

JANINA ZACZEK-PEPLINSKA\*, PAWEŁ POPIELSKI\*\*

## LOKALIZACJA PUNKTÓW KONTROLNYCH NA ŚCIANIE ODPOWIETRZNEJ ZAPORY BETONOWEJ NA PODSTAWIE MODELOWANYCH GRADIENTÓW PRZYRÓSTÓW PRZEMIESZCZEŃ

### LOCATING CONTROL POINTS ON A DOWNSTREAM FACE OF A CONCRETE DAM BASING ON MODELLED GRADIENTS OF INCREASE DISPLACEMENT

#### Streszczenie

Ze względu na znajomość danych pomiarowych opisujących zachowanie się konstrukcji zapory w latach poprzedzających modernizację sieci geodezyjnej do wskazania nowych lokalizacji celowników lub weryfikacji projektu geodezyjnej sieci kontrolnej można wykorzystać skalibrowane za pomocą analizy wstecz modele obliczane metodą elementów skończonych (MES).

W artykule opisano metody lokalizacji punktów kontrolowanych na ścianie odpowietrznej zapory betonowej bazujące na analizie wyników modelowania MES. Opisano i zilustrowano przykładem obliczeniowym metodę porównywania różnych modelowanych stanów obiektów: normalnego i symulowanych awaryjnych oraz metodę analizy gradientów przyrostów przemieszczeń konstrukcji będących wynikiem działania zmiennych sił zewnętrznych, w przypadku zapory – zmian poziomu zwierciadła wody górnej.

*Słowa kluczowe: geodezyjne pomiary przemieszczeń, modernizacja geodezyjnej sieci kontrolnej, metoda elementów skończonych (MES)*

#### Abstract

In view of the knowledge of survey data which describe the behaviour of a dam's construction before the control network was modernised, models calibrated with the use of the backward analysis methods and calculated with the use of the Finite Element Method (FEM) may be used to point new locations of targets or to verify the design of the control network.

The paper discusses methods of locating controlled points on downstream face of a concrete dam, basing on the results of the FEM analysis. The method of comparing various modelled conditions of structures are discussed and illustrated, such as: normal and simulated emergency conditions and the method of analysing gradients of increase displacements of structures, resulting from changing external forces – in the case of a water dam – changes of the upper water mirror level.

*Keywords: geodetic survey of displacements, modernisation of geodetic control network, Finite Elements Method (FEM)*

\* Dr inż. Janina Zaczek-Peplinska, Zakład Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych, Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska.

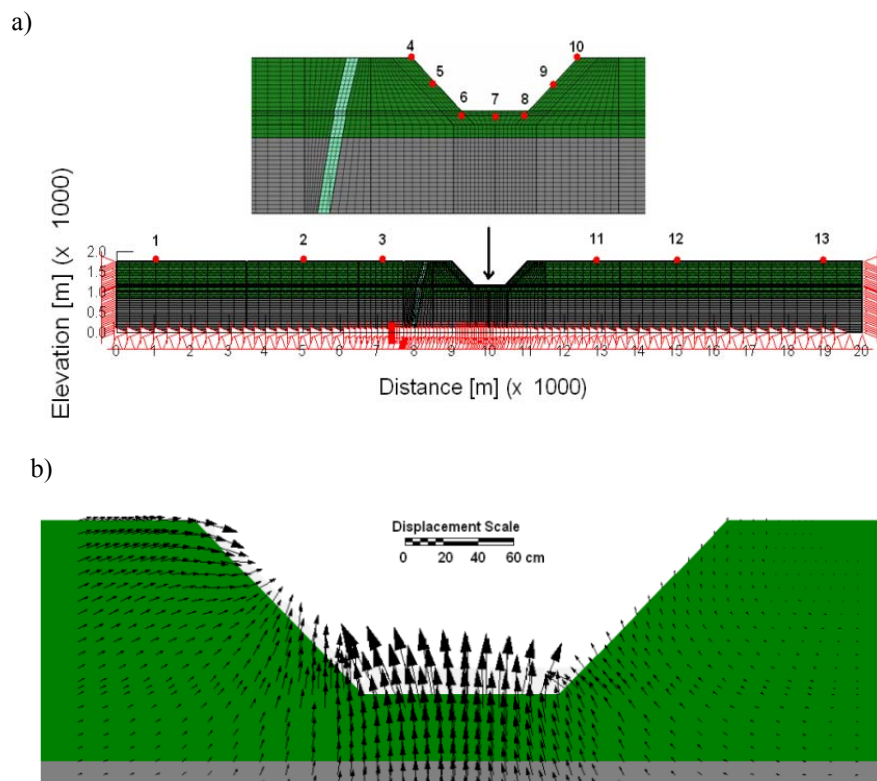
\*\* Dr inż. Paweł Popielski, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.

