metody różnic skończonych (MRS) jedną z najbardziej popularnych metod numerycznego rozwiązywania cząstkowych równań różniczkowych, a ściślej mówiąc znajdowania rozwiązań szczególnych. MES jest bogato udokumentowana zarówno od strony matematycznej jak i konkretnych zastosowań [Kacprzyk, 2005], [Kleiber, 1985], [Zienkiewicz, 1972], [M3], [M5].

Prace prof. Zienkiewicza (University of Wales, Swansea) opisujące metodę elementów skończonych uważane są za fundamentalne w tej dziedzinie. Jednostkowe przykłady zastosowań MES w obliczeniach konstrukcji inżynierskich opisane w latach 70-tych XX w. obecnie są uznane za wzorcowe rozwiązania tego typu problemów inżynierskich. Teraz przy użyciu komputerów o dużej mocy obliczeniowej podobne analizy mogą być wykonywane powszechnie, w dużej ilości wariantów, dla różnych obiektów.

MES jest obecnie jedną z najszerzej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Jej uniwersalność, polegająca na łatwości schematyzacji różnych obszarów o skomplikowanej geometrii, także niejednorodnych i anizotropowych, kwalifikuje ją jako dobre narzędzie do modelowania problemów geotechniki.

Z matematycznego punktu widzenia metoda elementów skończonych polega na wyborze specjalnych funkcji bazowych  $\varphi_i(x)$ , przy czym funkcje te są różne od zera tylko w niewielkiej części  $V_i$  obszaru  $V$ , w którym poszukujemy rozwiązania. Dlatego w metodzie elementów skończonych dokonujemy dyskretyzacji zadania, poczynając od podziału rozważanego obszaru na podobszary (elementy). Wewnątrz elementów określamy funkcje bazowe  $\varphi_i$  zapewniające ciągłość poszukiwanej funkcji (będącej rozwiązaniem zadania) na granicy elementów. Stosowane funkcje bazowe są najczęściej wielomianami, natomiast elementy prostymi bryłami (czworościany, sześciiany) przy dyskretyzacji przestrzeni lub prostymi figurami (trójkąty, czworokąty) przy dyskretyzacji powierzchni. Wówczas obliczenia MES są nieskomplikowane i efektywne.

Z inżynierskiego punktu widzenia, MES rozumiana jest jako pewien sposób postępowania podczas rozwiązywania zadań fizyki (gdy mamy do czynienia z ośrodkiem ciągłym). Jest to więc określony ciąg operacji wykonywanych przez inżyniera projektanta i komputer, w trakcie poszukiwania rozwiązania, począwszy od sformułowania zadania, a skończywszy na graficznej interpretacji wyników obliczeń. Ten punkt widzenia wynika między innymi z faktu, że sposób postępowania przy zastosowaniu MES jest niemal identyczny dla wszystkich rozwiązywanych zagadnień.

Układem rzeczywistym nazywamy pewien obszar w przestrzeni obejmujący ośrodek ciągły, obiekt techniczny istniejący w rzeczywistości lub projekt obiektu. Badania teoretyczne zachowania się obiektu rzeczywistego, na skutek oddziaływań zewnętrznych lub przemian wewnętrznych (procesy chemiczne, termiczne), wymagają stworzenia odpowiedniego modelu myślowego, który wraz ze zbiorem formuł opisujących jego własności nazywany jest modelem matematycznym.

Dla danego obiektu rzeczywistego można opracować różne modele matematyczne w zależności od przyjętych założeń, poczynionych uproszczeń oraz sposobu opisu zachodzących procesów fizycznych. Uproszczenia, poczynione przy opracowywaniu modelu, ułatwiają jego opis, jednakże mają one wpływ na dokładność poszukiwanego rozwiązania. Daleko idące uproszczenia mogą spowodować pominięcie istotnych cech układu rzeczywistego, natomiast zbyt złożony model matematyczny może spowodować błędy w rozwiązaniu ze względu na skomplikowany proces obliczeniowy.

Nie ma jednoznacznych wskazań, jak należy budować model matematyczny. Proces ten musi być oparty na intuicji i doświadczeniu inżynierskim. Najczęściej stosowane uproszczenia techniczne są następujące:

- uproszczenia kształtu rozważanego obszaru,
- pomijanie mało istotnych oddziaływań zewnętrznych,
- przyjęcie jednorodności ośrodka zawartego w danym obszarze (modularnym),
- pominięcie (dla zagadnień mechaniki) odkształceń lub ciężaru niektórych elementów układu,
- przyjęcie liniowych charakterystyk dla pewnych własności fizycznych badanego układu,
- założenie, że własności fizyczne są stałe w czasie,
- przybliżenie procesów stochastycznych, zachodzących w układzie rzeczywistym, procesami deterministycznymi.

Rozwiązując zadanie MES, należy utworzyć model matematyczny zawierający następujące elementy:

- opis powierzchni  $S$  ograniczającej obszar  $V$ , wewnątrz którego poszukujemy rozwiązania,
- równania różniczkowe opisujące stan ciała w obszarze  $V$ ,
- warunki brzegowe na powierzchni  $S$  oraz warunki ciągłości,
- wymuszenia, czyli pewne zewnętrzne przyczyny wywołujące skutki określone równaniem stanu.

Stosując do rozwiązania zadania mechaniki MES, musimy opracować model dyskretny (obliczeniowy) ekwiwalentny do modelu matematycznego ośrodka ciągłego. W procesie tworzenia tego modelu można wyodrębnić następujące etapy postępowania:

- podział rozpatrywanego obszaru  $V$  na podobszary  $V_e$  — elementy.
- przyjęcie punktów węzłowych tak, aby można było przeprowadzić aproksymację poszukiwanej funkcji wewnątrz obszaru  $V_e$  za pomocą funkcji aproksymujących i niezależnych parametrów węzłowych.
- określenie dla każdego elementu struktury macierzy opisujących jego własności.



- utworzenie macierzy dla całego układu na podstawie macierzy elementów.
- określenie warunków brzegowych i obciążenia ciała.
- rozwiązanie podstawowego układu równań.
- obliczenie, na podstawie wyznaczonych parametrów węzłowych, funkcji pochodnych.

Wyodrębnienie elementów w obszarze  $V$ , w którym poszukujemy rozwiązania zadania, jest bardzo ważnym etapem w tworzeniu modelu obliczeniowego MES.

Sposób dyskretyzacji zależy od geometrii obszaru, własności fizycznych, pewnych ogólnych przesłanek co do wyników rozwiązania, a także oczekiwanej efektywności obliczeń.

Sposób dyskretyzacji obszaru warunkuje liczbę niewiadomych, wielkość i kształt elementów, a to wpływa na dokładność rozwiązania zadania. W celu uzyskania wymaganej dokładności poszukiwanego rozwiązania, wykorzystywane elementy powinny być na tyle małe, aby aproksymowane wewnątrz nich funkcje mogły być przybliżone za pomocą wielomianów. Jednakże zmniejszanie elementów prowadzi do zwiększania liczby argumentów poszukiwanej funkcji wartości węzłowych, a to powoduje jednocześnie wydłużenie czasu obliczeń. Stosuje się więc najczęściej nierównomierny podział na elementy. Jeżeli możemy przewidzieć, gdzie poszukiwana funkcja zmienia się gwałtownie, to tam zagęszczamy siatkę elementów, a tam gdzie funkcja zmienia się łagodnie, siatkę elementów rozrzedzamy.

Wybór punktów kontrolowanych na obiekcie to też pewna forma dyskretyzacji monitorowanego obiektu, dokonana z punktu widzenia potrzeb jego kontroli (jest to zbiór punktów o relatywnie małej liczności w porównaniu z dyskretyzacją opisaną powyżej). Poprzez odpowiednie narzucenie lokalizacji wybranych węzłów siatki MES możemy bezpośrednio związać dyskretyzację obiektu dokonaną dla celów analizy pracy konstrukcji z punktami kontrolowanymi w trakcie pomiaru geodezyjnego.

Punkty we wnętrzu bryły obiektu, których ruch jest modelowany w czasie wykonywania analizy MES są niedostępne dla geodezyjnych pomiarów kątowno-liniowych, które ze względu na brak możliwości wykonania pomiaru ograniczają się do nie zakrytych zewnętrznych powierzchni obiektu (ściana odpowietrzna).

Dokładność rozwiązania zależy przede wszystkim od dokładności aproksymacji wielkości fizycznych wewnątrz elementu za pomocą funkcji interpolacyjnych nazywanych dalej funkcjami kształtu. Przy właściwym odwzorowaniu wielkości fizycznych elementu, zmniejszenie obszarów elementów (zwiększenie ich liczby) powoduje, że wartości węzłowe

funkcji poszukiwanej, stanowiące przybliżone rozwiązanie zadania, zbliżają się do rozwiązania dokładnego.

Rozwiązywanie problemów przy pomocy MES składa się z kilku etapów:

**I. Zbudowanie modelu obliczeniowego** – polega na podziale rozpatrywanego obszaru na elementy wraz z przyjęciem ich typu i parametrów węzłowych.

**II. Analiza poszczególnych elementów** – polega na wyliczeniu macierzy sztywności (zagadnienia mechaniki) wraz z przyjęciem odpowiednich funkcji kształtu, które służą do przybliżonego określania pola poszukiwanych wartości i stanowią o zbieżności procesu obliczeniowego, w przemieszczeniowej reprezentacji metody elementów skończonych funkcje te służą do przybliżonego opisu pola przemieszczeń. Funkcje kształtu powinny:

- zapewnić ciągłość przemieszczeń w obszarze elementu i zgodność przemieszczeń na jego brzegach – jest to kryterium zgodności,
- być tak dobrane aby podczas ruchu elementu jako ciała sztywnego, nie powstawały w nim naprężenia; jest to tzw. kryterium ruchu sztywnego, jego spełnienie zapewniają składniki stałe i liniowe,
- zawierać składniki dające stałe wartości odkształceń, jest to tzw. kryterium stałych odkształceń uwzględniające fakt, że wraz ze zmniejszaniem się wymiarów elementu, naprężenia w nim występujące zbiegają do pewnej stałej wartości.

Przemieszczenia węzłów sieci MES są obliczane z przekształconego równania równowagi sił [Szostak-Chrzanowski, 2005]:

$$K\delta = r - f^b - f^{\sigma o} - f^{\varepsilon o}, \quad (1)$$

(gdzie  $\delta = (u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots \ u_n \ v_n \ w_n)^T$  jest wektorem przemieszczeń,  $K$  jest globalną macierzą sztywności,  $f^b$  jest wektorem obciążenia pochodzącego od sił własnych,  $f^{\sigma o}$  jest wektorem obciążenia pochodzącego od naprężeń początkowych,  $f^{\varepsilon o}$  jest wektorem obciążenia pochodzącego od odkształceń początkowych i  $r$  jest wektorem obciążenia pochodzącego z sił zewnętrznych).

Macierz i wektory globalne modelu otrzymywane są poprzez superpozycję lokalnych (wyznaczonych w każdym elemencie lub w punktach węzłowych każdego elementu siatki MES) macierzy  $K_e$  i wektorów sił  $f_e^b$ ,  $f_e^{\sigma o}$ ,  $f_e^{\varepsilon o}$ .

Lokalna macierz sztywności  $K_e$  i lokalne wektory, np. obciążeń własnych  $f_e^b$ , obliczane są ze wzorów:

$$K_e = \int_{\Omega} B_e^T D B_e dx dy dz, \quad (2)$$

$$f_e^b = - \int_{\Omega} N_e^T b dx dy dz, \quad (3)$$

gdzie  $B$  jest macierzą relacji między odkształceniami i przemieszczeniami węzłów,  $N_e$  jest funkcją kształtu,  $D$  jest macierzą konstytutywną, która w przypadku materiału izotropowego zawiera parametry sprężystości: moduł Younga ( $E$ ) i liczbę Poissona  $\nu$  oraz  $b = (b_x \ b_y \ b_z)^T$  jest wektorem sił własnych, a  $\Omega$  jest obszarem całkowania..

**III. Analiza zbioru elementów układu obliczeniowego** – ilość równań macierzy równa jest liczbie węzłów w schemacie.

**IV. Ustalenie warunków brzegowych** – ze względu na to, że wyznaczona globalna macierz sztywności jest osobliwa, aby otrzymać rozwiązanie równania (1), należy ustalić warunki brzegowe.

#### V. Rozwiązanie globalnego układu równań

Niezbędne warunki brzegowe zapiszemy w postaci:

$$H^T \delta = d, \quad (4)$$

gdzie  $d$  jest wektorem znanych przemieszczeń i  $H$  jest macierzą położenia.

Rozwiązanie równania (1) przy warunkach brzegowych (4) ostatecznie przyjmuje postać:

$$\delta = (K + sHH^T)^{-1} (f + sHd), \quad (5)$$

gdzie  $s$  jest współczynnikiem skali odpowiadającym wadze pseudoobserwacji w stosowanej w geodezji metodzie wielkich wag.

## VI. Prezentacja wyników.

Wszystkie wyżej wymienione etapy zazwyczaj rozdzielone są między trzy moduły programu obliczeniowego. Pierwszy z nich – **preprocesor** – odpowiedzialny jest za komunikację z użytkownikiem, czyli wprowadzenie danych niezbędnych do jednoznacznego zdefiniowania schematu obliczeniowego oraz przygotowanie danych do obliczeń (generowanie siatki). Segment drugi – **moduł obliczeniowy (lub solver)** – zajmuje się tylko wykonywaniem obliczeń. Zadaniem trzeciego modułu – **postprocesora** – jest przygotowanie otrzymanych wyników, a także ich prezentacja (przeważnie graficzna) oraz ewentualny wydruk.

Modelowanie metodą elementów skończonych może być bardzo pomocne w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej, szczególnie podczas lokalizacji punktów kontrolowanych na obiekcie. Opracowanie wielu scenariuszy zdarzeń – sytuacji typowych oraz awaryjnych, a następnie wykonanie analiz numerycznych, przy wykorzystaniu „wytarowanego modelu” podłoża i konstrukcji może wskazać miejsca najbardziej narażone na największe naprężenia, których wynikiem są przemieszczenia i deformacje.

Opracowanie wariantowe jest jednym z możliwych sposobów tworzenia modelu, inne to tworzenie modelu na podstawie rzeczywiście zaobserwowanych stanów obiektu np. przy uwzględnieniu poziomu wody w zbiorniku, odczytów piezometrów, termometrów i innych czujników zainstalowanych na obiekcie. Jeśli modelowanie wykonuje się równoległe z odczytami czujników i na podstawie wyników modelowania w tzw. czasie rzeczywistym kontroluje się eksploatowany obiekt można wyniki takich „równoległych” obliczeń wykorzystać w trakcie geodezyjnych pomiarów kontrolnych realizowanych w tym samym czasie i co za tym idzie przy takich samych warunkach pracy konstrukcji.

W tej pracy, w jej następnych rozdziałach opisano propozycje wykorzystania modeli numerycznych w dwóch aspektach modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej:

- lokalizacji punktów kontrolowanych,
- kontroli pomiaru geodezyjnego – wykorzystanie modelowania w procesie opracowania wyników pomiaru.

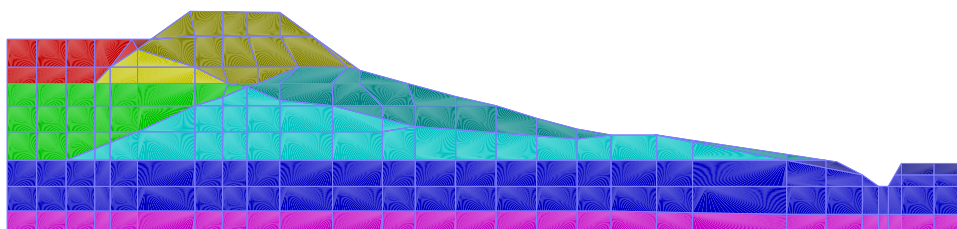
W związku z postulowaną wysoką dokładnością wyznaczonych metodami geodezyjnymi przemieszczeń punktów kontrolowanych obiektu ważne jest oszacowanie dokładności obliczonych w modelu numerycznym przemieszczeń punktów. Oszacowanie to jest bardzo trudne. Należy pamiętać o tym, że wartości decydujące o dokładności wyników obliczeń numerycznych – parametry podłoża oraz materiałów konstrukcyjnych, są

przyjmowane na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych, nie zawsze wiernie odzwierciedlających warunki rzeczywiste. Stąd wartości tych parametrów mogą być obarczone znacznym, trudnym do oszacowania błędem. Dlatego ważne jest porównanie wyników modelowych z wynikami pomiarów wykonywanych w okresie eksploatacji poprzedzającym analizowany stan obiektu.

### 3.2 Przykłady zastosowań MES w hydrotechnice

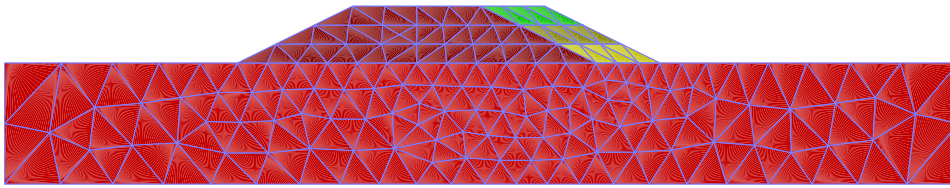
Modelowanie numeryczne za pomocą metody elementów skończonych (MES) daje bardzo szerokie możliwości analizy zachowania się konstrukcji hydrotechnicznych. Metoda elementów skończonych jest stosowana tam, gdzie zawodzą tradycyjne sposoby obliczania nośności granicznej czy osiadania konstrukcji. Projekty wzmocnienia konstrukcji, prognozy osiadań w skomplikowanych sytuacjach oraz na podatnych podłożach organicznych bądź konsolidujących glinach czy iłach, mogą być skutecznie analizowane za pomocą metody elementów skończonych.

Modele numeryczne były stosowane z powodzeniem do analizy wielu konstrukcji hydrotechnicznych w Polsce, między innymi analizy muru oporowego w Czorsztynie-Niedzicy oraz do modelowania awarii osadników odpadów przemysłowych w Skawinie, Połańcu, Stalowej Woli i Krasnymstawie (Rys. 27).

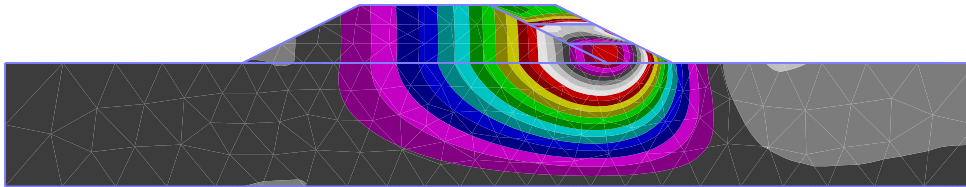


Rys. 27 Schemat stref materiałowych do analizy obwałowania osadnika w Krasnymstawie.

MES daje duże możliwości modelowania zjawisk dotyczących budowy nasypów i obwałowań osadników przemysłowych. Wielokrotnie wykonywano obliczenia wieloetapowego wznoszenia lub poszerzania obwałowań na podatnych konsolidujących podłożach organicznych (Rys. 28, Rys. 29).

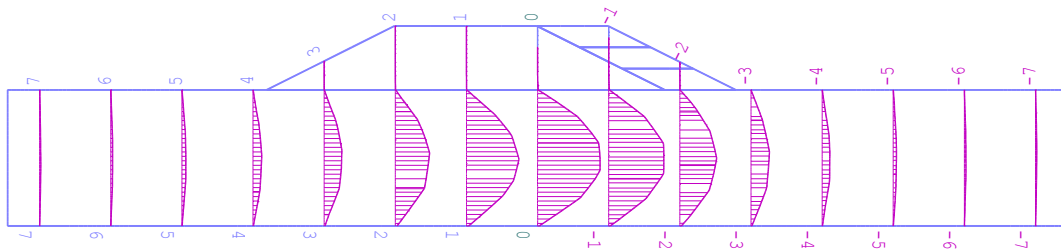


Rys. 28 Schemat stref materiałowych do analizy poszerzania nasypu na podatnym podłożu.



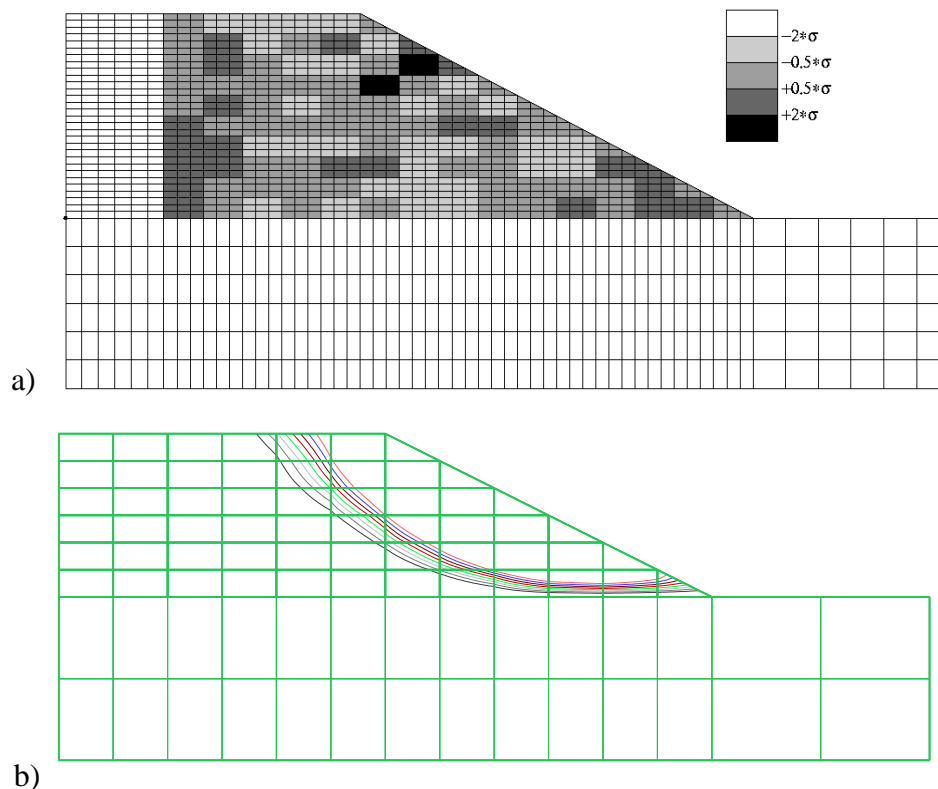
Rys. 29 Izolinie przemieszczeń pionowych w formie map barwionych.

W trakcie obliczeń istnieje możliwość uwzględnienia efektów zamykania się porów w trakcie konsolidacji torfów czy glin, które powodują zmianę współczynnika filtracji, a w konsekwencji zmianę prędkości redystrybucji nadwyżki ciśnienia porowego (Rys. 30).



Rys. 30 Nadwyżka ciśnienia porowego w formie przekrojów przy analizie poszerzania nasypu na podatnym podłożu.

Do analizy zagadnień stateczności oprogramowanie realizujące obliczenia MES może być wyposażone w automatyczną procedurę  $c$ - $\phi$  redukcji, prowadzącą do utraty stateczności modelu numerycznego budowli i obliczenia współczynnika bezpieczeństwa. W obliczeniach stateczności istnieje możliwość uwzględnienia wpływu zmienności parametrów gruntu  $c$  i  $\phi$  na współczynnik bezpieczeństwa  $F$  oraz kształt krzywej poślizgu (Rys. 31). [Opyrchał, 2007].



Rys. 31 Analiza stateczności a) przykładowa siatka obliczeniowa, odcień jasny – słaby element, odcień ciemny - mocny, lewy brzeg i podłoże – elementy niemodyfikowane, b) kształt krzywej poślizgu w zależności od zmienności parametrów gruntu.

Omawiana metoda jest również wykorzystywana do numerycznego modelowania posadowienia budynków wysokich w Warszawie oraz konstrukcji warszawskiego metra. W obliczeniach tego typu należy uwzględniać zjawiska związane z występowaniem wody gruntowej pod ciśnieniem, często w paru poziomach wodonośnych w jednym przekroju. W wykonywanych obliczeniach dotyczących głębokiego posadowienia budowli oprócz wyznaczenia osiadań projektowanego obiektu, określone jest oddziaływanie na obiekty sąsiednie znajdujące się zarówno na powierzchni jak i poniżej poziomu terenu. Analogiczne obliczenia mogą być wymagane przy projektowaniu np. części podziemnej elektrowni dobudowywanej do istniejącego stopnia wodnego lub innej konstrukcji zlokalizowanej w strefie oddziaływań na budowlę piętrzącą.

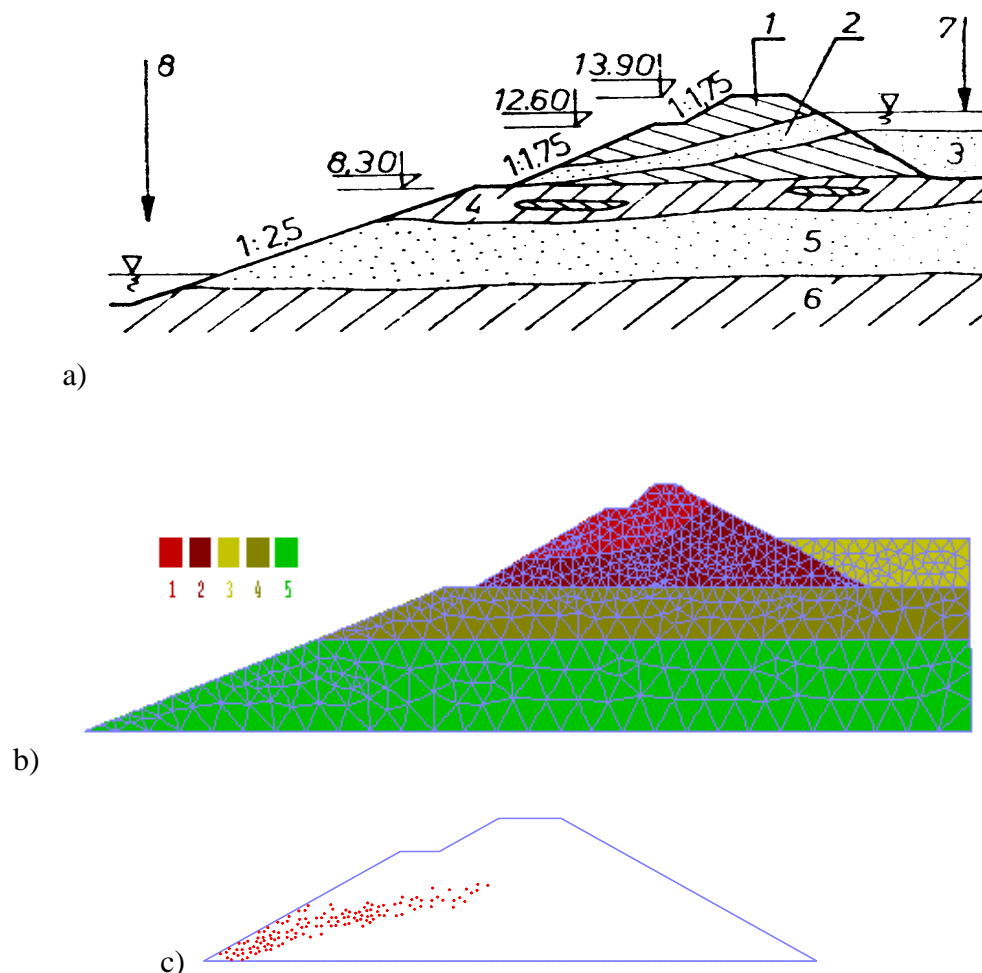
Wszystkie opisane obliczenia zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu oprogramowania zawartego w pakiecie HYDRO-GEO [Dłużewski, 1997].

Za pomocą programu HYDRO-GEO wykonano także analizę wytrzymałościową kilkunastu zapór, w tym Włocławek, Besko, Dobczyce, Wisła, Dębe, Mietków, Jeziorsko, Jarnołówki i inne. Analiza numeryczna zachowania się zapory kamiennej przy zmiennych



obciążeniach (napelnianie zbiornika) z uwzględnieniem wyników badań geofizycznych jest przedstawiona w pracy [Dłużewski, 2000]. W opracowaniu analizowano zmiany parametrów materiałowych konstrukcji i podłoża mogące spowodować wzrost osiadań. Wykorzystano w tym celu tzw. analizę wstecz (analizę odwrotną).

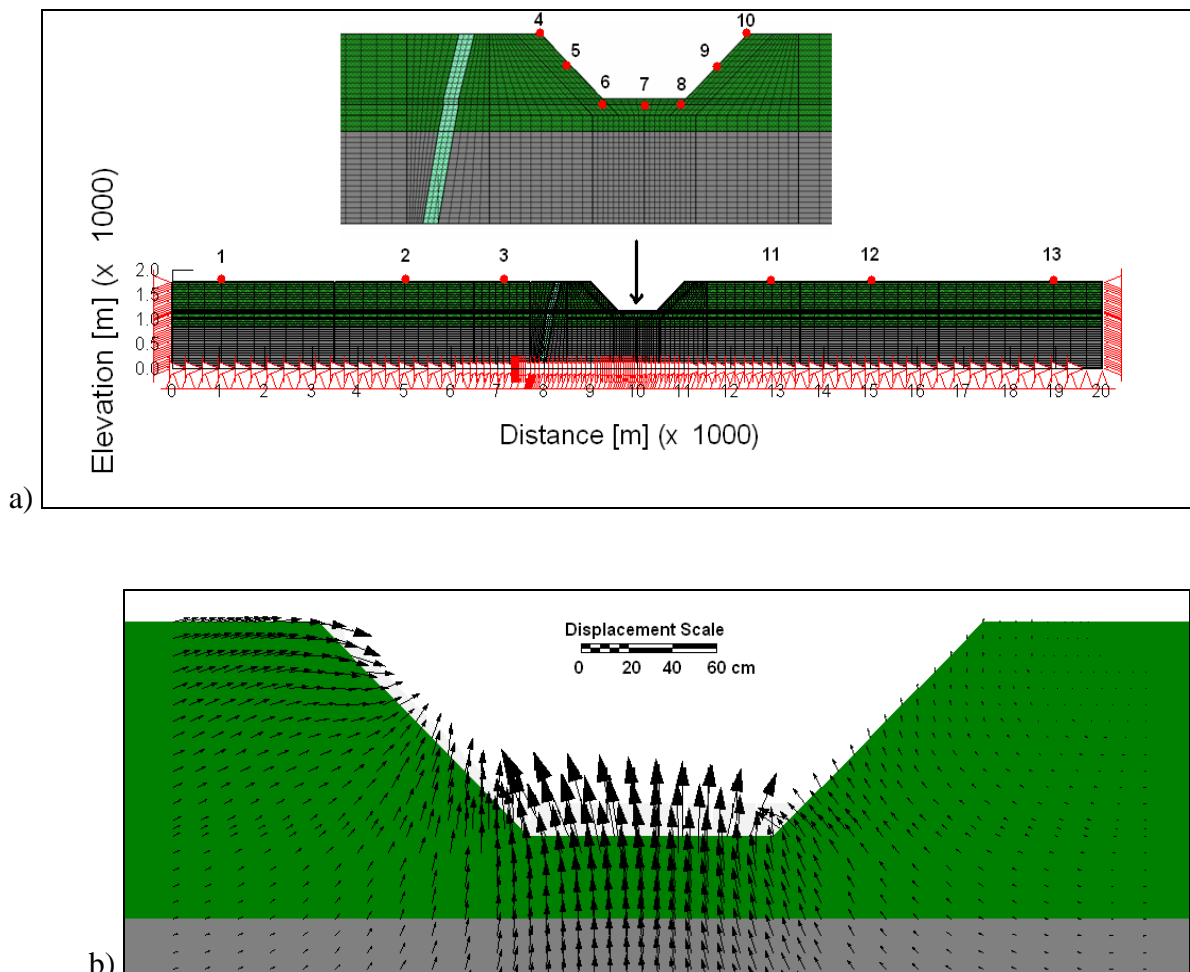
Często w obliczeniach należy uwzględniać zmiany parametrów materiałowych wynikających np. z destrukcyjnego działania wody. W praktyce inżynierskiej spotyka się często zjawiska niezwykle istotne ze względu na bezpieczeństwo obiektu, których ocena jest bardzo trudna. Takim zjawiskiem jest np. sufozja mechaniczna wołana przez filtrującą wodę. Opis zjawiska wymaga rozwiązania skomplikowanych procesów sprzężonych. W pracy [Popielski, 2000] podjęto udaną próbę odtworzenia awarii obwałowania.



Rys. 32 Rys. 3.6. a) przekrój przez obwałowanie w miejscu awarii [Broś, 1984] gdzie: 1 - obwałowanie z zagęszczonych popiołów, 2 - rurowa strefa luźnych popiołów, 3 - składowane popioły, 4 - gliny rzeczne z torfami, 5 - piaski i żwiry, 6 - iły miocenińskie, 7 - woda nadosadowa, 8 - kanał żeglugowy,  
b) warstwy nasypu i siatka elementów skończonych,  
c) punkty plastyczne - wynik przeprowadzonej symulacji numerycznej obrazujący powiększającą się strefę w, której została wyczerpana nośność materiału.

Szczegóły opisanych wyżej analiz, zrealizowanych m. in. w Instytucie Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej można znaleźć w opracowaniach [Popielski, Stasiński, 2005], [Popielski, Zaczek-Peplinska, 2007].

Na szczególną uwagę w dziedzinie zastosowania modelowania numerycznego w celu prognozowania przemieszczeń zarówno gruntu jak i konstrukcji zasługują prace realizowane w Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New Brunswick przez Profesora Adama Chrzanowskiego i Profesor Annę Szostak-Chrzanowski [Szostak-Chrzanowski, 2002], [Szostak-Chrzanowski, 2007]. Przykładami wykorzystania modelowania metodą elementów skończonych w geotechnice są analizy wykonane w celu prognozowania zachowania podłoża podczas eksploatacji złóż mineralnych metodą odkrywkową – (Rys. 33).

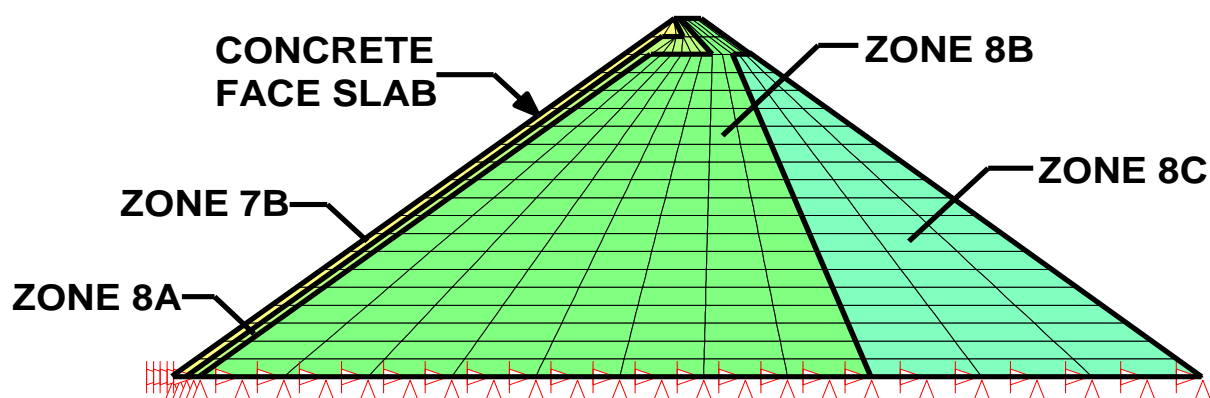


Rys. 33 Modelowanie metodą elementów skończonych przemieszczeń gruntów (Open Pit Mine) [Szostak-Chrzanowski, 2007]:

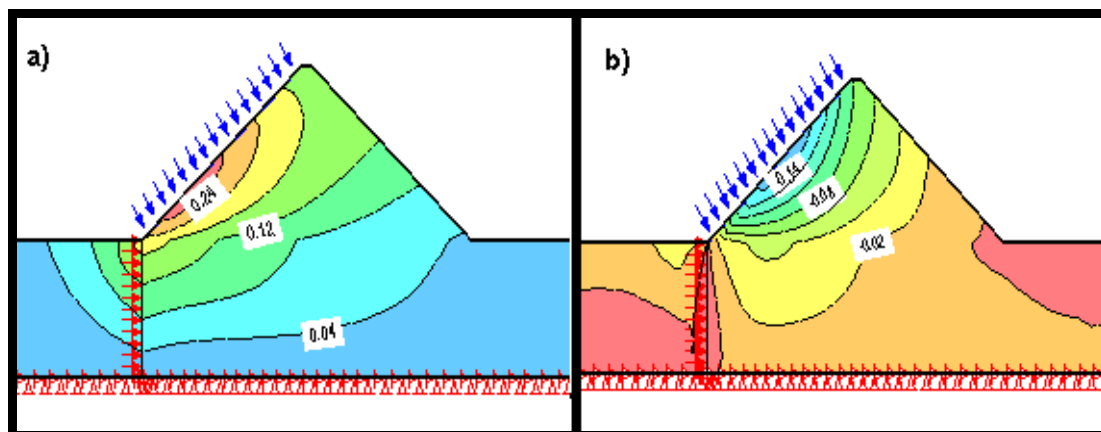
- a) siatka elementów skończonych dla złoża oraz warstw podłoża kopalni odkrywkowej,
- b) całkowite (łącznie) modelowane przemieszczenia po częściowej eksploatacji złoża.

Przykład ten nie dotyczy wprawdzie zastosowania MES w hydrotechnice, ale zasługuje na uwagę ze względu na wykorzystanie w tym projekcie wyników obserwacji geodezyjnych w celu weryfikacji modelu przez bezpośrednie związanie modelu MES i sieci geodezyjnej. Powiązanie to zostało zrealizowane w podobny sposób jak opisany w rozdziale 4 tej pracy - wybrane węzły siatki MES w miejscach zlokalizowano tam gdzie wykonywane były pomiary geodezyjne (m. in. stanowiska GPS, RTS).

Kanadyjskie centrum geodezji inżynieryjnej zajmuje się także badaniem przemieszczeń zapór i dla obiektów tego typu wykonywane są tam analizy numeryczne metodą elementów skończonych, dobrym przykładem jest model stworzony dla prognozowania przemieszczeń zapory nasypowej na podłożu skalnym po całkowitym napełnieniu zbiornika – rysunki (Rys. 34) i (Rys. 35).



Rys. 34 Wydzielone strefy materiałowe i siatka elementów skończonych dla zapory na rzece Toulmoustouc w północnej części stanu Quebec, Kanada [Szostak-Chrzanowski, 2007]



Rys. 35 Prognozowane przemieszczenia po napełnieniu zbiornika, zapora na rzece Toulnostouc w północnej części stanu Quebec, Kanada  
a) przemieszczenia poziome, b) przemieszczenia pionowe  
[Szostak-Chrzanowski i inni, 2007].

Specyficzny, dedykowany specjalnie dla kontroli zapór nasypowych sposób wykorzystania modeli numerycznych jest opisany w pracy [Sorbjan, 2004]. Praca ta opisuje proces przygotowania systemu ekspertowego do bieżącej kontroli stanu technicznego zapór GEO-TEKO. Modelowanie numeryczne jest wykorzystywane w tym systemie do tworzenia tak zwanej „normy”, czyli chwilowego prognozowanego stanu obiektu, którego model jest obliczany z uwzględnieniem bieżących (chwilowych) warunków. Wyniki modelowania traktowane jako aktualne normy stanu obiektu są porównywane z wartościami rejestrowanymi przez czujniki kontrolno-pomiarowe: piezometry, czujniki parcia gruntu, kolumny osiadań i inklinometry. Na tej podstawie korzystając z własnej Bazy Wiedzy zawierającej dane archiwalne opisujące zachowanie się obiektu w okresie normalnej eksploatacji system rozróżnia/diagnostuje cztery stany zapory: poprawna eksploatacja, stan wskazujący na możliwość awarii, stan awaryjny, stan katastrofalny. Analizy wykonywane przez system nie obejmują wyników geodezyjnych pomiarów kontrolnych.

Reasumując metoda elementów skończonych jest szeroko wykorzystywana hydrotechnice: do oceny stateczności budowli hydrotechnicznych, do analizy współpracy budowli z podłożem gruntowym, do modelowania osiadań, przy obliczaniu przemieszczeń dopuszczalnych i granicznych, do modelowania mechanizmów zniszczenia budowli, w celu symulacji przepływu wód gruntowych, do obliczania parć na budowle hydrotechniczne, do poszukiwania krzywej bądź powierzchni filtracji, przy rozwiązywaniu różnorodnych problemów związanych z nasycaniem wałów przeciwpowodziowych, do modelowania procesów sufozji wewnętrznej, do rozwiązywania problemów przepływu ciepła i zmian

temperatury oraz wywołanych stanów naprężeń, odkształceń i przemieszczeń spowodowanych zmianami temperatury, do modelowania reologii i do analizy wielu innych nie wymienionych powyżej ważnych zjawisk zachodzących w podłożu gruntowym bądź w samym obiekcie hydrotechnicznym.

Wymieniony zakres zastosowań nie obejmuje wszystkich opisanych w literaturze zastosowań MES w hydrotechnice. Nie ulega wątpliwości, że modelowanie numeryczne metodą elementów skończonych stało się bardzo ważnym elementem wspomagającym ocenę stanu technicznego budowli wodnych.

### **3.3 Dokładność modelowania MES**

Poniższy rozdział został opracowany głównie na podstawie publikacji [Babuska, 1986], [Szostak-Chrzanowski, 1993], [Szostak-Chrzanowski, 1994], [Szostak-Chrzanowski, 2002], [Popielski, Stasiński, 2005].

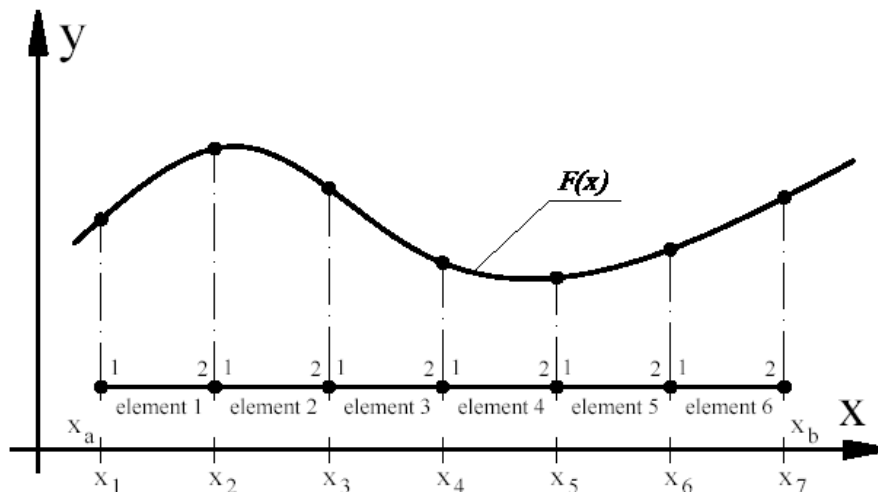
Zagadnienia z zakresu geotechniki zaliczane są do kategorii szczególnie trudnej, ze względu na nakładanie się skomplikowanych w odwzorowaniu matematycznym zjawisk silnie nieliniowych i o wysokiej niepewności związanej z oceną wartości parametrów materiałowych, a także układu warstw podłoża.

Problem oceny dokładności rozwiązań w modelowaniu numerycznym pozostaje wciąż jednym z wiodących problemów wytyczających kierunki rozwoju metody elementów skończonych. Wiąże się bowiem z dokładnością oszacowania wartości węzłowych, a zatem poprawnością dyskretyzacji, błędem wywołanym sposobem uwzględnienia warunków brzegowych itd. [Demkowicz, 1992], [Szabo, 1990]. W większości problemów, oprócz uzyskania wystarczająco dobrego przybliżenia rozwiązania równie ważne jest wyznaczenie jego pochodnych (np.: przemieszczenie – odkształcenie, potencjał – strumień), co zwykle jest znacznie trudniejsze.

Trudno podać jednoznaczne kryteria przyjęcia lub odrzucenia rozwiązania numerycznego. Te bowiem zależą od wymaganej dokładności zarówno otrzymanych wartości węzłowych, jak i wartości pochodnych funkcji rozwiązującej. Zwykle różnym punktom obszaru rozwiązania przypisuje się różne wymagania co do dokładności. Z praktycznego punktu widzenia niecelowe wydaje się jednak postulowanie dokładności rozwiązania

zdecydowanie wyższej niż dostępna dokładność określenia warunków brzegowych, a w szczególności parametrów materiałowych.

Ważne jest, aby zdawać sobie sprawę jaki jest wpływ warunków brzegowych na wynik wykonywanej w trakcie modelowania zjawiska aproksymacji. Najprościej przedstawić ten problem na przykładzie aproksymacji funkcji jednowymiarowej  $F(x)$  za pomocą elementów rzędu pierwszego (Rys. 36).



Rys. 36 Schemat dyskretyzacji zadania [Popielski, Stasiński, 2005].

Dla każdego z elementów niezbędne jest zdefiniowanie pary funkcji opisujących transformację układów:

Układ lokalny elementu (współrzędne  $\xi$ )  $\leftrightarrow$  Układ globalny (współrzędne  $x$ )

zapisanych w postaci (6) i (7).

$$x(\xi) = x_i + \alpha_i \cdot \xi, \quad (6)$$

$$\xi(x) = \frac{1}{\alpha_i} \cdot (x - x_i), \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } \alpha_i = (x_{i+1} - x_i) = 1. \quad (8)$$

Wartości związane z węzłem początkowym ( $i$ ), uzyskują w lokalnym układzie odniesienia indeks (1), zaś z węzłem końcowym ( $i+1$ ) – indeks (2).

Funkcję kształtu określa wzór:

$$f(\xi) = u_1 \cdot \varphi_1(\xi) + u_2 \cdot \varphi_2(\xi), \quad (9)$$

gdzie:  $\varphi_1(\xi) = 1 - \xi$ ,  $\varphi_2(\xi) = \xi$ ,  $\xi = \frac{x - x_1^e}{x_2^e - x_1^e}$ , wielkości  $x^e$  odpowiadają

wartościom w węzle.