## 1. Wstęp

Projektowanie i modernizacja geodezyjnych sieci kontrolnych do badania przemieszczeń obiektów inżynierskich jest zagadnieniem istotnym z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowania obiektu. Wraz z rozwojem technologii pomiarowych i obliczeniowych mamy coraz większe możliwości bardziej wiarygodnego i dokładniejszego monitorowania zmian obiektu inżynierskiego.

Modernizacja sieci kontrolnej tym różni się od projektu, że przystępując do analiz, dysponujemy informacjami archiwalnymi opisującymi bardzo dokładnie stan i pracę obiektu w różnych warunkach, są to m.in.:

- wyniki pomiarów kontrolnych,
- wyznaczone krótko- i długookresowe tendencje zmian,
- obserwowane zależności między zjawiskami,
- analizy obserwowanych przemieszczeń poszczególnych elementów.



Rys. 1. Modelowanie metodą elementów skończonych przemieszczeń gruntów podłoża (eksploatacja złóż metodą odkrywkową) [6]: a) siatka elementów skończonych dla złoża oraz warstw podłoża, b) całkowite (łącznie) modelowane przemieszczenia po częściowej eksploatacji złoża

Fig. 1. Finite element modeling of soil deformation for open pit mine: a) finite element mesh, b) cumulative displacement field after all excavations

W czasie modernizacji może okazać się, że geodezyjną sieć kontrolną należy rozszerzyć/uzupełnić o punkty umieszczone w miejscach największych – do tej pory niekontrolowanych przemieszczeń. Miejsca te można wskazać, analizując pracę konstrukcji na podstawie zebranych już w trakcie wcześniejszych pomiarów kontrolnych danych. Wykonanie modelu numerycznego obiektu już na etapie projektowania może pozwolić na optymalne zaplanowanie położenia punktów sieci kontrolnej.

Na szczególną uwagę w dziedzinie zastosowania modelowania numerycznego w celu prognozowania przemieszczeń zarówno gruntu, jak i konstrukcji i ich weryfikacji na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych zasługują prace realizowane w Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New Brunswick przez prof. Adama Chrzanowskiego i prof. Annę Szostak-Chrzanowski [5, 6]. Przykładem wykorzystania modelowania metodą elementów skończonych w geotechnice są analizy wykonane w celu prognozowania zachowania podłoża podczas eksploatacji złóż mineralnych metodą odkrywkową (rys. 1).

## **2. Uzupelnienie zbioru punktów kontrolowanych (celowników) na podstawie modelowania pracy sekcji zapory betonowej za pomocą MES**

Większość zapór w Polsce jest użytkowanych dłużej niż 50 lat. W czasie kiedy je projektowano 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 pochylomierzy i szczelinomierzy. Sieć celowników zlokalizowanych od strony odpowietrznej (dolnej wody) zapory najczęściej pozostawała niezmienną.

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 pęknięć 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, wskazane na podstawie wyników wielokrotnego modelowania numerycznego.

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 ulegały 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 zapórę. 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. Aby szybko wykryć nieprawidłowości pracy konstrukcji, miejsca takie powinny być szczególnie kontrolowane. 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 różne stany pracy obiektu (różne scenariusze zdarzeń, różne poziomy ZWG),
- analiza porównawcza uzyskanych modeli,
- wskazanie nowych lokalizacji celowników.

### 3. Przygotowanie modeli numerycznych obiektów hydrotechnicznych

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.

W celu 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 doboru warunków zmiennych, głównie poziomu piętrzenia. Kolejne etapy przygotowania modelu przedstawiono na rys. 2.