Związek pomiędzy współzrzednymi  $x$  oraz  $\xi$  przyjmuje postać:

$$x(\xi) = x_1 \cdot \varphi_1(\xi) + x_2 \cdot \varphi_2(\xi) \quad (10)$$

Wartości węzłowe ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) zostaną wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

Definiując funkcję optymalizacyjną jako całkę kwadratu błędu aproksymacji po obszarze rozwiązania:

$$\Delta(u_1, u_2, \dots, u_n) = \int_{x_a}^{x_b} [F(x) - f(x)]^2 dx \quad (11)$$

poszukujemy takich wartości ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ), które minimalizują wartość  $\Delta$ . Otrzymujemy więc układ  $n$  równań:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial u_1} = 0, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial u_2} = 0, \quad \dots \quad \frac{\partial \Delta}{\partial u_n} = 0 \quad (12)$$

w którym  $i$ -te równanie przyjmuje postać:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial u_i} = -2 \cdot \int_{x_a}^{x_b} [F(x) - f(x)] \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial u_i} dx = 0 \quad (13)$$

zatem:

$$\int_{x_a}^{x_b} [F(x) - f(x)] \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial u_i} dx = 0 \quad (14)$$

Rozwiązanie otrzymanego układu równań wymaga określenia warunków brzegowych.

Przyjmijmy, że będą to wartości funkcji  $F(x)$  na końcach przedziału całkowania:

$$F(x_a) = F_a, \quad F(x_b) = F_b$$

co prowadzi do znanej modyfikacji pierwszego i ostatniego równania układu oraz powoduje, że warunek optymalizacji błędu nie jest spełniony. Błąd ten nazywać będziemy błędem warunku brzegowego. Jest on automatycznie kompensowany w sąsiednich węzłach,

propagując się na sąsiednie elementy. W skrajnych przypadkach może być przyczyną utraty stabilności rozwiązania [Popielski, Stasiński, 2005].

Kwestię odrębną stanowi dokładność obliczeń numerycznych. Wydaje się, że można by tu posłużyć się dorobkiem doświadczeń w zakresie analizy algorytmów i oszacowań dokładności obliczeń numerycznych zgromadzonych w dziale – geodezji opisanych np. w [Nowak, 2000].

Modelowanie ilościowe rzeczywistych zjawisk i procesów wiąże się zazwyczaj z koniecznością wprowadzania pewnej liczby uproszczeń. Sprowadzają się one do wyizolowania czynników decydujących w istotny sposób o przebiegu zjawiska, pozwalając pominąć czynniki niższego rzędu. Uproszczenie (idealizacja), której dokonujemy w każdym przypadku zastosowania modelu numerycznego, polega na przypisaniu stałych wartości parametrów materiałowych tzw. strefom materiałowym, na które podzielono obiekt – model obliczeniowy. W przypadku konstrukcji budowlanych największą niepewność przypisujemy zwykle warstwom podłoża.

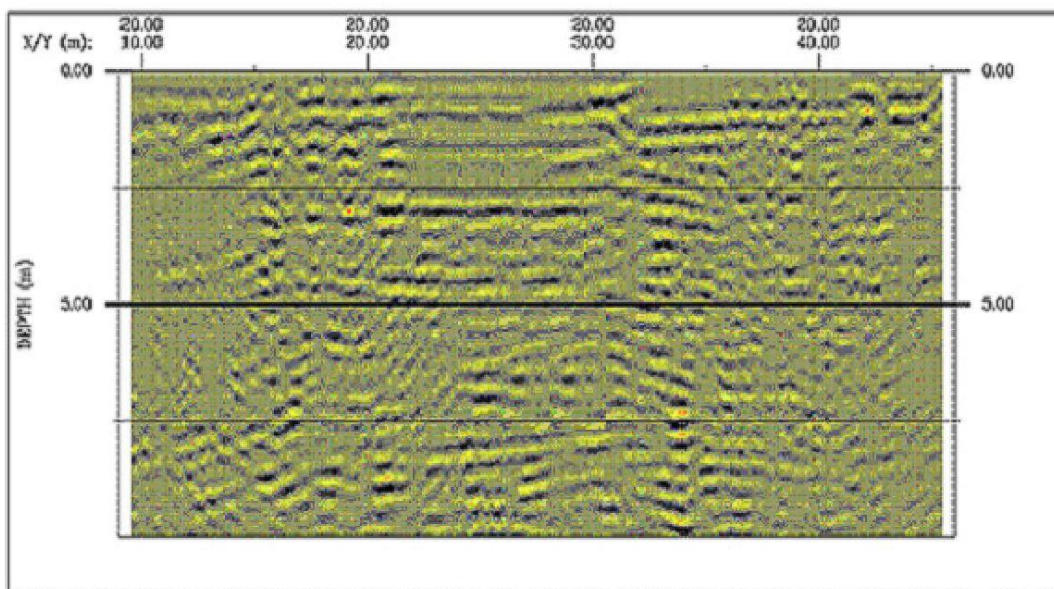
Rozważmy ograniczony obszar materiałowy (warstwę), któremu przypisujemy stałą wartość pewnego parametru. Wartość tę wyznaczamy w oparciu o wyniki serii pomiarów w odpowiednio rozmieszczonych punktach. Wyniki pomiarów zazwyczaj różnią się od siebie w pewnym zakresie, ze względu na niedoskonałą jednorodność materiału rzeczywistego. W materiale takim mierzony parametr cechuje się charakterystyczną dla niego zmiennością. Pomiar parametru, w stosunku do rozmiarów warstwy geotechnicznej, ze względu na objętość próbki pomiarowej, będzie traktowany jak wartość punktowa. Powyższe względy sprawiają, że nie przypisujemy warstwie żadnej konkretnej - rzeczywistej wartości parametru, a tzw. wartość charakterystyczną. Obok wartości charakterystycznej parametru, którym jest wartość oczekiwana, występuje zawsze charakterystyczna miara jego zmienności zazwyczaj pod postacią odchylenia standardowego. W rezultacie więc, na podstawie skończonej liczby wartości punktowych, przewidujemy wartość parametru w całym badanym obszarze.

Takie postępowanie ma charakter przybliżony. Przyjęcie jednej wartości charakterystycznej danego parametru powoduje założenie doskonałego wymieszania materiału w każdym z wypełnianych podobszarów.

W rzeczywistości tak zazwyczaj nie bywa. Precyzyjne odwzorowanie geometrycznego rozkładu badanej cechy wymagałoby pobrania do badań materiału całej warstwy, co jest nierealne. Niejednorodność materiału, w najlepszym razie, możemy oceniać jedynie



pośrednio i w sposób bardzo przybliżony. Pewnych wniosków może dostarczyć badanie wykonane z użyciem georadaru. Przykładowy echogram uzyskany takim urządzeniem przedstawia (Rys. 37). Na rysunku daje się zauważyć pewną regularność badanej cechy materiału. Można domniemywać, że podobną właściwość ma każdy z parametrów materiałowych, choć jego rozłożenie w przestrzeni może być różne.



Rys. 37 Przykładowy echogram podłoża gruntowego wykonany z zastosowaniem georadaru [Popielski, Stasiński, 2005].

Kolejnym aspektem szacowania dokładności modelu numerycznego jest uwzględnienie upływu czasu, a tym samym wpływu długotrwałego obciążenia konstrukcji – czyli reologii. Na skutek takiego oddziaływania następuje zmiana parametrów materiałów wykorzystanych w trakcie budowy obiektu (np. betonu).

Wykonanie analizy numerycznej jest zadaniem uwarunkowanym przez wiele czynników. Jak wspomniano na początku tego podrozdziału jakość przeprowadzonych obliczeń zależy od poprawnej i dokładnej dyskretyzacji modelu obliczeniowego, od przyjętych parametrów ośrodka gruntowego oraz parametrów materiałowych. Do dyskretyzacji modelu (podziału na elementy) najczęściej używa się specjalnie w tym celu skonstruowanych gotowych algorytmów, zaszytych w programach realizujących obliczenia metodą elementów skończonych. Doboru parametrów gruntu oraz parametrów materiałów nie wykonuje się automatycznie. Na podstawie wykonywanych pomiarów kontrolnych możemy próbować odwzorować zachowanie się obiektu w okresie jego eksploatacji. Porównanie

wyników modelowania z wynikami pomiarów (np. geodezyjnych) może być podstawą wnioskowania o właściwym doborze wartości parametrów gruntu i materiałów (warunki brzegowe). Takie postępowanie może w znaczący sposób podnieść wyniki modelowania numerycznego, ponieważ bazuje na danych uzyskanych w okresach ubiegłych określane jest jako „analiza wstecz” (back analysis).

Analiza wstecz polega na stworzeniu obliczeniowego modelu pracy budowli, przy wprowadzeniu założonych w projekcie lub ustalonych na podstawie badań właściwości materiałów budowli i podłoża. Model powinien odzwierciedlać kolejne fazy wznoszenia budowli i związane z nimi zmiany obciążeń. Rzeczywiste, zaobserwowane zachowanie się budowli (np. przemieszczenia, odkształcenia, przebieg filtracji) porównywane są z danymi uzyskanymi z modelu. Istotna niezgodność wyników obserwacji (monitoringu) z wynikami obliczeń modelu świadczy o tym, że model jest nieadekwatny do rzeczywistości. W kolejnych przybliżeniach, zmieniając właściwości materiałowe modelu, a niekiedy i sposób jego obciążania, dochodzi się do zgodności modelu z realiami, co pozwala w sposób bardziej wiarygodny prognozować przyszłe zachowanie się budowli. Tak przeprowadzone obliczenia pozwolą na wyznaczenie uśrednionych wartości parametrów podłoża lub innych elementów modelu.

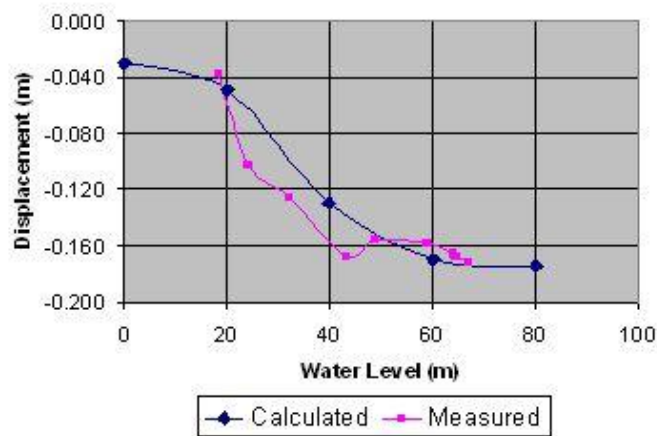
Doświadczenia z analizy przemieszczeń różnych obiektów wskazują, że wyznaczone za pomocą analizy wstecz moduły sprężystości obarczone są małym błędem, co daje po skalibrowaniu modelu możliwość dokładniejszej prognozy przemieszczeń. Dopiero odpowiednio zweryfikowany model numeryczny może mieć zastosowanie w praktycznych zagadnieniach związanych z eksploatacją budowli piętrzących np. w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej.

Analiza wstecz pomocna jest również przy ustalaniu przyczyn nietypowego (awaria, katastrofa) zachowania się budowli, a w szczególnych przypadkach przy rekonstrukcji przebiegu awarii oraz wartości wyjątkowych obciążeń powodujących nietypowe zachowanie się budowli.

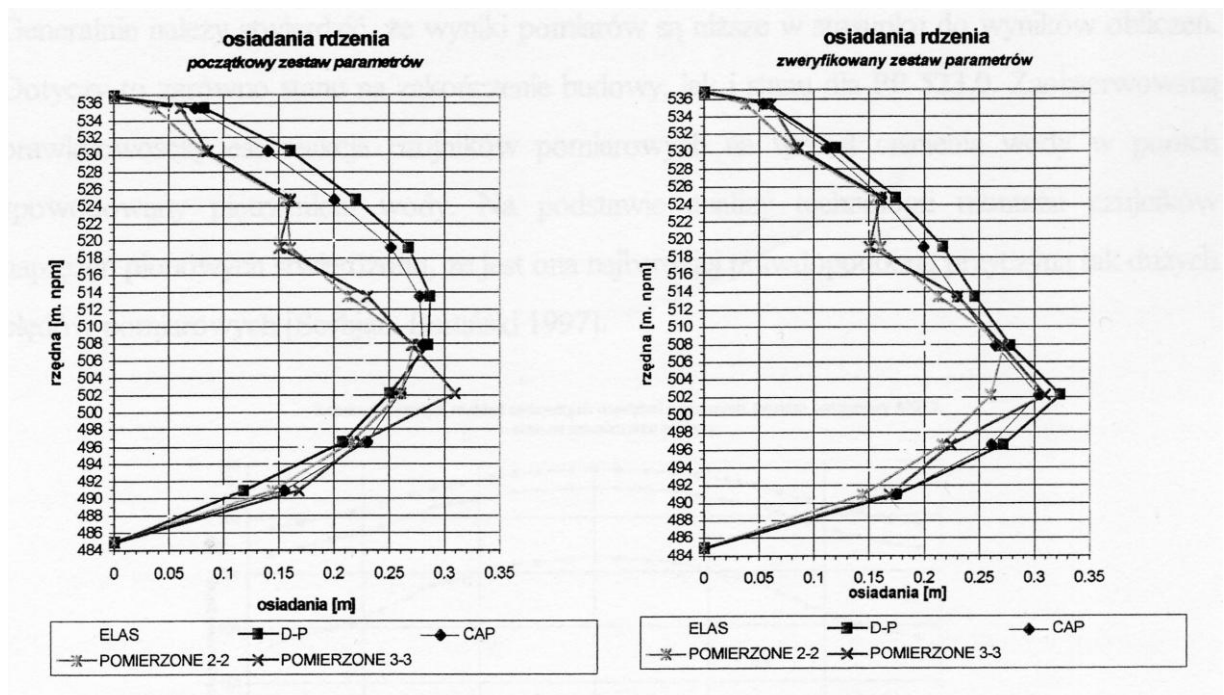
### **3.4 Wyniki modelowania numerycznego a wyniki pomiaru geodezyjnego**

W każdym opracowaniu wykorzystującym modelowanie numeryczne do oceny stanu obiektu hydrotechnicznego można znaleźć porównanie wyników obliczeń numerycznych z

wynikami pomiaru geodezyjnego. Zwykle porównywane są wyniki pomiarów niwelacyjnych określające zmianę wysokości kontrolowanych punktów (rysunki (Rys. 38) i (Rys. 39)).



Rys. 38 Porównanie obliczonych i pomierzonych przemieszczeń reperu na koronie The West Dam – Diamond Valley [Szostak-Chrzanowski, 2002].



Rys. 39 Porównanie obliczonych i pomierzonych osiadań rdzenia zapory w Czorsztynie (ELAS – model sprężysty), D-P – model sprężysto-plastyczny Druckera-Pragera, CAP – model CAP, 2-2 3-3 – przemieszczenia pomierzone w przekrojach 2-2, 3-3) [Sorbjan, 2004].

W analogiczny sposób można przedstawić wyniki pomiarów sieci poziomej. Najczęściej przemieszczenia przedstawiane są w kierunku prostopadłym do osi zapory, kierunek ten zazwyczaj jest kierunkiem osi OX lokalnego układu współrzędnych.

Porównanie wyników modelowania z wynikami pomiaru może być wykonywane w różnych celach. Dla potrzeb modernizacji sieci, a w szczególności w procesie wstępnej kontroli obserwacji geodezyjnych ważne jest oszacowanie zbieżności (zgodności) wielkości przemieszczeń uzyskanych z obliczenia modelu numerycznego z wielkościami przemieszczeń pomierzonych w okresie eksploatacji obiektu poprzedzającym proces modernizacji i wdrożenia algorytmów kontrolnych. Oczywiście porównywane wielkości modelowe muszą być obliczane przy założeniu takiego stanu obiektu jaki występował w okresie pomiaru geodezyjnego.

Porównanie wielkości powinno nastąpić w dwóch aspektach:

1. zgodności trendu obserwowanych zmian,
2. zgodności uzyskanych wartości.

Aby te porównania były wiarygodne powinny być wzięte pod uwagę charakterystyki dokładnościowe obu opracowań (modelowanego i pomierzonego). Ze względu na niemożność dokładnego oszacowania błędu wielkości modelowej, w dużym stopniu zależnego od przyjętych doświadczalnie warunków brzegowych (parametrów gruntu i materiałów) do porównania można wykorzystać najbardziej prawdopodobną wartość uzyskaną z modelu.

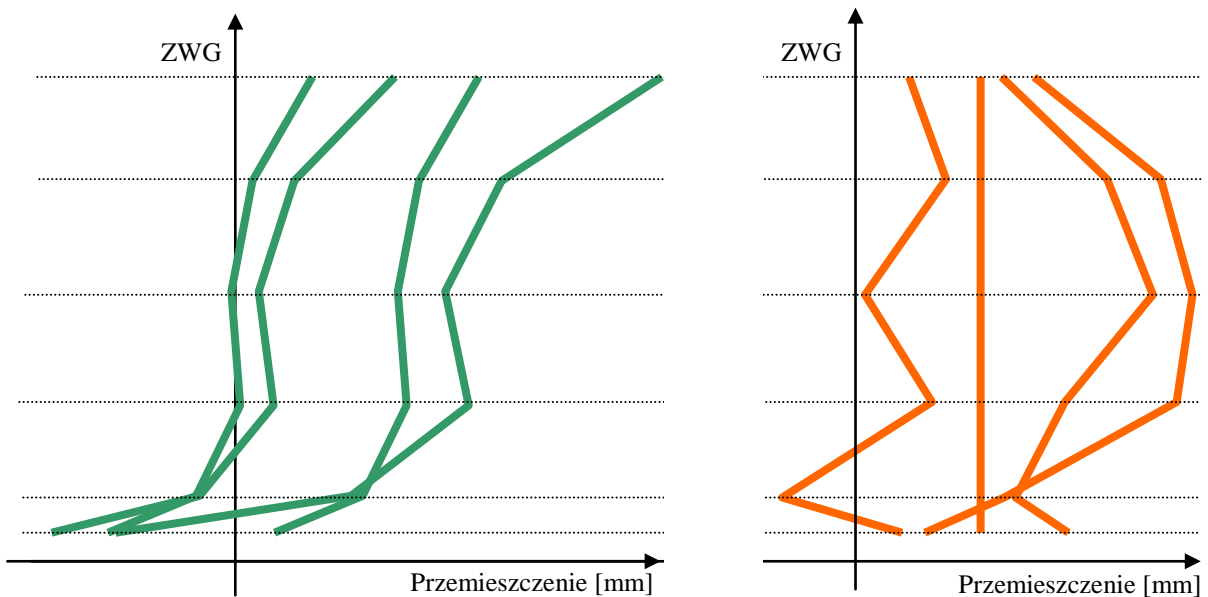
Z drugiej strony w wyniku wyrównania pomiaru geodezyjnego dysponujemy pełną charakterystyką dokładnościową wyznaczonych przemieszczeń.

Zgodność trendu obserwowanych zmian oznacza zgodność wartości i kierunku zmian przemieszczenia przy zmianie istotnych parametrów opisujących stan obiektu (np. poziomu piętrzenia wody w zbiorniku – zwierciadła wody górnej (ZWG)), porównanie pod tym kątem przedstawia rysunek (Rys. 40).

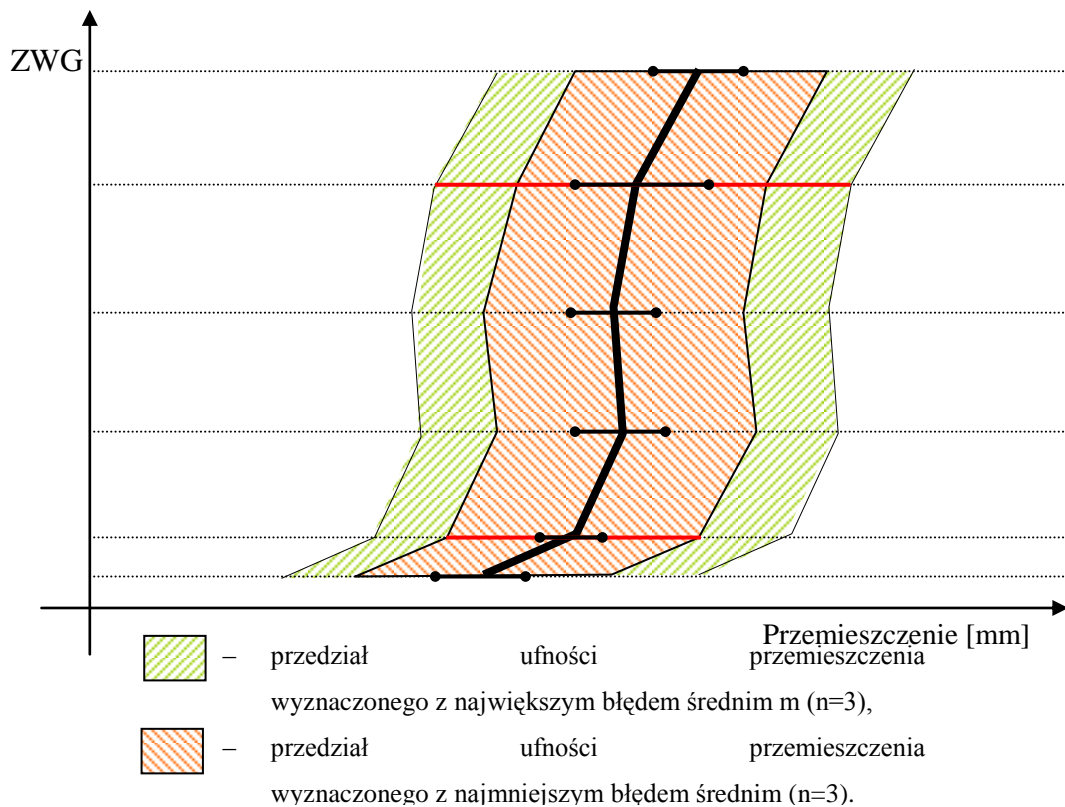
Zgodność uzyskanych wartości można stwierdzić porównując bezpośrednio wartości uzyskanych przemieszczeń. Za zgodne można przyjąć takie obliczone najbardziej prawdopodobne wartości przemieszczeń modelowych które mieszczą się w przedziale ufności opisanym  $n$ -krotnym błędem średnim przemieszczenia wyznaczonego metodami geodezyjnymi (rysunki (Rys. 41), (Rys. 42) i (Rys. 43)).

Zgodność obu modeli – obliczonego i pomierzonego można scharakteryzować podając procent obserwacji spełniających warunek zgodności częściowej, tzn. spełniających tylko jeden wybrany warunek: zgodności trendu lub zgodności wartości albo procent obserwacji spełniających warunek zgodności pełnej. Za przemieszczenia spełniające warunek zgodności pełnej należy uznać te wielkości, które spełniają oba opisane wyżej warunki.

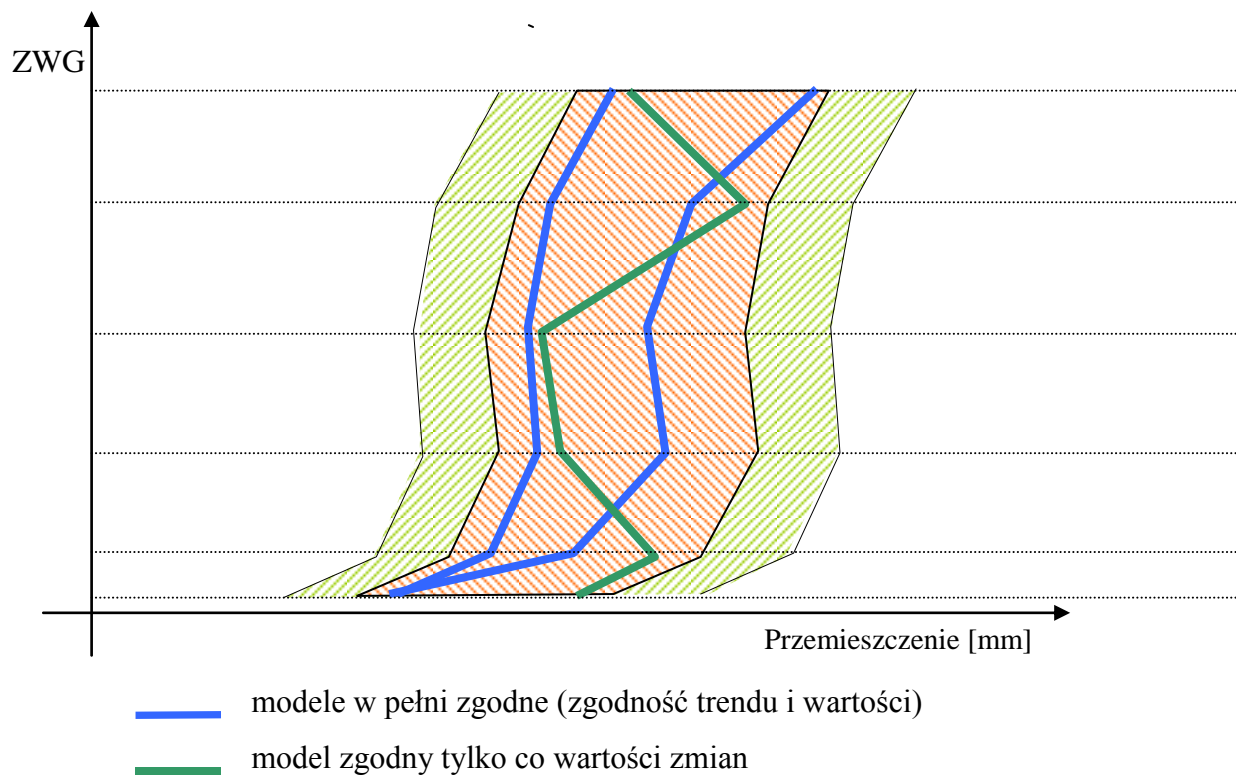
Wydaje się że zgodność pełną na poziomie 70-80 % można przyjąć za wystarczającą do wykorzystania modelu numerycznego w procesie modernizacji sieci kontrolnej.



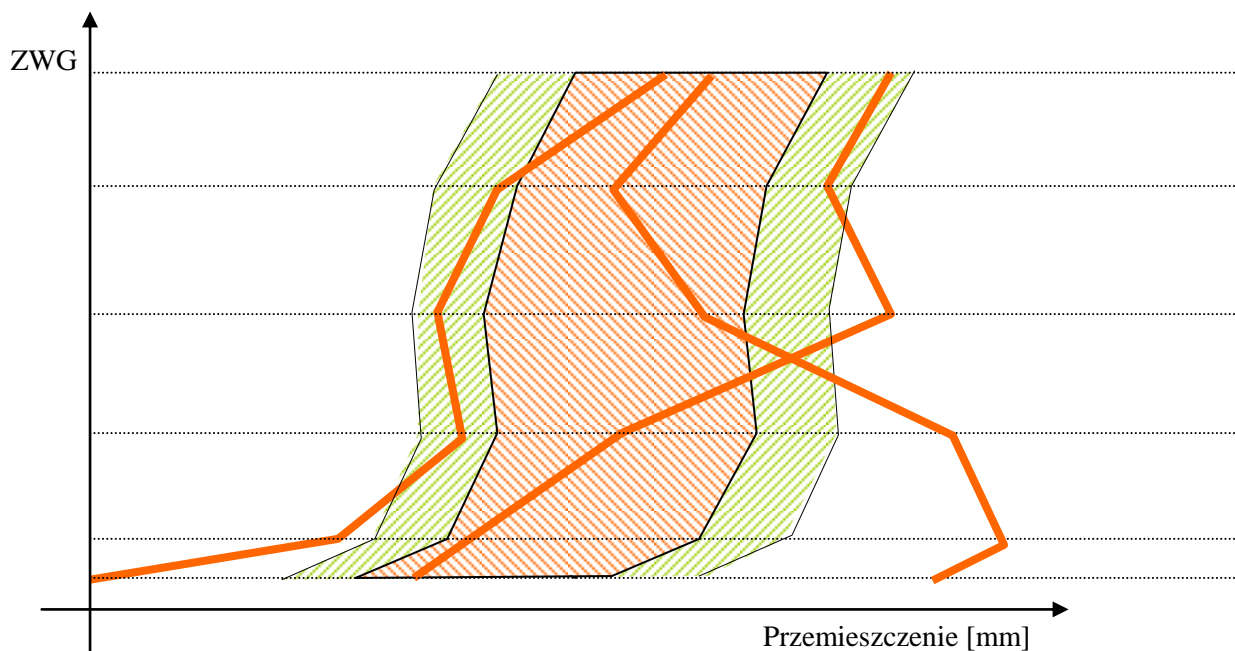
Rys. 40 Porównanie trendu zmian różnych modeli przemieszczeń  
a) modele zgodne, b) modele niezgodne).



Rys. 41 Charakterystyczne przedziały ufności (najmniejszy i największy) obliczone dla przemieszczeń celownika wyznaczonych metodami geodezyjnymi.



Rys. 42 Porównanie wartości przemieszczeń obliczonych z różnych modeli (zgodnych częściowo i w sposób pełny) z przedziałami ufności wyników pomiaru geodezyjnego.



Rys. 43 Porównanie wartości przemieszczeń obliczonych z różnych modeli niezgodnych z przedziałami ufności wyników pomiaru geodezyjnego.



### 3.5 Syntetyczny opis programu HYDRO-GEO

HYDRO-GEO jest polskim programem wykorzystującym metodę elementów skończonych do analizy problemów geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska. Jest on rozwijany od końca lat siedemdziesiątych na Politechnice Warszawskiej przy współpracy Politechniki Śląskiej i Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW.

Program HYDRO-GEO daje bardzo szerokie możliwości numerycznej analizy zachowania się konstrukcji geotechnicznych i hydrotechnicznych. Może być z powodzeniem wykorzystywany do analizy przemieszczeń i wytrzymałości konstrukcji takich jak: fundamenty pod różnego rodzaju konstrukcje (zbiorniki, maszyny, budynki), mury oporowe, zapory ziemne i betonowe, wykopy, tunele, skarpy i nasypy.

Metoda elementów skończonych jest stosowana tam, gdzie zawodzą tradycyjne sposoby obliczania nośności granicznej czy osiadania konstrukcji. Wzmocnienia konstrukcji, prognozowanie osiadań i przemieszczeń w skomplikowanych sytuacjach oraz na podatnych podłożach organicznych bądź konsolidujących glinach czy iłach mogą być skutecznie analizowane za pomocą metody elementów skończonych.

Program HYDRO-GEO stosowany był z powodzeniem do analizy wielu konstrukcji geotechnicznych, m. in. osiadań fundamentów pod turbogeneratory w elektrowni Połaniec, analizy muru oporowego w Czorsztynie-Niedzicy, konstrukcji warszawskiego metra. Program stosowany był także do modelowania awarii osadników odpadów przemysłowych w Skawinie, Połańcu, Stalowej Woli i Krasnymstawie.

Za pomocą programu HYDRO-GEO prowadzono obliczenia konsolidacji iłów i awarii składowiska węgla w elektrowni w Połańcu, filtracji wód gruntowych w rejonie składowiska odpadów chemicznych w Świętochłowicach. Program ten jest także wykorzystywany do numerycznego modelowania posadowienia budynków wysokich w Warszawie.

Program daje duże możliwości modelowania problemów budowy nasypów i obwałowań osadników przemysłowych. Wielokrotnie wykonywano obliczenia wieloetapowego wznoszenia lub poszerzania nasypów drogowych i obwałowań na podatnych konsolidujących podłożach organicznych. W programie istnieje możliwość uwzględniania efektów zamykania się porów w trakcie konsolidacji torfów czy glin, które powodują zmianę współczynnika filtracji, a w konsekwencji zmianę prędkości redystrybucji nadwyżki ciśnienia porowego.

Za pomocą programu HYDRO-GEO wykonano analizę wytrzymałościową kilkunastu zapór, w tym Włocławek, Besko, Dobczyce, Wisła, Dębe, Mietków, Jeziorsko, Jarnołówki i inne.

Wybrane możliwości programu:

- zadania 2D, płaski stan odkształcenia, naprężenia i osiowa symetria,
- nośność graniczna, sprężysto-plastyczne modele gruntu, warunki plastyczności: Coulomba-Mohra, Druckera-Pragera, Hubera, Treski, Modified Cam-clay,
- wkładanie bądź wyjmowanie elementów konstrukcji, etapowa budowa obiektu, wymiana materiałów,
- różnorodne typy obciążeń,
- rozkłady parć na budowle hydrotechniczne,
- obliczanie stateczności – metoda redukcji  $c-\phi$ ,
- etapowe wznoszenie obwałowań na konsolidującym podłożu gruntowym – małe lub duże odkształcenia, osiadania podłoża gruntowego w czasie,
- przemieszczenia elementów konstrukcji betonowych,
- obciążenia termiczne.

Cechy programu:

- obsługa przyjazna dla użytkownika,
- łatwa technologia wprowadzania i edycji danych,
- możliwość wczytania przekrojów konstrukcji z AutoCADa,
- automatyczny generator siatek węzłów,
- wielofunkcyjny postprocesor graficzny,
- dokumentacja programu z przykładami.

Program HYDRO-GEO ma kilkadziesiąt instalacji w Polsce i kilkanaście za granicą.

Szczegółowy opis możliwości programu, użytych algorytmów oraz podstaw matematycznych można znaleźć w skrypcie [Dłużewski, 1997].

Wszystkie modele i analizy numeryczne wykonane metodą elementów skończonych (MES) i wykorzystane w tej pracy w trakcie realizacji projektu modernizacji sieci kontrolnej zapory BESKO zostały wykonane przy użyciu programu HYDRO-GEO.



## **4 UZUPEŁNIENIE ZBIORU PUNKTÓW KONTROLOWANYCH (CELOWNIKÓW) NA PODSTAWIE MODELOWANIA PRACY SEKCJI ZAPORY BETONOWEJ ZA POMOCĄ MES**

### **4.1 Opis problemu**

Większość zapór w Polsce jest użytkowana powyżej 50 lat. W okresie kiedy były projektowane niedostępne były nowoczesne techniki obliczeniowe. Projekty sieci kontrolnej opierały się na instrukcjach zalecających lokalizację punktów w charakterystycznych miejscach obiektu. Wytyczne te poparte były teoretyczną wiedzą o pracy konstrukcji oraz doświadczeniami z kontroli, pracy normalnej oraz awarii zapór użytkowanych w okresie poprzedzającym projektowanie nowego obiektu. Po każdej awarii tego typu obiektu uzupełniano system kontroli tej i innych dużych zapór, skupiając się głównie na montowaniu dodatkowych czujników hydrotechnicznych takich jak mierniki filtracji i piezometry lub rozszerzając wyposażenie galerii zastrzykowo-kontrolnych przez założenie nowych stanowisk pochyłomierzy i szczelinomierzy. Sieć celowników zlokalizowanych od strony odpowietrznej (dolej wody) zapory najczęściej pozostawała niezmieniona. Pod koniec ubiegłego wieku, w latach 90-tych w Polsce na kilku obiektach uzupełniono sieci kierunkowe, tak aby były możliwe w nich pomiary odległości dalmierzami elektrooptycznymi – uzupełniono celowniki o bolce do instalacji luster lub umieszczono w betonie na stałe małe pryzmaty inżynierskie, podstawowa sieć punktów kontrolowanych pozostała niezmieniona.

Pojawienie się możliwości numerycznego modelowania zapory daje możliwość wielokrotnego wyznaczenia przemieszczeń modelu tak aby poszczególne warianty obliczeniowe oddawały przewidywane warunki pracy oraz sytuacje w których mogłoby dojść do awarii zapory. Wyniki modelowania uwzględniające różne scenariusze zdarzeń, także ekstremalne (jak np. całkowita przepuszczalność przesłony cementacyjnej, powstanie szczelin lub pustek w bryłach konstrukcji spowodowanych naprężeniami od obciążenia piętrowną wodą lub błędami wykonania) mogą być podstawą do weryfikacji poprawności lokalizacji punktów istniejącej sieci lub wskazania nowych miejsc stabilizacji tak, aby kontrolą objąć miejsca narażone na znaczące przemieszczenia, miejsca wskazane na podstawie wyników wielokrotnego modelowania numerycznego.

Ze względu na znajomość danych pomiarowych opisujących zachowanie się konstrukcji zapory w latach poprzedzających modernizację sieci geodezyjnej, do wskazania nowych

lokalizacji celowników/weryfikacji projektu sieci można wykorzystać skalibrowane za pomocą analizy wstecz modele obliczane metodą elementów skończonych. Bazując na wynikach wieloletnich pomiarów kontrolnych można wykonać modele zachowania się konstrukcji przy zmiennych obciążeniach, nie tylko związanych ze zmianami zwierciadła wody górnej (ZWG) w zbiorniku, ale też ze zmianami podłoża wynikającymi z długookresowego dociążenia gruntu samą konstrukcją oraz budowlami towarzyszącymi. Analizując modele przemieszczeń tego i innych podobnych obiektów, biorąc pod uwagę różne scenariusze zdarzeń można próbować znaleźć miejsca, które w latach następnych najprawdopodobniej będą podlegały największym przemieszczeniom/odkształceniom i je wskazać jako nowe (uzupełniające) lokalizacje celowników w trakcie modernizacji sieci kontrolnej.

Innym podejściem do tego zagadnienia jest analiza przyrostów obliczonych przemieszczeń na jednostkę wysokości zapory. Zmiany przemieszczenia pojedynczego punktu obiektu są wynikiem zmieniających się obciążeń działających na zaporę. W przypadku zapory głównym czynnikiem wpływającym na pracę obiektu jest poziom zwierciadła wody górnej (ZWG). Różnice w wielkości przemieszczeń sąsiadujących ze sobą węzłów, świadczą o powstawaniu naprężeń wewnątrz konstrukcji. Miejsca gdzie naprężenia te są największe są najbardziej narażone na osłabienie materiału, co może spowodować pęknięcia lub rozwarstwienia betonu. Miejsca te powinny być szczególnie kontrolowane, tak aby szybko wykryć nieprawidłowości pracy konstrukcji.

Obszary takie łatwo wyznaczyć analizując zmiany przemieszczeń węzłów na jednostkę wysokości konstrukcji. Ponieważ metodami geodezyjnymi opartymi na pomiarach trygonometrycznych można badać tylko zewnętrzne powierzchnie obiektu, wystarczy analizować zmiany przemieszczeń węzłów na odpowiedniej krawędzi modelu.

Analizę obliczonych przemieszczeń węzłów siatki MES w celu lokalizacji nowych punktów kontrolnych możemy podzielić na kilka etapów:

- prace przygotowawcze,
- przygotowanie podstawowego modelu numerycznego,
- wariantowanie obliczeń uwzględniające różny stan pracy obiektu (różne scenariusze zdarzeń, różne poziomy ZWG)
- analiza porównawcza uzyskanych modeli,
- wskazanie nowych lokalizacji celowników.

Poszczególne wykonywane czynności są przedstawione w (Tabela 2).

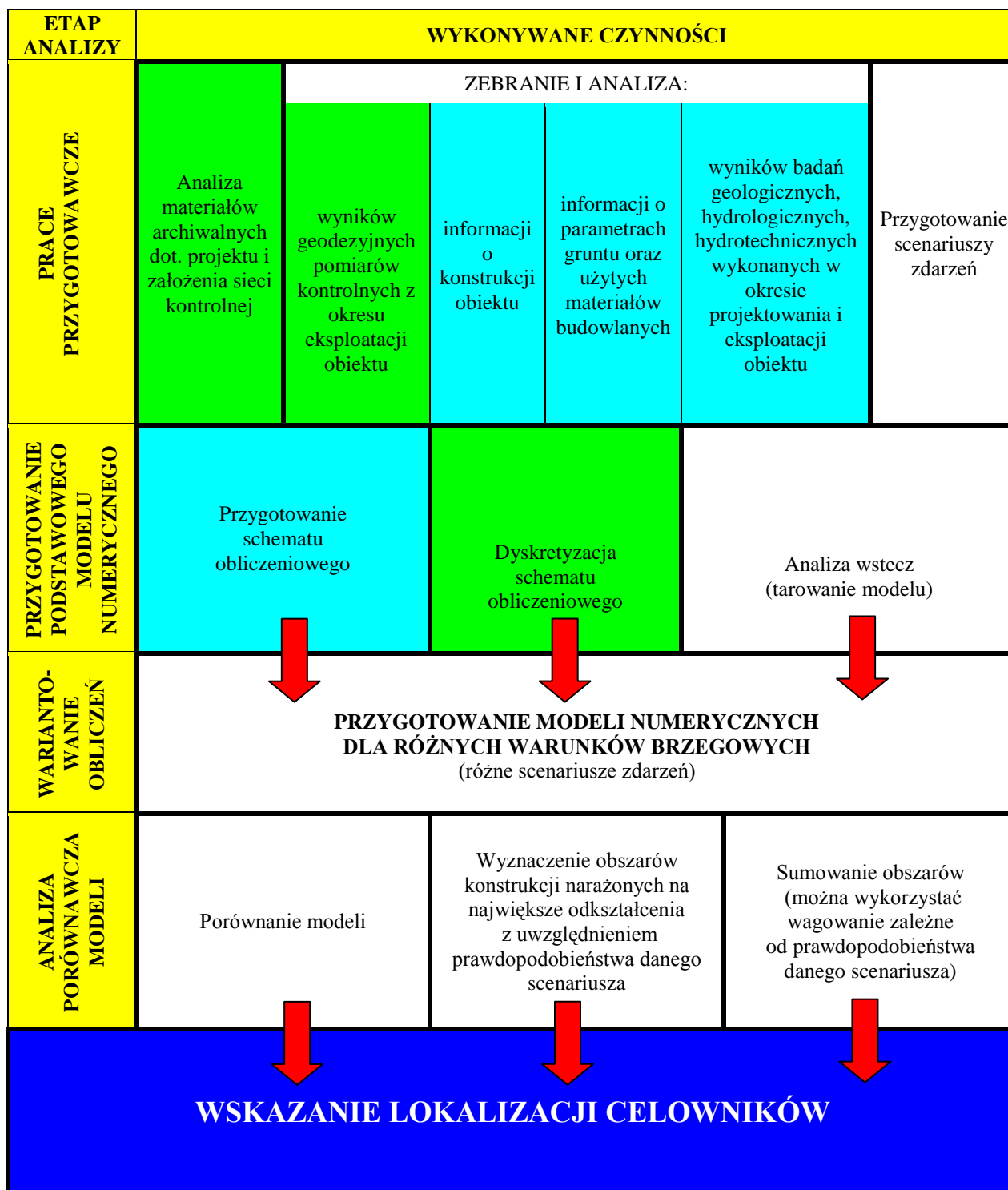


Tabela 2 Czynności wykonywane podczas kolejnych etapów lokalizacji punktów kontrolnych / weryfikacji projektu na podstawie modelowania MES

W podobny sposób można wskazać miejsca wokół obiektu nieobjęte wpływem pracy konstrukcji – miejsca gdzie można lokalizować punkty odniesienia (wskazanie zasięgu oddziaływania obiektu na podłoże gruntowe). Warunkiem wykonania takiej analizy jest rozszerzenie modelu numerycznego tak, aby obejmował większe fragmenty gruntu wokół obiektu. Wielkość modelowanej strefy powinna być dobierana dla każdego obiektu indywidualnie, po konsultacji z geologiem i może obejmować rejon od kilkudziesięciu metrów do kilku kilometrów wokół obiektu.

## **4.2 Przygotowanie modeli numerycznych**

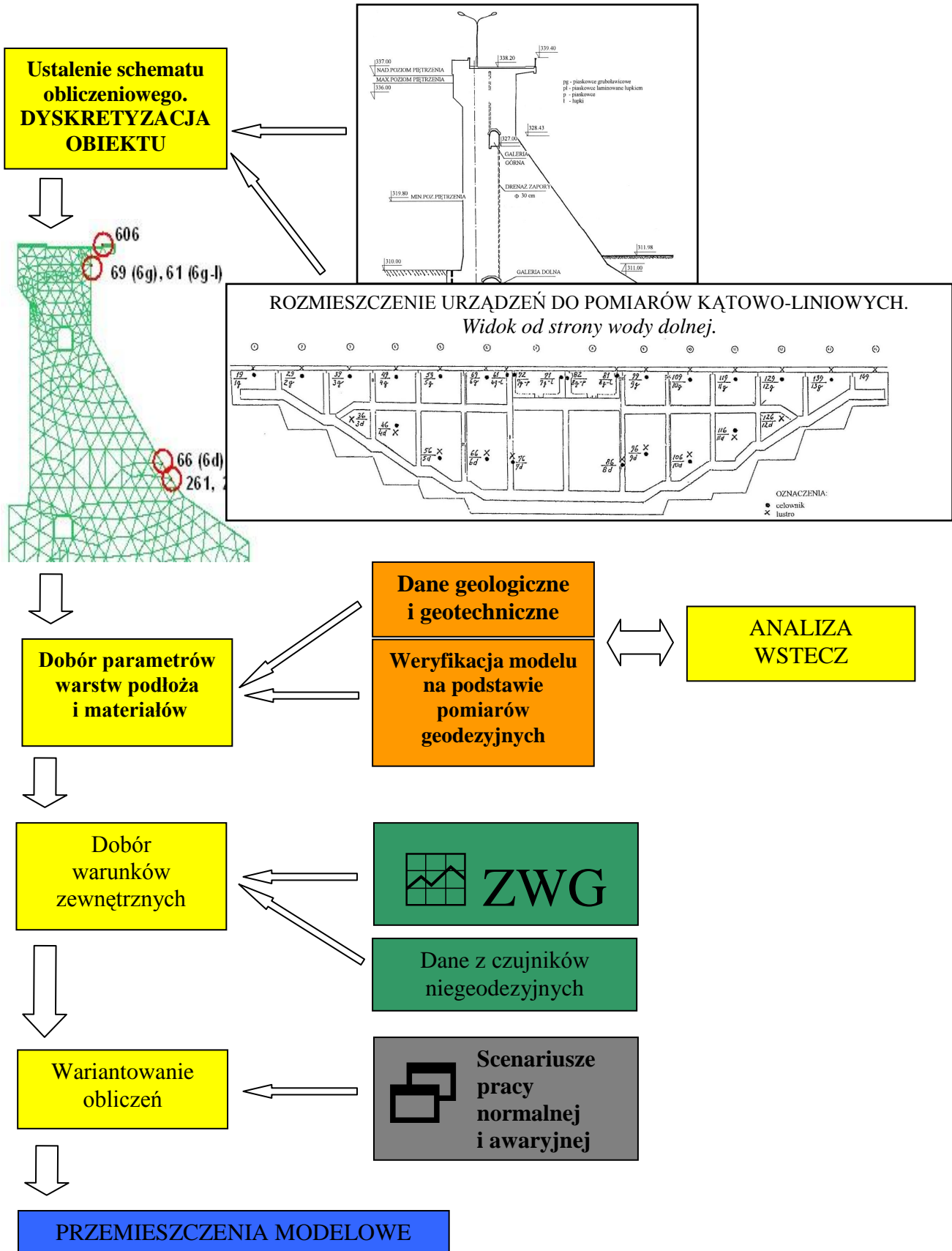
Modele numeryczne przygotowuje się oddzielnie dla każdej sekcji zapory. Modele mają za zadanie pokazać przemieszczenia punktów konstrukcji w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do osi korony zapory. Najczęściej, dla zapór o prostym przebiegu korony, płaszczyzny modelowania są równoległe do siebie i do kierunku osi OX lokalnego układu współrzędnych. Dla zapór o koronie łamanej lub łukowej płaszczyzny te są prostopadłe do osi poszczególnych sekcji konstrukcji i nie są równoległe do siebie.