#### 3.1. Ustalenie schematu obliczeniowego i dyskretyzacja

Aby przemieszczenia obliczone na podstawie modelu były jak 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. celownikom, reperom i punktom „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 najbardziej wiarygodnych, nienarzucając zaś takiego warunku na strukturę siatki MES spowodowałoby konieczność interpolacji poszukiwanych wartości.

### 3.2. 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, opisujące w sposób najbardziej zbliżony stany rzeczywiste z okresów kampanii pomiarowych).

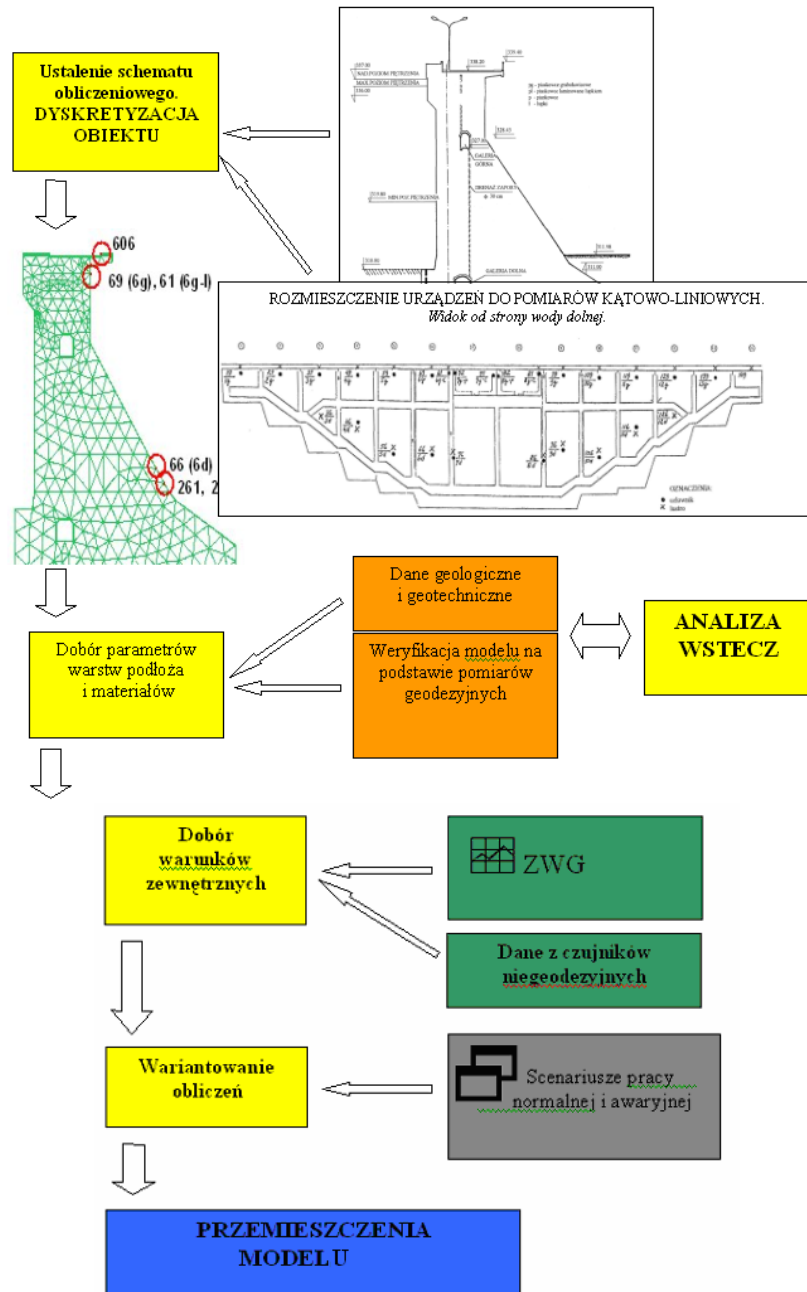
Często w obliczeniach należy uwzględniać zmiany parametrów materiałowych wynikających np. z destrukcyjnego działania wody lub długotrwałego oddziaływania obciążeń konstrukcji. W praktyce inżynierskiej spotyka się często zjawiska niezwykle istotne ze względu na bezpieczeństwo obiektu, których ocena jest 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 obciążeń).

Znając obciążenia 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 stosowanych do budowy obiektu.

### 3.3. 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



Rys. 2. Etapy przygotowania modeli numerycznych

Fig. 2. Stages of preparation of numerical models



zarejestrowana w systemie i zweryfikowana przez sprawdzenie lat hydrologicznych (tj. lat wodowskazowych) powinna być wprowadzona do obliczeń z dokładnością centymetrową.

Obciążenia takie, jak np. drgania sejsmiczne należy traktować jako nadzwyczajne i trudne do przewidzenia [5].

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 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.

### 3.4. 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:

- I. Wygenerowanie/zasymulowanie w podłożu naprężeń początkowych i ciśnienia porowego wynikających z układu warstw gruntu i poziomu wody gruntowej występującej w analizowanym przekroju (rys. 3a).
- II. Modelowanie wykonania konstrukcji zapory, tzw. zbiornik suchy (rys. 3b)).
- III. Dodanie obciążeń wynikających z napełnienia zbiornika wodą. Obciążenia te przykłada się do ściany odwodnej (wody górnej) zapory i dna zbiornika – wartości obciążeń zależą od rzędnej napełnienia zbiornika (ZWG). Przykłada się też obciążenia do przesłony przeciwfiltracyjnej oraz stopy zapory (rys. 3c)).



Rys. 3. Etapy obliczeń modelu MES

Fig. 3. Stages of FEM calculations

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 przeciwfiltracyjnej (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 z uwzględnieniem wszystkich ww. stanów wody górnej (ZWG).

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

Ze względu na to, że 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.

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 są największe.

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.

#### 4. Model numeryczny MES pracy sekcji 6 zapory Besko

Obliczenia numeryczne współpracy zapory betonowej Besko i podłoża gruntowego wykonano za pomocą metody elementów skończonych (MES). Ze względu na dostępne rozpoznanie geologiczne obliczenia przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia. Do symulacji pracy podłoża przyjęto sprężysto-plastyczny model ośrodka gruntowego bazujący 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.

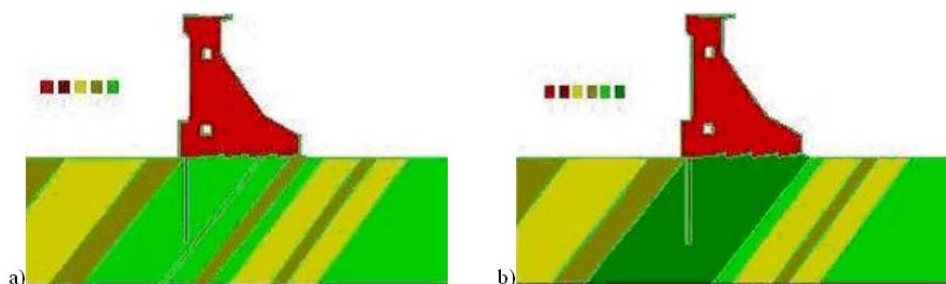
W modelu numerycznym wykorzystano rozpoznanie podłoża zgodnie z dokumentacją geologiczno-inżynierską omówioną w opracowaniach [2, 3]. Odtworzono występujący w analizowanym przekroju układ i nachylenie poszczególnych warstw materiałów. Wartości parametrów materiałowych podłoża zaczerpnięto z wymienionych wyżej opracowań.



Została wykonana analiza wstecz weryfikująca parametry materiałowe warstwy znajdującej się bezpośrednio pod stopą zapory. Na rysunku 4 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 [1].

W związku ze zmianami w podłożu wynikającymi z długookresowego dociążenia gruntu konstrukcją, spiętrzeniem wody oraz zjawiskami filtracyjnymi zastosowano zmianę sztywności materiału bezpośrednio pod zaporą (osłabiono i uśredniono parametry).