Celem uzyskania możliwie jak największej zgodności wyników modelowania numerycznego MES z wynikami pomiarów kontrolnych wykonanych w różnych okresach eksploatacji obiektu modele numeryczne powinny być przygotowane bardzo starannie zarówno pod kątem ustalenia warunków brzegowych jak i dobrania warunków zmiennych głównie poziomu piętrzenia. Kolejne etapy przygotowania modelu przedstawia (Rys. 44).

### Ustalenie schematu obliczeniowego i dyskretyzacja

Aby przemieszczenia obliczone na podstawie modelu były najbardziej zbliżone do przyjętego schematu obliczeniowego (modelu konstrukcji) należy wykorzystać materiały projektowe i inwentaryzacyjne, szkice oraz opisy poszczególnych elementów konstrukcji. Poszczególne elementy takie jak uskoki na ścianie od strony wody górnej, kształt korony, „zęby” na stopie zapory oraz układ galerii kontrolno pomiarowych i wewnętrznych pomieszczeń zapory powinny być wiernie odwzorowane. Do definicji stref podłoża gruntowego należy wykorzystać badania geologiczne i geotechniczne. Należy odtworzyć występujące w analizowanych przekrojach układy i nachylenie poszczególnych warstw materiałów. Na tym etapie przygotowania geometrii modelu należy uwzględnić położenie poszczególnych celowników i reperów zainstalowanych w konstrukcji. Siatka MES powinna zostać skonstruowana w taki sposób, aby każdemu z punktów sieci kontrolnej na zaporze

(tj. celowników, reperów i punktów „stałej prostej”) przyporządkowany był węzeł siatki MES. Usytuowanie węzłów siatki w punktach podlegających kontroli metodami geodezyjnymi pozwoli na bezpośrednie porównywanie przemieszczeń obliczonych z przemieszczeniami pomierzonymi w okresie poprzedzającym wykonanie projektu uzupełnienia sieci celowników. Takie narzucenie lokalizacji wybranych węzłów siatki spowoduje uzyskanie wyników rzeczywiście najbardziej wiarygodnych, nie narzucenie zaś takiego warunku na strukturę siatki MES spowodowałoby konieczność interpolacji poszukiwanych wartości.



Rys. 44 Etapy przygotowania modeli numerycznych.

### Dobór parametrów warstw podłoża gruntowego i materiałów

Parametry opisujące warstwy podłoża oraz materiały wykorzystane przy wznoszeniu konstrukcji należy przyjąć opierając się na badaniach geologicznych. Modele wykorzystywane do porównań z wynikami pomiarów powinny być opisane za pomocą parametrów wynikających z badań przeprowadzanych w okresie wykonywania pomiaru (powinny czasowo być najbardziej odpowiednie, tak aby w sposób najbardziej zbliżony opisywały stany rzeczywiste z okresów kampanii pomiarowych)

Często w obliczeniach należy uwzględniać zmiany parametrów materiałowych wynikających np. z destrukcyjnego działania wody lub długotrwałego oddziaływania obciążeń konstrukcji. W praktyce inżynierskiej spotyka się często zjawiska niezwykle istotne ze względu na bezpieczeństwo obiektu, których ocena jest bardzo trudna do przeprowadzenia. Takim zjawiskiem jest np. sufozja mechaniczna wywołana przez filtrującą wodę lub reologiczne zmiany parametrów betonów (zmiany związane z upływem czasu i zmiennych w czasie obciążań).

Znając obciążenie działające na obiekt w wybranym etapie budowy lub eksploatacji i dysponując pomierzonymi wartościami przemieszczeń, można wykonując analizę wstecz – oszacować parametry materiałów znajdujących się wewnątrz konstrukcji i poniżej poziomu jej posadowienia. Jako wyjściowe należy stosować parametry wynikające z badań geologicznych w wydzielonych strefach materiałowych opisanych przez geometrię modelu. Tak przeprowadzone obliczenia pozwolą na wyznaczenie uśrednionych wartości modułów sprężystości podłoża. Podobnie można wyznaczyć chwilowe/bieżące parametry materiałów wykorzystanych do budowy obiektu.

### Dobór warunków zewnętrznych

Obliczenia przemieszczeń należy wykonywać przy założeniu takich warunków jakie panowały w czasie wykonywania pomiaru geodezyjnego.

Podczas normalnej eksploatacji zapory wodnej czynnikiem najbardziej zmieniającym warunki obciążenia jest poziom wody w zbiorniku ZWG (np. w czasie nagłego obniżenia poziomu wody lub wezbrania spowodowanego przejściem fali powodziowej) i wielkość ta zarejestrowana w systemie i zweryfikowana przez sprawdzenie łąt hydrologicznych (tj. łąt wodowskazowych) powinna być wprowadzona do obliczeń z dokładnością centymetrową. Obciążenia takie jak np. drgania sejsmiczne należy traktować jako nadzwyczajne i trudne do przewidzenia [Sorbjan, 2004]. Mimo to, dysponując danymi zarejestrowanymi w Automatycznym Systemie Technicznej Kontroli Zapór (AS TKZ) należy sprawdzić jakie

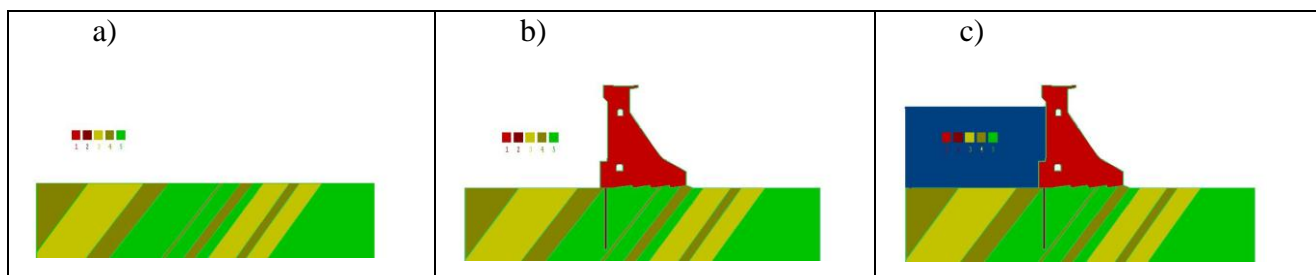
występowały w porównywanych okresach maksymalne i minimalne zarejestrowane poziomy zwierciadła wody górnej, wody dolnej i ciśnienia w piezometrach ulokowanych pod stopą zapory. Jeżeli różnice max-min są znaczne należy przeprowadzić obliczenia uwzględniając różne wartości i porównać czy ich zmiana skutkuje różnicami w obliczonych najbardziej prawdopodobnych wartościach przemieszczeń. Jeśli różnice te są nieistotne tzn. dużo mniejsze niż błędy wielkości wyznaczonych z pomiaru geodezyjnego należy przy wykonywaniu obliczeń dla kolejnych modeli przyjąć wartości średnie.

### Wariantowanie obliczeń

Po skalibrowaniu modelu – ustaleniu parametrów materiałowych i sprawdzeniu istotności obciążeń zmiennych innych niż te wynikające ze zmian poziomu wody w zbiorniku można przystąpić do obliczania przemieszczeń modelowych mogących wystąpić przy różnych poziomach ZWG w czasie normalnej lub awaryjnej pracy zapory.

Obliczenia w większości programów komputerowych realizujących modelowanie MES wykonuje się w trzech etapach (Rys. 45):

- I. Wygenerowanie/zasymulowanie w podłożu naprężeń początkowych i ciśnienia porowego wynikających z układu warstw gruntu i poziomu wody gruntowej występującej w analizowanym przekroju.
- II. Modelowanie wykonania konstrukcji zapory, tzw. zbiornik suchy.
- III. Dodanie obciążeń wynikających z napełnienia zbiornika wodą. Obciążenia te przykładają się do ściany odwodnej (wody górnej) zapory i dna zbiornika - wartości obciążeń są zależne od rzędnej napełnienia zbiornika (ZWG). Przykładają się też obciążenia do przesłony przeciw filtracyjnej oraz stopy zapory.



Rys. 45 Etapy obliczeń modelu MES.

Kolejne modele powinny być obliczane przy założeniu:

- maksymalnego i minimalnego projektowanego stanu wody górnej (ZWG),



- maksymalnego i minimalnego stanu wody górnej (ZWG) zarejestrowanego w czasie normalnej pracy zapory,
- stanów wody górnej z czasów wykonywania geodezyjnych pomiarów kontrolnych wybranych do porównań,

Kolejne warianty – scenariusze zdarzeń powinny opisywać sytuacje niestandardowe, „awaryjne”, które mogą wystąpić w czasie użytkowania obiektu, np:

- awarie przesłony przeciw filtracyjnej (cementacyjnej),
- zmiany w podłożu związane z takimi zjawiskami jak konsolidacja gruntów lub sufozja,
- zmiany w samej konstrukcji – wynikające z erozji użytych materiałów np. betonów,
- zmiany konstrukcji związane z przebudową obiektu.

Wszystkie przyjęte do analizy scenariusze powinny być modelowane przy uwzględnieniu wszystkich w/w stanów wody górnej (ZWG).

Scenariusze powinny być skonsultowane z osobą odpowiadającą za bezpieczeństwo obiektu (inspektor, pracownik OTKZ) wykonującą coroczne oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu.

Model numeryczny powinien być przygotowany przez osobę mającą wiedzę i doświadczenie w dokonywaniu tego typu analiz. Dobranie parametrów podłoża i materiałów oraz definiowanie schematu obciążeń obiektu wymaga znajomości podstaw geotechniki i hydrotechniki oraz budownictwa wodnego w zakresie budownictwa budowli piętrzących. Wskazane jest aby przy tworzeniu modeli które mają być wykorzystane w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej współpracowali hydrotechnicy i geodeci.

Wiele polskich ośrodków zajmujących się oceną stanu technicznego i bezpieczeństwa zapór takich jak: Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór IMGW, Instytut Budownictwa Wodnego PW wyraziło chęć stworzenia specjalizowanego ośrodka obliczeniowego wykonującego analizy na potrzeby wszystkich użytkowników zapór w Polsce, zarówno tych będących własnością Skarbu Państwa jaki i znajdujących się w rękach prywatnych [Wita, 2005], [Jankowski, 2007]. Jeżeli taki ośrodek powstanie zaistniałaby możliwość praktycznej realizacji opisanych powyżej analiz przez doświadczonych pracowników specjalizujących się w modelowaniu zagadnień hydrotechnicznych.

### 4.3 Wskazanie nowych lokalizacji punktów kontrolowanych

Po przeliczeniu modeli numerycznych realizujących wybrane scenariusze pracy zapory, można przystąpić do analizy wyników i wyznaczenia takich obszarów na powierzchni ściany odpowietrznej, gdzie izolynie obliczonych/prognozowanych przemieszczeń są najbardziej zagęszczone. Zagęszczenie izolini wskazuje miejsca gdzie przemieszczenia będą najlepiej obserwowane. Obszary te są najbardziej narażone na erozję betonu, pęknięcie oraz odkształcenia związane ze zmianami stanu obiektu (głównie zmianami poziomu wody w zbiorniku (ZWG)) oraz ze starzeniem się konstrukcji.

Ze względu na to, iż modele numeryczne MES pracy zapory wykonywane są w przekrojach poprzecznych prostopadłych do osi korony analizowanej sekcji, wyznaczenie obszarów w których przewidywane są największe przemieszczenia sprowadza się do wyznaczenia zakresów rzędnych – fragmentów ściany odpowietrznej sekcji. Obszary te można zdefiniować jako poziome pasy na zewnętrznej powierzchni konstrukcji. Celownik powinien być lokalizowany z reguły w środkowej części wyznaczonego pasa sekcji. Jeżeli są powody aby kontrolować brzegi sekcji (np. kontrola sekcji sąsiadujących z przelewami, kontrola sekcji przelewowych) celowniki należy lokalizować w takiej odległości od szczeliny dylatacyjnej między sekcjami, aby nie były narażone na przemieszczenia związane z wietrzeniem i pękaniem brzegowym betonu. Na sekcjach przelewowych celowniki powinny być lokalizowane symetrycznie po obu stronach przelewu.

Na rysunku (Rys. 46) przedstawiono prosty przykład analizy modeli numerycznych przedstawiających prognozowane przemieszczenia zapory przy różnym napełnieniu zbiornika.

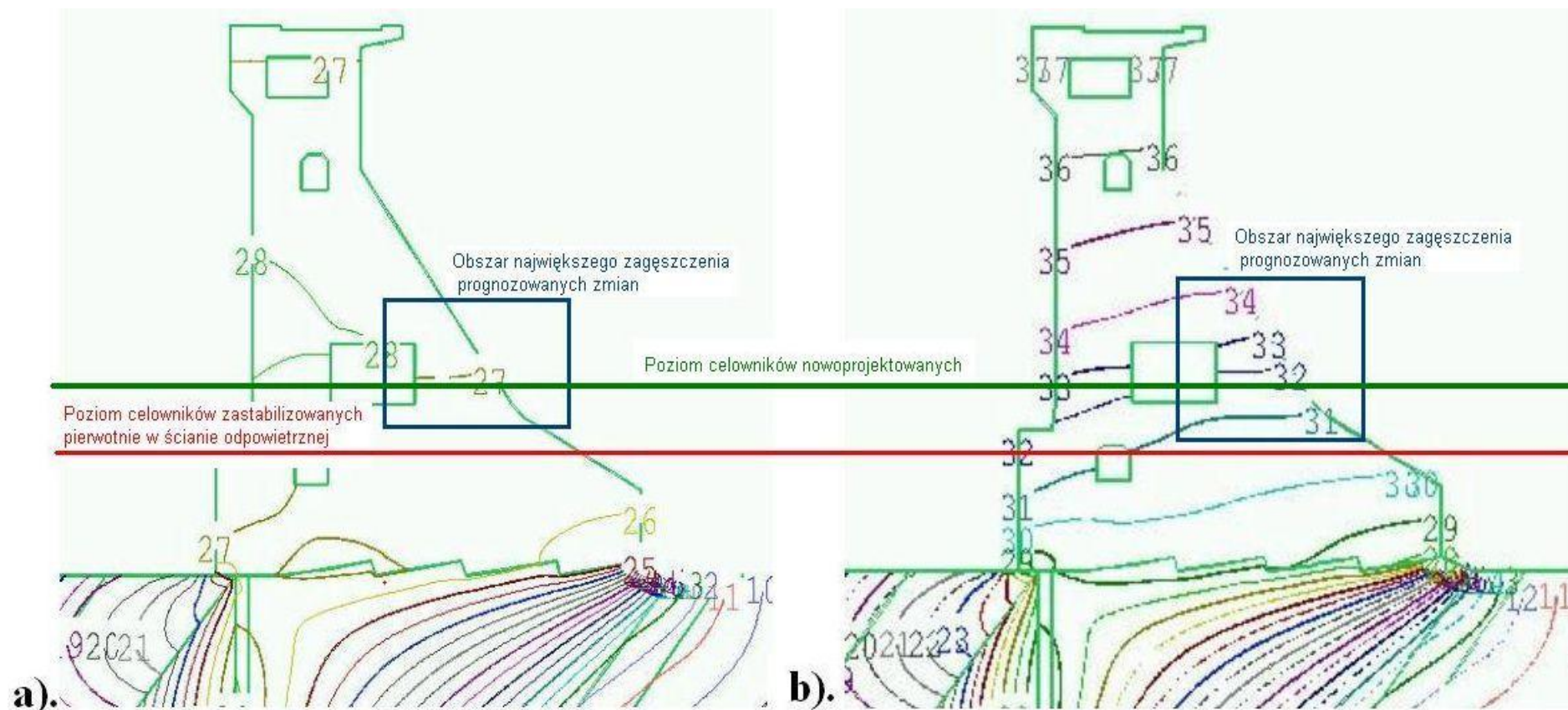
Uzyskane wyniki modelowania numerycznego można porównywać wg schematu przedstawionego w tabeli (Tabela 3)

ZWG	MIN	...	średnie	...	MAX
Scenariusz					
Praca normalna	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń
Symulacja zdarzenia I	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń
Symulacja awarii II	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń	wyniki obliczeń

Tabela 3 Zestawienie wyników modelowania numerycznego.

Należy wyznaczyć rzędne zagęszczeń izolinii przemieszczeń dla każdego analizowanego scenariusza, jako zmienną przyjmując poziom wody w zbiorniku (ZWG). Porównując wyznaczony w ten sposób obszar z obszarami wyznaczonymi podczas analizy innych scenariuszy (jeśli były symulowane) można wyznaczyć obszar (rzędne ograniczające) na którym prognozowane przemieszczenia występują najczęściej i w największym zagęszczeniu.

Jeżeli celowniki zastabilizowane w ścianie zapory znajdują się wewnątrz tych obszarów lub w ich bezpośredniej bliskości nie ma potrzeby wskazywania lokalizacji nowych punktów. Jeśli wyznaczone obszary nie pokrywają się z miejscami już kontrolowanymi to obszary te można wskazać jako lokalizacje nowych celowników w trakcie modernizacji sieci kontrolnej.



Rys. 46 Zapora Besko - model sekcji 6 (etap III.), izoliny przemieszczeń w kierunku poziomym:

a). ZWG=331 mnpm, b). WG=332 mnpm,

linia czerwona - poziom celowników zastabilizowanych pierwotnie w ścianie odpowietrznej, linia zielona - poziom celowników nowoprojektowanych, niebieskimi prostokątami zaznaczono obszary największych zagęszczeń prognozowanych zmian.

## **5 TERENOWA KONTROLA GEODEZYJNEGO POMIARU KONTROLNEGO NA PODSTAWIE WYNIKÓW MODELOWANIA NUMERYCZNEGO – PROGRAM WŁASNY SUDAM**

### **5.1 Opis problemu**

Poziom niezawodności sieci geodezyjnej jest tym wyższy, im mniejsze jest prawdopodobieństwo niewykrycia obserwacji odstającej i tym samym dopuszczenia jej do udziału w procesie wyznaczania niewiadomych, a wskutek tego – do zniekształcenia ich wartości.

Wprowadzenie dodatkowej kontroli terenowej opierającej się na danych geo- i hydrotechnicznych, opisujących chwilowy stan obiektu pozwoli na podniesienie niezawodności w tzw. szerszym sensie [Prószyński, Kwaśniak, 2002] obejmującym różne „praktyczne” aspekty technologii pomiarowej (np. kwalifikacje personelu, okresowa kontrola instrumentów pomiarowych, wprowadzanie korekt z tytułu zaburzających wpływów warunków zewnętrznych). Ponieważ teoria niezawodności operująca konkretnymi miarami tego pojęcia ogranicza się do rozpatrywania konstrukcji pomiarowych i trudno jest mówić o zwiększeniu niezawodności w aspekcie praktycznego wykonania pomiaru – udoskonalenie elementów kontroli terenowej podniesie tzw. wiarygodność pomiaru geodezyjnego. Przy większej liczbie przeprowadzonych różnorodnych kontroli bazujących na doświadczeniach różnych dziedzin inżynierskich (w rozpatrywanym przypadku: geodezja, hydrotechnika, geotechnika) wyniki tych pomiarów będą budziły większe zaufanie odbiorców wyników pomiarów.

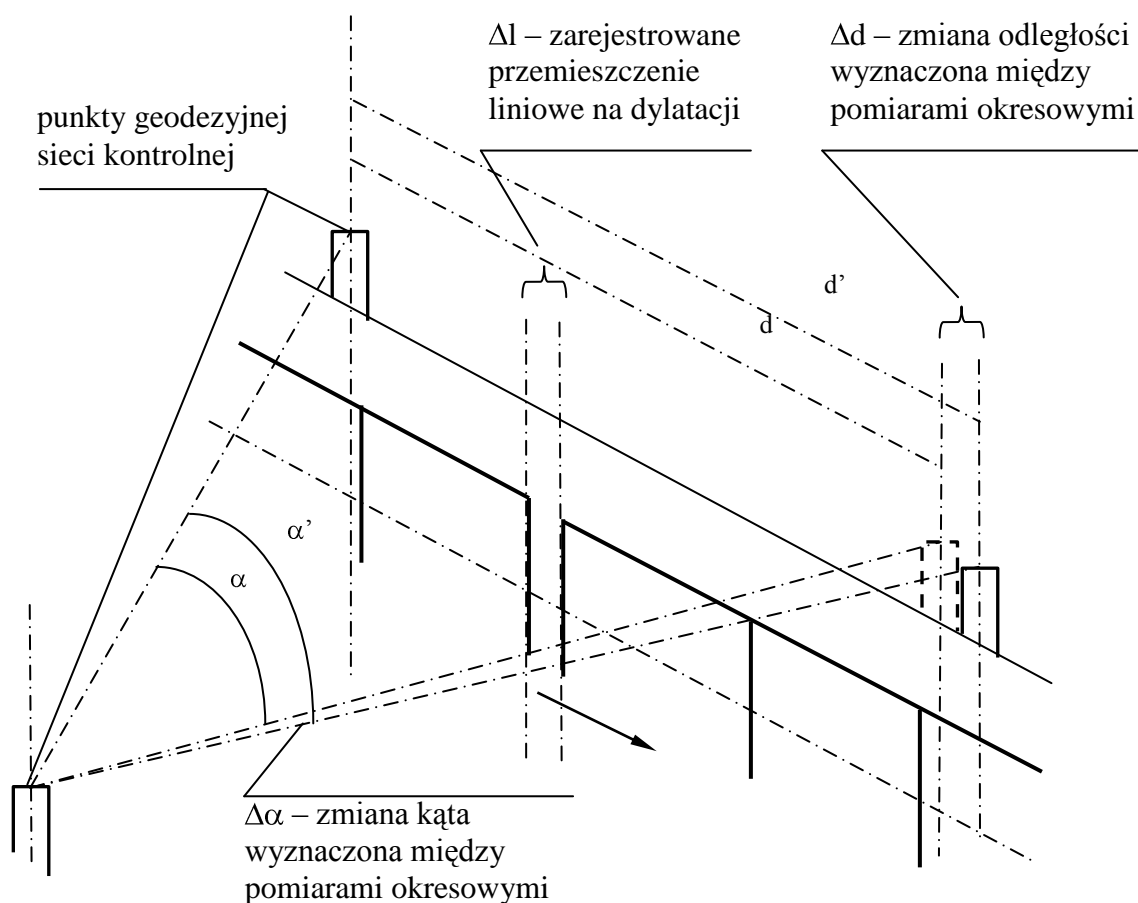
Danymi dodatkowymi wykorzystywanymi w procesie kontroli pomiaru geodezyjnego w czasie jego wykonywania mogą być:

- dane o charakterze geometrycznym (uzyskane z pomiarów względnych wykonanych przy użyciu takich instrumentów jak: np. szczelinomierze, pochyłomierze),
- wyniki pomiaru niwelacyjnego (dla kontroli pomiarów sieci poziomej),
- dane z czujników i rejestratorów bezpośrednich np. hydrotechnicznych
- (tj. wskazania piezometrów) i rejestrujących warunki zewnętrzne (tj. temperatura, wilgotność).

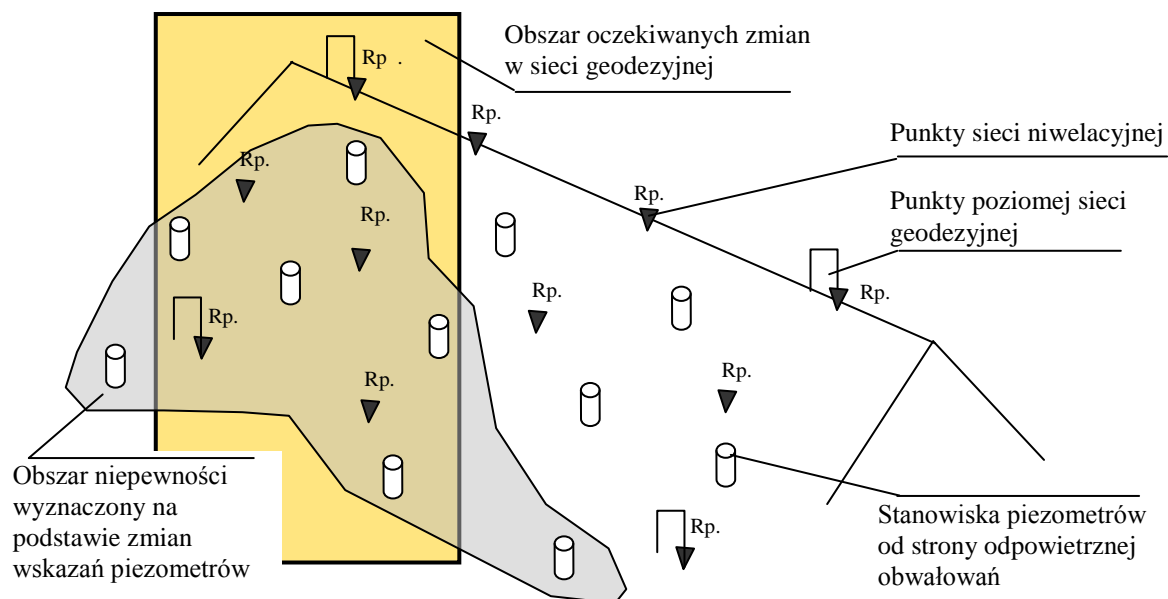
Dane dodatkowe o charakterze geometrycznym mogłyby pozwolić na wyznaczenie przewidywanych zależności bezpośrednich np. zmiana wysokości wpłynie na odległość

skośną między punktami, zmiana szerokości szczeliny dylatacyjnej może się ujawnić w wielkości obserwowanych kątów i długości w sieci między punktami zastabilizowanymi w sąsiednich sekcjach konstrukcji (Rys. 47).

Dane z czujników i rejestratorów geotechnicznych i hydrologicznych na podstawie zmian wskazań w okresie bezpośrednio poprzedzającym pomiar kontrolny oraz na podstawie prognoz bazujących na wykonanych interpretacjach wyników pomiaru dla ubiegłych okresów wieloletnich mogłyby służyć do wyznaczania tzw. obszarów (rejonów) niepewności (Rys. 48) – pomiar geodezyjny punktów tam zastabilizowanych mógłby być wykonany ze szczególną dbałością i powtórzony jeżeli w czasie jego realizacji nie ma potwierdzenia przewidywanych zmian.



Rys. 47 Powiązanie pomiarów odległości i kąta z zarejestrowaną zmianą wielkości szczeliny dylatacyjnej.



Rys. 48 Wyznaczenie obszarów oczekiwanych zmian na podstawie danych z piezometrów.

Opisane wyżej zależności są uproszczone, ale dobrze obrazują zależności, na których można byłoby oprzeć algorytmy kontrolne [Zaczek-Peplinska, 2004]. Niestety bezpośrednie powiązanie obserwacji geodezyjnych z badanymi wielkościami fizycznymi takimi jak: wielkość filtracji, poziom wody gruntowej, przesunięcie pojedynczej sekcji, za pomocą funkcji matematycznych jest bardzo trudne. Dodatkowo obserwacje geo- i hydrotechniczne są obserwacjami o relatywnie małej dokładności, dającej się oszacować z pewnym przybliżeniem.

Z uwagi na to, że modele wyrównawcze sieci kontrolnych są modelami wystarczająco dokładnymi w odróżnieniu od modeli fizykalnych (bazujących na rejestrowanych wielkościach fizycznych) stosowanych w ocenie bezpieczeństwa budowli i operujemy w nich wiarygodnymi oszacowaniami wykonanych pomiarów, Papo i Perelmuter [1993] zaproponowali dwuetapowość podejścia do wyznaczanych parametrów fizykalnych. Pierwszy etap stanowi opracowanie obserwacji geodezyjnych i dopiero wyniki tego etapu (tj. przemieszczenia bądź też prędkości ruchu) są przekazywane do etapu drugiego, w którym operuje się modelem fizykalnym.

Z punktu widzenia niezawodności wewnętrznej sieci nie jest też wskazane [Prószyński, 2007] konstruowanie modeli wyrównawczych integrujących obserwacje o znacznych dysproporcjach poziomów dokładności pomiaru i słabych oszacowaniach tych poziomów.

Nie jest więc wskazane dołączanie do obserwacji geodezyjnych obserwacji geotechnicznych o relatywnie małej dokładności i dającej się oszacować jedynie z pewnym przybliżeniem.

Mając na uwadze te zalecenia przyjęto w niniejszej pracy, że model wyrównawczy modernizowanej sieci kontrolnej obejmować będzie wyłącznie obserwacje geodezyjne. Struktura sieci będzie zmodyfikowana tak, by zapewnić wystarczająco wysoki poziom niezawodności wewnętrznej tej sieci.

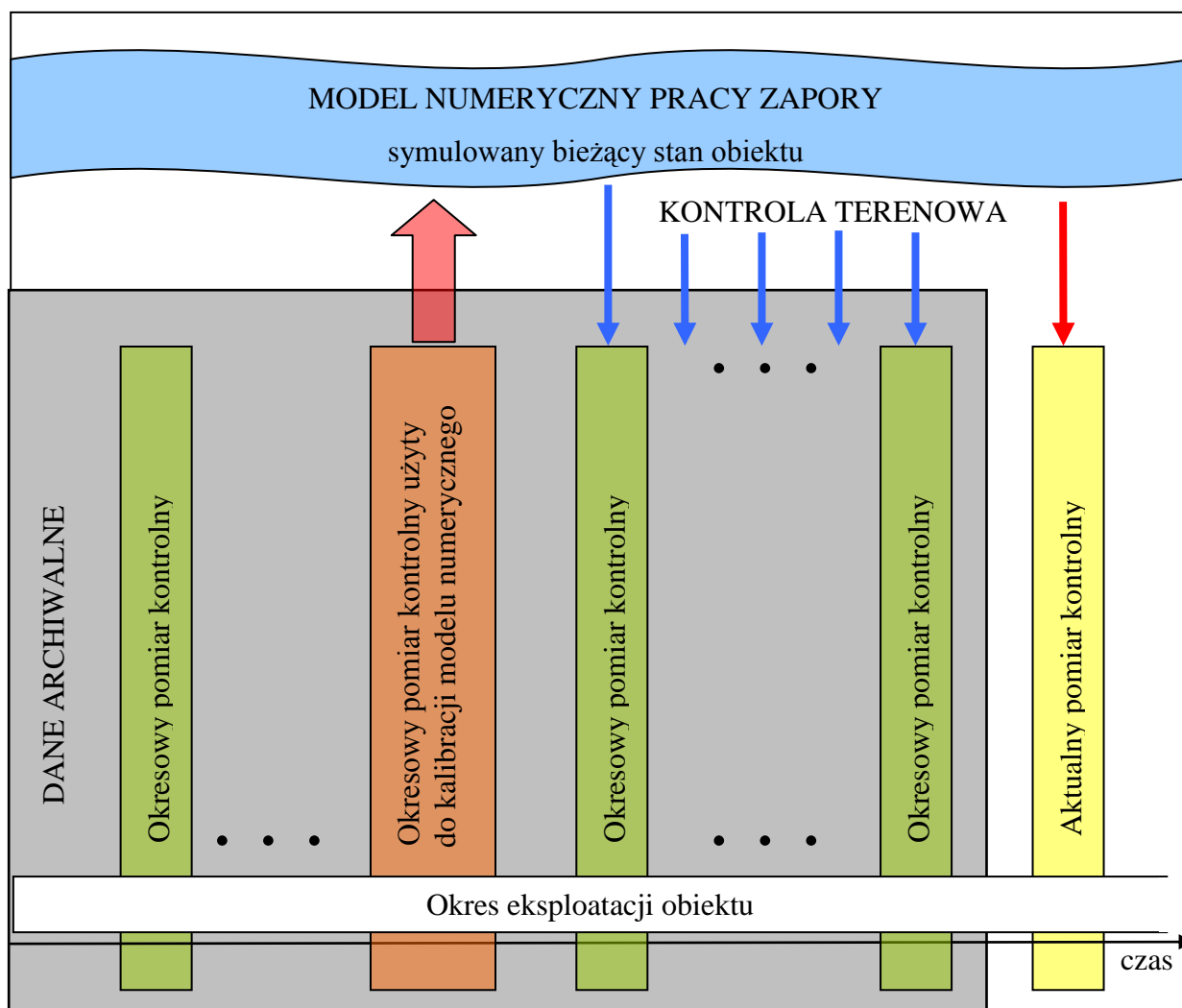
Proponowana tutaj terenowa kontrola poprawności wykonanych obserwacji geodezyjnych obejmująca obserwacje niewyrównane bazuje na modelowaniu numerycznym MES pracy monitorowanego obiektu. Z racji niższej dokładności oczekiwanych wielkości przemieszczeń (uzyskanych na podstawie modelowania numerycznego) w stosunku do dokładności obserwacji geodezyjnych dają one możliwość kontroli na poziomie błędów grubych. Jest to kontrola w pełni niezależna od wykonanych w sieci pomiarów geodezyjnych i ma osadzenie w warstwie fizycznej zadania.

Model bieżącego (chwilowego) stanu obiektu w procesie kontroli pomiaru geodezyjnego, oddający zachowanie się budowli powinien uwzględniać warunki brzegowe - wielkości opisujące stan obiektu. Takimi wielkościami mogą być bieżące odczyty z czujników pomiarowych zainstalowanych na obiekcie, a w szczególności uwzględnienie zmiany poziomu wody górnej, mającego największy wpływ na obciążenia i naprężenia obserwowane w czasie normalnej eksploatacji zapory. Z racji niższej dokładności modelowanych oczekiwanych wielkości przemieszczeń w stosunku do dokładności obserwacji geodezyjnych dają one możliwość kontroli na poziomie błędów grubych, oraz sygnalizacji nieadekwatności do stanu rzeczywistego wykorzystywanego modelu, lub w sytuacjach skrajnych – sygnalizacji stanu awaryjnego obiektu

Podkreślić należy, że kontrola terenowa okresowego pomiaru geodezyjnego jest kontrolą bazującą na wynikach modelowania, mającego na celu symulację bieżącego stanu obiektu, stanu przy którym wykonywany jest kontrolowany pomiar okresowy. Nie występuje tutaj kontrola zgodności obserwacji z obserwacjami wykonanymi w czasie poprzednich pomiarów okresowych. Dane archiwalne służą do kalibracji modelu numerycznego oraz przedstawienia obliczonych wartości przemieszczeń w lokalnym układzie współrzędnych związanym z kontrolowanym obiektem i na ich podstawie obliczeniu oczekiwanych współrzędnych punktów kontrolnych. Na podstawie oczekiwanych współrzędnych obliczane są wartości obserwacji oczekiwanych. Rolę poszczególnych rodzajów danych przedstawia rysunek (Rys. 49). Wydaje się, że takie podejście może być bez trudu wprowadzone na etapie modernizacji istniejącej sieci kontrolnej i stanowić podstawowy element ulepszenia procesu

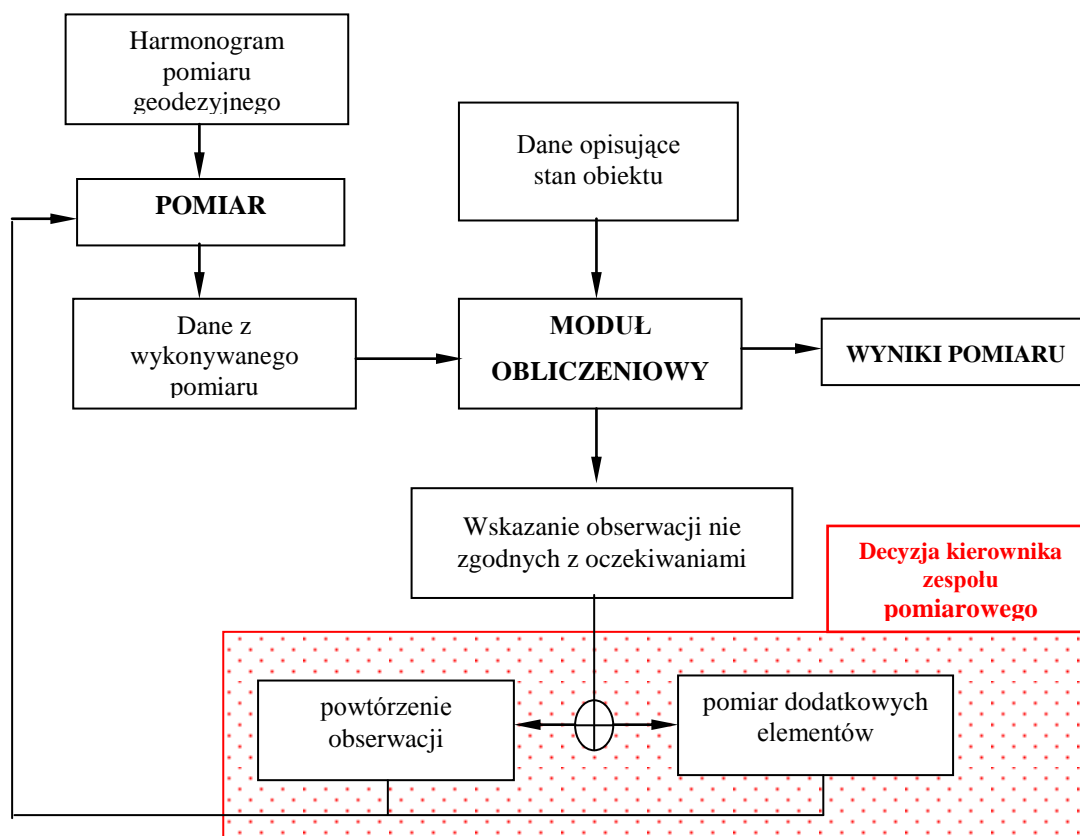


opracowania wyników pomiaru w tej sieci i podniesienia poziomu wiarygodności wyznaczonych przemieszczeń.



Rys. 49 Rola pomiarów archiwalnych i rejestracji bieżącego stanu obiektu w terenowej kontroli pomiaru okresowego.

Uwzględnienie wyników modelowania MES powinno nastąpić przez opracowanie i włączenie do procesu geodezyjnego pomiaru przemieszczeń modułu obliczeniowego wykorzystującego w procesie kontroli danych geodezyjnych obliczone najbardziej prawdopodobne przemieszczenia punktów kontrolnych. Schemat działań w czasie pomiaru kontrolnego na obiekcie, uwzględniający dodatkową kontrolę terenową pomiaru przedstawia rysunek (Rys. 50).



Rys. 50 Schemat wstępnej terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego

Opracowany przez autorkę pracy sposób kontroli terenowej pomiaru geodezyjnego opiera się na porównaniu wartości zaobserwowanych kierunków, kątów i odległości z odpowiednimi wartościami obliczonymi na podstawie najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń obserwowanych punktów kontrolnych uzyskanych z modelu MES. Modele wykorzystywane do kontroli powinny być wykonane zgodnie z procedurami opisanymi w podrozdziale 4.2 tej pracy.

Zastrzec należy, że potwierdzenie zgodności wykonanych obserwacji z obserwacjami obliczonymi na podstawie przemieszczeń uzyskanych z modelu pracy obiektu nie może być warunkiem kontynuacji pomiaru – charakter rejestrowanych przez czujniki danych jest zupełnie inny niż dane otrzymywane z pomiaru geodezyjnego i nie można danych tych traktować na tym samym poziomie wiarygodności. Proponowane porównania powinny tu mieć tylko i wyłącznie charakter kontrolny na poziomie wstępnego terenowego opracowania wyników pomiaru.

Kontrola danych powinna następować w czasie wykonywania pomiaru (jeżeli dysponujemy sprzętem pomiarowym umożliwiającym na bieżąco przesyłanie, gromadzenie i analizowanie danych pomiarowych) lub bezpośrednio po zakończeniu pomiaru, zanim zespół

zakończy swój pobyt na obiekcie (wstępna kontrola terenowa) aby można było od razu powtórzyć lub uzupełnić wykonane już obserwacje o dodatkowe elementy (kąty, odległości) [Prószyński, Zaczek-Peplinska, 2005].

W celu realizacji kontroli terenowej zostały opracowane procedury opisujące sposób przygotowania danych oraz algorytmy obliczeniowe. Na ich podstawie powstał program SuDam. Program ten realizuje kontrolę na podstawie analizy danych archiwalnych: obserwowanych i modelowych przemieszczeń dla stanów obiektu obserwowanych w poprzednich okresach normalnej eksploatacji obiektu oraz bieżącego stanu obiektu scharakteryzowanego wielkością poziomu zwierciadła wody górnej (ZWG). Drugim trybem pracy programu jest analiza danych uzyskanych z modelowania równoległego (on-line), realizowanego w czasie wykonywania pomiaru i uwzględniającego bieżący stan obiektu.

Opracowane algorytmy i program SuDam są opisane w następnych rozdziałach tej pracy.

## **5.2 Związek poziomu zwierciadła wody górnej (ZWG) ze wskazaniami czujników hydrotechnicznych**

Automatyczne pomiary stosowane do kontroli pracy zapór obejmują pomiary wielkości i wpływu głównych czynników oddziałujących na zapory. W normalnych warunkach kontroli podlegają:

- opady i stany wody na dopływach do zbiornika (prognoza dopływu),
- poziom górnej i dolnej wody,
- temperatury wody, powietrza oraz budowli,
- wszelkiego rodzaju przemieszczenia liniowe i kątowe (względne i bezwzględne),
- ciśnienia oraz położenia zwierciadła wód gruntowych (filtracyjnych),
- wydatki filtracji (drenaży),
- ciśnienie wody porowej.

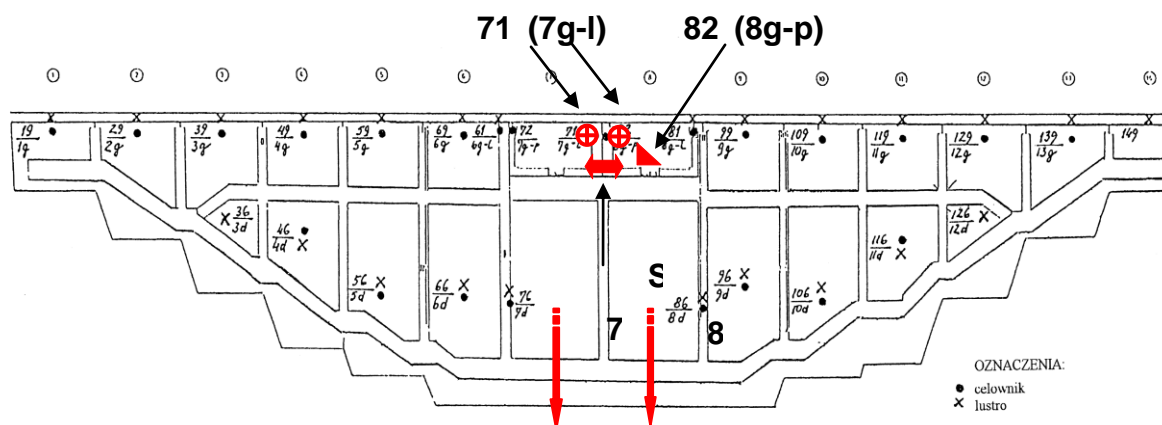
Wszystkie te dane rejestrowane są przez czujniki zainstalowane na obiekcie. Danych rejestrowanych przez Automatyczny System Technicznej Kontroli Zapór (AS TKZ) jest bardzo wiele, nie sposób jest uwzględnić wszystkie te dane w procesie modelowania stanu obiektu. Podczas normalnej eksploatacji zapory jedynym istotnym czynnikiem zmieniającym obciążenia jest poziom wody w zbiorniku ZWG [Fanti, 1972], [Fiedler, 2007], [Sorbjan, 2004]. Analiza archiwalnych danych pomiarowych z różnych okresów eksploatacji obiektów

m. in. Besko, Klimkówka, Solina potwierdza zależność wskazań czujników od poziomu zwierciadła wody górnej. Przeanalizowano także wyznaczone wielkości przemieszczeń celowników i porównano je z odczytami czujników i wskazaniem poziomu ZWG. Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że najważniejszym parametrem opisującym bieżący stan obiektu jest poziom ZWG. Dlatego też modelowanie numeryczne, którego wyniki są materiałem podstawowym proponowanej kontroli pomiaru geodezyjnego może być wykonywane z ograniczeniem ilości parametrów zmiennych do ZWG oraz wskazań czujników posadowionych w punktach newralgicznych i wskazanych przez użytkownika obiektu (jeśli istnieje taka potrzeba).