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

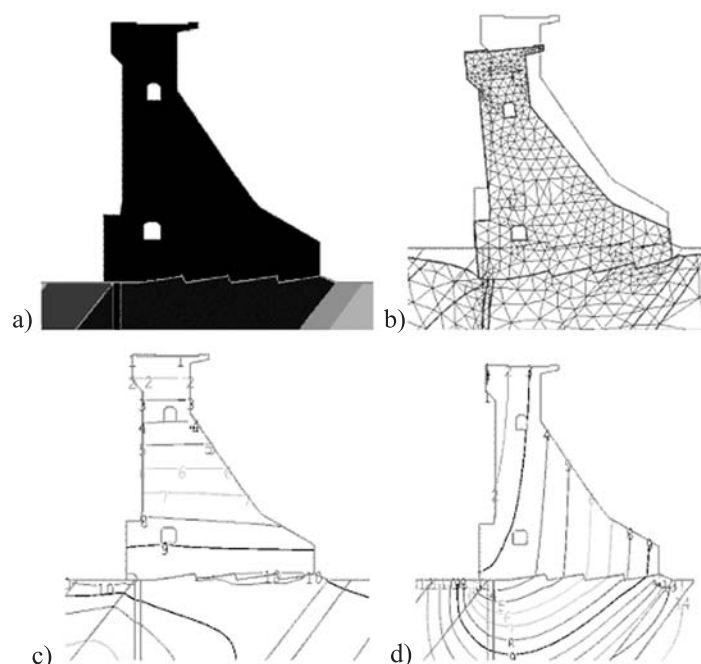
Fig. 4. Diagram of the structure and substratum layers: a) described in geological-and-engineering documentation, b) after backward analysis

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 [4].

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. Uwzględniono 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  $\gamma_{\text{betonu hydrotechnicznego}} = 22,2 \text{ kN/m}^3$ ) [2, 3].
- Wyniki obliczeń etapu II przedstawiono na rys. 5.

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 przeciwfiltracyjnej oraz stopy zapory. Jako rzędną zwierciadła wody po stronie odpowietrznej 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 [1].



Rys. 5. 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

Fig. 5. Besko Dam – the model of section 6 (stage II): a) diagram of the structure and substratum layers, b) displacements resulting from the construction weight (the reservoir without water), c) isolines of horizontal displacements with 0,0001 m interval, d) iso-lines of vertical displacements with 0,0001 m interval

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 uznano za dobre – zgodne w 75% w przedziale wyznaczonym przez dwukrotny błąd średni pomiaru geodezyjnego. Wskazują one na możliwość zastosowania modelowania MES w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej [9].

Obliczono 36 modeli numerycznych, które zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

**Zestawienie wykonanych modeli numerycznych, kolorem szarym zaznaczono modele pracy zapory przyjęte za najbardziej prawdopodobne**

ZWG [m n.p.m.]	ZWD = 307,9 [m n.p.m.] (min.)	ZWD = 309,6 [m n.p.m.] (max)			ZWD = 310,00 [m n.p.m.]	
	beton $E = 24,5 E+6$ [kPa]	beton $E = 19,6 E+6$ (-20%) [kPa]	beton $E = 24,5 E+6$ [kPa]	beton $E = 29,4 E+6$ (+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

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

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 [2, 3]. W ten sposób zasymulowano ewentualne zmiany reologiczne betonu. Różnice obliczonych wartości przemieszczeń są poniżej dokładności pomiaru geodezyjnego, co wskazuje na zasadność przyjęcia wartości  $E$  według dokumentacji projektowej:  $E = 24,50E + 6$  kPa.

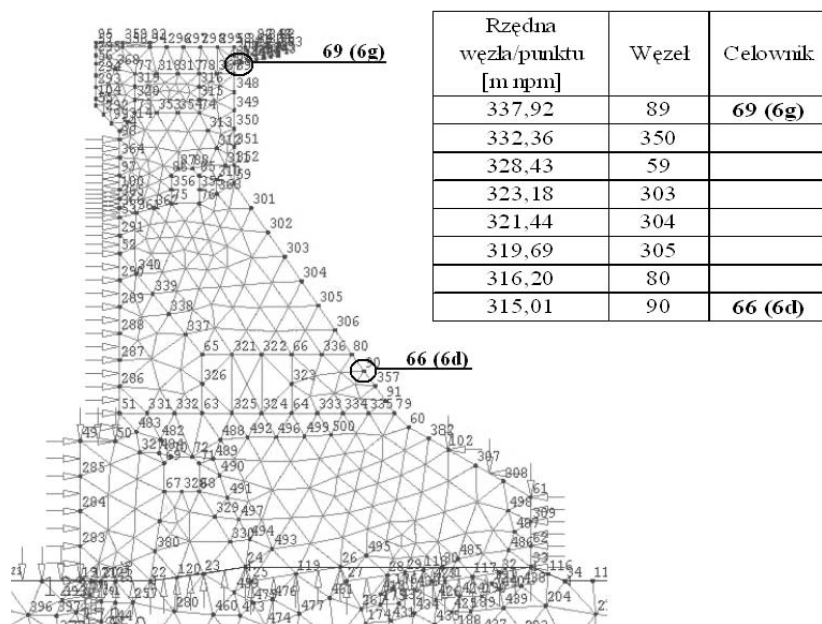
### 5. Uzupelnienie zbioru celowników na ścianie odpowietrznej zapory Besko

W ramach projektu modernizacji sieci kontrolnej do badania przemieszczeń punktów zlokalizowanych na ścianie odpowietrznej zapory Besko wykonano analizy mające na celu wskazanie obszarów konstrukcji, gdzie uzasadnione 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) 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 przemieszczenia wybranych węzłów siatki. Lokalizację węzłów na krawędzi przekroju sekcji przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Siatka węzłów MES – sekcja 6 zapory Besko

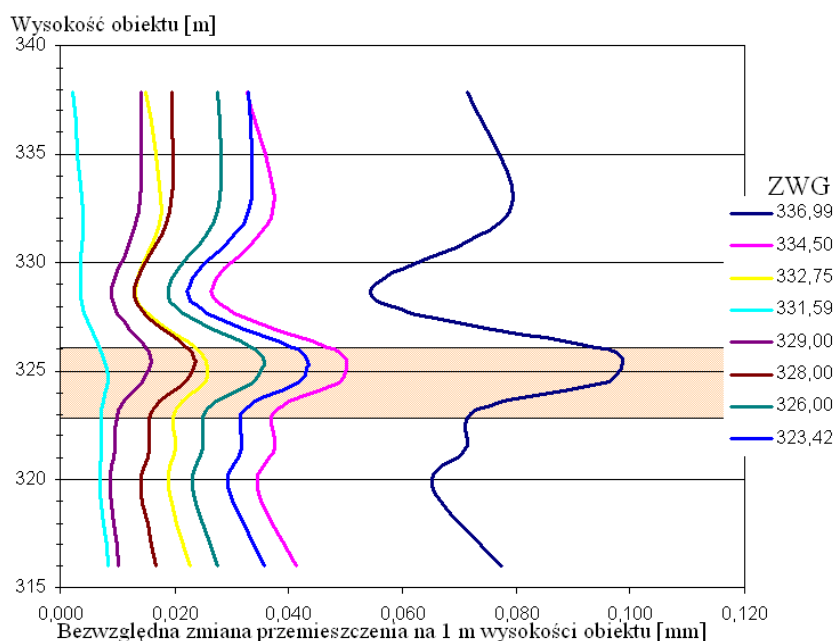
Fig. 6. Mesh of FEM nodes – section 6 of Besko Dam

Wyniki analiz w obu kierunkach pozwalają stwierdzić:

- poprawne zlokalizowanie dotychczas kontrolowanych celowników,
- potrzebę rozszerzenia zbioru celowników w czasie modernizacji przez dodanie punktów na każdej sekcji głuchej (nieprzelewowej) w sferze największych obliczonych zmian przemieszczeń na 1 m wysokości obiektu, tj. na ścianie odpowietrznej, na wysokości odpowiadającej węzłom 301–302, tj. między 324 a 326 m n.p.m.

### 6. Analiza gradientów przyrostów przemieszczeń – analiza obliczonych przyrostów przemieszczeń poziomych na jednostkę wysokości zapory

Różnice w wielkości przemieszczeń sąsiadujących ze sobą węzłów świadczą o powstawaniu naprężeń wewnątrz konstrukcji. Miejsca, gdzie naprężenia te są największe, są najbardziej narażone na zniszczenie materiału, dlatego powinny być one szczególnie kontrolowane. W celu ich wyznaczenia wykonano analizę zmian przemieszczeń węzłów na 1 m wysokości konstrukcji. Ponieważ metodami geodezyjnymi opartymi na pomiarach trygonometrycznych można badać tylko zewnętrzne powierzchnie obiektu, przeanalizowano zmiany przemieszczeń węzłów na odpowietrznej krawędzi modelu.