W celu potwierdzenia możliwości porównywania wskazań różnych czujników z wynikami pomiaru geodezyjnego wykonano analizę porównawczą dla okresu rozruchowego zapory Besko (pomiarów punktów na koronie i wskazania czujników w galerii górnej sekcji 8). Oczekiwane zbieżności zmian wskazań w czasie (Tabela 4, rysunki Rys. 51, Rys. 52, Rys. 53, Rys. 54, Rys. 55 przedstawiają wybrane dane) potwierdzają zasadność porównywania tych danych. Na wykresach zaznaczono charakterystyczne momenty zmian wskazań czujników, wynikające ze zmian zwierciadła wody górnej (ZWG), zmiany te potwierdzają zasadność ograniczenia parametrów modelowania.

	Nr	celowniki na koronie				galeria górna						
		71 (7g-l)		82 (8g-p)		szczelinomierz S33 7-8			pochyłomierz PN11 8		piezometry	
Data	ZWG	DX	DY	DX	DY	DX	DY	DZ	DX	DY	7G	8G
03-1979	326,00	5,33	0,50	5,00	-0,17	-1,20	2,60	0,80	-0,40	-0,60	302,5	302,6
05-1979	335,70	6,07	0,50	5,55	-0,33	-1,20	2,00	0,20	-0,40	-0,80	302,8	303,2
06-1979	331,80	2,83	-0,33	2,83	-0,83	-1,60	1,80	0,00	-0,20	-0,80	303,0	303,2
10-1979	330,00	1,67	-0,17	2,33	-0,33	-1,60	2,40	0,40	0,20	-0,80	303,6	303,4
11-1979	326,20	2,50	0,17	2,50	-0,50	-1,80	8,20	1,40	0,40	-0,80	303,8	303,2
02-1980	318,70	0,50	0,50	0,00	1,17	-1,80	6,00	1,20	0,60	-0,20	303,0	303,2
04-1980	326,30	0,67	0,00	-0,33	1,40	-2,40	4,20	1,60	0,60	-0,40	303,2	303,5
05-1980	332,05	1,33	-0,67	1,33	-1,42	-2,20	3,60	1,40	0,40	-0,40	303,4	303,5
07-1980	336,10	1,83	-1,57	1,83	-0,83	-6,50	2,60	1,00	0,20	-0,40	303,5	303,6
11-1980	333,15	-0,67	0,57	0,83	0,83	-3,00	7,80	2,00	0,20	-0,60	304,0	303,5
05-1981	329,80	-0,99	-1,00	-1,16	0,83	-3,40	3,20	1,00	0,60	-0,40	304,2	303,8

Tabela 4 Przemieszczenia celowników i wskazania czujników – zapora Besko, sekcje 7-8.

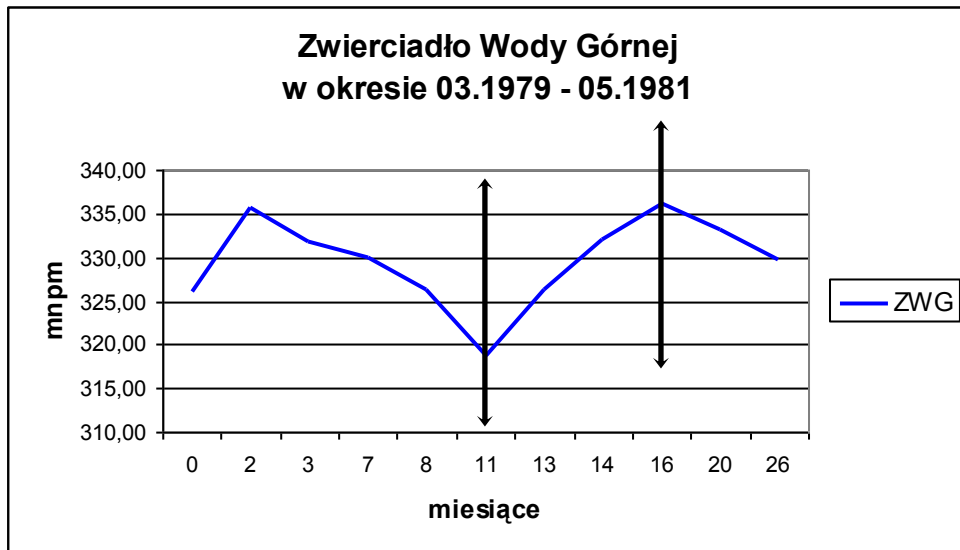


Rys. 51 Rozmieszczenie czujników, których wskazania zostały porównane.

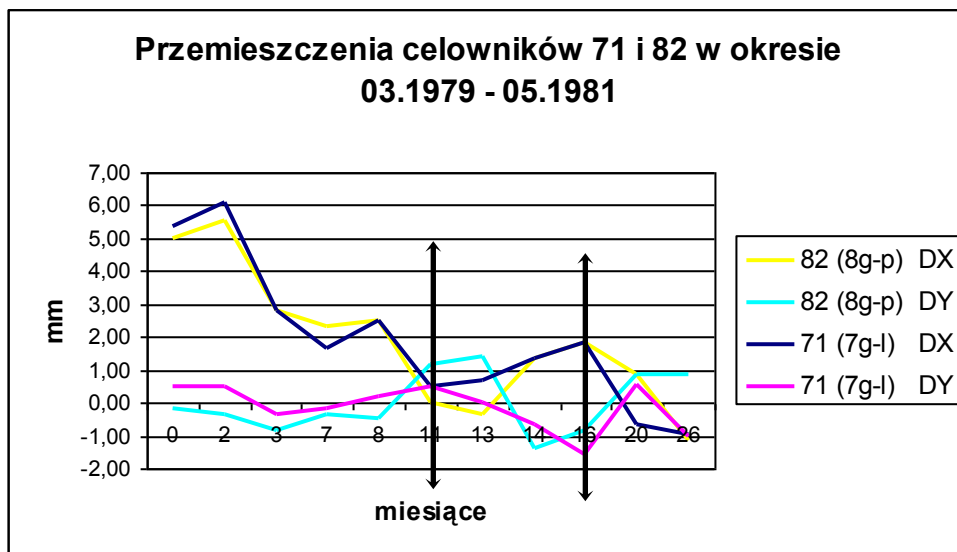
W programie SuDam przewidziano możliwość wprowadzenia dodatkowych zmiennych parametrów w postaci odczytów z wybranych czujników. Uwzględnienie tych danych nie jest problemem w trybie modelowania równoległego, tworząc modele pracy poszczególnych sekcji budowli można zdefiniować położenie czujników oraz zmienić i odpowiednio rozszerzyć zbiór parametrów wejściowych – program HYDRO-GEO pozwala na zestawianie dużych tablic parametrów (jest to program dedykowany dla tego typu symulacji pracy obiektów hydrotechnicznych).

W trybie wykorzystującym funkcje aproksymujące ruch punktów kontrolowanych, ilość, lokalizację i zakres wskazań czujników należy uwzględnić przy tworzeniu bazy wiedzy o zachowaniu obiektu. Większa ilość parametrów zmiennych powoduje zwielokrotnienie ilości modeli numerycznych potrzebnych do wyznaczenia parametrów funkcji aproksymującej, dodatkowo funkcje te nie będą już funkcjami jednej zmiennej, zmiennych opisujących stan może być wiele, co komplikuje proces obliczeniowy. W oknie dialogowym programu SuDam przewidziano miejsce na wprowadzenie odczytów większej liczby czujników, ale jest to tylko miejsce gdzie należałoby „podpiąć” odpowiednie procedury wybierające odpowiednie dla poszczególnych punktów parametry funkcji aproksymujących.

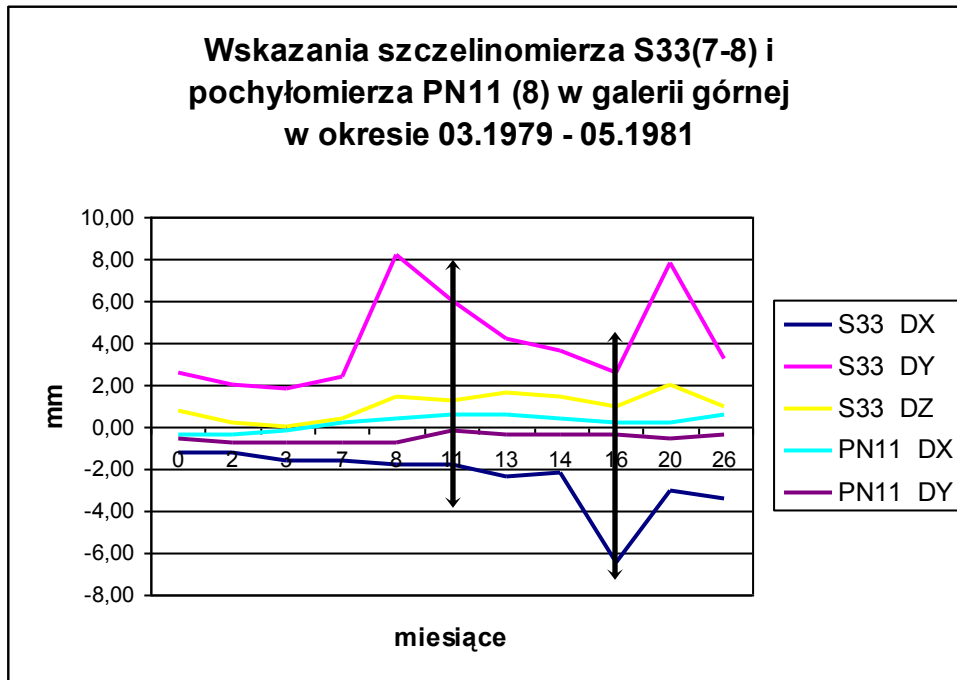
Przed przystąpieniem do rozbudowy programu należy wykonać analizę wylwu „odczytów pojedynczych czujników (a także ich kombinacji) i poziomu ZWG na ruch punktu kontrolowanego” w celu dobrania postaci funkcji najlepiej przybliżających ruchy punktów.



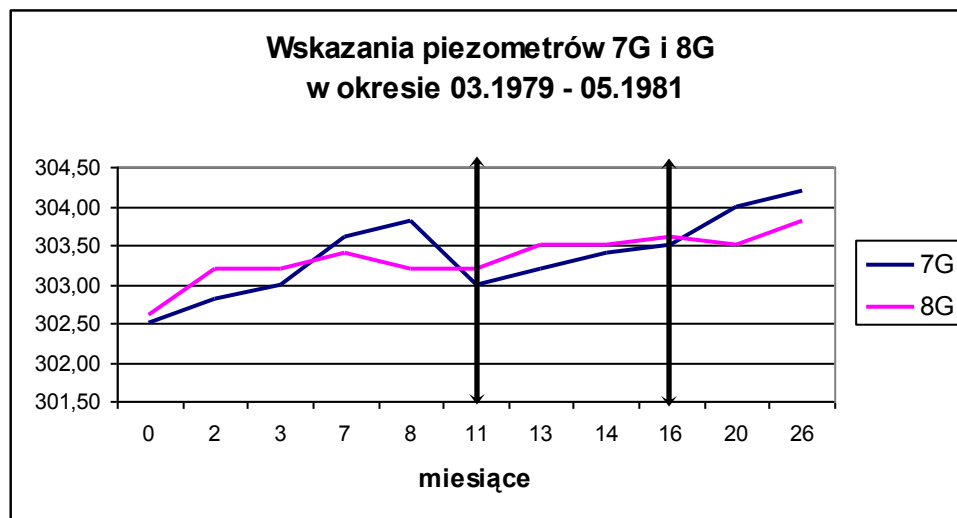
Rys. 52 Wykres wahań poziomu wody w zbiorniku (ZWG)



Rys. 53 Przemieszczenia celowników w analizowanym okresie



Rys. 54 Wskazania szczelinomierza i pochyłomierza w analizowanym okresie



Rys. 55 Wskazania piezometrów w analizowanym okresie

### 5.3 Baza Wiedzy o przemieszczeniach punktów kontrolnych obiektu

Algorytmy terenowej kontroli okresowego pomiaru geodezyjnego potrzebują danych o oczekiwanych wartościach przemieszczeń punktów kontrolowanych obiektu. W celu opracowania tych danych i przygotowania odpowiednich plików wejściowych dla programu realizującego algorytmy kontroli należy stworzyć Bazę Wiedzy, w której będą przechowywane dane archiwalne (wyniki geodezyjnych pomiarów przemieszczeń) i wyniki modelowania numerycznego dla zarejestrowanych (charakteryzowanych wielkością ZWG (obligatoryjnie) i odczytami z czujników niegeodezyjnych (opcjonalnie) i prognozowanych (charakteryzowanych przez wielkość ZWG) stanów obiektu. Stworzona Baza Wiedzy powinna być na bieżąco zasilana wynikami aktualnych pomiarów kontrolnych oraz wynikami obliczonymi na podstawie modeli uwzględniających nowe-bieżące dane opisujące stany obiektu.

#### 5.3.1 Archiwalne wyniki pomiarów geodezyjnych

Dla każdego wykonanego okresowego pomiaru geodezyjnego w Bazie Wiedzy powinny znaleźć się następujące dane:

1. Dane opisujące stan obiektu w chwili wykonywania pomiaru:  
informacja obligatoryjna: poziom zwierciadła wody górnej (ZWG),  
informacje opcjonalne: odczyty wybranych czujników niegeodezyjnych.
2. Ocena wiarygodności i niezawodności wykonanego pomiaru wykonana przez kierownika zespołu pomiarowego - w tym wskazanie czy wyniki nadają się jako dane do kalibracji modelu numerycznego (kwalifikacja: pomiar kalibracyjny TAK/NIE).
3. Wyznaczone przemieszczenia punktów kontrolowanych.
4. Zestawienie nie wyrównanych obserwacji.
5. Zestawienie aktualnych w stosunku do wykonanego pomiaru współrzędnych punktów sieci kontrolnej.

Jako potencjalne pomiary kalibrujące można zakwalifikować takie pomiary, których wyniki oceniane są jako bardzo wiarygodne, wykonane w ostatnim dziesięcioleciu eksploatacji obiektu. Wyniki tych pomiarów powinny być zgodne z zarejestrowanymi w czasie ich wykonywania stanami obiektu (na podstawie wartości ZWG i wskazań czujników AS TKZ). Pomiary te powinny być wybrane razem z kierownikiem zespołu pomiarowego i



osobą wykonującą oceny stanu technicznego obiektu. Pomiary te nie powinny być starsze niż 10 lat, dlatego, że przy większym odstępnie czasu między pomiarem aktualnym i pomiarem kalibrującym obliczone przemieszczenia oczekiwane mogą być obciążone wpływem reologicznych zmian materiałowych (np. starzenie się betonu), co spowoduje niższą jakość przeprowadzonej kontroli obserwacji.

### 5.3.2 Wyniki modelowania numerycznego pracy obiektu

W Bazie Wiedzy powinny znaleźć się wyniki modelowania numerycznego wykonanego przy założeniu różnych wartości ZWG, a w szczególności:

- Projektowanych minimalnej i maksymalnej wartości ZWG dla zbiornika,
- Zarejestrowanych w okresie eksploatacji minimalnej i maksymalnej wartości ZWG,
- Wartości ZWG zarejestrowanych w czasie wykonywania pomiarów geodezyjnych, których wyniki były wykorzystane podczas kalibracji modelu numerycznego metodą analizy wstecz,
- Wartości ZWG zarejestrowanych w czasie wykonywania pomiarów zakwalifikowanych jako kalibrujące,
- Wartości pośrednich ZWG (między maksymalną i minimalną z wyżej wymienionych).

Dla każdego zbioru danych uzyskanych z obliczenia jednego modelu numerycznego w Bazie Wiedzy powinny znaleźć się następujące dane:

1. Dane opisujące stan obiektu dla którego był przygotowany model:  
informacja obligatoryjna: poziom zwierciadła wody górnej (ZWG),  
informacje opcjonalne: odczyty wybranych czujników hydrotechnicznych, jeśli były uwzględnione w czasie określania warunków brzegowych schematu obliczeniowego.
2. Obliczone najbardziej prawdopodobne przemieszczenia punktów kontrolowanych.

Ze względu na to, iż przemieszczenia obliczone z modelu są liczone oddzielnie dla każdej sekcji obiektu, w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do osi zapory, a ich wielkości wyznaczone są względem ich położenia przy suchym zbiorniku (stan przyjęty jako stan odniesienia w modelowaniu pracy obiektu) wybrany ze wskazanych pomiar kalibrujący będzie stanowił podstawę przeliczenia przemieszczeń do lokalnego układu współrzędnych. Oś OX lokalnego układu współrzędnych jest prostopadła do głównej osi korony zapory,

dlatego można wprost przyjąć, że obliczone najbardziej prawdopodobne przemieszczenia punktu stanowią składowe w kierunku OX obserwowanych przemieszczeń. W czasie normalnej pracy obiektu obserwowane wartości składowych przemieszczeń OY, równoległych do osi korony zapory są niewielkie i można je zaniedbać w procesie kontroli obserwacji. Dla sekcji, których osie korony nie pokrywają się z osią główną zapory, wartości obliczonych z modelu przemieszczeń należy zrzutować na płaszczyznę pionową prostopadłą do osi głównej zapory i przechodzącą przez punkt kontrolny. Na podstawie tak przygotowanych danych należy wyznaczać współczynniki funkcji aproksymujących przemieszczenia punktów kontrolowanych.

### *5.3.3 Prognozowanie przemieszczeń punktów kontrolowanych – współczynniki funkcji aproksymujących*

Aby obliczyć oczekiwane przemieszczenia punktów kontrolowanych obiektu bez wykorzystania zaawansowanych programów obliczeniowych do modelowania MES można wykorzystać wyniki już wykonanych obliczeń i wyznaczyć współczynniki funkcji przybliżających (w pracy zostały one nazwane „funkcjami aproksymującymi”) prognozowane ruchy punktów. Aby algorytm terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego mógł być zrealizowany należy wyznaczyć współczynniki funkcji aproksymujących dla wszystkich punktów kontrolowanych na obiekcie (celowników).

Współczynniki funkcji aproksymujących powinny być wyznaczone są na podstawie wyników wielokrotnie przeprowadzonego modelowania MES pracy obiektu dla różnych wartości ZWG. Minimalny zbiór danych powinien obejmować przemieszczenia obliczone na podstawie modelowania numerycznego wykonanego przy założeniu różnych wartości ZWG, a w szczególności:

- Projektowanych minimalnej i maksymalnej wartości ZWG dla zbiornika,
- Zarejestrowanych w okresie eksploatacji minimalnej i maksymalnej wartości ZWG,
- Wartości ZWG zarejestrowanych w czasie wykonywania pomiarów geodezyjnych, których wyniki były wykorzystane podczas kalibracji modelu numerycznego metodą analizy wstecz,
- Wartości pośrednich ZWG (między maksymalną i minimalną z wyżej wymienionych).

W celu dobrania odpowiedniej postaci funkcji aproksymujących wykonano obliczenia współczynników funkcji mających przybliżyć ruchy różnych punktów kontrolowanych na różnych obiektach i porównano otrzymane wyniki. Obliczono współczynniki funkcji postaci:

1. hiperbola:  $f(x) = \frac{a}{x^2} + \frac{b}{x} + c,$

2. parabola:  $f(x) = c + dx + ex^2 + gx^3$

3. funkcja złożona:  $f(x) = \frac{a}{x^2} + \frac{b}{x} + c + dx + ex^2 + gx^3,$

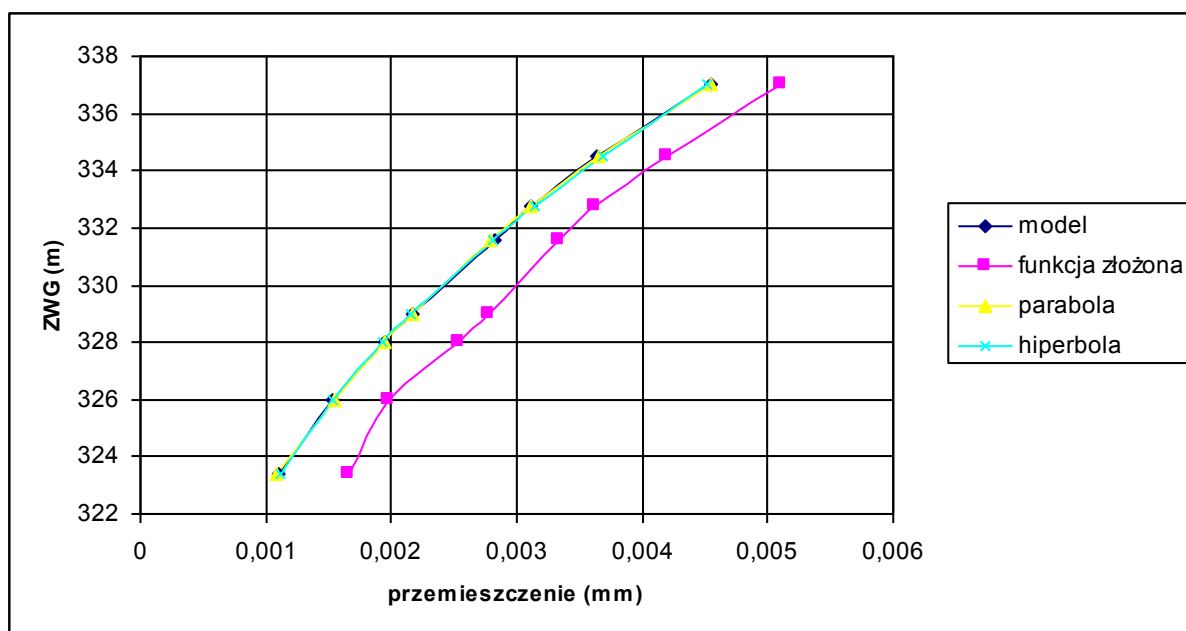
gdzie: x – wartość ZWG.

Na podstawie przeprowadzonej analizy ruchu różnych punktów kontrolnych zlokalizowanych na ścianie odpowietrznej zapory, stwierdzono, że funkcjami dobrze przybliżającymi przemieszczenia punktów są parabole i hiperbole. Obie rodziny funkcji dają bardzo zbliżone wyniki. Przykładowe wyniki uzyskane dla przemieszczeń celownika 66 zapory Besko obliczonych na podstawie modelowania numerycznego przy różnych wartościach ZWG zostały przedstawione w tabeli (Tabela 5) i na rysunku (Rys. 56).

Przemieszczenia punktu 66 w kierunku prostopadłym do osi korony zapory (X) [m]							
ZWG [m]	Przemieszczenie modelowe	funkcja złożona	różnica f.złożona-model	parabola	różnica parabola-model	hiperbola	różnica hiperbola-model
336,99	0,004555223	0,005105540	0,000550317	0,004548245	-0,000006978	0,004522103	-0,000033120
334,50	0,003637903	0,004195724	0,000557821	0,003657509	0,000019606	0,003679755	0,000041852
332,75	0,003117803	0,003624045	0,000506242	0,003119448	0,000001645	0,003142779	0,000024976
331,59	0,002816773	0,003331357	0,000514584	0,002797824	-0,000018949	0,002812751	-0,000004022
329,00	0,002169623	0,002775652	0,000606029	0,002165913	-0,000003710	0,002153084	-0,000016539
328,00	0,001947893	0,002532666	0,000584773	0,001949132	0,000001239	0,001927796	-0,000020097
326,00	0,001539858	0,001971791	0,000431933	0,001551863	0,000012005	0,001528144	-0,000011714
323,42	0,001097837	0,001656590	0,000558753	0,001092837	-0,000005000	0,001116501	0,000018664
	suma kwadratów różnic.		0,0000023431		0,000000001		0,000000005
			2,04025E-06		9,79261E-10		4,65152E-09

Obliczone współczynniki funkcji aproksymujących							
	a	2,96E+10				3,12E-03	
	b	-4,47E+08				2,80E-03	
	c	2,70E+06		-9,03E+00		2,17E-03	
	d	-8,17E+03		8,43E-02			
	e	1,23E+01		-2,63E-04			
	g	-7,47E-03		2,73E-07			

Tabela 5 Wyznaczenie współczynników funkcji aproksymujących obliczone przemieszczenia dla punktu 66 zapory Besko.



Rys. 56 Wykres przemieszczeń modelowych i funkcji aproksymujących dla punktu 66 zapory Besko.

W Bazie Wiedzy powinny się znaleźć współczynniki funkcji aproksymujących ruchy każdego z punktów kontrolowanych obiektu. Wraz z uzupełnianiem Bazy Wiedzy wynikami modelowania numerycznego obrazującego nie analizowane do tej pory stany obiektu współczynniki funkcji aproksymujących powinny być ponownie wyznaczone na podstawie większej liczby danych. Dzięki takiemu ciągłemu uaktualnianiu Bazy Wiedzy wartości przemieszczeń oczekiwanych obliczanych przy wykorzystaniu funkcji aproksymujących będą lepiej odpowiadały wartościom prognozowanym uznawanych za bliskie wartościom rzeczywistym w czasie normalnej pracy obiektu.

#### 5.4 Algorytm kontrolny wykorzystujący funkcje aproksymujące

Algorytm kontroli obserwacji geodezyjnych wykonanych w czasie geodezyjnego pomiaru okresowego wykorzystuje współczynniki funkcji aproksymujących położenie poszczególnych celowników w zależności od aktualnego poziomu zwierciadła wody górnej (ZWG). Z Bazy Wiedzy program w trakcie realizacji algorytmu pobiera następujące informacje:

- współrzędne punktów wyznaczone na podstawie archiwalnego pomiaru kalibrującego -  $X_k, Y_k$ ,
- poziom zwierciadła wody górnej w czasie pomiaru kalibrującego ( $ZWG_k$ ),
- współczynniki funkcji aproksymujących  $f(ZWG)$  opisujących ruch punktów kontrolowanych, wyznaczone na podstawie najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń obliczonych z modelu MES.

Ponadto algorytm potrzebuje informacji o wykonywanym/wykonanym aktualnym pomiarze geodezyjnym – zestawienia obserwacji wykonanych w czasie pomiaru wraz z oszacowanymi ich błędami pomiarowymi. Właśnie te nie wyrównane obserwacje będą poddane kontroli. dane te powinny być zapisane w pliku tekstowym.

Bieżący stan obiektu, rejestrowany w czasie wykonywania aktualnego pomiaru geodezyjnego jest charakteryzowany aktualną wartością  $ZWG$ .

Wyznaczone dla poszczególnych punktów współczynniki funkcji aproksymujących przechowywane są w Bazie Wiedzy. Program pobiera dane dotyczące punktów kontrolowanych i oblicza ich współrzędne aktualne, z następujących wzorów:

$$X_a = X_k - f(ZWG_k) + f(ZWG_a),$$

$$Y_a = Y_k,$$

gdzie:

$X_a, Y_a$  – oczekiwane współrzędne punktu kontrolowanego w czasie pomiaru aktualnego,

$X_k, Y_k$  – współrzędne punktu kontrolowanego wyznaczone na podstawie wyników pomiaru kalibrującego,

$ZWG_a$  – poziom zwierciadła wody górnej w czasie pomiaru aktualnego,

$ZWG_k$  – poziom zwierciadła wody górnej w czasie pomiaru kalibrującego.

Warto zauważyć, że wartość  $X_k - f(ZWG_k)$  należy traktować jako położenie punktu kontrolowanego przy suchym zbiorniku tzn. przy wartości  $ZWG$ , dla której modelowe wielkości przemieszczeń wynikają tylko z obciążenia gruntu samą konstrukcją.

W następnym kroku na podstawie współrzędnych  $X_a, Y_a$  punktów kontrolowanych, obliczane są oczekiwane wartości poszczególnych obserwacji i porównywane z obserwacjami wykonanymi w czasie kontrolowanego pomiaru geodezyjnego.

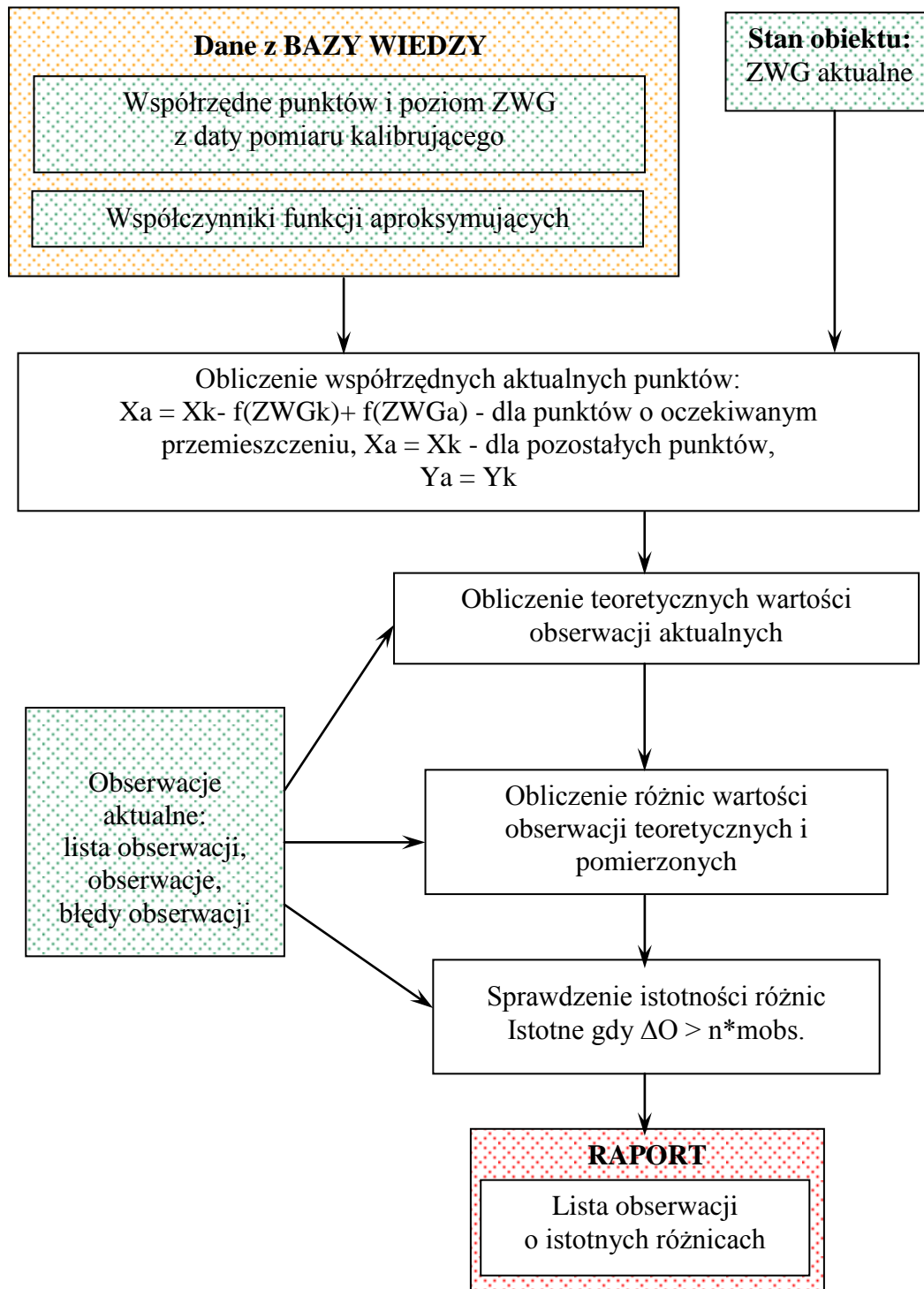
Wynikiem działania algorytmu jest lista wykonanych obserwacji i różnic między nimi a obserwacjami oczekiwanymi obliczonymi na podstawie danych pobranych z Bazy Wiedzy.

W raporcie końcowym program realizujący algorytm wskazuje te obserwacje których różnica między obserwacją rzeczywistą a oczekiwaną przekracza n-krotny błąd pomiaru danej wielkości (błąd obserwacji niewyrównanej).

Wartości obserwacji i błędy pomiaru są pobierane na bieżąco, jeśli jest wykonywana transmisja obserwacji w czasie pomiaru, lub w jednym z plików wejściowych czytanych przez program. Wielkość n jest podawana przez użytkownika w oknie dialogowym programu.

Kierownik zespołu pomiarowego na podstawie raportu końcowego powinien podjąć decyzję o ewentualnej zmianie harmonogramu pomiaru: powtórzeniu wskazanych przez program obserwacji lub wykonaniu obserwacji dodatkowych, uzupełniających dotychczas wykonany pomiar.

Schemat blokowy opisanego algorytmu przedstawia rysunek (Rys. 57).



Rys. 57 Schemat blokowy algorytmu kontroli obserwacji wykorzystującego funkcje aproksymujące przemieszczenia punktów kontrolowanych.

## **5.5 Algorytm kontrolny wykorzystujący modelowanie równoległe**

Pod pojęciem „modelowanie równoległe” (on-line) rozumie się modelowanie numeryczne wykonywane w tzw. czasie rzeczywistym (real time). W tym przypadku modelowanie to odbywa się bezpośrednio przed pomiarem lub w czasie jego wykonywania. Parametry zmienne modelu: aktualny poziom zwierciadła wody górnej (ZWG<sub>a</sub>) i odczyty wybranych czujników hydrotechnicznych (opcjonalnie) powinny być wprowadzone do programu realizującego modelowanie MES pracy obiektu (np. HYDO-GEO).

Wykorzystanie odczytów specjalistycznej aparatury kontrolnej monitorującej stan obiektu będzie możliwe tylko w przypadku takiego przygotowania modelu numerycznego pracy konstrukcji, aby było możliwe uwzględnienie dużej liczby warunków brzegowych odpowiadających danym takim jak temperatura na zewnątrz i wewnątrz konstrukcji, ciśnienie porowego gruntu, wielkość filtracji, wskazania piezometrów otwartych i zamkniętych rejestrowanych np. przez Automatyczny System Technicznej Kontroli Zapór (AS TKZ).

Obliczenia mogą być wykonane w czasie pomiaru kontrolnego przez osobę posiadającą odpowiednie kwalifikacje lub w centrum obliczeniowym. Kontakt z centrum obliczeniowym może odbywać się przez stronę www (serwis internetowy), e-mail lub w inny dowolny sposób tak, aby możliwe było otrzymanie wartości oczekiwanych aktualnych współrzędnych punktów w takiej formie aby program realizujący algorytm mógł je odczytać, wykorzystać i dołączyć (funkcja automatyczna lub działanie użytkownika) do Bazy Wiedzy.

Ponadto algorytm potrzebuje informacji o wykonanym aktualnym pomiarze geodezyjnym – zestawienia obserwacji wykonanych w czasie pomiaru wraz z oszacowanymi ich błędami pomiarowymi. Właśnie te nie wyrównane obserwacje będą poddane kontroli.

Na podstawie otrzymanych z modelowania równoległego oczekiwanych współrzędnych punktów kontrolowanych obliczane są oczekiwane wartości poszczególnych obserwacji i porównywane z obserwacjami wykonanymi w czasie kontrolowanego pomiaru geodezyjnego.

W raporcie końcowym program realizujący algorytm wskazuje te obserwacje których różnica między obserwacją rzeczywistą a oczekiwaną przekracza n-krotny błąd pomiaru danej wielkości (błąd obserwacji niewyrównanej).

Wartości obserwacji i błędy pomiaru są pobierane na bieżąco, jeśli jest wykonywana transmisja obserwacji w czasie pomiaru, lub w jednym z plików wejściowych czytanych przez program. Wielkość n jest podawana przez użytkownika w oknie dialogowym programu.

Podobnie jak po zakończeniu kontroli z wykorzystaniem funkcji aproksymujących, kierownik zespołu pomiarowego na podstawie raportu końcowego powinien podjąć decyzję o

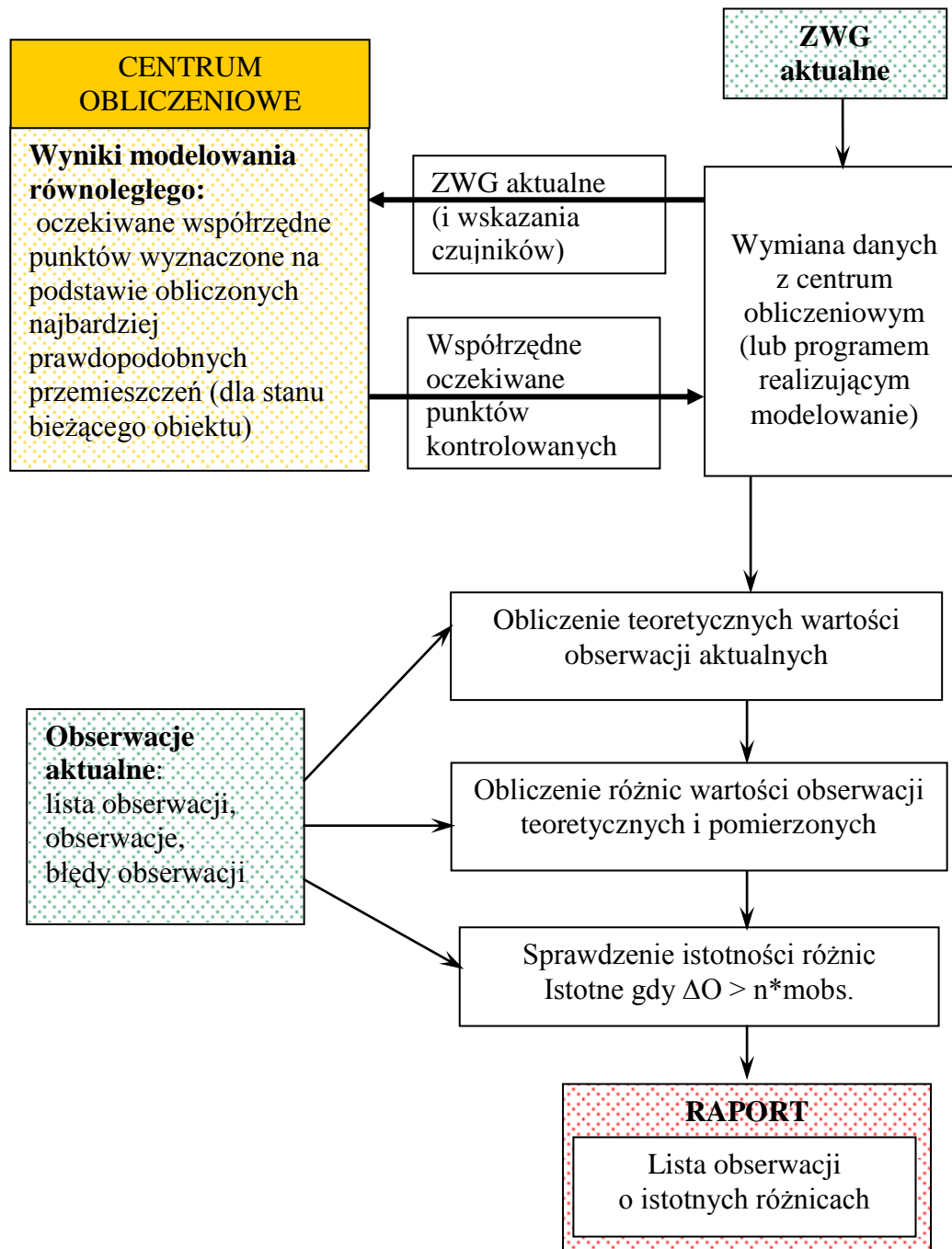


ewentualnej zmianie harmonogramu pomiaru: powtórzeniu wskazanych przez program obserwacji lub wykonaniu obserwacji dodatkowych, uzupełniających dotychczas wykonany pomiar.

Na schemacie blokowym opisanego algorytmu (Rys. 58) nie jest ujęta Baza Wiedzy. Wynika to z faktu, iż Baza ta jest w trakcie realizacji tego algorytmu uzupełniana danymi z centrum obliczeniowego – wynikami modelowania numerycznego. Dane te opisujące bieżący stan obiektu mogą zostać wykorzystane w trakcie uaktualniania zbioru informacji o przemieszczeniach poszczególnych punktów kontrolowanych i posłużyć do ponownego wyznaczenia współczynników funkcji aproksymujących na podstawie większej liczby danych.

Użytkownik wykorzystujący program realizujący opisany algorytm będzie oczekiwał od niego wskazania obserwacji potencjalnie obciążonych błędem grubym oraz potwierdzenia spójności pomiaru geodezyjnego z wynikami modelowania, a pośrednio ze wskazaniami czujników niegeodezyjnych (jeśli były uwzględnione przy tworzeniu modelu pracy zapory). W związku z powyższym program powinien dostarczyć użytkownikowi najbardziej prawdopodobne wyniki pomiaru obliczone na podstawie najlepszych znanych współrzędnych punktów sieci pomiarowej oraz przemieszczeń tych punktów obliczonych na podstawie numerycznego modelu zapory i dostarczonych od użytkownika pomierzonych wartości parametrów zmiennych. Aby spełnić oczekiwania użytkownika centrum obliczeniowe powinno przekazywać współrzędne punktów uzyskane z ostatniego wyrównania sieci zredukowane do poziomu kalibracji ZWG i poprawione o wartości przemieszczeń dla aktualnego ZWG<sub>a</sub>. Dla obserwowanych punktów spoza modelu centrum obliczeniowe powinno przekazać niezmiennione współrzędne z ostatniego wyrównania.

Wszystkie modele numeryczne wykorzystywane w czasie kontroli powinny być obliczane przez specjalistów z zakresu hydrotechniki i pracy konstrukcji, archiwalne dane kalibrujące (wyniki pomiaru geodezyjnego) powinny być wybierane wspólnie z osobą odpowiedzialną za pomiary kontrolne obiektu np. kierownikiem zespołu pomiarowego, geodetą wykonującym obliczenia itp.



Rys. 58 Schemat blokowy algorytmu kontroli obserwacji wykorzystującego wyniki modelowania równoległego.

## 5.6 Program ekspertowy SuDam (Survey of Dam) – opis i instrukcja użytkownika

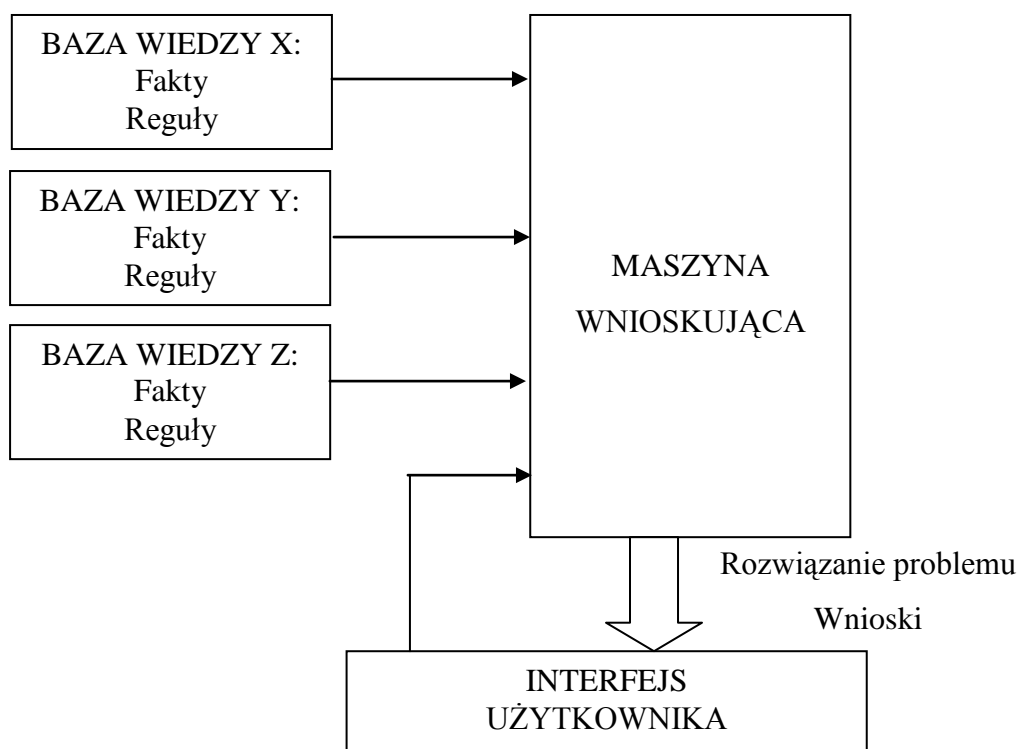
### 5.6.1 Program ekspertowy

System ekspertowy jest programem komputerowym, który wykonuje skomplikowane obliczenia i analizy, których nie byłby w stanie w sposób szybki – bieżący wykonywać człowiek. Analizy te bazują na wiedzy z różnych dziedzin nauki i techniki.

Systemy ekspertowe można podzielić na trzy ogólne kategorie [Mulańska, 1996]:

- doradcze (advisory) – prezentujące rozwiązania dla użytkownika, który jest w stanie ocenić ich jakość – użytkownik może odrzucić proponowane rozwiązanie,
- podejmujące decyzje bez kontroli człowieka (dictatorial) – programy te są używane np. do sterowania różnymi obiektami, gdzie udział człowieka jest utrudniony lub wręcz niemożliwy,
- krytykujące (criticizing) – systemowi jest przedstawiany problem i jego rozwiązanie, system dokonuje analizy i komentuje rozwiązanie.

Ogólną strukturę systemu ekspertowego przedstawia rysunek 5.4.



Rys. 59 Ogólna struktura systemu ekspertowego.

Rozważając bardziej szczegółowo strukturę systemów ekspertowych można w niej wyróżnić następujące podstawowe elementy:

- baza wiedzy (np. zbiór reguł),
- baza danych (np. dane o obiekcie, wyniki pomiarów, hipotezy),
- procedury wnioskowania – maszyna wnioskująca,
- procedury objaśniania – objaśniają strategię wnioskowania,
- procedury sterowania dialogiem – procedury wejścia/wyjścia umożliwiają formułowanie zadań przez użytkownika i przekazywanie rozwiązania przez program,
- procedury umożliwiające rozszerzanie oraz modyfikację wiedzy – pozyskiwanie wiedzy.

Jednym z wstępnych założeń programu SuDam było aby jego struktura, wykorzystywane dane archiwalne i bieżące, oraz interfejs użytkownika pozwoliły zaliczyć go do grupy programów ekspertowych. I tak w strukturze programu można wyróżnić:

- Bazę wiedzy – to w tym przypadku dane zawarte w plikach wejściowych:
  1. współrzędne punktów kontrolowanych w „stanie odniesienia” – stanie na podstawie którego model MES został skalibrowany,
  2. dane opisujące charakter ruchu poszczególnych punktów kontrolowanych (zapisany w formie parametrów funkcji aproksymującej) wyznaczony na podstawie wielokrotnego modelowania MES pracy zapory przy różnych stanach obiektu – różnym poziomie wody górnej (ZWG) i odpowiadających mu odczytach czujników niegeodezyjnych (np. piezometrów, czujników parcia gruntu, inklinometrów itp.),
  3. wielkości obliczonych z modelu najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń (model MES tworzony na bieżąco, dla aktualnego – zarejestrowanego w czasie wykonywania pomiaru stanu obiektu).
- Bazę danych – dane zawarte w pliku wejściowym zawierającym aktualne obserwacje geodezyjne (pomierzone kąty, kierunki i odległości) oraz dane hydrotechniczne opisujące stan obiektu dla potrzeb wykonania aktualnego modelu MES.
- Procedury wnioskowania – algorytmy obliczeniowe:
  1. oparty na danych archiwalnych – algorytm kontrolny wykorzystujący funkcje aproksymujące,
  2. oparty na danych opisujących bieżący stan obiektu – algorytm kontrolny wykorzystujący wyniki modelowania równoległego (on-line).
- Procedury sterowania dialogiem – w tej wersji programu są to proste okna dialogowe i raportowe.

- Procedury umożliwiające rozszerzanie oraz modyfikację wiedzy – na etapie gromadzenia danych opisujących jeden obiekt, wystarczający jest opisany szczegółowo sposób kodowania danych w plikach tekstowych, nie potrzebne są funkcje programowe pozwalające na automatyczne tworzenie plików wejściowych. Jeżeli program ten miałby być wykorzystywany dla innych obiektów, w celu prostego katalogowania danych program należy rozbudować o odpowiednie procedury.

Ze względu na prosty, sekwencyjny sposób wnioskowania nie zaprojektowano procedur objaśniania.

Utworzenie systemu ekspertowego opartego na bazie wiedzy wymaga pozyskania (akwizycji) wiedzy eksperta, który często znajduje rozwiązanie na podstawie informacji o problemie oraz na swoim doświadczeniu – wiedza eksperta w programie SuDam jest reprezentowana przez zbiory danych opisujących pracę zapory w latach ubiegłych (dane z pomiarów kontrolnych) oraz modelowe przemieszczenia punktów kontrolowanych, modele pracy konstrukcji wykonane przez specjalistów z dziedziny hydrotechniki (z udziałem wiedzy geodety obejmującym sieć pomiarowo-kontrolną).

### 5.6.2 *O programie SuDam*

Program SuDam (skrót od angielskiego Survey of Dam – Pomiar Zapory) jest programem realizującym opisane w niniejszej pracy algorytmy terenowej kontroli obserwacji geodezyjnych wykonywanych w trakcie okresowego pomiaru geodezyjnego zapory betonowej. Wykorzystane algorytmy oraz sam program zostały opracowane przez autora tej pracy. Program został napisany w języku Delphi. Działanie programu zostało przetestowane przy wykorzystaniu danych pomiarowych z okresowych kontroli zapór Besko i Klimkówka. Pomiaru te były wykonane przez zespół pomiarowy Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór (OTKZ) pod kierownictwem mgr inż. Marka Wróblewskiego.

Program służy do sprawdzenia zgodności wyników pomiarów geodezyjnych z numerycznym modelem zapory betonowej. Zapora modelowana jest metodą elementów skończonych za pomocą specjalizowanego oprogramowania – niezależnie od programu SuDam. Program wykorzystuje tylko dane wynikowe modelowania – w postaci zbiorów zawierających obliczone przemieszczenia obserwowanych punktów lub parametrów funkcji

opisujących ruch punktów, uzyskanych z opracowania rozwiązania modelowego przy wielu różnych wartościach parametrów wejściowych.

Program na podstawie danych wejściowych oblicza modelowe aktualne współrzędne punktów geodezyjnych (stanowisk, celowników) w sieci kontrolnej i na podstawie pliku tekstowego zawierającego nie wyrównane wyniki pomiarów generuje raport niezgodności poszczególnych obserwacji z danymi modelowymi. Niezgodność wartości pomierzonej z obliczoną na podstawie modelu może oznaczać jedną z trzech sytuacji:

- nieprawidłowa postać funkcji opisującej ruch punktu, lub nieprawidłowo dobrane parametry modelu,
- błąd pomiaru,
- rzeczywiste przemieszczenie elementów zapory – niezgodne z założonym modelem pracy obiektu – co może świadczyć o pracy elementu zapory innej niż założona przez projektanta, a w sytuacji ekstremalnej o stanie poprzedzającym awarię.

Program może działać w trybie „Rozwiązania z funkcją aproksymującą” (opis algorytmu w podrozdziale 5.4) lub „Modelowania równoległego” (opis algorytmu w podrozdziale 5.5). W każdym z trybów obliczane są aktualne współrzędne punktów sieci. Współrzędne obliczane są w dwóch etapach – na podstawie współrzędnych stanu przyjętego za stan odniesienia (najbardziej wiarygodny stan zapory, stan pomierzony i wykorzystany do tarowania modelu numerycznego) oraz obliczonych, modelowych przemieszczeń dla poziomu wody górnej zarejestrowanej w czasie pomiaru stanu odniesienia uzyskiwane są współrzędne punktów sieci dla zapory „suchej” – czyli dla teoretycznego stanu w którym zbiornik zapory nie jest w ogóle wypełniony. Do tak uzyskanych współrzędnych dodawane są przemieszczenia uzyskane z modelu dla aktualnego poziomu wody górnej. Z tych współrzędnych obliczane są teoretyczne wartości poszczególnych obserwacji i porównywane z wartościami uzyskanymi w trakcie pomiaru kontrolnego.

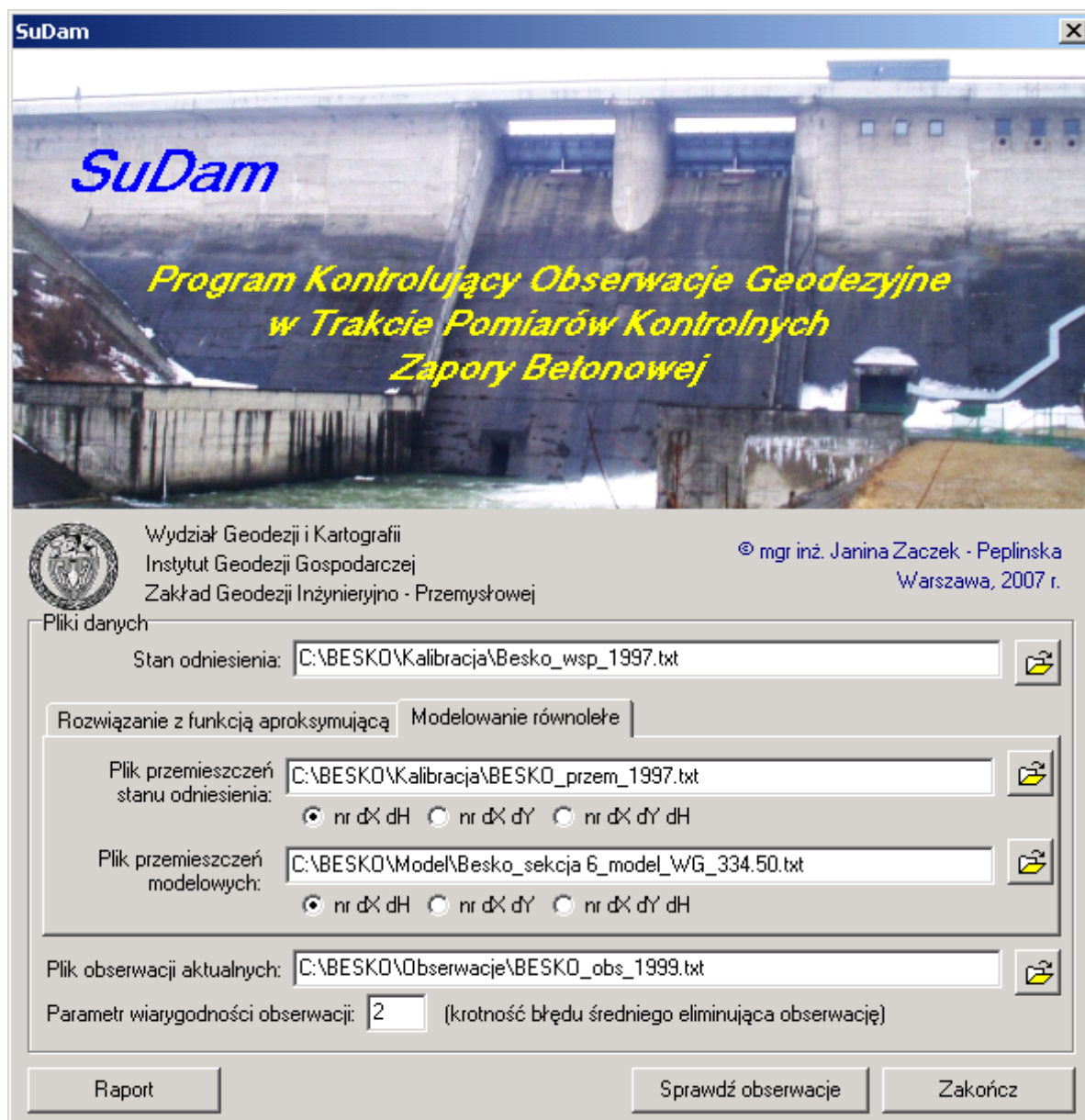
### 5.6.3 Tryby pracy programu SuDam

Rozwiązanie z funkcją aproksymującą (Rys. 60) - oznacza, że dla każdego z punktów sieci zostały dobrane funkcje opisujące zależność wartości przemieszczenia od poziomu wody górnej. Przemieszczenia – zarówno w stanie odniesienia jak i aktualne uzyskiwane są przez obliczenie ich wartości z funkcji na podstawie podanych poziomów wody górnej.

Modelowanie równoległe (Rys. 61) - to tryb w którym podawane są bezpośrednie wartości przemieszczeń punktów sieci – zarówno dla stanu odniesienia jak i dla stanu aktualnego. Określenie „modelowanie równoległe” oznacza, że wartości dla stanu aktualnego powinny zostać obliczone w momencie pomiaru – na podstawie właśnie pomierzonego stanu wody górnej. Idealnym rozwiązaniem byłoby przesłanie aktualnego poziomu wody górnej do centrum obliczeniowego i uzyskanie obliczonych, modelowych wartości przemieszczeń.



Rys. 60 Okno programu SuDam – wybrana zakładka „Rozwiązanie z funkcją aproksymującą”.



Rys. 61 Okno programu SuDam – wybrana zakładka „Modelowanie równoległe”.


#### 5.6.4 Parametry programu SuDam

Parametrami programu są pliki opisujące stan odniesienia zapory (współrzędne punktów), plik obserwacji oraz w zależności od trybu pracy – wartości poziomu wody górnej dla stanu odniesienia i aktualnego oraz plik parametrów funkcji modelującej dla każdego z punktów bądź pliki przemieszczeń dla stanu odniesienia i aktualnego.



Dodatkowym parametrem jest „Parametr wiarygodności obserwacji”  $n$ . Parametr ten jest używany do oznaczania obserwacji dla których różnica pomiędzy wartością pomierzoną a obliczoną z modelu jest większa niż  $n$ -krotność błędu średniego obserwacji.

Niezależnie od listy obserwacji plik współrzędnych stanu odniesienia oraz pliki opisujące model zmian położenia punktów geodezyjnych na zaporze mogą zawierać dane wszystkich lub wybranych punktów. Plik opisujący przemieszczenia stanu odniesienia może zawierać tylko dane dla punktów rzeczywiście przemieszczonych.

Nazwy plików należy wpisać w odpowiednie pola okna głównego programu. We właściwe pola należy wpisać też wartości poziomów wody górnej dla stanu odniesienia i aktualnego oraz wartość parametru wiarygodności. Pliki dyskowe można wskazać naciskając na przycisk  umieszczony przy każdym z pól nazw plików lub dwuklikając pole nazwy pliku.

#### 5.5.5 Formaty plików parametrów

Każdy z plików czytanych przez program może zawierać trzy rodzaje linii:

- linie komentarza – całkowicie pomijane przez program – rozpoczynają się znakiem „\*” w pierwszym znaku linii
- linie opisu – przepisywane przez program do raportu – rozpoczynają się ciągiem znaków „REM”
- linie danych – wszystkie pozostałe linie.

Linie puste są traktowane jak linie komentarza.

Linie danych składają się z pól rozdzielonych separatorami którymi są pojedyncze znaki odstępu (spacja) lub tabulacji albo dowolne ich kombinacje. Jeżeli linia danych zawiera znaki separatora na początku lub końcu to znaki te są pomijane.

#### Pliki stanu odniesienia – plik współrzędnych

Kolejność pól: numer punktu, współrzędna X, współrzędna Y

Fragment przykładowego pliku:

```
* BESKO
* WYKAZ WSPÓŁRZĘDNYCH SIECI KATOWO-LINIOWEJ 1997
* WG=332,20
* NR          X          Y
*
```

1	199.09	360.99
2	236.28	406.27
3	157.60	495.76

### Pliki stanu odniesienia – plik wyznaczonych przemieszczeń

Kolejność pól: numer punktu, przemieszczenie w kierunku X, przemieszczenie w kierunku H.

Fragment przykładowego pliku:

```
* WYZNACZONE PRZEMIESZCZENIA KWI-1991
* WG=332,20
*
* Nr      dX [m]    dH [m]
66       0,0011    0
69       0,0024    0
069      0,0024    0
```

### Plik parametrów funkcji modelującej

Funkcja modelująca ma postać:

$$f(WG) = \frac{a}{WG^2} + \frac{b}{WG} + c + d \cdot WG + e \cdot WG^2 + g \cdot WG^3,$$

do pliku dla każdego punktu zapisywane są wartości a, b, c, d, e i g. Jeżeli wartości d, e i g będą zerowe, to funkcja będzie miała charakter hiperboli, jeżeli a i b będą zerowe – paraboli.

Kolejność pól w pliku: numer punktu, wartość współczynnika a, wartość współczynnika b, wartość współczynnika c, wartość współczynnika d, wartość współczynnika e, wartość współczynnika g.

Fragment przykładowego pliku parametrów opisującego hiperbole:

```
* BESKO SEKCJA 6
* przemieszczenia poziome w kierunku X (dX)
* funkcja aproksymująca a/x^2 + b/x + c + dx + ex^2 + gx^3 : HIPERBOLA
*
* WG [m]    dx [m]
*
*NR      a                b                c                d    e    g
66  105262,909759402000  -665,182827721062  1,051498900378  0  0  0
69  258919,412189720000  -1615,111179578980  2,518939291455  0  0  0
069  247470,525116175000  -1544,427638122350  2,409893451640  0  0  0
```

Fragment przykładowego pliku parametrów opisującego parabolę:

```
* BESKO SEKCJA 6
* przemieszczenia poziome w kierunku X (dX)
```

```

* funkcja aproksymująca  $a/x^2 + b/x + c + dx + ex^2 + gx^3$  : PARABOLA
*
* WG [m]    dx [m]
*
*NR   a  b    c                d                e                g
66   0  0  -9,0321074719    0,0842818253    -0,0002626380    0,0000002733
69   0  0  -21,4679849486    0,2010542626    -0,0006282390    0,0000006549
069  0  0  -20,2909610728    0,1900750677    -0,0005940911    0,0000006195

```

Plik obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń (wynik modelowania równoległego):

Kolejność pól: numer punktu, przemieszczenie X, przemieszczenie H.

Fragment przykładowego pliku obliczonych przemieszczeń:

```

* BESKO modelowanie równoległe dX, dH
* WG = 323,42
*
*NR   dX [m]                dH [m]
66   0,0010978            0,0005746
69   0,0003576            0,0003918
069  0,0004112            0,0002881

```

Plik obserwacji

Obserwacje zakodowane są przy pomocy kodu „clp”.

Kolejność pól:

- C – punkt centralny obserwacji kątowej lub początkowy obserwacji liniowej lub kierunku
- L – punkt lewy obserwacji kątowej lub końcowy obserwacji liniowej lub kierunku
- P – punkt prawy obserwacji kątowej lub kod obserwacji („0” – długość , „-3” – kierunek).
- Wartość pomierzona (w gradach lub metrach)
- Błąd pomiaru (w cc lub milimetrach)

Fragment przykładowego pliku obserwacji:

```

* BESKO OBSERWACJE KWIE-1991
*
*c   L   P   obs   m
1    8   -3   0.00000  1.5
1    3   -3  28.77523  1.5
1    9   -3  29.27148  1.5
1   19   -3  44.66041  2.1
1   29   -3  47.03667  2.1

```

### 5.6.5 Raport z pracy programu - wyniki

W czasie działania programu tworzony jest raport zawierający informacje o wczytanych plikach oraz wyniki działania programu. Raport (Rys. 62) jest podzielony na 4 sekcje, każda z nich zawiera informacje dotyczące poszczególnych etapów pracy programu.

Sekcja 1 raportu – zawiera informacje o trybie (wybranej zakładce) i parametrach programu:

```
Rozwiązanie z funkcją aproksymująca

Stan odniesienia z pliku:
C:\BESKO\Kalibracja\Besko_wsp_1997.txt
Poziom wody górnej stanu odniesienia: 332.75
Poziom wody górnej stanu aktualnego: 334.50

Plik parametrów funkcji:
C:\BESKO\Model\BESKO_sekcja_6_parabola.txt
Format pliku: dx

Plik obserwacji aktualnych:
C:\BESKO\Obserwacje\BESKO_obs_1999.txt
Parametr wiarygodności obserwacji: 2
```

Sekcja 2 raportu – zawiera informację o poprawności i ilości wczytanych punktów sieci oraz ilości zdefiniowanych funkcji opisujących przemieszczania punktów kontrolowanych. Jeśli wystąpiły błędy w czytaniu danych z pliku to w tej sekcji raportu zostaną one zasygnalizowane.

```
C:\BESKO\Kalibracja\Besko_wsp_1997.txt
Wczytano punktów: 45
C:\BESKO\Model\BESKO_sekcja_6_parabola.txt
Wczytano funkcji: 12
C:\BESKO\Obserwacje\BESKO_obs_1999.txt
```

Sekcja 3 raportu – zawiera zestawienie współrzędnych punktów oraz ich przemieszczeń i współrzędnych X wyliczonych dla zbiornika suchego oraz dla aktualnego (podanego, stan zbiornika w momencie pomiaru geodezyjnego) poziomu wody górnej.

```
Lista punktów

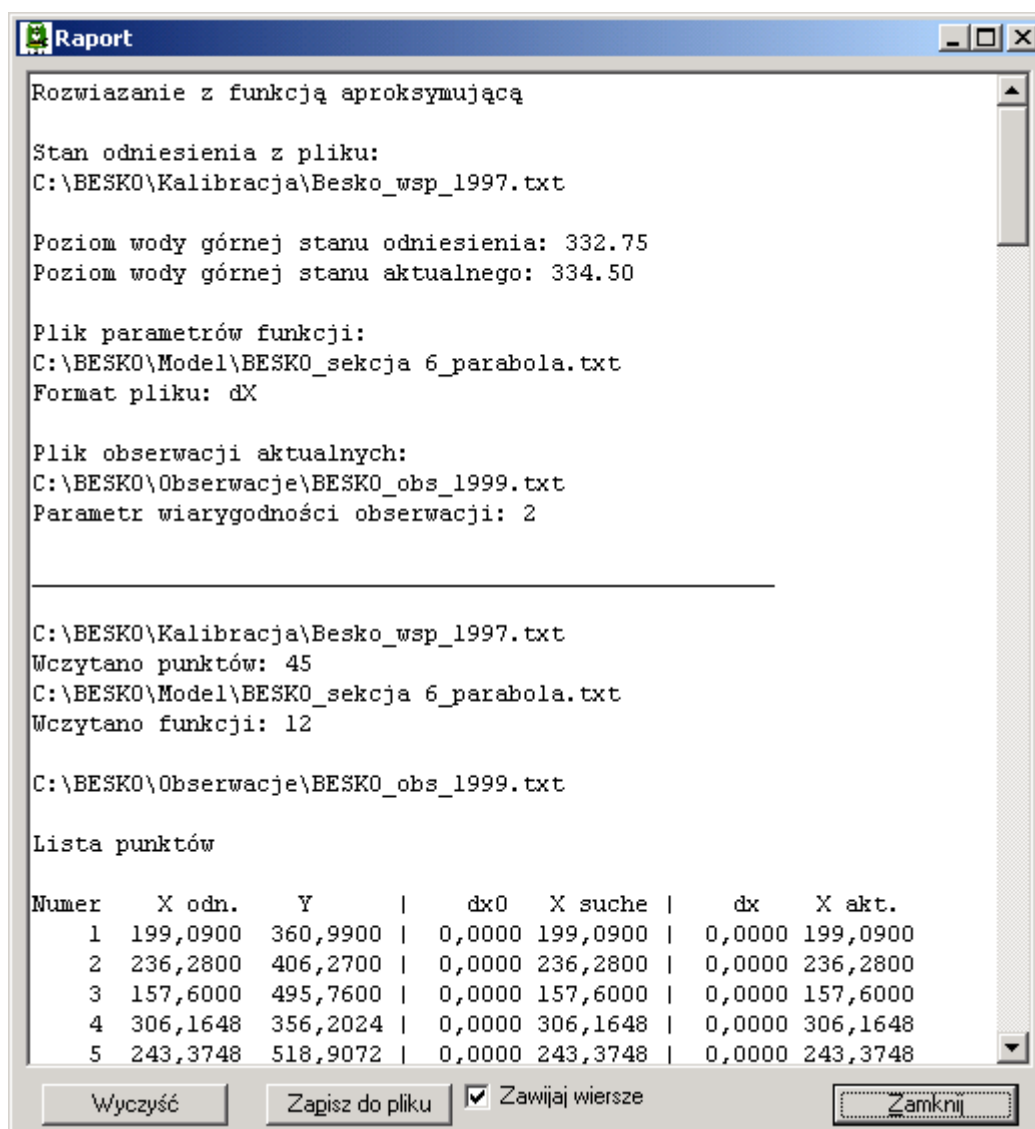
Numer      X odn.      Y      |      dx0      X suche      |      dx      X akt.
1      199,0900    360,9900 |      0,0000    199,0900      |      0,0000    199,0900
2      236,2800    406,2700 |      0,0000    236,2800      |      0,0000    236,2800
3      157,6000    495,7600 |      0,0000    157,6000      |      0,0000    157,6000
4      306,1648    356,2024 |      0,0000    306,1648      |      0,0000    306,1648
5      243,3748    518,9072 |      0,0000    243,3748      |      0,0000    243,3748
6      358,1806    393,4528 |      0,0000    358,1806      |      0,0000    358,1806
7      364,9200    512,8000 |      0,0000    364,9200      |      0,0000    364,9200
8      245,6400    662,1700 |      0,0000    245,6400      |      0,0000    245,6400
9      112,0400    636,1000 |      0,0000    112,0400      |      0,0000    112,0400
66     115,7968    453,3773 |     -0,0031    115,7937      |      0,0036    115,7973
069    108,9965    453,1031 |     -0,0035    108,9930      |      0,0044    108,9975
```

69	106,0246	453,1024		-0,0035	106,0211		0,0045	106,0256
----	----------	----------	--	---------	----------	--	--------	----------

Sekcja 4 – zawiera informacje o poszczególnych obserwacjach oraz wyniki porównania ich z obserwacjami obliczonymi na podstawie danych modelowych. „Bł. max.” to wielokrotność błędu pomiaru, zależna od podanego parametru wiarygodności – wielkości te są wielkościami na podstawie których obserwacje są kontrolowane.

W ostatniej kolumnie znak ”\*\*\*” oznacza, że stosunek różnicy wartości pomiaru do błędu pomiaru przekracza podaną wartość graniczną  $n$  (parametr wiarygodności) \* błąd pomiaru.

Lista obserwacji									
Rodzaj	C	L	P	Pomiar	Wart. obl.	Różn.	(Bł.max.)	Błąd pom.	n
Kier. poziomy		1	8	0,00000	0,00000	0,0000	(0,0003)	0,0001	0,0
Kier. poziomy		1	69	60,12146	60,08958	-0,0319	(0,0004)	0,0002	177,1 ***
Kier. poziomy		1	4	306,92306	306,91763	-0,0054	(0,0003)	0,0001	36,2 ***
Kier. poziomy		1	7	356,95408	356,95416	0,0001	(0,0003)	0,0001	0,6
Kier. poziomy		1	5	392,35926	392,35658	-0,0027	(0,0003)	0,0001	17,9 ***
Kier. poziomy		1	3	28,77546	28,77494	-0,0005	(0,0003)	0,0001	3,5 ***
Kier. poziomy		1	9	29,27150	29,27156	0,0001	(0,0003)	0,0001	0,4
Kier. poziomy		4	8	0,00000	0,00000	0,0000	(0,0003)	0,0001	0,0
[...]									
Długość		1	8	304,75390	304,75612	0,0022	(0,0006)	0,0003	7,4 ***
Długość		7	1	224,82250	224,82408	0,0016	(0,0004)	0,0002	7,9 ***
Długość		5	1	163,99100	164,00910	0,0181	(0,0004)	0,0002	90,5 ***
Długość		1	3	141,00760	141,01196	0,0044	(0,0004)	0,0002	21,8 ***
Długość		9	1	288,54350	288,55366	0,0102	(0,0006)	0,0003	33,9 ***
Długość		4	1	107,16990	107,18178	0,0119	(0,0004)	0,0002	59,4 ***
Długość		4	6	63,98780	63,97840	-0,0094	(0,0004)	0,0002	47,0 ***
Długość		4	3	203,81450	203,83283	0,0183	(0,0004)	0,0002	91,7 ***
[...]									



Rys. 62 Okno programu SuDam – raport z pracy programu.

## **6 SYNTETYCZNE UJĘCIE ETAPÓW MODERNIZACJI SIECI KONTROLNEJ**

Niezależnie od rodzaju i zakresu modernizacji sieci kontrolnej (opisanych w rozdziale 2 tej pracy) każdy projekt składa się z przedstawionych niżej etapów.

ZLECENIE: MODERNIZACJA SIECI KONTROLNEJ

RODZAJ MODERNIZACJI: planowa / interwencyjna / otwarta

ZAKRES: określony przez zleceniodawcę

### *A. Prace wstępne – wywiad i określenie zakresu modernizacji*

1. Weryfikacja zakresu modernizacji, w zależności od stanu technicznego sieci i potrzeb interpretacyjnych związanych z wykonywaniem prawidłowych ocen bezpieczeństwa i stanu technicznego obiektu.
2. Weryfikacja zakresu modernizacji pod kątem możliwości technicznych – różnych w zależności od przewidzianych do wykonania prac na obiekcie w trakcie jego remontu lub przebudowy. Możliwości techniczne są mocno ograniczone w przypadku modernizacji sieci nie związanej z pracami na obiekcie. Tylko modernizacja planowa daje możliwość wykonania wszystkich postulowanych prac.
3. Weryfikacja zakresu modernizacji w zależności od środków finansowych przewidzianych na ten cel.

### *B. Prace związane z modelowaniem numerycznym pracy konstrukcji*

1. Analiza wyników pomiarów archiwalnych, także pod kątem wykorzystania ich do kalibracji modelu numerycznego.
2. Modelowanie pracy konstrukcji oraz zmian otoczenia obiektu (podłoża gruntowego):
  - a). przygotowanie modelu numerycznego pracy zapory,
  - b). przygotowanie wariantów obliczeń dla różnych wartości parametrów zmiennych (tj. poziom zwierciadła wody górnej (ZWG), wskazania piezometrów, wielkości filtracji, parametrów materiałowych).
3. Stworzenie Bazy Wiedzy o przemieszczeniach punktów kontrolowanych obiektu.

*C. Analiza potrzeby i sposobu unowocześnienia  
stosowanych dotychczas technologii pomiarowych*

1. Analiza celowości zmiany/rozszerzenia technologii pomiarowych.
2. Wybór technologii, które miałyby uzupełnić dotychczas wykonywane pomiary (z analizy a). materiałów archiwalnych, b). obecnej sytuacji na obiektach hydrotechnicznych wykonanej na potrzeby realizacji tej pracy wynika brak potrzeby całkowitych zmian technologicznych w zakresie pomiarów punktów kontrolowanych na obiektach hydrotechnicznych w Polsce, rozważana, inna od dotychczas stosowanej, technologia mogłaby pełnić rolę uzupełniającą np. pomiary GPS na wybranych punktach korony zbiornika).
3. Opracowanie sposobu wprowadzenia nowej technologii do pomiaru sieci modernizowanej (np. pomiarów odległości do sieci pełnej, pomiarów GPS – czyli przeprojektowanie sieci do postaci sieci hybrydowej).

*D. Prace nad projektem zmian struktury sieci*

1. Analiza lokalizacji punktów i obserwacji w sieci odniesienia, ewentualnie sformułowanie postulatów modernizacyjnych – dołączenie punktów i/lub obserwacji, zmiana geometrii, przebudowa punktów (zmiany w sposobie stabilizacji).
2. Analiza lokalizacji punktów kontrolowanych na obiekcie:
  - a). opracowanie wyników modelowania numerycznego,
  - b). konsultacje z interpretatorem zarejestrowanych zmian konstrukcji oraz specjalistą z zakresu hydrotechniki,
  - c). Wskazanie dodatkowych lokalizacji punktów kontrolowanych i sposobu stabilizacji znaków.
3. Analiza lokalizacji filarów obserwacyjnych – czy po dokonaniu uzupełnienia sieci punktów kontrolowanych nie potrzeba zmian w układzie stanowisk (np. stabilizacji dodatkowego stanowiska i powiązania go z siecią punktów odniesienia).

*E. Analiza sposobu wykonywania obliczeń i celowości  
wprowadzenia dodatkowych kontroli pomiaru*

1. Analiza dotychczas wykonanych opracowań pomiaru okresowego.



2. Analiza celowości wprowadzenia zmian w sposobie opracowania wyników pomiaru
3. Analiza celowości wprowadzenia dodatkowych kontroli pomiaru.
4. Opracowanie dodatkowych kontroli (np. opracowanie danych dla terenowej kontroli niewyrównanych obserwacji ).

OPIS PROJEKTU MODERNIZACJI SIECI KONTROLNEJ (dokument końcowy)

## 7 PROJEKT MODERNIZACJI SIECI KONTROLNEJ ZAPORY BESKO

### 7.1 Opis obiektu

#### 7.1.1 Zapora betonowa

Obiektem hydrotechnicznym, dla którego wykonano projekt modernizacji poziomej sieci kontrolnej jest zapora betonowa typu ciężkiego w Sieniawie koło Beska usytuowana na 172,8 km rzeki Wisłok, w powiecie Sanok, województwo Podkarpackie (Rys. 63, Rys. 64 a,b). Zapora została oddana do eksploatacji w 1978 roku. Pierwotnie zapora miała być usytuowana około 2 km poniżej obecnej lokalizacji – bliżej miejscowości Besko. Z powodu złych warunków geologicznych plany uległy zmianie – stąd też obiekt ten jest znany jako Zapora Wodna "Besko".



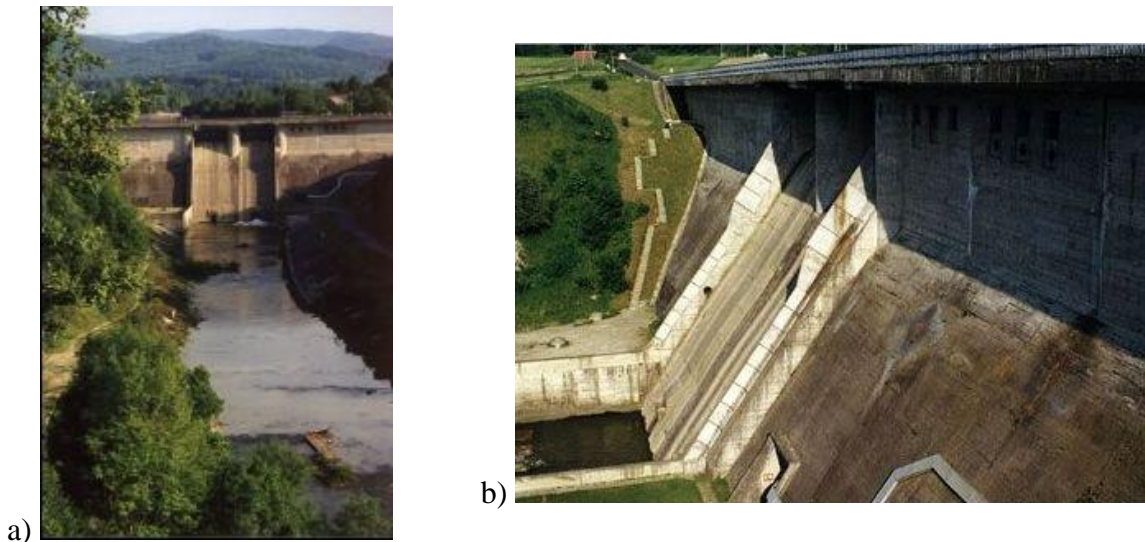
Rys. 63 Lokalizacja zapory Besko.

Rzędna w koronie zapory wynosi 337,45 m npm. Zapora składa się z 12 sekcji głuchych o szerokości 12 m oraz dwu sekcji przelewowych o szerokości 15 m. Na rysunku (0) przedstawiony jest widok do strony wody dolnej z zaznaczonymi numerami sekcji.

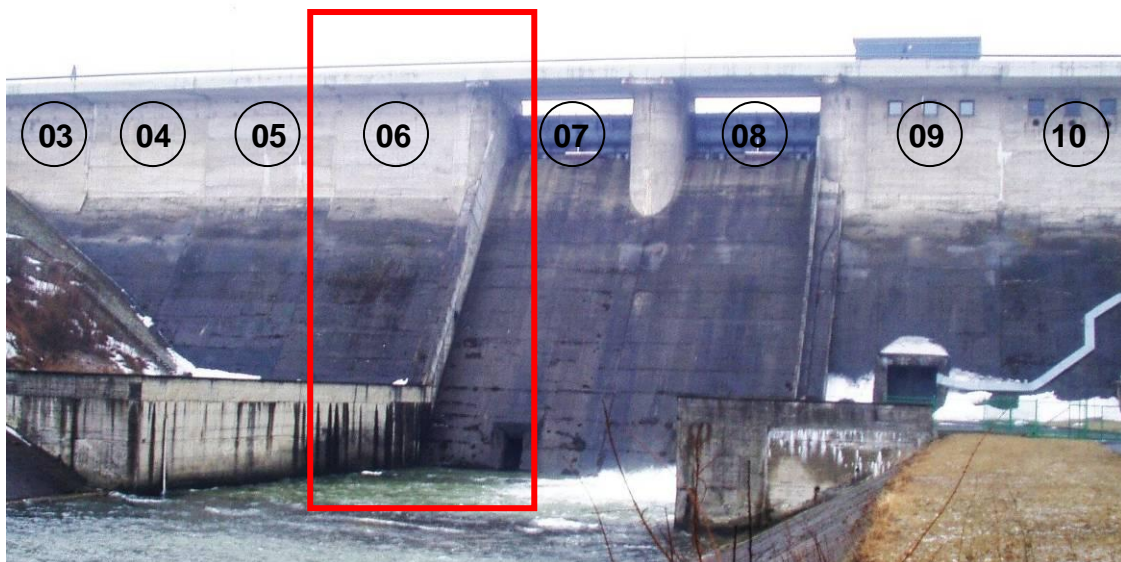
Maksymalna wysokość sekcji wynosi 38,2 m, zaś maksymalna wysokość zbiornika w rejonie sekcji przelewowych: 29 m. Sezonowe wahania poziomu wody wynoszą 3 do 5 m, maksymalnie 12,3 m. Część przelewowa obejmuje dwa przelewy powierzchniowe i dwa

spusty denne o łącznym, maksymalnym wydatku  $442 \text{ m}^3/\text{s}$ . W podłożu zapory, od strony wody górnej wykonana jest przeciwfiltacyjna przesłona cementacyjna, znajdujący się za nią drenaż oraz układ piezometrów zamkniętych. W rejonie zapory znajduje się również układ piezometrów otwartych.

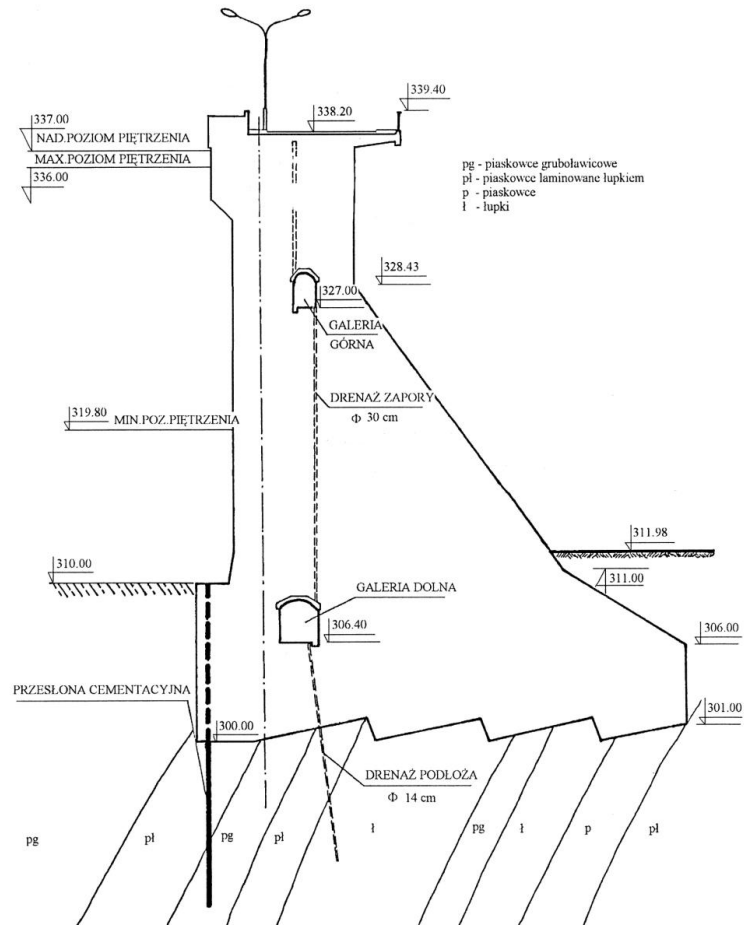
Przekrój porzeczný przez sekcję 6, dla której wykonano modele MES pracy zapory przedstawia rysunek (Rys. 66).



Rys. 64 Zapora Besko od strony wody dolnej (odpowietrznej) [fot. OTKZ].



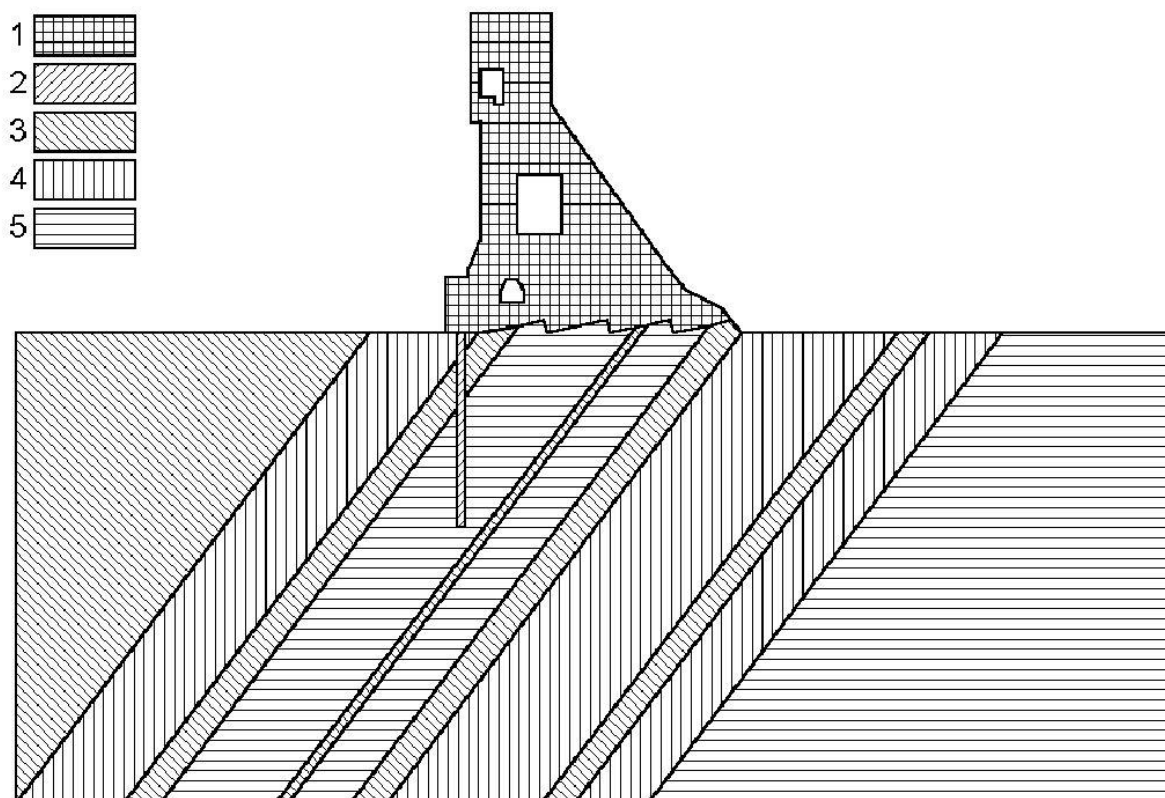
Rys. 65 Widok zapory Besko od strony wody dolnej (strony odpowiedznej), z zaznaczonymi numerami sekcji, dla sekcji 6 wykonano modele numeryczne pracy zapory [fot. autorka].



Rys. 66 Przekrój poprzeczny przez sekcję 6 zapory Besko

### 7.1.2 Podłoże

W rejonie zapory Besko występują utwory fliszowe. Podłoże zbudowane jest z kompleksów skalnych różniących się zawartością łupków i piaskowców. Na podstawie badań geologicznych przeprowadzonych w okresie projektowania obiektu wydzielono cztery kompleksy skalne: piaskowce gruboławicowe (Pg), piaskowce (P), piaskowce-łupki (Pł) i łupki (Ł). Poszczególne warstwy układają się prawie równolegle do osi zapory i zapadają pod zbiornik pod kątem 48° do 70° do pionu (w dnie doliny pod kątem ok. 50°) [M2], [M10]. Przekrój przez sekcję zapory wraz z podłożem przedstawia rysunek (Rys. 67).



Rys. 67 Przekrój przez sekcję 8 zapory wraz z podłożem.

1- korpus zapory, 2- przesłona, 3- piaskowce gruboławicowe, 4. piaskowce-łupki 5- łupki wg. [M2].

### 7.1.3 Pomiary kontrolne zapory

W ramach pomiarów kontrolnych dla zapory Besko są wykonywane:

- całodobowe pomiary temperatury powietrza w otoczeniu zapory,
- cotygodniowe pomiary temperatur w galeriach,
- pomiary przemieszczeń pionowych reperów zastabilizowanych na koronie, po stronie odpowietrznej i w galerii dolnej zapory,
- pomiary przemieszczeń celowników trygonometrycznych zlokalizowanych w górnych i dolnych partiach strony odpowietrznej zapory,
- pomiary punktów stałej prostej na koronie zapory,
- pomiary przemieszczeń względnych (szczelinomierze, pochyłomierze i wahadła),
- pomiary ciśnień w piezometrach,
- pomiary stanu wody w zbiorniku (ZWG),
- pomiary stanu wody dolnej.

#### 7.1.4 Parametry materiałowe

Zestawienie wartości liczbowych parametrów charakteryzujących zaporę i podłoże przytoczono w tabeli (Tabela 6). Przyjęto następujące oznaczenia:

E – moduł Younga (sprężystości podłużnej),

$\nu$  – współczynnik Poissona,

g – ciężar objętościowy,

c – spójność,

f – kąt tarcia wewnętrzznego.

Nr	Nazwa	E [kPa]	$\nu$	g [kN/m <sup>3</sup> ]	c [kPa]	F [°]
1	Beton	24,50E+6	0,17	22,2	20000	45
2	Przesłona cementacyjna	2,00E+6	0,17	20,0	300	45
3	Piaskowce-łupki (Pł)	4,00E+6	0,35	25,0	450	40
4	Piaskowce gruboławicowe (Pg)	10,00E+6	0,30	25,0	600	50
5	Łupki (Ł)	2,50E+6	0,30	25,0	150	20

Tabela 6 Parametry materiałowe – zapora Besko, wg. [M2, M10].