Rys. 7. Przyrosty przemieszczeń na jednostkę wysokości obiektu przy różnych poziomach ZWG, wyróżniono obszar największych obliczonych zmian znajdujący się między węzłami siatki MES: 303–302–301

Fig. 7. Changes of displacements on unit of height for different of the upper water mirror levels, marked area of largest calculated changes between nodes 303–302–301 in FEM grid

Analiza wykonana dla sekcji 6 zapory Besko wykazała największe zmiany przemieszczeń w przedziale ok. 324,00–326,00 m n.p.m., czyli ok. 20 m powyżej kontrolowanego celownika 66 (6d) i 12 m poniżej celownika 69 (6g). W obszarze tym różnice obliczonych przemieszczeń między sąsiednimi węzłami 301–302 i 302–303 przy największym dotychczas zanotowanym poziomie (ZWG) nie przekraczają wartości 0,10 mm na 1 m 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 zestawiono w tab. 2. Na rysunku 7 przedstawiono wykres bezwzględnych zmian wielkości przemieszczenia na 1 m wysokości zapory.

Tabela 2

**Zestawienie bezwzględnych wartości zmian obliczonych przemieszczeń węzłów na 1 m wysokości obiektu**

Numer	Granice obszaru [m]	dH [m]	ZWG [m n.p.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 [mm]							
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>									

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



## 7. Wnioski i spostrzeżenia

1. Wiarygodność wyników obliczeń numerycznych uzależniona jest od dokładności rozpoznania geologicznego i poprawności wyznaczania parametrów materiałowych.
2. Opisane powyżej wyniki analizy są zgodne z oczekiwaniami i wskazują na możliwość wykorzystania modelowania MES w eksploatacji budowli piętrzących, np. w procesie modernizacji geodezyjnej sieci kontrolnej.
3. Kolejnym etapem analizy powinna być analiza stanu naprężeń konstrukcji uwzględniająca rozkład zmian temperatury w obiekcie i możliwe zmiany w podłożu spowodowane przez zjawiska filtracyjne. Wszystkie obliczenia powinny być weryfikowane na podstawie pomiarów wykonanych na rzeczywistym obiekcie – tak aby w miejscach występowania maksymalnych przemieszczeń lokalizować kolejne celowniki (punkty kontrolne).
4. Stosowanie modeli numerycznych w eksploatacji obiektów hydrotechnicznych wymaga współpracy specjalistów wielu dziedzin.
5. Analiza porównawcza z pomierzonymi przemieszczeniami bliźniaczej sekcji nie wykazała zadowalającej zbieżności i pozwala na wysunięcie wniosku, że decydującą rolę w symulacjach betonowych obiektów hydrotechnicznych odgrywa weryfikacja parametrów podłoża.

## Literatura

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Popielski P., Zaczek-Peplinska J., *Wykorzystanie modeli numerycznych w eksploatacji budowli piętrzących*, *Gospodarka Wodna* 2/2008.
- [5] Sorbjan P., *Zastosowanie systemu ekspertowego do bieżącej kontroli stanu technicznego zapór ziemnych*, rozprawa doktorska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa 2004.
- [6] Szostak-Chrzanowski A., Massiera M., Chrzanowski A., Le Hoan F., Whitaker C., *Verification of material parameters of earthen dams at Diamond Valley Lake using geodetic measurements*, XXII International Congress of FIG, Washington, DC USA 2002.
- [7] Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Bond J., *Deterministic modeling of deformations as a tool for designing geodetic monitoring scheme*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Aktualne Problemy Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa–Białobrzegi, 30–31 marca 2007.

- [8] Zaczek-Peplinska J., Popielski P., *Investigation of possibilities to use FEM modelling in the process of modernisation of control networks for concrete dams*, Reports of Geodesy, No. 1 (82), 2007.
- [9] Zaczek-Peplinska J., *Koncepcja modernizacji klasycznych sieci poziomych do wyznaczania przemieszczeń obiektów hydrotechnicznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2008.