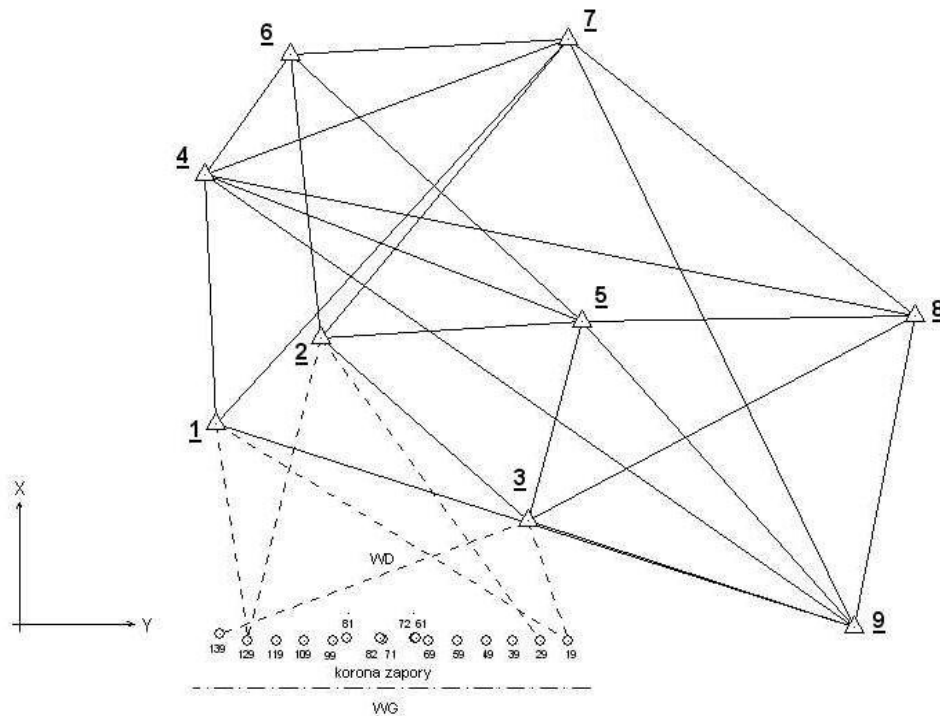
#### 7.2 Geodezyjna sieć pozioma do wyznaczania przemieszczeń

Geodezyjna sieć do badania przemieszczeń poziomych zapory Besko składa się z sieci trygonometrycznej do wyznaczania przemieszczeń punktów zlokalizowanych na ścianie odpowietrznej (od strony wody dolnej) i konstrukcji „stałej prostej”.

Sieć trygonometryczna składa się z 7 punktów odniesienia, 3 stanowisk do obserwacji 24 celowników do pomiaru kierunków i 23 bolców na lustra do pomiaru odległości. Lokalizację punktów odniesienia przedstawia rysunek (Rys. 68), rozmieszczenie celowników i bolców przedstawia rysunek (Rys. 69).

Oś OX lokalnego układu współrzędnych do wyznaczania przemieszczeń zapory jest prostopadła do osi głównej zapory – przebiegającej przez środek korony, kierunek „dodatni” osi zwrócony jest w stronę do wody dolnej (odpowietrznej) obiektu.

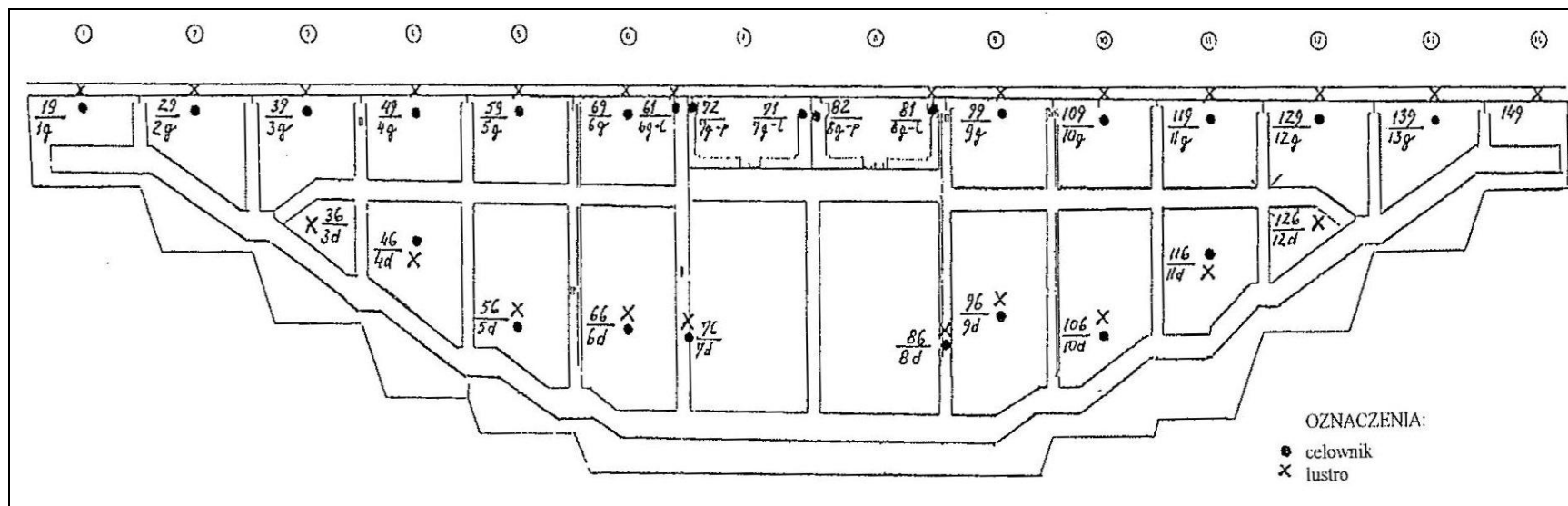
## Zapora BESKO. Szkic sieci trygonometrycznej.



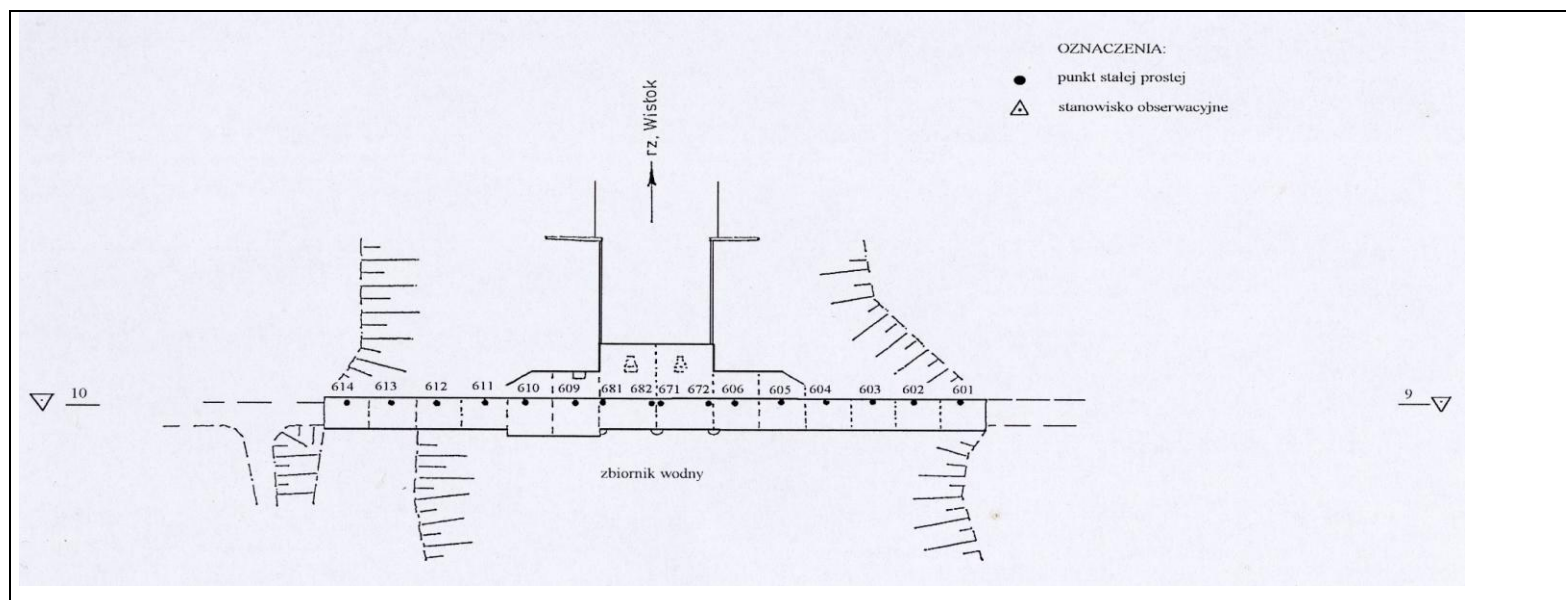
Rys. 68 Szkic sieci punktów odniesienia dla zapory Besko.

Wszystkie punkty odniesienia są zastabilizowane w formie zbrojonych słupów betonowych, wyposażonych w urządzenia do centrowania wymuszonego: metalowe główce i tuleje o stałej średnicy (wykorzystuje się kulki centrownicze o średnicy 20 mm). Słup obserwacyjny, celownik, bolec i sposób mocowania lustra na punkcie kontrolowanym na ścianie odpowietrznej przedstawiono na rysunkach w podrozdziale 2.2 tej pracy.





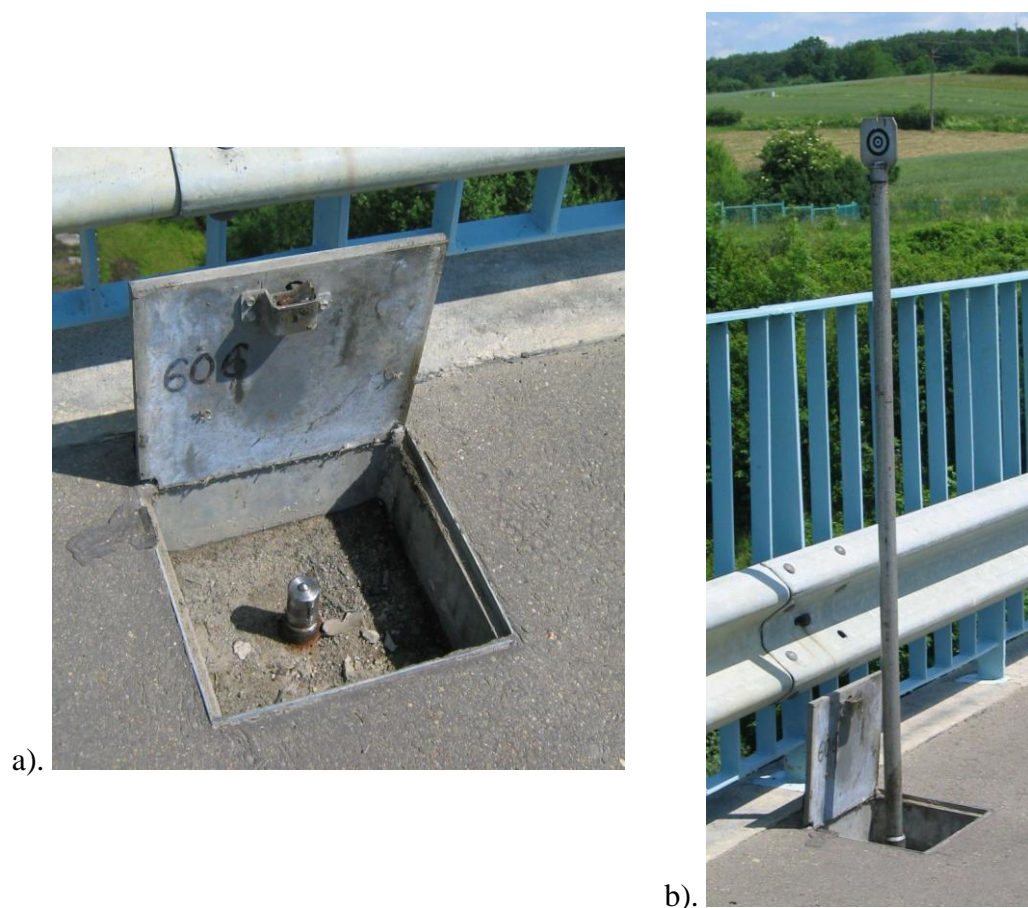
Rys. 69 Rozmieszczenie celowników i bolców na lustra na ścianie odpowietrznej zapory.



Rys. 70 Rozmieszczenie punktów „stałej prostej”.

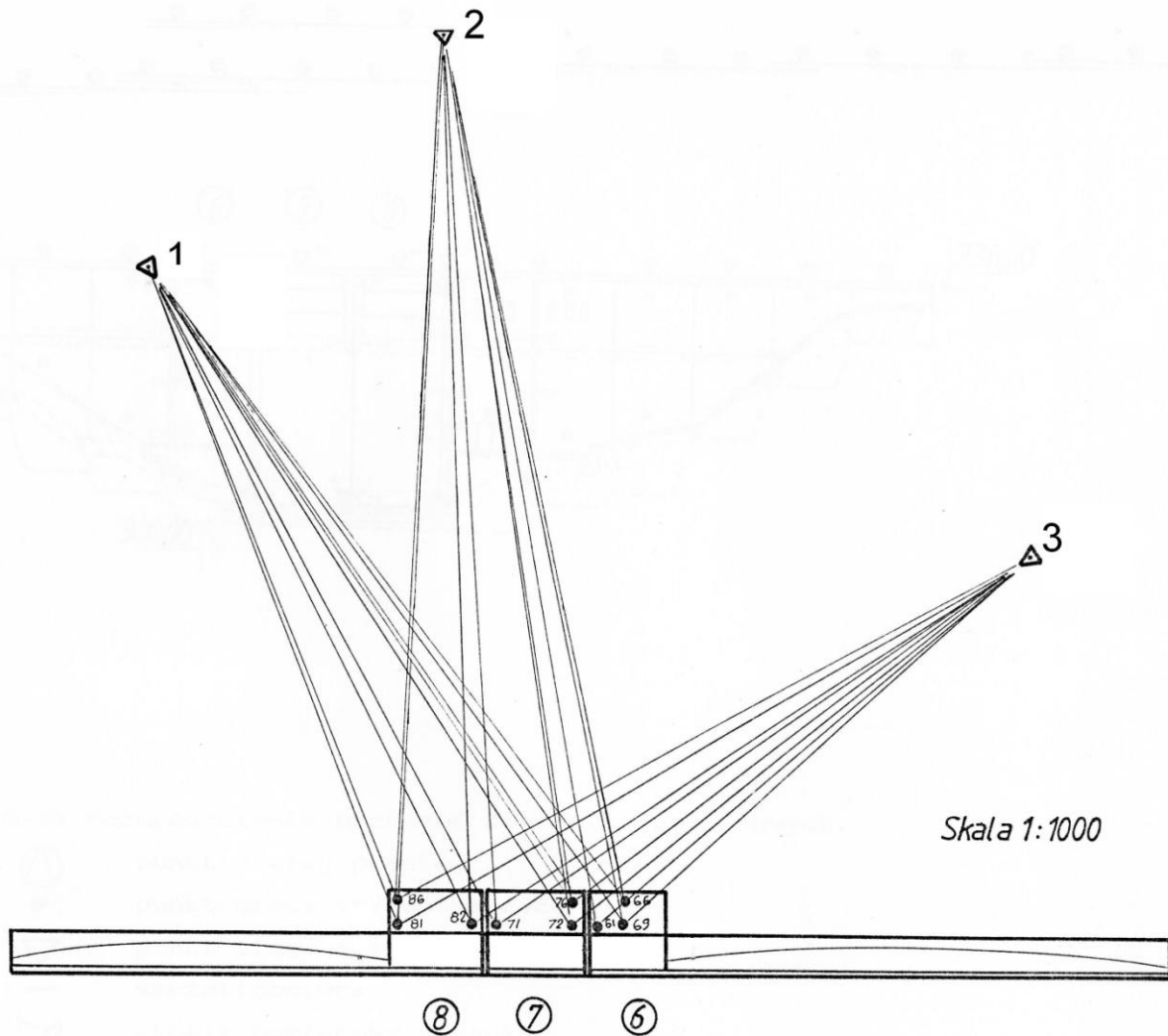


„Stała prosta” składa się z 2 stanowisk obserwacyjnych, siedmiu punktów odniesienia i 16 punktów kontrolowanych na koronie zapory. Rozmieszczenie punktów „stałej prostej” przedstawia rysunek (Rys. 70). Na rysunku (Rys. 71) przedstawiono punkt i sposób pomiaru punktów kontrolowanych. Stanowiska obserwacyjne i punkty odniesienia „stałej prostej” są jednocześnie punktami odniesienia w sieci trygonometrycznej.



Rys. 71 a). punkt „stałej prostej” na koronie zbiornika, b). nasadka z celownikiem do obserwacji punktów „stałej prostej”

Do zbadania możliwości wykorzystania modelowania numerycznego MES w procesie modernizacji sieci kontrolnej została wybrana sekcja 6 zapory, także na wynikach obserwacji celowników i lusterek zastabilizowanych w betonie tej sekcji testowano algorytmy terenowej kontroli obserwacji (program SuDam). Fragment sieci kontrolnej zapory obejmujący sekcję 6 i sąsiednie sekcje przelewowe przedstawia rysunek (Rys. 72).



Rys. 72 Fragment sieci kontrolnej zapory obejmujący sekcje 6, 7 i 8.

### 7.3 Pomiary GPS na punktach odniesienia

Wywiad terenowy i próbne pomiary GPS (Static) zostały wykonane w dn. 19-21.03.2003r. Prace te miały na celu ocenę możliwości wprowadzenia technologii pomiarów satelitarnych GPS do pomiarów sieci kontrolnej zapory Besko, tak aby pomiary GPS była technologią wspomagającą klasyczne pomiary geodezyjne. Ze względu na istniejącą zabudowę punktów oraz brak stabilnych stanowisk pomiarowych na koronie zapory zdecydowano rozważać wykonywanie pomiarów GPS tylko na punktach odniesienia (4-10) i stanowiskach obserwacyjnych (1-3) w celu kontroli ich wzajemnej stałości.

Pomiary wykonano pod kierownictwem autorki tej pracy we współpracy z zespołem dr inż. Adama Bałuta z Zakładu Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz

z zespołem mgr inż. Marka Wróblewskiego z Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW w Warszawie.

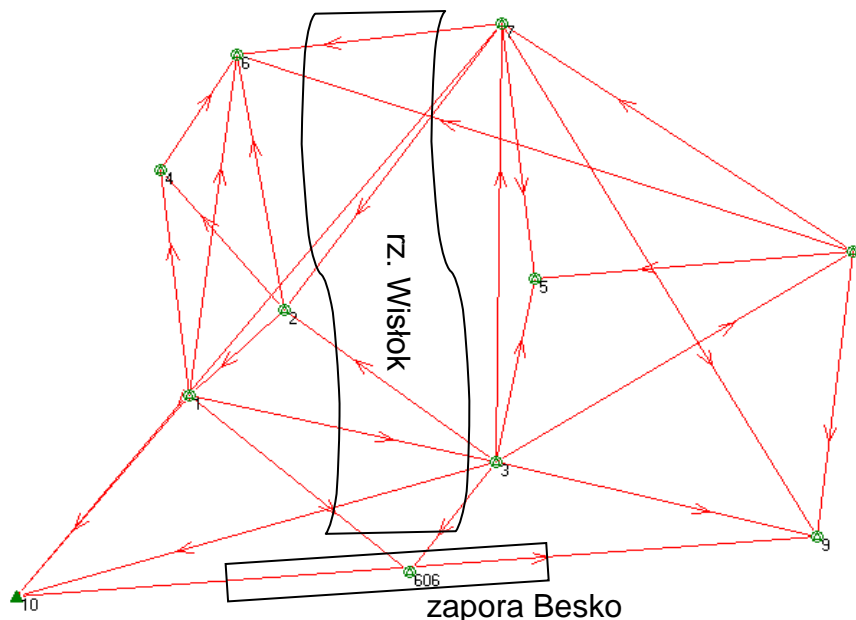
Do pomiaru użyto odbiorniki GPS Leica System 500 i anteny Leica AT 503 (PW i AGH) oraz zestawy odbiorników i anten Trimble 4800 (OTKZ).

Pomierzono 29 wektorów, o długościach: max. ok. 359 m, min. ok. 59 m, średnia ok. 188 m. Szkic pomierzonych wektorów przedstawia rysunek (Rys. 73).

Na podstawie wywiadu terenowego i wykonanych pomiarów przeprowadzono analizę utrudnień obserwacji GPS na punktach sieci odniesienia dla zapory Besko (Rys. 74), wykonano też analizę lokalizacji punktów odniesienia, pod kątem ich wykorzystywania do obserwacji GPS. Punkty podzielono na trzy grupy:

4. **punkty nieprzydatne** – nie nadające się do wykonywania obserwacji GPS, ze względu na warunki terenowe,
5. **punkty do adaptacji** – punkty na których można będzie wykonywać pomiary GPS po zlikwidowaniu źródeł zakłóceń odbioru sygnału satelitarnego GPS,
6. **punkty przydatne** – nadające się do wykonywania obserwacji GPS, bez konieczności przeprowadzania żadnych prac adaptacyjno-modernizacyjnych.

Wyniki analizy przedstawia tabela (Tabela 7).



Rys. 73 Szkic wektorów GPS pomierzonych na punktach odniesienia i stanowiskach obserwacyjnych sieci kontrolnej zapory Besko (606 – jeden z punktów „stałej prostej” na koronie zapory)

Punkt	Widok	Charakterystyka położenia	Ocena przydatności	Uwagi
1		na krawędzi skarpy, teren gęsto zadrzewiony	<b>do adaptacji</b>	po usunięciu przysłaniającej roślinności
2		na samym brzegu kanału rzeki płynącej w obudowie betonowej, rzadka roślinność, od strony zachodniej horyzont przysłonięty stromą skarpą, od strony południowej horyzont przysłonięty przez badany obiekt	<b>nieprzydatny</b>	
3		na krawędzi skarpy, teren gęsto zakrzewiony	<b>do adaptacji</b>	po usunięciu przysłaniającej roślinności
4		na krawędzi skarpy, teren gęsto zadrzewiony (wysokie drzewa)	<b>do adaptacji</b>	po usunięciu przysłaniającej roślinności (mogą być trudności z wycięciem drzew, których korzenie zabezpieczają skarpy przed osunięciem)
5		na krawędzi skarpy, teren gęsto zadrzewiony	<b>do adaptacji</b>	po usunięciu przysłaniającej roślinności
6		na samym brzegu kanału rzeki płynącej w obudowie betonowej, gęsta roślinność, od strony zachodniej horyzont przysłonięty stromą skarpą	<b>nieprzydatny</b>	
7		na górnej krawędzi skarpy, teren gęsto zadrzewiony	<b>do adaptacji</b>	po usunięciu przysłaniającej roślinności
8		w terenie odsłoniętym (na środku pola)	<b>przydatny</b>	



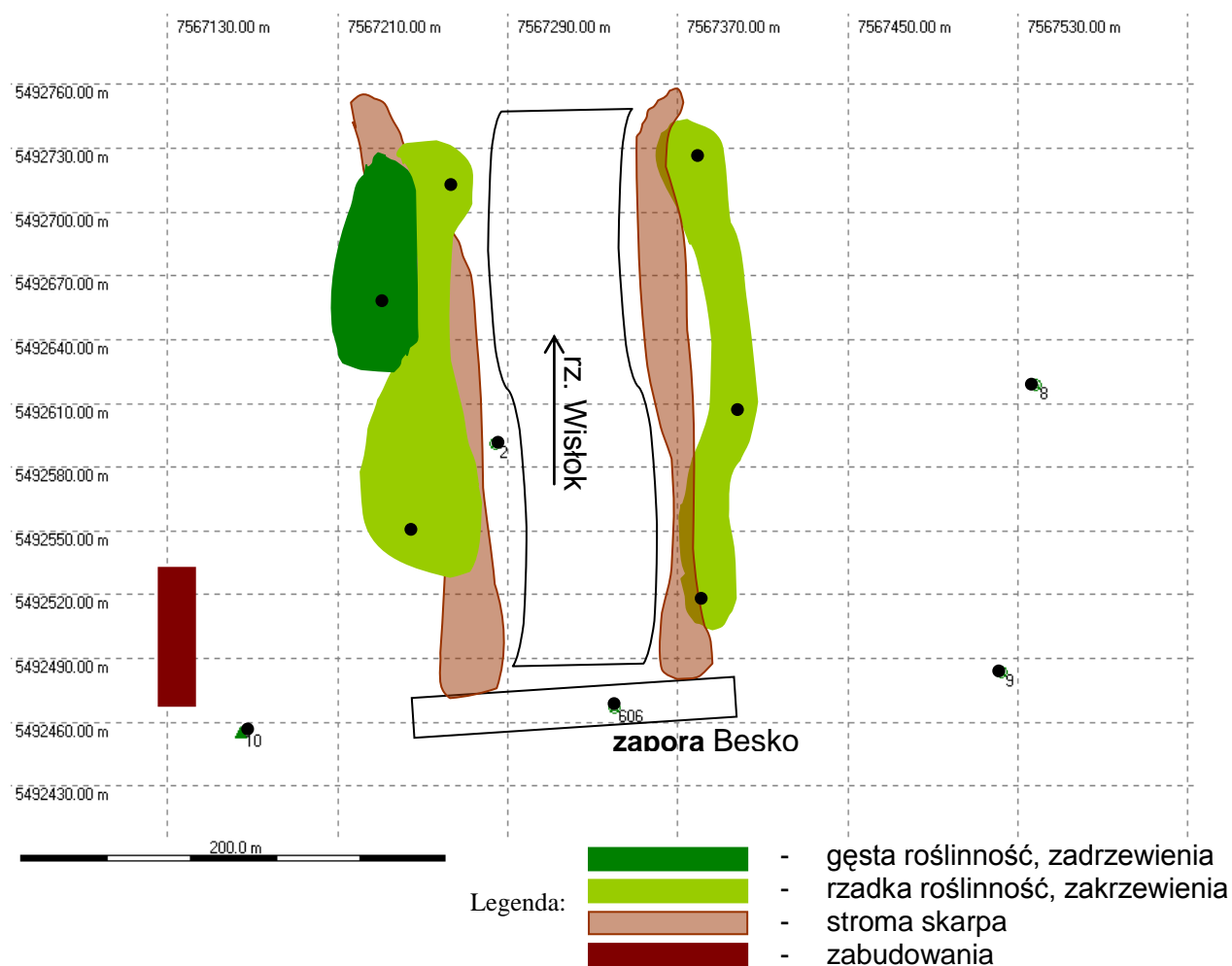
<b>9</b>		w terenie odsłoniętym (przy drodze)	<b>przydatny</b>	
<b>10</b>		w terenie odsłoniętym od strony zachodniej niewysokie zabudowania	<b>przydatny</b>	

Tabela 7 Wyniki analizy lokalizacji punktów odniesienia pod kątem przydatności do wykonywania pomiarów GPS.



Rys. 74 Szkic utrudnień terenowych w wykonywaniu pomiarów GPS na punktach odniesienia w sieci kontrolnej zapory Besko.

Zaproponowano modernizację sieci kontrolnej tak aby spełnione były następujące założenia projektowe:

1. rozbudowanie sieci punktów odniesienia, tak aby na punktach po obu stronach rzeki możliwy był prawidłowy pomiar GPS,
2. nawiązanie sieci lokalnej do sieci państwowej Polref,
3. umożliwienie pomiaru punktów na koronie obiektu metodą GPS,
4. wykorzystanie danych dodatkowych do kontroli obserwacji klasycznych.

Powyższe założenia powinny być spełnione tak aby jak najlepiej wykorzystać istniejące na obiekcie elementy sieci kontrolnej.

W tabeli (Tabela 8) przedstawiono propozycję realizacji powyższych założeń, szkic sieci uzupełnionej przedstawia rysunek (Rys. 75).

Założenia	Realizacja
1. Rozbudowanie sieci punktów odniesienia.	Uzupełnienie sieci o punkty odniesienia O11, O12, O13 – na prawym brzegu rzeki Wisłok i opcjonalnie o punkt O14 – na lewym brzegu, w celu poprawienia geometrii sieci,
	Rezygnacja z obserwacji GPS na punktach 2, 4, 6 i przeprowadzanie na nich tylko pomiarów metodami klasycznymi.
2. Nawiązanie sieci lokalnej do sieci państwowej Polref.	Wykorzystanie trzech najbliższych zlokalizowanych punktów Polref : N15, N16, N17 (Odrzechowa).
3. Umożliwienie pomiaru GPS na koronie zapory.	Lokalizacja na koronie minimum 4 punktów kontrolnych K18, K19, K20, K21.
	Wyposażenie punktów na koronie w urządzenia do centrowania wymuszonego, lub wykorzystanie istniejących punktów „stałej prostej” (możliwość pomiaru przy użyciu specjalnego adapteru przykręcanego do znaku pomiarowego projektu S. Margańskiego, wykorzystywanego do pomiarów GPS przez pracowników Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej PW [Walo i inni, 2004]).
4. Wykorzystanie wyników pomiaru na etapie kontroli obserwacji klasycznych.	Lokalizacja punktów na koronie przy styku sekcji pełnych i przelewowych pozwoli na porównanie różnic odległości między tymi punktami oraz zaobserwowanych zmian współrzędnych z wynikami modelowania numerycznego i zmianami obserwacji klasycznych.

Tabela 8 Proponowane działania mające na celu realizację założeń projektowych.

Punkty sieci Polref do nawiązania sieci kontrolnej, w zależności od ich stanu i łatwości dojazdu, należy wybrać z podanych w tabeli (Tabela 9).

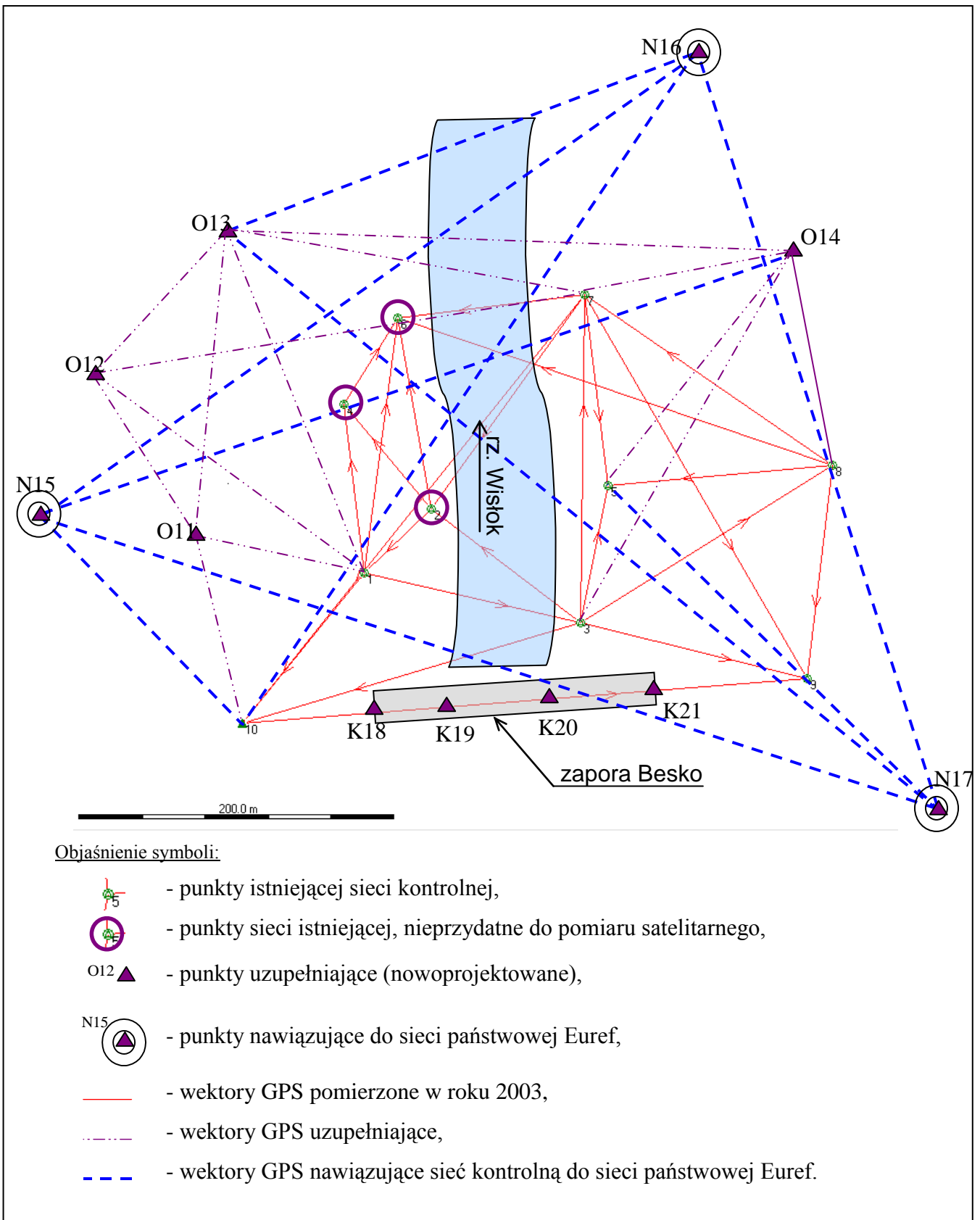
Numer punktu	Nazwa	Współrzędne (WGS 84)	
0704	TOKI	49°37'26''	21°33'43''
0705 (najbliższy)	ODRZETCHOWA	49°33'20''	21°59'16''
0703	ŻARNOWA	49°52'42''	21°51'59''
0802	SUCHA GÓRA	49°42'52''	22°19'41''
0803	ŁUPKÓW NOWY	49°15'14''	22°05'55''

Tabela 9 Punkty Polref zlokalizowane w sąsiedztwie zapory Besko.

Na koronie zapory powinny być kontrolowane sekcje przelewowe 7,8, sekcje z nimi sąsiadujące 6, 9 oraz sekcje skrajne 2 i 13. Jeżeli z powodu ograniczonego miejsca na koronie zrezygnowano by ze stabilizacji punktów specjalnie dostosowanych do pomiarów GPS, można wykorzystać punkty „stałej prostej”: 602, 606, 671, 682, 609 i 613.

Opisany projekt modernizacji został zaprezentowany na XI Konferencji Technicznej Kontroli Zapor [Prószyński, Zaczek-Peplinska, 2005] gdzie spotkał się z przychylnym przyjęciem.





Rys. 75 Proponowana modernizacja układu punktów kontrolnych zapory Besko.



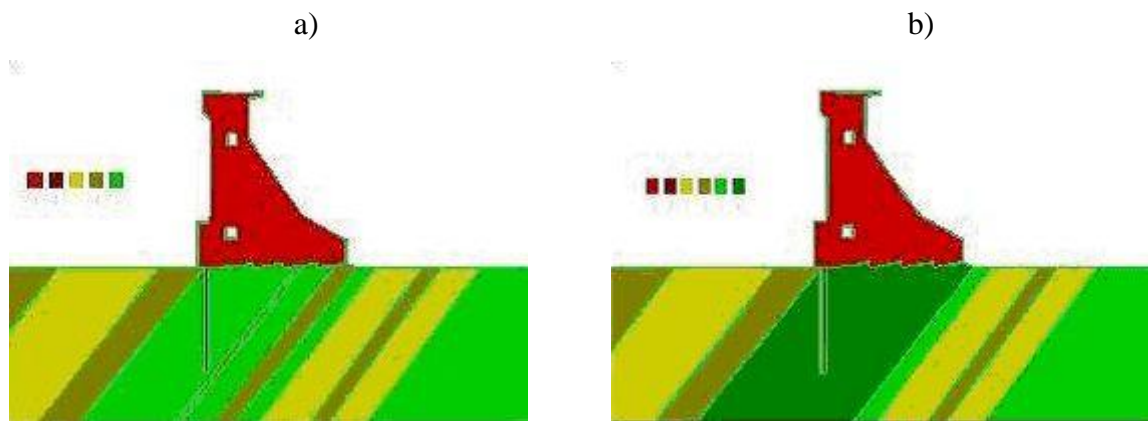
#### **7.4 Model numeryczny MES pracy sekcji 6 zapory**

Obliczenia numeryczne współpracy zapory betonowej Besko i podłoża gruntowego wykonano za pomocą metody elementów skończonych (MES). Obliczenia wykonano w płaskim stanie odkształcenia. Do symulacji pracy podłoża, przyjęto sprężysto-plastyczne modele ośrodka gruntowego bazujące na warunku plastyczności Coulomba-Mohra. Stosowano prawo płynięcia, zakładając nieściśliwość materiałów w plastycznym zakresie ich pracy (tj. kąt dylatacji równy zero). W analizie numerycznej zastosowano sześciowęzłowe trójkątne elementy izoparametryczne o funkcjach kształtu stopnia drugiego.

W modelu numerycznym wykorzystano rozpoznanie podłoża zgodnie z dokumentacją geologiczno-inżynierską omówioną w opracowaniach [M2],[M10] i cytowaną w podrozdziale 7.1 pracy. Odtworzono występujący w analizowanym przekroju układ i nachylenie poszczególnych warstw materiałów. Wartości parametrów materiałowych podłoża zaczerpnięto z wymienionych wyżej opracowań. Została wykonana analiza wstecz weryfikująca parametry materiałowe warstwy znajdującej się bezpośrednio pod stopą zapory. Na rysunku (Rys. 76) przedstawiono schematy stref materiałowych zgodnie z rozpoznaniem geologicznym oraz po przeprowadzeniu analizy wstecz. Przy przeprowadzeniu analizy wstecz wykorzystano pomiary przemieszczeń korpusu zapory przy różnych poziomach wody w zbiorniku. Jako rzędną zwierciadła wody po stronie odpowietrznej przyjęto poziom wody w otwartym piezometrze PO6d znajdującym się naprzeciwko analizowanej sekcji. Wartość obciążenia na stopę zapory obrazował rzeczywisty rozkład ciśnienia pomierzony w piezometrach zamkniętych pod stopą zapory [M9].

Założono zmianę sztywności, osłabiono i uśredniono parametry materiału bezpośrednio pod zaporą, związaną ze zmianami podłoża wynikającymi z długookresowego dociążenia gruntu samą konstrukcją, spiętrzeniem wody oraz zjawiskami filtracyjnymi.

Do wykonania modelu zapory betonowej wykorzystano przekroje przez 6 sekcję konstrukcji. Wiernie odtworzono poszczególne elementy konstrukcji takie jak uskoki na ścianie od strony wody górnej, kształt korony, „zęby” na stopie zapory oraz układ galerii kontrolno pomiarowych i wewnętrznych pomieszczeń zapory.



Rys. 76 Schematy stref materiałowych wykorzystane do modeli numerycznych zapory  
a) zgodnie z rozpoznaniem geologicznym, b) po przeprowadzeniu analizy wstecz.

Na etapie przygotowania geometrii modelu uwzględniono położenie poszczególnych celowników i reperów zainstalowanych w konstrukcji. Siatka MES została wygenerowana w taki sposób, aby każdemu z punktów sieci kontrolnej na zaporze (tj. celowników, reperów i punktów „stałej prostej”) przyporządkowany był węzeł siatki MES. Siatka składa się z 2566 węzłów i zawiera 1213 elementów. Na rys. (Rys. 78) przedstawiono szkic konstrukcji sekcji 6 zapory i odpowiedni fragment siatki MES.

#### Obliczenia wykonano w trzech etapach.

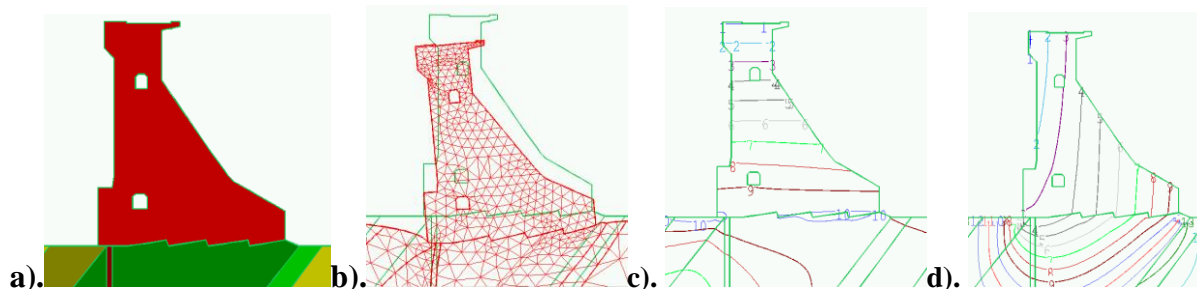
Etap I: wygenerowano w podłożu naprężenia początkowe i ciśnienia porowe wynikające z układu warstw gruntu i poziomu wody gruntowej występującej w analizowanym przekroju. Uwzględniony układ warstw i poziom wody gruntowej.

Etap II: modelowano numerycznie wykonanie konstrukcji zapory. Etap obrazował suchy zbiornik. Do modelu dołączono elementy obrazujące konstrukcję zapory. Obciążenie stanowił ciężar wykonanej konstrukcji (przyjęto  $\gamma_{\text{betonu hydrotechnicznego}} = 22,2 \text{ kN / m}^3$ ) [M2], [M10].

Wyniki obliczeń etapu II przedstawia rysunek (Rys. 77).

Etap III: modelowano przyłożenie obciążeń wynikające z napełnienia zbiornika wodą. Przyłożono obciążenia do ściany odwodnej zapory, dna zbiornika - wartości obciążeń wynikały z rzędnej napełnienia zbiornika. Przyłożono obciążenie do przesłony przeciwnfiltracyjnej oraz stopy zapory. Jako rzędną zwierciadła wody po stronie powietrznej przyjęto poziom wody w otwartym piezometrze PO6d

znajdującym się naprzeciwko analizowanej sekcji. Wartość obciążenia na stopę zapory obrazowała rzeczywisty rozkład ciśnienia pomierzony w piezometrach zamkniętych pod stopą zapory [M9].



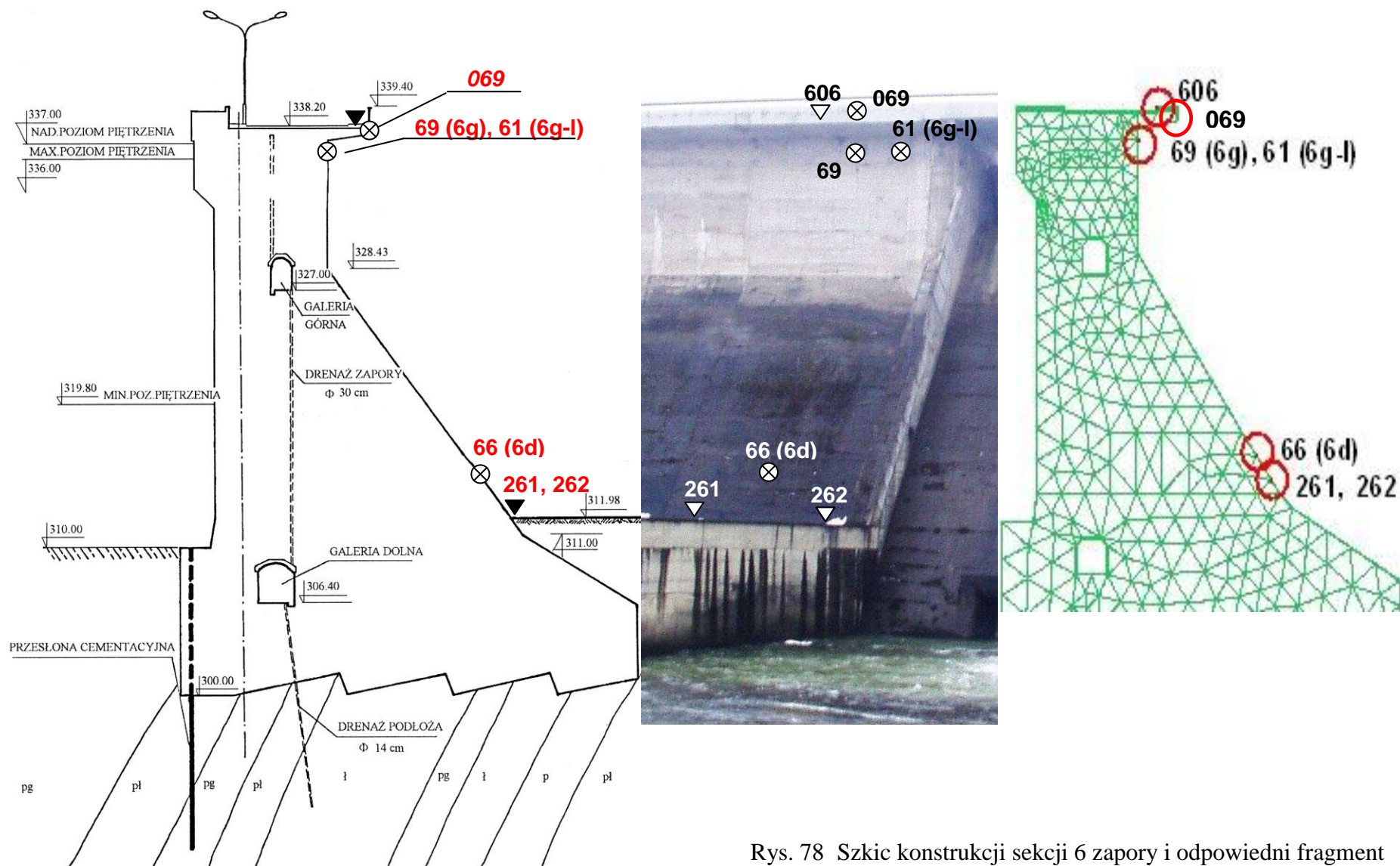
Rys. 77 Zapora Besko - model sekcji 6 (etap II.):

- a). schemat konstrukcji i warstw podłoża,  
 b). przemieszczenia od ciężaru konstrukcji (zbiornik suchy),  
 c). izolinie przemieszczeń w kierunku poziomym kreślone co 0,0001 m,  
 d). izolinie przemieszczeń w kierunku pionowym kreślone co 0,0001 m.

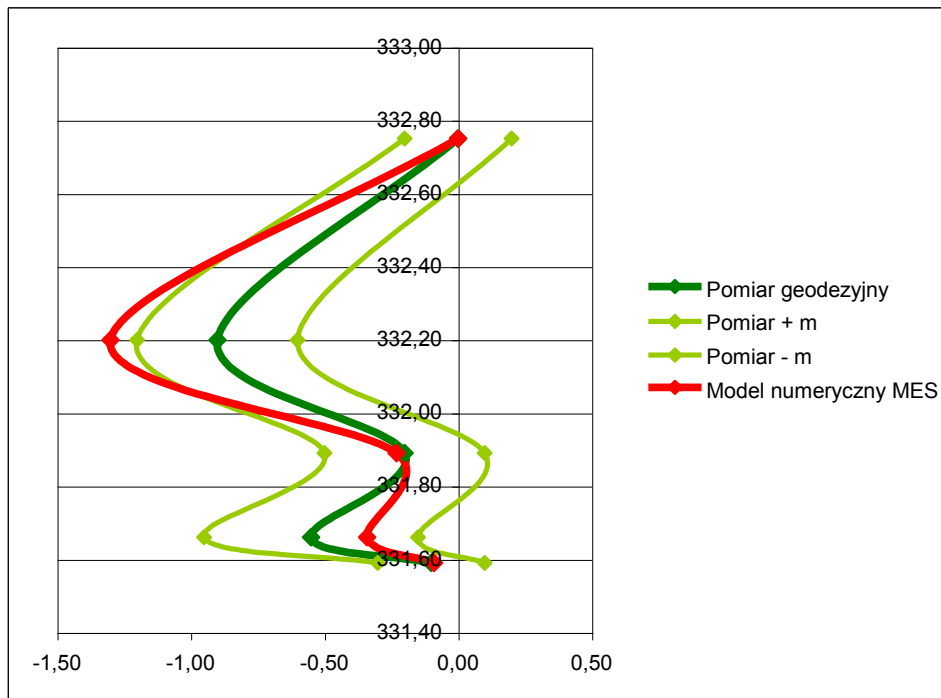
W analogiczny sposób wykonano obliczenia dla różnych poziomów wody w zbiorniku. Sprawdzono zgodność przemieszczeń węzłów – celowników uzyskanych „z modelu” z przemieszczeniami wyznaczonymi na podstawie pomiarów kontrolnych. Otrzymane wyniki przedstawiają (Tabela 10) i rysunki (Rys. 79),(Rys. 80) - uznano je za bardzo dobre - zgodne w sposób pełny (75 %) przy n-krotnym błędzie średnim m pomiaru geodezyjnego, dla n=1). Wskazują one na możliwość wykorzystania modelowania MES w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej.

Data	ZWG [m npm]		dX 69 [mm]	dX 66 [mm]	Średni błąd wyznaczenia m [mm]	
04-1991	332,20	Model	-1,3	-0,27	0,30	
		Pomiar	-0,90	-0,30		
03-1996	331,66	Model	-0,34	-0,10	0,40	
		Pomiar	-0,55	+0,80		
03-1997	332,75	Pomiar kalibrujący				0,20
			0,00	0,00		
04-1998	331,59	Model	-0,09	-0,50	0,20	
		Pomiar	-0,10	-0,50		
03-1999	331,89	Model	-0,23	-0,67	0,30	
		Pomiar	-0,20	-0,80		

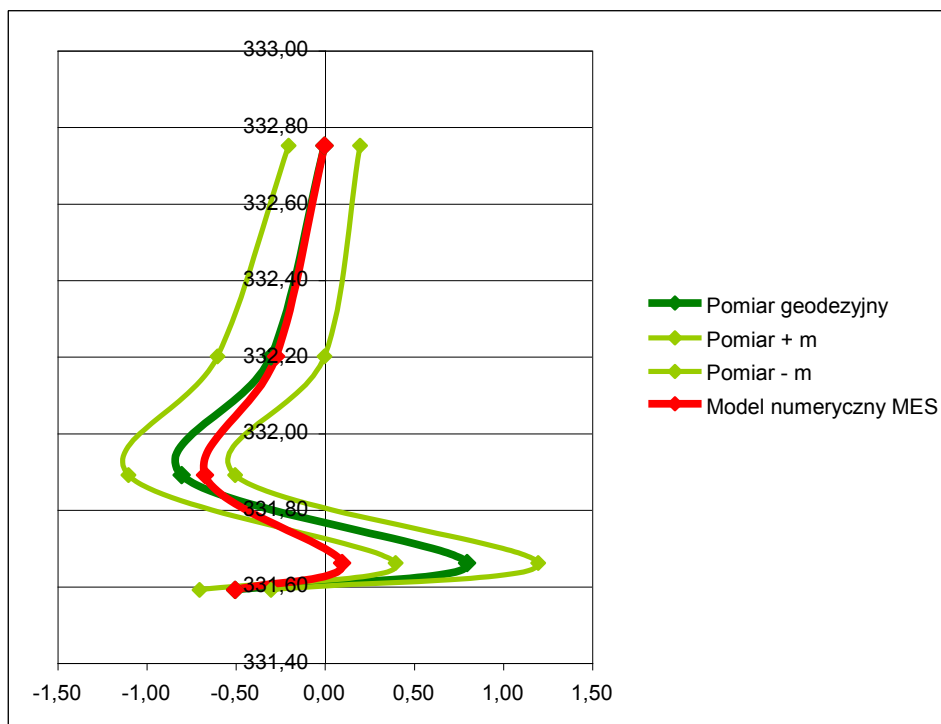
Tabela 10 Porównanie przemieszczeń obliczonych z modelu MES i wyznaczonych na podstawie pomiarów geodezyjnych.



Rys. 78 Szkic konstrukcji sekcji 6 zapory i odpowiedni fragment siatki MES.



Rys. 79 Wykres przemieszczeń pomierzonych i obliczonych z modelu MES dla celownika 69 (sekcja 6) w zależności od poziomu ZWG (oś Y).



Rys. 80 Wykres przemieszczeń pomierzonych i obliczonych z modelu MES dla celownika 66 (sekcja 6) w zależności od poziomu ZWG (oś Y).

Na potrzeby pracy obliczono 36 modeli numerycznych, które zestawiono w tabeli (Tabela 11).

ZWG [m npm]	ZWD=307,9 [m npm] (min)	ZWD=309,6 [m npm] (max)			ZWD=310,00 [m npm]	
	beton E=24,5 E+6 [kPa]	beton E=19,6E+6 (-20%) [kPa]	beton E=24,5E+6 [kPa]	beton E=29,4E+6 (+20%) [kPa]	beton E=24,5E+6 [kPa]	
					Awaria przesłony przeciw- filtracyjnej	Zmiana konstrukcji sekcji
336,99 (max)	X	X	X	X	X	X
334,50		X	X	X		
332,75	X	X	X	X	X	X
331,59	X	X	X	X	X	X
329,00		X	X	X		
328,00		X	X	X		
326,00		X	X	X		
323,42 (min)	X	X	X	X	X	X

Tabela 11 Zestawienie wykonanych modeli numerycznych, kolorem żółtym zaznaczono modele pracy zapory przyjęte za najbardziej prawdopodobne.

W celu sprawdzenia wpływu poziomu zwierciadła wody dolnej (ZWD) na wyniki modelowania wykonano modele zmieniając wysokość ZWD (przyjęto maksymalny i minimalny zarejestrowany w ostatnim dziesięcioleciu eksploatacji zapory - na podstawie wskazań piezometru otwartego PO6d). Porównano obliczone przemieszczenia „zbiornik suchy – zbiornik napelniony” celowników przy różnych poziomach ZWG. Otrzymane wyniki przedstawia tabela (Tabela 12). Ze względu na niewielkie różnice obliczonych wartości przemieszczeń (w granicach dokładności pomiaru geodezyjnego) do kolejnych obliczeń przyjęto najczęściej obserwowaną wielkość ZWD – 309,80 m npm.

W celu sprawdzenia doboru parametru materiałowego betonu – modułu Younga (E) – wykonano obliczenia dla wartości o 20% mniejszej i większej od parametru przyjętego na podstawie dokumentacji [M2], [M10]. W ten sposób zasymulowano ewentualne zmiany reologiczne betonu. Otrzymane wyniki przedstawiają tabele (Tabela 13) i (Tabela 14). Różnice wartości obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń są niewielkie (w granicach dokładności pomiaru geodezyjnego), co wskazuje na zasadne przyjęcie wartości E według dokumentacji projektowej: E=24,50E+6 [kPa].



Celownik		dX 69 [m]			dX 66 [m]		
ZWD [m npm]		307,9	309,8	różnica	307,9	309,8	różnica
Przemieszczenie zbiornik suchy – zbiornik napelnlony							
ZWG [m npm]	336,99	0,006412	0,006233	-0,000180	0,004671	0,004555	-0,000115
	332,75	0,003305	0,003534	0,000228	0,003090	0,003118	0,000028
	331,59	0,002881	0,002932	0,000051	0,002850	0,002817	-0,000034
	323,42	0,000567	0,000358	-0,000210	0,001210	0,001098	-0,000112

Tabela 12 Zestawienie wartości i różnic obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń dla różnych wartości ZWD.

		dX 69 [m]			
WG	różnica „N”-„A”	E=19,6E+6 (-20%) [kPa] „A”	E=24,5E+6 [kPa] „N”	E=29,4E+6 (+20%) [kPa] „B”	różnica „N”-„B”
336,99	-0,000436	0,006669	0,006233	0,005937	0,000295
334,50	-0,000302	0,004769	0,004467	0,004263	0,000203
332,75	-0,000236	0,00377	0,003534	0,003376	0,000157
331,59	-0,000191	0,003123	0,002932	0,002805	0,000127
329,00	-0,000129	0,002026	0,001897	0,001812	0,000085
328,00	-0,000107	0,001654	0,001546	0,001475	0,000072
326,00	-0,000073	0,001009	0,000936	0,000888	0,000048
323,42	-0,000039	0,000396	0,000358	0,000332	0,000025

Tabela 13 Zestawienie wartości i różnic obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń celownika 69 dla różnych wartości modułu Younga (E) betonu.

		dX 66 [m]			
WG	różnica „N”-„A”	E=19,6E+6 (-20%) [kPa] „A”	E=24,5E+6 [kPa] „N”	E=29,4E+6 (+20%) [kPa] „B”	różnica „N”-„B”
336,99	-0,000149	0,004705	0,004555	0,004451	0,000104
334,50	-0,000114	0,003752	0,003638	0,003559	0,000079
332,75	-0,000097	0,003214	0,003118	0,003052	0,000065
331,59	-0,000086	0,002903	0,002817	0,002758	0,000059
329,00	-0,000067	0,002236	0,002170	0,002124	0,000045
328,00	-0,000060	0,002008	0,001948	0,001907	0,000041
326,00	-0,000048	0,001588	0,001540	0,001507	0,000033
323,42	-0,000034	0,001132	0,001098	0,001074	0,000024

Tabela 14 Zestawienie wartości i różnic obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń celownika 66 dla różnych wartości modułu Younga (E) betonu.

## 7.5 Uzupelnienie zbioru celowników na ścianie odpowietrznej (od strony wody dolnej)

W ramach projektu modernizacji sieci kontrolnej dla badania przemieszczeń punktów zlokalizowanych na ścianie odpowietrznej zapory Besko wykonano analizy mające na celu wskazanie obszarów konstrukcji, gdzie celowe byłoby rozmieszczenie dodatkowych celowników. Rozszerzenie liczby punktów kontrolowanych dałoby w efekcie lepsze odwzorowanie bieżącego stanu konstrukcji (pod względem przemieszczeń poszczególnych elementów).

Analizę wykonano w dwóch kierunkach:

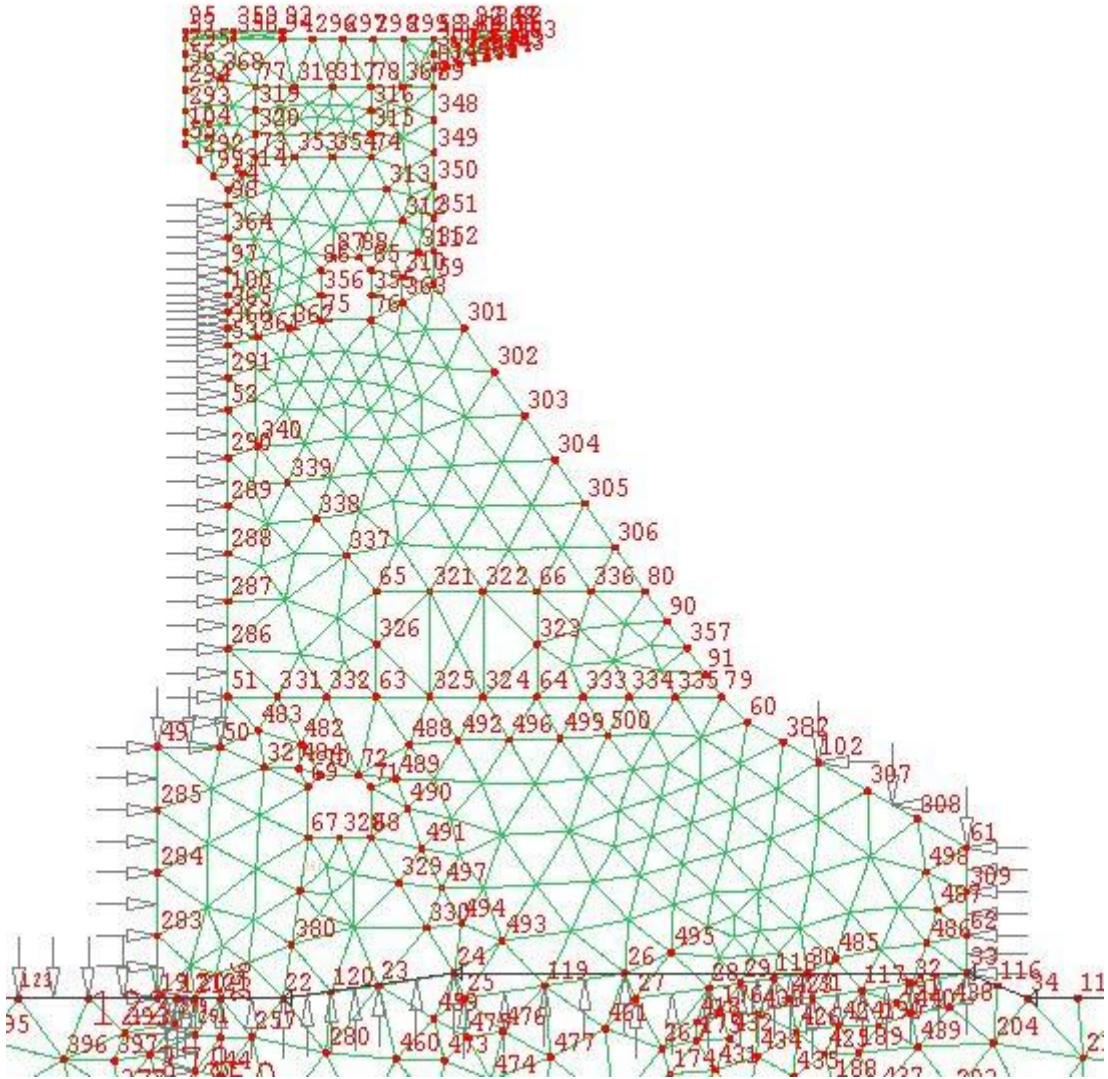
1. Sprawdzenie poprawności lokalizacji dotychczas obserwowanych celowników na podstawie obliczonych (MES) najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń. Porównano wyniki modelowania pracy konstrukcji dla różnych symulowanych stanów awaryjnych obiektu.
2. Wyznaczenie obszarów o największym przyroście przemieszczenia przypadającym na 1 m wysokości konstrukcji. Analizę wykonano na podstawie wielokrotnego modelowania pracy zapory przy zmianie poziomu zwierciadła wody górnej (ZWG).

Ponieważ siatka MES została zdefiniowana w ten sposób, aby wybrane węzły były zlokalizowane w miejscach stabilizacji celowników, porównywano bezpośrednio obliczone najbardziej prawdopodobne przemieszczenia węzłów siatki. Lokalizację węzłów na krawędzi przekroju sekcji przedstawia rysunek (Rys. 81), zestawienie węzłów i odpowiadających im celowników zawiera tabela (Tabela 15).

Wyniki analiz w obu kierunkach pozwalają stwierdzić:

- poprawne zlokalizowanie dotychczas kontrolowanych celowników,
- w czasie modernizacji, jeśli osoba odpowiedzialna za ocenę bezpieczeństwa obiektu uzna za korzystne rozszerzenie zbioru celowników, tak aby na każdej sekcji głuchej (nie przelewowej) dodać punkty, w sferze największych obliczonych zmian przemieszczeń na 1 metr wysokości obiektu, tj. na ścianie odpowietrznej, na wysokości odpowiadającej węzłom 301-302 tj. między 324 a 326 m npm.





Rys. 81 Siatka węzłów MES – sekcja 6 zapory Besko

Rzędna węzła/punktu [m npm]	Węzeł	Celownik
337,92	89	<b>69 (6g)</b>
332,36	350	
328,43	59	
323,18	303	
321,44	304	
319,69	305	
316,20	80	
315,01	90	<b>66 (6d)</b>

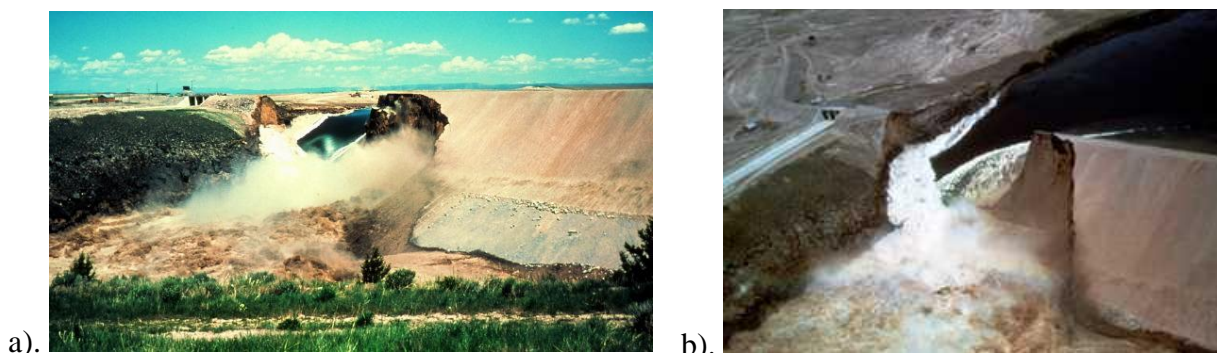
Tabela 15 Zestawienie węzłów siatki MES i odpowiadających im celowników.

### 7.5.1 Symulacja stanów awaryjnych konstrukcji

Wykonano modele numeryczne pracy konstrukcji przy dwóch poziomie ZWG z zakresu najczęściej notowanych w czasie wykonywania geodezyjnych pomiarów kontrolnych: 331,59 m npm. i 332,75 m npm.

Zasymulowane następujące skrajne stany awaryjne (scenariusze zdarzeń):

1. Zmiana konstrukcji sekcji betonowej zapory - wprowadzenie w sekcji przestrzeni pustej – stan ten został zrealizowany przez zamodelowanie pracy sekcji 9 zapory, w której jest zlokalizowane ujęcie wody pitnej. Przykład ten może też ilustrować pracę sekcji 6 po jej przebudowie lub poważną różnicę parametrów betonu względem projektu, użytego w czasie budowy (użycie wadliwego materiału, osłabienie sekcji). Awaria przesłony cementacyjnej - zwiększenie sił wyporu działających na stopę zapory, rozmycie ekranu zmniejszającego filtrację od strony wody górnej (zmniejszającego parcie pionowe na stopę). Scenariusz obejmujący tak duże zniszczenia ekranu jest mało prawdopodobny, ale podobne zjawisko- częściowe rozmycie było przyczyną katastrof zapór (np. katastrofa zapory ziemnej w Teton (Idaho), 5.06.1976 – (Rys. 82)).



Rys. 82 Zapora w Teton w czasie katastrofy: a). widok od strony wody dolnej, b). widok z góry [źródło: strona internetowa zapory Teton: [www.tetondam.org](http://www.tetondam.org)].

Porównanie obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń celowników dla stanu normalnej pracy i stanów symulowanych zawiera tabela (Tabela 16).

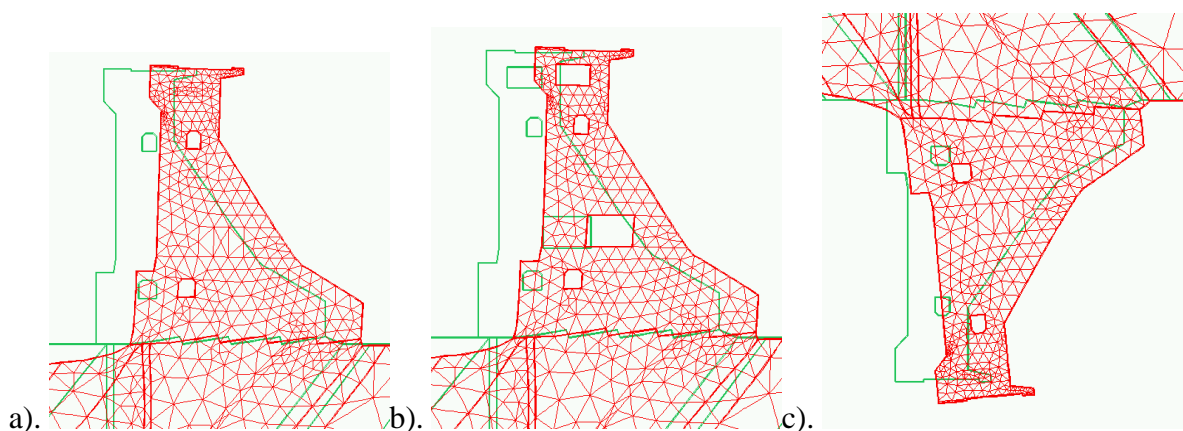
WG	dX 69	różnice od N(331,59)	dX 66	różnice od N(331,59)
<b>PRACA NORMALNA (N)</b>				
331,59	0,002665		0,002680	
332,75	0,003655	0,000991	0,003182	0,000502
<b>ZMIANA KONSTRUKCJI</b>				
331,59	0,002698	0,000034	0,002712	0,000032
332,75	0,003702	0,001004	0,003226	0,000513
<b>AWARIA PRZESŁONY</b>				
332,75	0,004172	0,001507	0,002653	-0,000027

Tabela 16 Porównanie obliczonych przemieszczeń celowników dla stanu normalnej pracy konstrukcji oraz stanów awaryjnych (symulowanych).

W zasymulowanym przypadku zmiany konstrukcji sekcji zapory nie ma różnicy w wielkości wyznaczonych przemieszczeń celowników w obu modelach. Na wykonanych szkicach izolinii przemieszczeń (rysunki: (Rys. 83), (Rys. 84), (Rys. 85)) można zauważyć, że obszar maksymalnych zmian wystąpił na wysokości „pustek” w konstrukcji, czyli w obszarze lokalizacji celownika 66.

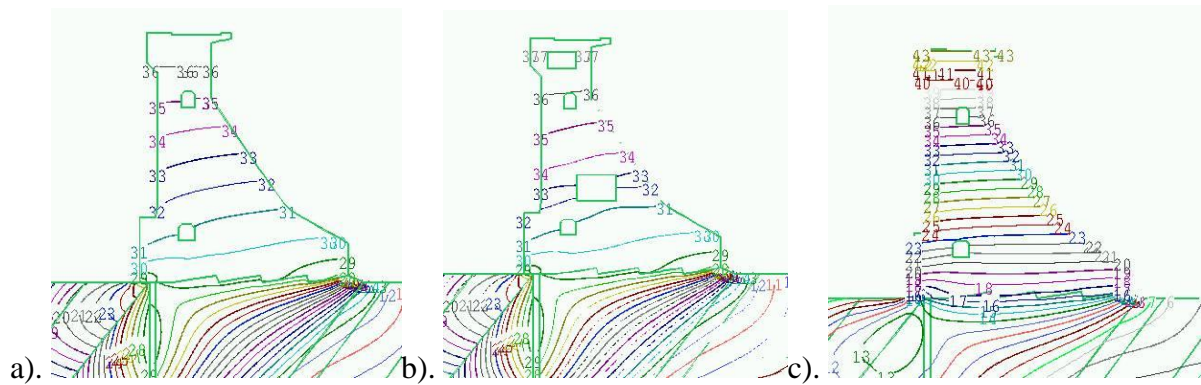
W drugim analizowanym przypadku - awarii przesłony cementacyjnej - ze względu na kierunek przyłożonej do stopy zapory siły wyporu, większe są składowe pionowe przemieszczenia węzłów siatki, a cała konstrukcja przemieszcza się w sposób spójny. Nie można wskazać obszarów charakteryzujących się różną wielkością oczekiwanych przemieszczeń.

**WNIOSEK:** Lokalizacja dotychczas obserwowanych celowników jest poprawna.

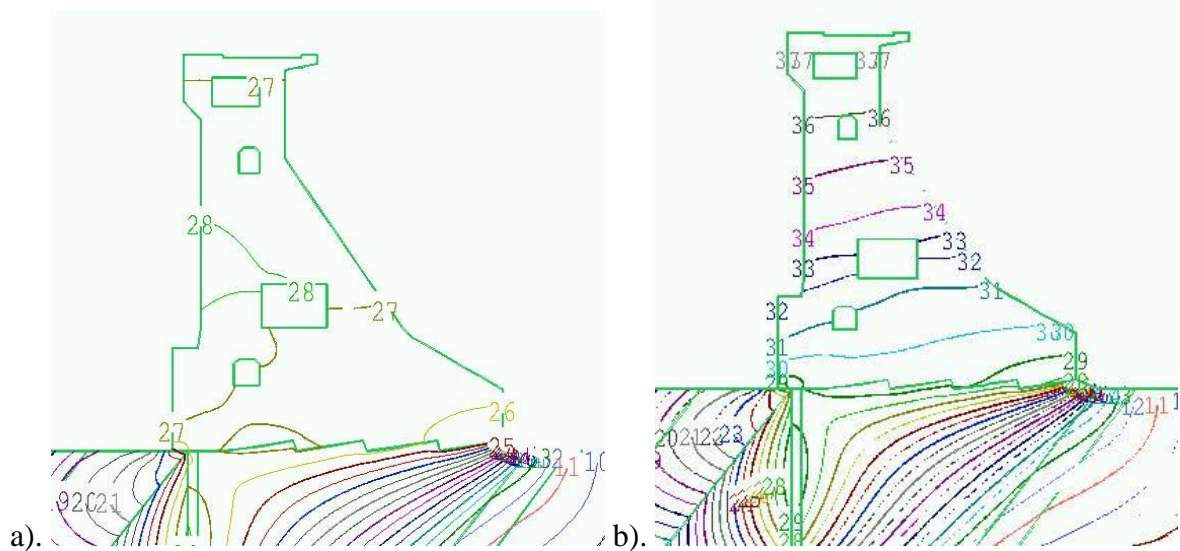


Rys. 83 Zapora Besko - model sekcji 6 (etap III.):

- przemieszczenie konstrukcji przy napełnieniu zbiornika (WG=332 m npm),
- przemieszczenia zmienionej konstrukcji (WG=332 m npm),
- przemieszczenia konstrukcji – awaria przesłony cementacyjnej (WG=332 m npm).



Rys. 84 Zapora Besko - model sekcji 6 (etap III.),  
 izolinie przemieszczeń w kierunku poziomym kreślone co 0,0001 m:  
 a). przemieszczenie konstrukcji (WG=332 m npm),  
 b). przemieszczenia zmienionej konstrukcji (WG=332 m npm),  
 c). przemieszczenia konstrukcji – awaria przesłony cementacyjnej (WG=332 m npm).



Rys. 85 Zapora Besko - model sekcji 6 (etap III.),  
 izolinie przemieszczeń w kierunku poziomym kreślone co 0,0001 m:  
 a). przemieszczenie zmienionej konstrukcji WG=331 m npm,  
 b). przemieszczenia zmienionej konstrukcji WG=332 m npm.

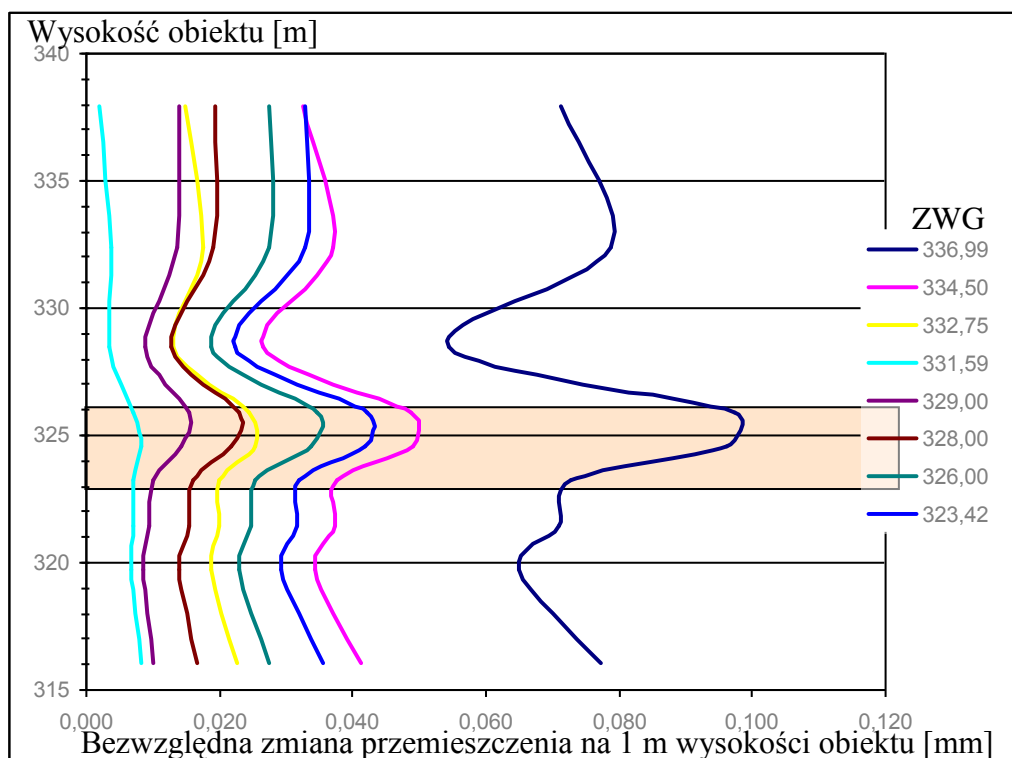
### 7.5.2 Analiza wielkości zmian przemieszczeń

Różnice w wielkości przemieszczeń sąsiadujących ze sobą węzłów, świadczą o powstawaniu naprężeń wewnątrz konstrukcji. Miejsca gdzie naprężenia te są największe są najbardziej narażone na osłabienie materiału. Miejsca te powinny być szczególnie kontrolowane, w celu ich wyznaczenia wykonano analizę zmian przemieszczeń węzłów na 1 metr wysokości konstrukcji. Ponieważ metodami geodezyjnymi opartymi na pomiarach



trygonometrycznych można badać tylko zewnętrzne powierzchnie obiektu, przeanalizowano zmiany przemieszczeń węzłów na odpowietrznej krawędzi modelu.

Analizę wykonana dla sekcji 6 zapory Besko wykazała największe zmiany przemieszczeń w przedziale ok. 324,00 – 326,00 m npm, czyli ok. 20 m powyżej kontrolowanego celownika 66 (6d) i 12 m poniżej celownika 69 (6g). W obszarze tym różnice obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń między sąsiednimi węzłami 301-302 i 302-303 przy największym dotychczas zanotowanym poziomie (ZWG) nie przekraczają wartości 0,10 mm na metr wysokości konstrukcji i są wyższe o średnio 20% od różnic obliczonych dla innych par węzłów siatki. Obliczone wielkości przemieszczeń węzłów zlokalizowanych na różnej wysokości konstrukcji i różnic przemieszczeń w zależności od poziomu ZWG zestawione są w tabelach (Tabela 17) i (Tabela 18). Rysunek (Rys. 86) przedstawia wykres bezwzględnych zmian wielkości przemieszczenia na 1 metr wysokości zapory.



Rys. 86 Zmiany przemieszczeń na jednostkę wysokości obiektu przy różnych poziomach ZWG, wyróżniono obszar największych obliczonych zmian znajdujący się między węzłami siatki MES: 303-302-301.

Węzły MES (celow- niki)	Rzędna [m npm]	ZWG [m npm]															
		323,42		326,00		328,00		329,00		331,59		332,75		334,50		336,99	
		Obliczone najbardziej prawdopodobne przemieszczenia [mm] od stanu „zbiornik suchy”															
		dX	Δ	dX	Δ	dX	Δ	dX	Δ	dX	Δ	dX	Δ	dX	Δ		
103 (69)	<b>337,92</b>	0,358		1,546		2,932		4,467		0,358		1,546		2,932		4,467	
			-								-						
350	<b>332,36</b>	0,541	0,183	1,654	-0,108	2,921	0,011	4,284	0,182	0,541	0,183	1,654	-0,108	2,921	0,011	4,284	
			-								-						
59	<b>328,49</b>	0,670	0,130	1,730	-0,076	2,906	0,015	4,139	0,146	0,670	0,130	1,730	-0,076	2,906	0,015	4,139	
			-								-						
301	<b>325,89</b>	0,728	0,058	1,763	-0,033	2,897	0,009	4,071	0,068	0,728	0,058	1,763	-0,033	2,897	0,009	4,071	
			-								-						
302	<b>324,54</b>	0,785	0,057	1,794	-0,031	2,887	0,010	4,005	0,066	0,785	0,057	1,794	-0,031	2,887	0,010	4,005	
			-								-						
303	<b>323,19</b>	0,842	0,057	1,824	-0,030	2,876	0,011	3,939	0,066	0,842	0,057	1,824	-0,030	2,876	0,011	3,939	
			-								-						
304	<b>321,44</b>	0,898	0,056	1,852	-0,028	2,864	0,012	3,872	0,066	0,898	0,056	1,852	-0,028	2,864	0,012	3,872	
			-								-						
305	<b>319,69</b>	0,953	0,055	1,879	-0,027	2,851	0,013	3,807	0,066	0,953	0,055	1,879	-0,027	2,851	0,013	3,807	
			-								-						
80	<b>316,02</b>	1,062	0,108	1,931	-0,052	2,825	0,026	3,680	0,127	1,062	0,108	1,931	-0,052	2,825	0,026	3,680	
			-								-						
90 (66)	<b>315,01</b>	1,098	0,036	1,948	-0,017	2,817	0,008	3,638	0,042	1,098	0,036	1,948	-0,017	2,817	0,008	3,638	

Tabela 17 Zestawienie przemieszczeń węzłów siatki MES w zależności od poziomu zwierciadła wody w zbiorniku (ZWG)

Odcinek			ZWG [m npm]							
Numer	Granice obszaru [m]	dH [m]	323,42	326,00	328,00	329,00	331,59	332,75	334,50	336,99
			Bezwzględna wartość zmiany przemieszczenia na 1 m wysokości konstrukcji							
350-103	<b>337,92</b>	5,560	0,033	0,028	0,019	0,014	0,002	0,015	0,033	0,071
59-350	<b>332,36</b>	3,930	0,033	0,028	0,019	0,014	0,004	0,018	0,037	0,079
301-59	<b>328,49</b>	2,540	0,023	0,019	0,013	0,009	0,003	0,013	0,027	0,055
302-301	<b>325,89</b>	1,350	0,042	0,035	0,023	0,016	0,007	0,025	0,049	0,098
303-302	<b>324,54</b>	1,350	0,042	0,034	0,022	0,014	0,008	0,026	0,049	0,096
304-303	<b>323,19</b>	1,750	0,032	0,026	0,016	0,010	0,007	0,020	0,038	0,073
305-304	<b>321,44</b>	1,750	0,032	0,025	0,016	0,010	0,007	0,020	0,037	0,071
80-305	<b>319,69</b>	3,670	0,030	0,023	0,014	0,009	0,007	0,019	0,035	0,065
90-80	<b>316,02</b>	1,010	0,036	0,028	0,017	0,010	0,008	0,023	0,041	0,077
	<b>315,01</b>									

Tabela 18 Zestawienie bezwzględnych wartości zmian obliczonych przemieszczeń węzłów na 1 m wysokości obiektu.

**WNIOSEK:** Wartości różnic przemieszczeń na całej krawędzi modelu są zbliżone i niewielkie. Lokalizacja nowych punktów w wyznaczonym obszarze między 324 a 326 m npm może przyczynić się do lepszej oceny stanu zapory.

## 7.6 Kontrola okresowego pomiaru geodezyjnego – pliki danych dla programu SuDam wykorzystującego wyniki modelowania MES

W ramach projektu modernizacji sieci kontrolnej dla zapory Besko przygotowano podstawowe pliki danych (Bazę Wiedzy) dla programu SuDam. Na podstawie przeprowadzonych analiz, po konsultacji z kierownikiem Pracowni Geodezyjnych Pomiarów przemieszczeń OTKZ mgr inż. Markiem Wróblewskim jako pomiary kalibrujące wybrano wyniki pomiarów geodezyjnych wykonanych w kwietniu 1991 i w marcu 1997. Obliczenia wykonano dla sekcji 6 zapory, na której są zlokalizowane celowniki 66 (6d) i 69 (6g) oraz bolec lustra 069.

## 7.6.1 Pliki stanu odniesienia (pomiar kalibrujący) – dane uzyskane z OTKZ

**KWIECIEŃ 1991**

plik współrzędnych:

```

* BESKO
* WYKAZ WSPÓŁRZĘDNYCH SIECI KĄTOWO-LINIOWEJ 1991
* WG=332,20
* NR          X          Y
*
1          199.09       360.99
2          236.28       406.27
3          157.60       495.76
4          306.15       356.21
5          243.36       518.90
6          358.17       393.46
7          364.92       512.80
8          245.64       662.17
9          112.04       636.10
019        108.91       512.32
19         106.10       513.28
029        106.93       499.98
29         106.11       501.22
36         106.10       489.48
039        106.77       488.21
39         106.03       489.23
46         109.73       477.61
049        107.10       476.45
49         106.07       477.74
56         115.64       465.93
059        107.46       463.81
59         105.99       465.46
61         106.99       447.54
66         115.65       453.44
66         115.72       453.36
69         107.47       451.58
69         105.94       453.09
71         106.73       433.13
72         106.88       446.90
76         117.96       446.46
81         107.02       417.98
82         106.83       431.85
86         117.97       418.17
96         115.18       411.28
99         108.28       410.32
99         105.99       411.56
06         116.05       399.34
0109       108.50       398.35
109        105.97       399.39
116        110.17       387.13
0119       108.74       386.45
119        106.03       387.21
126        106.22       375.02
0129       108.92       374.77
129        106.08       375.20

```

plik wyznaczonych przemieszczeń:

```

* WYZNACZONE PRZEMIESZCZENIA KWI-1991
* WG=332,20
*
*Nr      dX [m]      dH [m]
66      0,0011      0
69      0,0024      0
069     0,0024      0

```

**MARZEC 1997**

plik współrzędnych:



```

* BESKO
* WYKAZ WSPÓŁRZĘDNYCH SIECI KĄTOWO-LINIOWEJ 1997
* WG=332,75
* NR          X          Y
*
1      199.0900    360.9900
2      236.2800    406.2700
3      157.6000    495.7600
4      306.1648    356.2024
5      243.3748    518.9072
6      358.1806    393.4528
7      364.9200    512.8000
8      245.6400    662.1700
9      112.0400    636.1000
019    108.9933    512.5625
19     106.2792    513.1890
029    108.9762    501.3132
29     106.2580    501.1725
36     106.1000    489.4807
039    108.9855    489.7925
39     106.1400    489.2112
46     109.9138    477.6111
049    108.9798    477.9182
49     106.1621    477.7301
56     115.6498    465.9109
059    108.9803    465.1446
59     106.0834    465.4599
61     107.8678    447.8368
066    115.5337    453.3342
66     115.7968    453.3773
069    108.9965    453.1031
69     106.0246    453.1024
71     106.8263    433.1613
72     106.9667    446.9072
76     117.9305    446.4349
81     107.8947    418.1306
82     106.9226    431.8894
86     117.9513    418.2361
96     115.2558    411.3261
099    108.9458    411.5182
99     106.0766    411.6122
106    116.0181    399.2987
0109   108.9643    399.4664
109    106.0568    399.4490
116    110.3215    387.1781
0119   108.9466    387.1683
119    106.1160    387.2727
126    106.1632    375.0644
0129   108.9440    374.9361
129    106.1740    375.2666

```

#### plik wyznaczonych przemieszczeń:

```

* WYZNACZONE PRZEMIESZCZENIA MARZ-1997
* WG=332,75
*
*Nr      dX [m]      dH [m]
66       0,0008       0
69       0,0033       0
069      0,0033       0

```

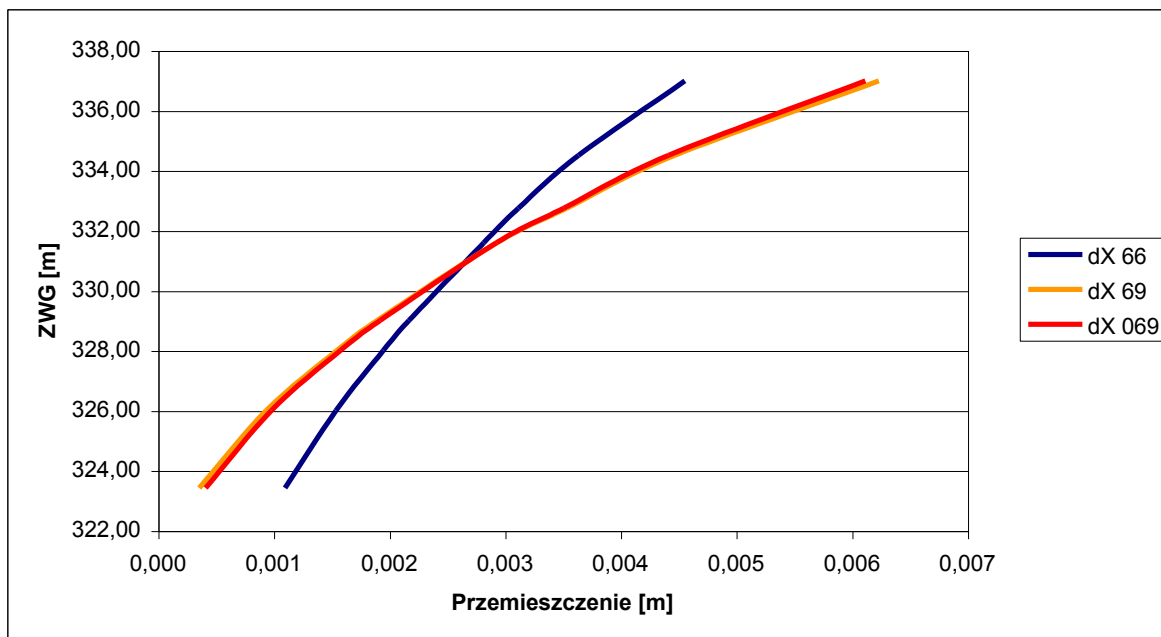
#### 7.6.2 Pliki parametrów funkcji modelujących (funkcji aproksymujących)

Na podstawie obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń punktów 66, 69 i 069 z modeli dla 8 poziomów zwierciadła wody górnej obliczono współczynniki a, b, c (hiperbola), c, d, e, g (parabola). Opis teoretyczny zawiera podrozdział 6.4 tej pracy), otrzymane wyniki przedstawia tabela (Tabela 19) i rysunek (Rys. 87).

Sprawdzono zgodność przemieszczeń węzłów – celowników obliczonych z funkcji modelującej z przemieszczeniami wyznaczonymi na podstawie pomiarów kontrolnych. Wyznaczone przemieszczenia celownika 66 porównano z parabolą, wyznaczone przemieszczenia celownika porównano z hiperbolą, Otrzymane wyniki przedstawiają tabele (Tabela 20),(Tabela 21) i rysunki (Rys. 88), (Rys. 89) - uznano je za dobre - zgodne przy n-krotnym błędzie średnim m pomiaru geodezyjnego, dla n=2). Wskazują one na możliwość wykorzystania tych funkcji modelujących w czasie terenowej kontroli obserwacji geodezyjnych, przy wykorzystaniu programu SuDam.

ZWG	Opis	Przemieszczenia		
		dX 66	dX 69	dX 069
336,99	maksymalne	0,004555	0,006233	0,006117
334,50		0,003638	0,004467	0,004413
332,75	Kalibracja 1997	0,003118	0,003534	0,003510
331,59		0,002817	0,002932	0,002929
329,00		0,002170	0,001897	0,001920
328,00		0,001948	0,001546	0,001578
326,00		0,001540	0,000936	0,000981
323,42	minimalne	0,001098	0,000358	0,000411
Współczynniki funkcji modelujących				
	a	105262,910	258919,412	247470,525
	b	-665,182828	-1615,111180	-1544,427638
	c	1,05149890	2,51893929	2,40989345
	c	-9,03210747	-21,46798495	-20,29096107
	d	0,08428183	0,20105426	0,19007507
	e	-0,00026264	-0,00062824	-0,00059409
	g	0,00000027	0,00000065	0,00000062
	[vv] hip	4,7E-09	2,4E-08	2,1E-08
	[vv] par	9,8E-10	2,8E-09	2,5E-09

Tabela 19 Zestawienie obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń oraz parametrów funkcji modelujących (a,b,c – hiperboli, c,d,e,f, - paraboli) celowników 66, 69 i bolca 069.



Rys. 87 Wykres obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń celowników 66, 69 i bolca 069 (wykresy odpowiednich funkcji modelujących na tym rysunku odpowiadają wykresom obliczonych przemieszczeń).

Data	ZWG [m npm]		dX 69 [mm] (hiperbola)			dX 66 [mm] (parabola)			Średni błąd wyznaczenia m [mm]
			dX -2* m	dX	dX +2*m	dX -2* m	dX	dX +2*m	
04-1991	332,20	Funkcja	-0,30			-0,15			0,30
		Pomiar	-1,50	-0,90	-0,30	-0,90	-0,30	0,30	
03-1996	331,66	Funkcja	-0,55			-0,30			0,40
		Pomiar	-1,35	-0,55	+0,25	0,00	+0,80	+1,60	
03-1997	332,75	Pomiar kalibrujący							0,20
		0,00			0,00				
04-1998	331,59	Funkcja	-0,59			-0,32			0,20
		Pomiar	-0,50	-0,10	0,30	-0,90	-0,50	-0,10	
03-1999	331,89	Funkcja	-0,44			-0,24			0,30
		Pomiar	-0,60	-0,20	0,40	-1,40	-0,80	-0,20	

Tabela 20 Porównanie przemieszczeń obliczonych z funkcji modelującej i wyznaczonych na podstawie pomiarów geodezyjnych.

ZWG [m nrm]	Pomiar geodezyjny			Funkcja modelująca		różnica
	dX [m]	X kalibracji [m]	X w układzie modelu [m]	X kalibracji [m]	X w układzie modelu [m]	
<b>Celownik 69</b>						
332,75	0,002800	0,000000	0,003564	0,000000	0,003564	0,000000
332,20	0,001900	-0,000900	0,002664	-0,000287	0,003277	0,000613
331,89	0,002600	-0,000200	0,003364	-0,000443	0,003121	-0,000243
331,66	0,002250	-0,000550	0,003014	-0,000556	0,003007	-0,000006
331,59	0,002700	-0,000100	0,003464	-0,000590	0,002973	-0,000490
					[rr]	0,000001
<b>Celownik 66</b>						
332,75	0,003300	0,000000	0,003119	0,000000	0,003119	0,000000
332,20	0,003000	-0,000300	0,002819	-0,000156	0,002964	0,000144
331,89	0,002500	-0,000800	0,002319	-0,000241	0,002879	0,000559
331,66	0,004100	0,000800	0,003919	-0,000303	0,002816	-0,001103
331,59	0,002800	-0,000500	0,002619	-0,000322	0,002798	0,000178
					[rr]	0,000002

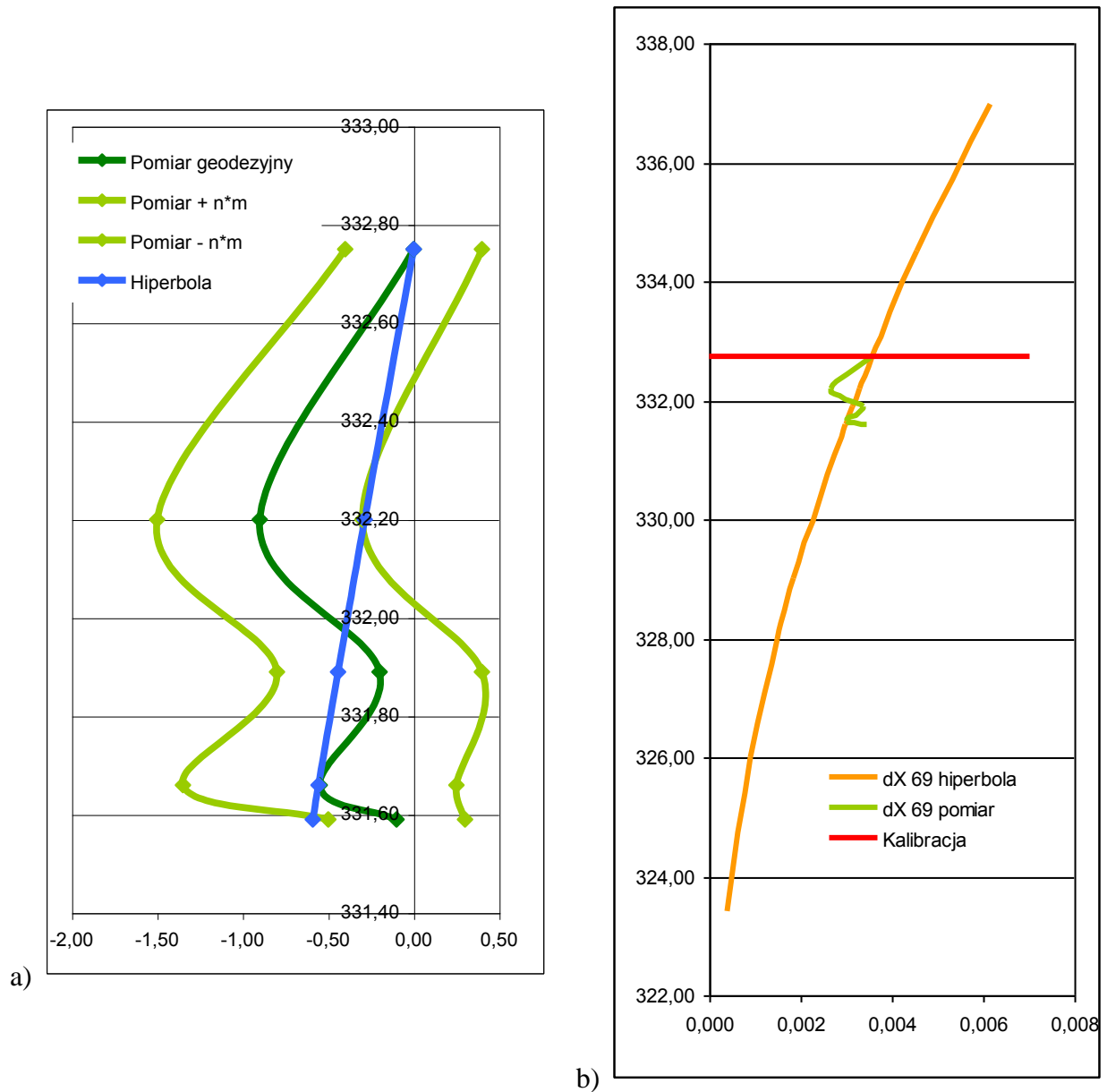
Tabela 21 Porównanie wartości przemieszczeń obliczonych z funkcji modelującej i wyznaczonych na podstawie pomiarów geodezyjnych.

plik parametrów funkcji modelującej – hiperboli (założono stałość punktów potencjalnej bazy odniesienia 1-10):

```

* BESKO SEKCJA 6
* przemieszczenia poziome w kierunku X (dX)
* funkcja aproksymująca  $a/x^2 + b/x + c + dx + ex^2 + gx^3$  :HIPERBOLA
*
*NR      a              b              c              d  e  g
66  105262,909759402000  -665,182827721062  1,051498900378  0  0  0
69  258919,412189720000  -1615,111179578980  2,518939291455  0  0  0
069 247470,525116175000  -1544,427638122350  2,409893451640  0  0  0

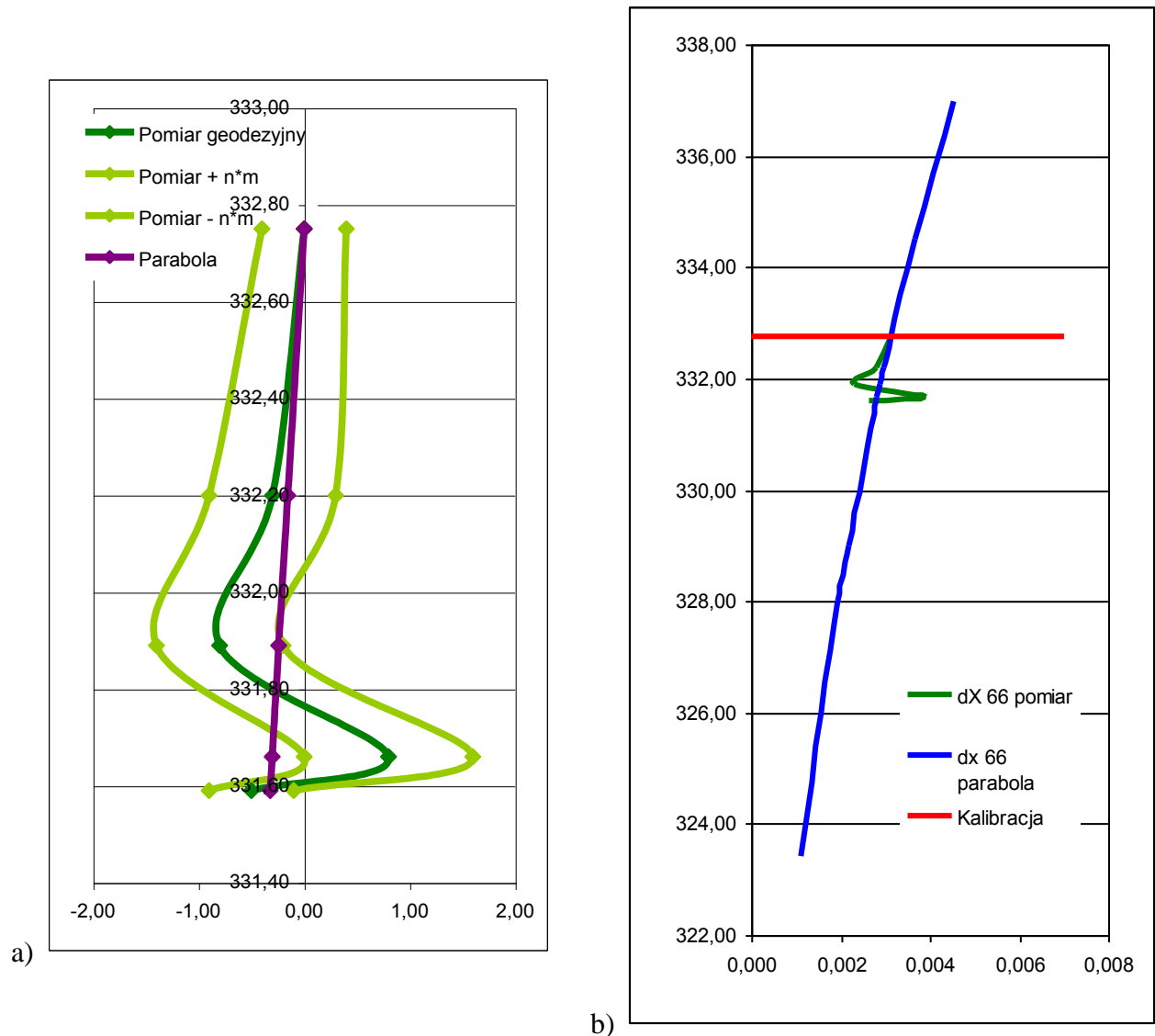
```



Rys. 88 Wykres przemieszczeń pomierzonych i obliczonych z funkcji modelującej dla celownika 69 w zależności od poziomu ZWG (oś Y): a) w układzie kalibracji, b) w układzie modelu.

plik parametrów funkcji modelującej – paraboli:

```
* BESKO SEKCJA 6
* przemieszczenia poziome w kierunku X (dX)
* funkcja aproksymująca a/x^2 + b/x + c + dx + ex^2 + gx^3 : PARABOLA
*
*NR   a   b   c       d       e       g
66    0   0 -9,032107471920  0,084281825331 -0,000262638017  0,000000273333
69    0   0 -21,467984948607  0,201054262636 -0,000628239015  0,000000654967
069   0   0 -20,290961072857  0,190075067760 -0,000594091174  0,000000619556
```



Rys. 89 Wykres przemieszczeń pomierzonych i obliczonych z funkcji modelującej dla celownika 66 w zależności od poziomu ZWG (oś Y): a) w układzie kalibracji, b) w układzie modelu.

### 7.6.3 Pliki obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń (symulacja modelowania równoległego)

Aby zasymulować pracę programu SuDam w trybie modelowania równoległego na podstawie obliczonych modeli numerycznych zestawiono przemieszczenia dla różnych poziomów zwierciadła wody górnej ZWG.

plik obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń dla ZWG=323,42:

```
* BESKO modelowanie równoległe dX, dH
* WG = 323,42
*
*NR dX [m] dH [m]
66 0,0010978 0,0005746
69 0,0003576 0,0003918
069 0,0004112 0,0002881
```

plik obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń dla ZWG=331,59:

```
* BESKO modelowanie równoległe dX, dH
* WG = 331,59
*
*NR dX [m]      dH [m]
66  0,0028168  0,0001008
69  0,0029319  0,0000751
069 0,0029286  0,0000814
```

plik obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń dla ZWG=332,75:

```
* BESKO modelowanie równoległe dX, dH
* WG = 332,75
*
*NR dX [m]      dH [m]
66  0,0031178  0,0000129
69  0,0035337  0,0000385
069 0,0035095  0,0000852
```

plik obliczonych najbardziej prawdopodobnych przemieszczeń dla ZWG=336,99:

```
* BESKO modelowanie równoległe dX, dH
* WG = 336,99
*
*NR dX [m]      dH [m]
66  0,0045552 -0,0003615
69  0,0062326 -0,0001843
069 0,0061169  0,0000393
```

#### 7.6.4 Pliki obserwacji aktualnych (kontrolowanych przy użyciu programu SuDam) – dane uzyskane z OTKZ

plik obserwacji wykonanych w czasie pomiaru kontrolnego w MARCU 1997 (zakodowanych przy pomocy kodu clp):

```
* BESKO OBSERWACJE MARZ-1997
*
*c L P obs m
1 8 -3 0.00000 1.5
1 3 -3 28.77557 1.5
1 9 -3 29.27137 1.5
1 19 -3 44.66077 2.7
1 29 -3 47.03691 2.7
1 39 -3 49.72515 2.7
1 49 -3 52.59247 2.7
1 59 -3 56.10090 2.7
1 69 -3 60.12134 2.7
1 61 -3 61.74622 2.7
1 72 -3 62.01303 2.7
1 71 -3 67.53614 2.7
1 82 -3 68.06998 2.7
1 81 -3 74.47966 2.7
1 99 -3 78.08404 2.7
1 109 -3 84.85962 2.7
1 119 -3 92.27625 2.7
1 129 -3 100.10924 2.7
1 46 -3 51.38481 2.7
1 56 -3 52.53067 2.7
1 66 -3 56.49987 2.7
1 86 -3 70.66541 2.7
1 96 -3 75.39144 2.7
1 4 -3 306.92255 1.5
1 7 -3 356.95413 1.5
1 5 -3 392.35943 1.5
3 8 -3 0.00000 1.5
3 9 -3 50.96192 1.5
3 19 -3 110.09845 2.7
3 29 -3 124.25403 2.7
```

3	39	-3	138.99765	2.7
3	49	-3	152.40188	2.7
3	59	-3	164.78613	2.7
3	69	-3	174.93228	2.7
3	61	-3	179.38815	2.7
3	72	-3	179.79997	2.7
3	71	-3	187.55536	2.7
3	82	-3	188.24555	2.7
3	81	-3	194.25793	2.7
3	99	-3	195.97070	2.7
3	109	-3	199.66598	2.7
3	119	-3	202.74185	2.7
3	129	-3	205.26993	2.7
3	139	-3	207.42982	2.7
3	46	-3	154.06389	2.7
3	56	-3	170.33261	2.7
3	66	-3	181.37712	2.7
3	76	-3	187.84948	2.7
3	96	-3	201.35509	2.7
3	106	-3	205.07523	2.7
3	116	-3	204.76777	2.7
3	1	-3	249.99140	1.5
3	2	-3	276.89241	1.5
3	4	-3	282.96899	1.5
3	5	-3	347.75323	1.5
9	1	-3	0.00000	1.5
9	3	-3	0.47388	1.5
9	4	-3	19.09436	1.5
9	5	-3	34.10404	1.5
9	7	-3	51.61074	1.5
9	8	-3	92.76280	1.5
8	4	-3	0.00000	1.5
8	7	-3	30.46830	1.5
8	9	-3	299.84107	1.5
8	3	-3	356.59039	1.5
8	1	-3	377.80666	1.5
8	5	-3	386.55751	1.5
5	1	-3	0.00000	1.5
5	2	-3	13.40215	1.5
5	4	-3	40.85342	1.5
5	6	-3	64.59243	1.5
5	8	-3	216.39111	1.5
5	9	-3	271.01591	1.5
5	3	-3	334.17781	1.5
2	7	-3	0.00000	1.5
2	5	-3	51.96889	1.5
2	3	-3	101.88395	1.5
2	29	-3	115.85123	2.7
2	39	-3	119.87744	2.7
2	49	-3	124.02819	2.7
2	59	-3	128.83606	2.7
2	69	-3	134.02514	2.7
2	61	-3	136.30600	2.7
2	72	-3	136.61284	2.7
2	71	-3	142.95695	2.7
2	82	-3	143.52597	2.7
2	81	-3	150.22907	2.7
2	99	-3	153.35995	2.7
2	109	-3	159.29950	2.7
2	119	-3	165.19215	2.7
2	129	-3	170.85702	2.7
2	46	-3	123.30370	2.7
2	56	-3	126.74268	2.7
2	66	-3	132.27148	2.7
2	76	-3	135.13621	2.7
2	86	-3	149.59522	2.7
2	96	-3	153.31136	2.7
2	106	-3	159.63884	2.7
2	116	-3	165.56226	2.7
2	6	-3	349.30673	1.5
6	7	-3	0.00000	1.5
6	5	-3	50.78390	1.5
6	2	-3	96.93148	1.5
6	4	-3	143.15958	1.5
4	8	-3	0.00000	1.5
4	5	-3	11.01968	1.5
4	9	-3	26.17284	1.5



4	3	-3	39.55933	1.5
4	1	-3	84.72951	1.5
4	6	-3	327.13458	1.5
4	7	-3	364.71287	1.5
7	1	-3	0.00000	1.5
7	4	-3	29.95203	1.5
7	6	-3	49.21407	1.5
7	8	-3	295.70739	1.5
7	9	-3	323.92807	1.5
7	2	-3	396.83843	1.5
7	8	0	191.1514	0.5
7	9	0	281.3306	0.5
7	2	0	167.0234	0.5
7	6	0	119.5213	0.5
7	4	0	167.2507	0.5
7	1	0	224.8229	0.5
9	1	0	288.5443	0.5
8	9	0	136.1165	0.5
9	4	0	340.6038	0.6
5	9	0	176.0116	0.5
9	3	0	147.5440	0.5
8	4	0	311.8832	0.6
8	3	0	188.2648	0.5
1	8	0	304.7542	0.6
8	5	0	143.2932	0.5
5	1	0	163.9921	0.5
5	4	0	174.3785	0.5
5	6	0	170.0394	0.5
5	2	0	112.8425	0.5
5	3	0	88.8285	0.4
4	1	0	107.1707	0.5
1	86	0	99.3038	0.4
1	129	0	91.2184	0.4
1	119	0	93.8676	0.4
1	109	0	97.9953	0.4
1	99	0	103.3396	0.5
1	36	0	158.6125	0.5
1	81	0	106.6953	0.5
1	61	0	124.9863	0.5
1	69	0	128.8474	0.5
1	3	0	141.0084	0.5
1	46	0	146.7664	0.5
1	56	0	134.0921	0.5
1	66	0	124.5393	0.5
1	59	0	137.7241	0.5
1	49	0	147.6213	0.5
1	39	0	157.1907	0.5
1	29	0	166.7666	0.5
1	19	0	176.3282	0.5
2	66	0	129.5903	0.5
2	6	0	122.5704	0.5
2	76	0	125.0683	0.5
2	56	0	134.6120	0.5
2	46	0	145.0644	0.5
2	3	0	119.1515	0.5
2	36	0	154.4979	0.5
2	116	0	127.3281	0.5
2	86	0	118.9480	0.5
2	106	0	120.5345	0.5
2	126	0	133.8065	0.5
4	6	0	63.9880	0.4
4	3	0	203.8158	0.5
3	106	0	105.0719	0.5
3	116	0	118.4723	0.5
3	126	0	131.1990	0.5
3	99	0	97.2826	0.4
3	81	0	91.6786	0.4

Przygotowano także pliki z obserwacjami z pomiarów kontrolnych wykonanych w KWIETNIU 1991, KWIETNIU 1998, MARCU 1999.

### 7.6.5 Wyniki kontroli obserwacji przy użyciu programu SuDam (raport)

Działanie programu SuDam przetestowano na wielu zestawach danych – rzeczywistych (udostępnionych przez OTKZ) i symulowanych. Stwierdzono poprawne działanie programu.

Kierownik pracowni Geodezyjnych Pomiarów Przemieszczeń OTKZ mgr inż. Marek Wróblewski zgodził się przeprowadzić testy terenowe i korzystać z programu SuDam w czasie następnych pomiarów kontrolnych zapór Besko i Klimkówka (i innych obiektów jeśli zostaną opracowane modele numeryczne ich pracy i przygotowane pliki stanowiące Bazy Wiedzy o zachowaniu tych obiektów). Pomiarów te są przewidziane wiosną i jesienią 2008 roku.

#### Wybrany raport programu SuDam:

```

Rozwiązanie z funkcją aproksymującą

Stan odniesienia z pliku:
D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Kalibracja\Besko_wsp_odl_1991.txt

Poziom wody górnej stanu odniesienia: 332.20
Poziom wody górnej stanu aktualnego: 332.75

Plik parametrów funkcji:
D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Model\BESKO_sekcja_6_hiperbola.txt
Format pliku: dX

Plik obserwacji aktualnych:
D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Obserwacje\BESKO_obs_1997.txt
Parametr wiarygodności obserwacji: 3

-----

D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Kalibracja\Besko_wsp_odl_1991.txt
Wczytano punktów: 45
D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Model\BESKO_sekcja_6_hiperbola.txt
Wczytano funkcji: 12

D:\Users\Janina\Doktorat\SuDam\Test_exe\Dane\BESKO\Obserwacje\BESKO_obs_1998.txt

Lista punktów

Numer      X odn.      Y      |      dx0      X suche      |      dx      X akt.
1      199,0900    360,9900 | 0,0000 199,0900 | 0,0000 199,0900
2      236,2800    406,2700 | 0,0000 236,2800 | 0,0000 236,2800
3      157,6000    495,7600 | 0,0000 157,6000 | 0,0000 157,6000
4      306,1500    356,2100 | 0,0000 306,1500 | 0,0000 306,1500
5      243,3600    518,9000 | 0,0000 243,3600 | 0,0000 243,3600
6      358,1700    393,4600 | 0,0000 358,1700 | 0,0000 358,1700
7      364,9200    512,8000 | 0,0000 364,9200 | 0,0000 364,9200
8      245,6400    662,1700 | 0,0000 245,6400 | 0,0000 245,6400
9      112,0400    636,1000 | 0,0000 112,0400 | 0,0000 112,0400
66     115,7200    453,3600 | -0,0030 115,7170 | 0,0030 115,7200
069    107,4700    451,5800 | -0,0033 107,4667 | 0,0033 107,4700
69     105,9400    453,0900 | -0,0033 105,9367 | 0,0033 105,9400

Lista obserwacji nie wyznaczających przemieszczeń oczekiwanych

Rodzaj      C      L      P      Pomiar      Wart. obl.      Różn. (Bł.max.)      Błąd pom.      n
Kier. poziomy      3      9      50,96155      50,96313      0,0016      (0,0004)      0,0001      10,6 ***
Kier. poziomy      3      69     174,93204      174,93018      -0,0019      (0,0006)      0,0002      8,9 ***
Kier. poziomy      3      4      282,96894      282,96727      -0,0017      (0,0004)      0,0001      11,1 ***
Kier. poziomy      3      5      347,75295      347,75709      0,0041      (0,0004)      0,0001      27,6 ***
Kier. poziomy      1      69     60,12117      60,12312      0,0020      (0,0006)      0,0002      9,3 ***
Kier. poziomy      1      4      306,92273      306,92175      -0,0010      (0,0004)      0,0001      6,5 ***

```

Kier. poziomy	4	3	39,55886	39,55803	-0,0008	(0,0004)	0,0001	5,5	***
Kier. poziomy	2	69	134,02498	134,01336	-0,0116	(0,0006)	0,0002	55,4	***
Kier. poziomy	5	4	40,85312	40,84985	-0,0033	(0,0004)	0,0001	21,8	***
Kier. poziomy	5	3	334,17711	334,17878	0,0017	(0,0004)	0,0001	11,2	***
Długość	3	069	64,66800	66,81983	2,1518	(0,0027)	0,0009	2390,9	***
Długość	1	069	128,84720	128,84399	-0,0032	(0,0027)	0,0009	3,6	***
Długość	2	069	135,61820	136,54674	0,9285	(0,0027)	0,0009	1031,7	***

Raport ten wskazuje na niezgodność z oczekiwanymi wartościami obserwacji wykonanych w celu kontroli celownika 69 i bolca 069, znajdujących się w górnej części sekcji 6. Wskazuje też na obserwacje wykonane między słupami obserwacyjnymi 3 i 5, być może w czasie pomiaru sieci punktów odniesienia wystąpiły błędy centrowania, poziomowania lub celowania.

## 8 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizy i opracowania wykonane podczas realizacji opisanej w pracy koncepcji modernizacji klasycznej sieci poziomej do wyznaczania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych, pozwalają na sformułowanie wniosków o charakterze ogólnym, jak i na wskazanie kierunków badań pozwalających rozszerzyć tę koncepcję na inne rodzaje sieci i konstrukcje pomiarowe (sieć pionową i konstrukcję „stałej prostej”) w celu pełniejszej kontroli obiektu hydrotechnicznego.

### *A. Wnioski ogólne dotyczące procesu modernizacji sieci kontrolnej*

- ◆ Ze względu na opisane w niniejszej pracy możliwości wykorzystania wyników modelowania MES do weryfikacji układu punktów kontrolnych na obiekcie oraz wskazywania dodatkowych lokalizacji punktów, uwzględnienie takich analiz w procesie modernizacji sieci może przyczynić się lepszemu, bardziej wiarygodnemu ocenie bezpieczeństwa i stanu technicznego obiektu dokonywanym na podstawie wyników monitorowania geodezyjnego. Warunkiem tego jest wskazanie nie tylko punktów charakterystycznych dla pracy obiektu, ale też i innych punktów przydatnych dla interpretacji specjalistycznych wykonywanych na potrzeby oceny stanu obiektu.
- ◆ Mając na celu podniesienie wiarygodności pomiaru geodezyjnego i jego przydatności jego wyników do interpretacji specjalistycznej – projekt sieci musi uwzględniać prognozy zachowania się obiektu pod wpływem zmiennych obciążeń (wynikających głównie ze stopnia napełnienia zbiornika).
- ◆ Potrzebne wydaje się gromadzenie (archiwizowanie) wyników geodezyjnych pomiarów kontrolnych oraz wyników modelowania numerycznego dla obiektów hydrotechnicznych. Porównanie i analiza danych otrzymanych z obu źródeł pozwoli na przygotowanie danych dla Baz Wiedzy o przemieszczeniach punktów obiektu. Dane te mogą stać się podstawą dla projektowania rozwiązań w różnych etapach modernizacji sieci już istniejących jak i zbiorem wskazówek pomocnych przy wykonywaniu projektu sieci dla nowego obiektu.
- ◆ Projekt sieci kontrolnej wykonywany przez geodetę powinien być skonsultowany z hydrotechnikami i specjalistami w zakresie pracy tego typu konstrukcji, co podniesie stopień zaufania do wyników tego pomiaru..

- ◆ Wskazane byłoby, aby specjalista wykonujący model numeryczny zapory, na etapie tworzenia sieci MES skonsultował się z kierownikiem zespołu pomiarowego w celu lokalizacji wybranych węzłów w miejscu rzeczywistej stabilizacji znaków pomiarowych. Pozwoli to na uzyskanie większej dokładności kalibracji modelu i na wykorzystanie wyników modelowania w trakcie terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego.
- ◆ Niezależna od wyników obserwacji geodezyjnych kontrola terenowa może pełnić rolę: 1) kontroli pomiaru na poziomie błędów grubych, 2) weryfikacji adekwatności modelu numerycznego, 3) diagnozy stanu awaryjnego obiektu.  
Taka kontrola przyczynia się do podniesienia wiarygodności obserwacji geodezyjnych poprzez ich konfrontację z wynikami modelowania numerycznego wykonanego przez specjalistów z zakresu hydrotechniki.
- ◆ Proponowana terenowa kontrola niewyrównanych obserwacji może być szczególnie przydatna w automatycznych systemach pomiarowych operujących tachimetrami wyposażonymi w ATR (Automatic Target Recognition). Ze względu na brak wizualnej kontroli celowania w czasie trwania pomiaru utrudnione jest stwierdzenie prawidłowej identyfikacji celu przez instrument. Pomiaru wykonane do znaków uszkodzonych bądź przesuniętych lub wykonane w sytuacji niekorzystnych odbić sygnału od elementów otoczenia i tym samym niezgodne z modelem obiektu mogą zostać szybko wykryte i zasygnalizowane odpowiednim komentarzem.
- ◆ Z uwagi na to, że specyfika i dokładność pomiarów GPS nie kwalifikuje tej techniki do konstruowania autonomicznych sieci kontrolnych dla obiektów hydrotechnicznych – należy dążyć do przekształcania sieci odniesienia w sieci hybrydowe, w których pomiary wektorów GPS uzupełnione są pomiarami klasycznymi. Ponadto, nie jest celowe dążenie do wprowadzenia pomiarów GPS na stanowiskach obserwacyjnych (filarach) od strony odpowietrznej zapory oraz na punktach kontrolowanych tej budowli z uwagi na znaczne ograniczenia horyzontu. Wyjątkiem są punkty na koronie obiektu.

### *B. Wnioski dotyczące kierunków dalszych prac*

- ◆ Przydatne byłoby opracowanie metodyki zbierania, ujednolicania i archiwizacji wyników geodezyjnych pomiarów przemieszczeń w celu stworzenia Baz Wiedzy o zachowaniu się poszczególnych obiektów (na poziomie danych o przemieszczeniach pojedynczych punktów kontrolowanych).
- ◆ Celowym byłoby zbadanie możliwości kalibracji modelu numerycznego na podstawie wyników pomiarów poziomych i pionowych. Ze względu na niezależność sieci poziomej (kątowno-liniowej) i sieci niwelacyjnej należałoby opisać sposób w jaki dane te byłyby integrowane. Dostępność oprogramowania do modelowania pracy obiektu w przestrzeni trójwymiarowej (3D) i wprowadzenie kalibracji w dwóch płaszczyznach X, H pozwoli na większą dokładność uzyskanych prognoz pracy konstrukcji.
- ◆ Powstaje też pytanie czy wartości wyznaczonych przemieszczeń pionowych mogą służyć do kontroli (zgrubnej) poprawności obserwacji w sieci poziomej ? Odpowiedź na to pytanie jest utrudniona ze względu na rozdzielność lokalizacji znaków sieci poziomych i pionowych. Aby taka kontrola była możliwa należałoby przygotować wskazania do wzajemnego sytuowania znaków poziomych i reperów, uwzględniającego wyniki prognozowania pracy obiektu.
- ◆ Ze względu na ograniczenia środków finansowych na kontrolę obiektów często pomiar geodezyjny zostaje ograniczony do pomiaru niwelacyjnego i badania przemieszczeń punktów kontrolnych na koronie obiektu metodą „stałej prostej”. Pomiar sieci poziomej, umożliwiający pełny opis stanu obiektu jest w przypadku takiego ograniczenia wykonywany w większych odstępach czasu. Dlatego wskazane byłoby opracowanie algorytmu terenowej kontroli dla pomiaru metodą „stałej prostej”, skutkiem czego byłoby podniesienie wiarygodności tego pomiaru. Opracowanie takiego algorytmu wymagałoby niewielkich modyfikacji sposobu kontroli opisanego w tej pracy.
- ◆ Przydatne byłoby opracowanie zasad integrowania rozpatrywanych dotychczas oddzielnie sieci dwuwymiarowej 2D (X,Y) oraz jednowymiarowej 1D (H) bądź 1D (X) (stała prosta). Przy jednoczesnym wykorzystaniu modelowania numerycznego pracy obiektu umożliwiłoby to udoskonalenie terenowej kontroli poprawności obserwacji w tych sieciach.

## 9 LITERATURA

- Bałut A. (1998): *Zastosowanie GPS w geodezji inżynierskiej i pomiarach odkształceń*. Półrocznik Geodezja. t. 4, z. 1, Wydawnictwo AGH, Kraków 1998.
- Bałut A., Gocał J. (1997): *Klasyczne i satelitarne techniki pomiarowe w pracach tyczeniowych*. Zeszyty naukowe AR we Wrocławiu Nr 324, Geodezja i Urządzenia Rolne XIV, Wrocław, 1997.
- Broś B. (1984): *Awarie zbiorników osadowych na odpady paleniskowe*. Gospodarka Wodna nr 10/84, Warszawa, 1984.
- Bryś H., Przewłocki S. (1998): *Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- Chrzanowski A. (1981): *A comparison of different approaches into the analysis of deformation measurements*. XVI International Congress of FIG, Commission 6, 1981.
- Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowski A., Massiera M., Whitaker C. (2002): *Monitoring and numerical modelling of deformations of large dams – a case study*. Technical Sciences No 5, 2002.
- Czarnecki K. (1997): *Geodezja współczesna w zarysie*. Wydawnictwo Wiedza i Życie, Warszawa, 1997.
- Dłużewski J. (1997): *HYDRO-GEO - program metody elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- Dłużewski J., Popielski P., Fiedler K. (2000): *Analiza numeryczna zachowania się zapory kamienną przy zmiennych obciążeniach (napelnianie zbiornika) z uwzględnieniem wyników badań geofizycznych*. Geotechnika – Janusz Dłużewski, Warszawa lipiec 2000.
- Dłużewski J., Ciuhak K., Tomaszewicz A., Jankowski W. (2001): *Wpływ konsolidacji podłoża na osiadania i stan bezpieczeństwa zapór czołowych Jeziorsko i Mietków w ujęciu metody elementów skończonych*. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 1/2001.
- Dłużewski J., Tomaszewicz A., Jankowski W., Ciuhak K. (2001): *Wykorzystanie modeli numerycznych przy ocenie stanu technicznego budowli hydrotechnicznych*. IX Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Rytro, 29-31 maj, 2001.

- Fahsa I. (1991): *Badanie możliwości integrowania klasycznych technologii geodezyjnych z niegeodezyjnymi w kontroli zapór wodnych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Warszawa 1991.
- Fanti K., Fiedler K., Kowalewski J., Wójcicki S. (1972): *Budowle piętrzące*. Arkady, Warszawa 1972
- Fiedler K. i inni (2007): *Awarie i katastrofy zapór – zagrożenia, ich przyczyny i skutki oraz działania zapobiegawcze*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2007.
- Gajderowicz I. (1997): *Sieci poziome z dwuwymiarowymi wektorami GPS*. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu Nr 324, Geodezja i Urządzenia Rolne XIV, Wrocław, 1997.
- Halecki B. (2007): *Sensorowe techniki badania deformacji lokalnych budowli na wybranych obiektach hydrotechnicznych*. Praca magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Warszawa, 2007.
- Hrabowski W., Golonka E., Stanke A. (1992): *Automatyczne systemy technicznej kontroli zapór oraz sygnalizacja ich awarii*. V Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Międzybrodzie Żywieckie, 1-3 czerwca 1992.
- ICOLD (1973): *Lessons from dam incidents*. Paris, 1973.
- ICOLD (1995): *Dam failures, statistical analysis, Bulletin 99*. Paris, 1995.
- Jankowski W., Kloze J., Sieński E., Wita A. (2007): *Propozycje zmian organizacyjno-prawnych dla poprawy stanu bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę w Polsce*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Stare Jabłonki, 19-22 czerwca 2007.
- Jankowski W., Kloze J., Wita A. (2007): *Ocena stanu bezpieczeństwa budowli piętrzących w Polsce w świetle istniejących regulacji prawnych*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Stare Jabłonki, 19-22 czerwca 2007.
- Kleiber M. (1985): *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*. PWN, Warszawa – Poznań, 1985.
- Lang W. (1929): *Deformationsmessungen an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie*. Verlag der Abteilung für Landestopographie Bern, 1929.
- Lazzarini T. oraz zespół współautorów (1977): *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. PPWK, Warszawa 1977.
- Londe P. (1981): *Wnioski z katastrof zapór ziemnych*. Gospodarka wodna Nr 7-8, 1981.



- Lutes J.A. (2002): *Automated dam displacement monitoring using a robotic total station*. Technical Report No. 214, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, February 2002.
- Mulawka J. (1996): *Systemy ekspertowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1996.
- Nowak E. (1986): *Teoretyczne i praktyczne aspekty geodezyjnego rachunku wyrównawczego*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Geodezja z. 27, 1986.
- Nowak E. (2000): *Algorytmy numeryczne w geodezji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- Opyrchał L., Popielski P., Tomaszewicz A., Jankowski W. (2007): *Wpływ zmienności parametrów na współczynnik stanu równowagi skarpy oraz kształt powierzchni poślizgu*. Archiwum Inżynierii Lądowej (w druku), Warszawa 2007.
- Papo H. B., Perelmuter A. (1993): *Two-step analysis of dynamical network*. Manuscripta Geodetica, Vol. 18, No 6.
- Popielski P. (2000): *Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2000.
- Popielski P., Stasiński J. (2005): *Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładności obliczeń numerycznych, analiza wstecz*. XX Ogólnopolska Konferencja – Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła-Ustroń, 1-4 marca 2005.
- Popielski P., Zaczek-Peplinska J. (2007): *Wykorzystanie modeli numerycznych w eksploatacji budowli piętrowych*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Stare Jabłonki, 19-22 czerwca 2007.
- Prószyński W. (2007): *On integration of multiple-source data in the survey of structural displacement*. Reports of Geodesy – w druku, 2007.
- Prószyński W., Kwaśniak M. (2002): *Niezawodność sieci geodezyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- Prószyński W., Kwaśniak M. (2006): *Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Pojęcia i elementy metodyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- Prószyński W., Zaczek-Peplinska J. (2005): *Kompleksowa modernizacja geodezyjnej sieci kontrolnej środkiem do podniesienia wiarygodności wyników pomiarów przemieszczeń*. XI Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Zakopane-Polana Zgorzelisko, 8-11 maja 2005.

- Rakowski G., Kacprzyk Z. (2005): *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- Roland H., Moriarty B. (1990): *System safety engineering and management*. John Willey & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, 1990.
- Sanierung der Kölnbreinsperre (1991): *Projektierung und Ausführung*. Österreichische Draukraftwerka AG., 05.1991.
- Sorbjan P. (2004): *Zastosowanie systemu ekspertowego do bieżącej kontroli stanu technicznego zapór ziemnych*. Praca doktorska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa, 2004.
- Szostak-Chrzanowski A. (2006): *Interdyscyplinarne podejście do analizy deformacji w problemach inżynierskich i górniczych poprzez połączenie pomiarów geodezyjnych z modelowaniem deterministycznym*. Autoreferat rozprawy habilitacyjnej. Fredericton, New Brunswick, 2006.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Bond J. (2007): *Deterministic modeling of deformations as a tool for designing geodetic monitoring schemes*. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne Problemy Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa – Białobrzegi, 30-31 marca 2007.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Chen Y.Q. (1994): *Error propagation in the finite element analysis of deformations*. XX International Congress of FIG, Melbourne, Australia, 1994.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Kuang S.L. (1993): *Propagation of random errors in finite element analyses. First Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics*. Montreal, Quebec, March 27-30 1993.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Kuang S.L., Lambert A. (1992): *Finite element modelling of tectonic movements in Western Canada*. 6th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, 24-28 February 1992.
- Szostak-Chrzanowski A., Massiera M., Chrzanowski, Hill C. J. (2001): *Use of geodetic monitoring surveys in verifying design parameters of large earthen dams at the stage of filling the reservoir*. 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 19-22 March 2001.
- Szostak-Chrzanowski A., Massiera M. (2004): *Modelling of deformations during construction of a large earth dam in the la grande complex, Canada*. Technical Sciences No 7, 2004.

- Szostak-Chrzanowski A., Massiera M., Chrzanowski A., Le Hoan F., Whitaker C. (2002): *Verification of material parameters of earthen dams at Diamond Valley Lake using geodetic measurements*. XXII International Congress of FIG, Washington, DC USA, 2002.
- Urbański A., Truty A. (2005): *Współczesne możliwości modelowania komputerowego w zagadnieniach geotechniczno-budowlanych*. XX Ogólnopolska Konferencja – Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła-Ustroń, 1-4 marca 2005.
- Walo J., Prószyński W., Woźniak M., Pachuta A., Szpunar R. (1999): *Sieci hybrydowe w monitorowaniu budowli wodnych na przykładzie EW „Żarnowiec”*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Automatykacji w Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa, 15–16 marca 1999.
- Walo J., Szpunar R., Pachuta A. (2004): *Pomiary satelitarne GPS w poziomej sieci Pienińskiego Poligonu Geodynamicznego*. Monografia: Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skałkowego w rejonie Czorsztyna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- Wasilewski A., Rzepecka Z. (2001): *Zastosowanie GPS w geodezji inżynierskiej*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, z.102/2001.
- Wita A. (2005): *Organizacja bezpieczeństwa zapór – Polska na tle wybranych krajów Europy*. XI Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Zakopane-Polana Zgorzelisko, 8-11 maja 2005.
- Woźniak M. (2005): *Geodetic measurement systems in monitoring of displacements*. „Reports of Geodesy”, No. 3 (74), 2005.
- Woźniak M., Prószyński W., Czarnecki K. oraz zespół współautorów (1998): *Opracowanie studialne dotyczące zastosowania pomiarów satelitarnych i precyzyjnych pomiarów liniowych do wyznaczania bezwzględnych przemieszczeń poziomych na koronie zbiornika ESP Żarnowiec*. Materiały niepublikowane, Warszawa, 1998.
- Woźniak M., Prószyński W., Wojciechowski J., Jastrzębski S., Walo J., Pachuta A. (2003): *Doświadczenia z badań przemieszczeń poziomych oraz zmian geometrii korony zbiornika wodnego*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Automatykacji w Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa-Białobrzegi, 27-28 marca 2003.
- Zaczek-Peplinska J. (1999): *Analiza porównawcza wybranych algorytmów identyfikacji układu odniesienia w sieciach trygonometrycznych pełnych*. Praca dyplomowa

magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii,  
Warszawa, 1999.

Zaczek-Peplinska J. (2004): *Analiza możliwości wstępnej kontroli geodezyjnych pomiarów przemieszczeń na podstawie danych pomiarowych uzyskanych w galerii budowli piętrzące*. XI Międzynarodowe Sympozjum GEOTECHNIKA-GEOTECHNICS 2004, Gliwice-Ustroń 19-22 października 2004.

Zaczek-Peplinska J. (2005): *Praktyczne potrzeby modernizacji sieci kontrolnych dla dużych obiektów hydrotechnicznych*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne Problemy Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa – Białobrzegi, 1 – 2 kwietnia 2005, (materiały konferencyjne - CD).

Zaczek-Peplinska J. (2005): *Practical demands of modernisation of control networks for large hydrotechnical objects*. Reports of Geodesy, No. 3 (74), 2005.

Zaczek-Peplinska J. (2007): *Omówienie wybranych wariantów modernizacji sieci kontrolnych zapór wodnych*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Stare Jabłonki, 19-22 czerwca 2007.

Zaczek-Peplinska J., Popielski P. (2007): *Investigation of possibilities to use FEM modelling in the process of modernisation of control networks for concrete dams*. Reports of Geodesy – w druku, 2007.

Zienkiewicz O.C. (1972): *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1972.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (1989): *The Finite Element Method*. McGraw Hill, London, Toronto, 1989.

Wykorzystane materiały Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór Instytutu Meteorologii  
Gospodarki Wodnej (IMGW OTKZ):

[Raport1] Hrabowski W. i inni: *Raport o stanie technicznym i bezpieczeństwie budowli piętrzących wodę w Polsce według stanu na 30 września 1998 roku*. Warszawa, 1998.

[Raport2] Praca zbiorowa: *Raport o stanie technicznym i bezpieczeństwie budowli piętrzących wodę w Polsce za rok 2001*. Warszawa, 2001.

[M1] Beynar-Czeczott E., Reszka T. *Interpretacja bieżących wyników badań i pomiarów kontrolnych oraz ocena stanu technicznego zapory w Besku*. IMGW, Zakład Inżynierii Wodnej, Warszawa 1981.

- [M2] Dłużewski J., Gajewski T., Tomaszewicz A., Boros-Meinike D. *Analiza wytrzymałościowa sekcji betonowej celem wcześniejszego wykrycia ewentualnych uszkodzeń i potwierdzenia prognozy przemieszczeń na przykładzie sekcji 8 zapory w Besku*. IMGW OTKZ, Warszawa 1995.
- [M3] Dłużewski J. i inni: *Przykłady obliczeń budowli inżynierskich za pomocą metody elementów skończonych z wykorzystaniem programu HYDRO-FIL*. Politechnika Warszawska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Warszawa 1993.
- [M4] Boros-Meinike D. *Analiza i interpretacja wyników pomiarów kontrolnych oraz ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa zapory Besko za okres X 2002 do VII 2004 roku*. IMGW OTKZ, Warszawa 2004.
- [M5] Wita A., Zielińska M., Mirosław-Świątek D.: *Sprawozdanie z prac wykonanych w temacie 175/U/93-TKZ: Metoda elementów skończonych w modelowaniu filtracji*. IMGW OTKZ, Warszawa 1993.
- [M6] Dłużewski J., Ciuhak K., Tomaszewicz A., Jankowski W.: *Temat A-8. Opracowanie modelu numerycznego budowli piętrzącej Mietków*. IMGW OTKZ, Warszawa, grudzień 1999.
- [M7] Opyrchał L.: *Pomiary i weryfikacja odczytów aparatury kontrolno-pomiarowej na zaporze Besko – ASTKZ Besko – Piezometry*. IMGW OTKZ, Dobczyce, maj 1995.
- [M8] Gamdzyk J., Wróblewski M.: *Opracowanie wytycznych technicznych do wykonywania pomiarów przemieszczeń metodami geodezyjnymi*. IMGW OTKZ, Warszawa, grudzień 1995.
- [M9] Boros-Meinike D. *Analiza i interpretacja wyników pomiarów kontrolnych oraz ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa zapory Besko za okres XI 1998 do X 1999 roku*. IMGW OTKZ, Warszawa 1999.
- [M10] Dłużewski J., Gajewski T., Tomaszewicz A., Boros-Meinike D. *Analiza przemieszczeniowo-wytrzymałościowa sekcji 8 zapory betonowej w Besku w celu interpretacji pomierzonych przemieszczeń*. IMGW OTKZ, Warszawa 1995.

Akty prawne:

- [1] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie.
- [2] Prawo budowlane. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 (tekst jednolity) – sierpień 2001.
- [3] Prawo wodne. Ustawa z dnia 18 lipca 2001.
- [4] Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać objekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 20 grudnia 1996.