

ALEKSANDER URBAŃSKI\*, WŁODZISŁAW HRABOWSKI\*\*

## MODELOWANIE NUMERYCZNE ZJAWISK TERMICZNYCH, FILTRACYJNYCH I MECHANICZNYCH W WYBRANEJ SEKCJI ZAPORY W SOLINIE

### NUMERICAL MODELING OF THERMAL, FILTRATION AND MECHANICAL PHENOMENA IN SELECTED SECTION OF SOLINA DAM

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki symulacyjnej analizy numerycznej jednej z najwyższych sekcji zapory w Solinie. Pod uwagę wzięto zmienne w czasie pola temperatury, ciśnień wody i ich oddziaływanie na stan przemieszczeń i naprężeń w korpusie zapory. Wyniki porównano z pomiarami.

*Słowa kluczowe: zapora betonowa, monitoring, wpływy termiczne na konstrukcję, filtracja, stan przemieszczeń, stan naprężeń*

#### Abstract

The paper presents course and results of numerical simulations performed on the selected section of the Solina Dam. Thermal and water pressure fields variable in time were taken into account with their influence on displacements and stress state in the dam. Results of analysis were compared with measurements.

*Keywords: concrete dam, monitoring, thermal effects in structures, filtration, displacements, stresses*

\* Dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

\*\* Doc. dr inż. Włodzisław Hrabowski, „Hrabowski – Projektowanie, Badania”, Warszawa.

## 1. Wstęp

W latach 2007–2008 konsorcjum Politechnika Krakowska i firma „Hrabowski – Projektowanie, Badania”, działając na zlecenie Elektrowni Szczytowo-Pompowych S.A., wykonywała wszechstronną ocenę stanu największej w Polsce zapory betonowej w Solinie. Ocena obejmowała, między innymi, sieci pomiarowe do kontroli przemieszczeń, filtracji i temperatury oraz jakość betonów. Wyniki tych badań były konfrontowane z analizą numeryczną pracy wybranej sekcji zapory o numerze 22, dla której zestaw danych pomiarowych był najpełniejszy. Położenie oraz archiwalny rysunek sekcji wraz z podstawowymi danymi hydrotechnicznymi zapory pokazano na rys. 1.

Zapora w Solinie - podstawowe dane

$H_{\max} = 75,0$  m

pojemność zbiornika 474 mln m<sup>3</sup>

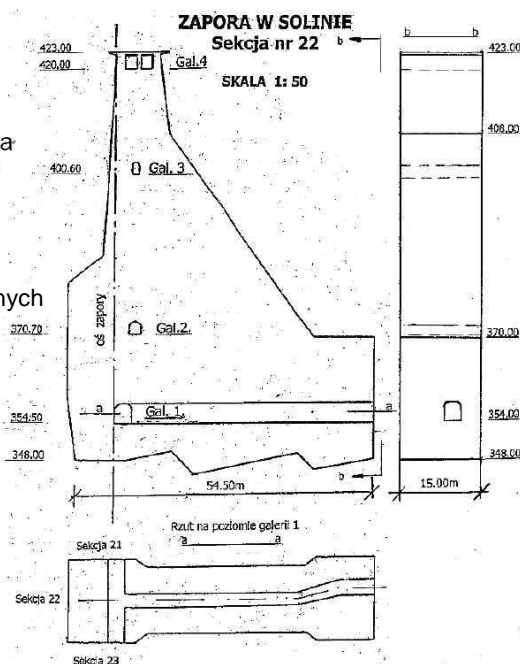
powierzchnia ~2100 ha

elektrownia wodna szczytowo-pompowa  
(4 turbozespoły typu Francis, w tym dwa odwracalne) o mocy 200 MW i produkcji rocznej 230 GWh.

$V_b = 820\ 000$  m<sup>3</sup> betonu

podział na 43 sekcje

4 poziomy galerii komunikacyjno-kontrolnych



Rys. 1. Zapora w Solinie. Widok ogólny, podstawowe dane hydrotechniczne. Sekcja nr 22

Fig. 1. Solina Dam. Overview and basic hydrotechnical data. Section nr 22

Analiza numeryczna, obejmująca symulację zmiennego w czasie pola temperatury oraz ciśnienia wody, a także ich oddziaływanie na stan przemieszczeń i naprężeń w korpusie zapory, miała na celu wyjaśnienie, czy obserwowane przebiegi pomiarowe różnych pól są ze sobą spójne. Sprawdzała również, czy nie występują stany mechaniczne zagrażające bezpieczeństwu zapory. Analizę wykonano z zastosowaniem systemu obliczeniowego MES Z\_Soil.PC v.2007.

## 2. Analiza termiczna

### 2.1. Założenia, dane i sposób obliczeń

Celem analizy jest utworzenie obrazu rozkładu przestrzennego oraz ewolucji w czasie pola temperatury korpusu zapory (sekcji 22) w trakcie rocznego cyklu zmian wymuszeń termicznych wynikających ze zmieniających się zewnętrznych warunków klimatycznych (temperatura wody i powietrza). Wyniki analizy pola temperatury będą wykorzystane w analizie mechanicznej, gdzie niejednorodny rozkład temperatury jest istotnym wymuszeniem stanowiącym potencjalne źródło naprężeń rozciągających w korpusie sekcji, a także możliwych spękań. Czasoprzestrzenny rozkład pola temperatur  $T(\mathbf{x}, t)$  w zaporze betonowej i jej otoczeniu jest opisany równaniem Fouriera (1)

$$(\lambda(T, \cdot))_{,i} = c \dot{T} \quad (1)$$

Przyjęto następujące charakterystyki:

- współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·°K)]:  $\lambda_1 = 1,8$  dla betonu (wg PN-91/B-02020),  $\lambda_2 = 3,0$  dla skał podłoża,
- pojemność cieplna (ciepło właściwe na jednostkę objętości), [kJ/(m<sup>3</sup>·°K)]:  $c_1 = 2016$  dla betonu (wg PN-91/B-02020),  $c_2 = 2362$  dla skał podłoża.

Warunki brzegowe opisują oddziaływania zewnętrzne.

Rozróżnia się 3 typy warunków:

**Warunki brzegowe typu 1** – znana temperatura,  $T(\mathbf{x}, t) = T_e(h, t)$ , stosowane tam, gdzie temperatura jest wymuszona przez kontakt z ośrodkiem zewnętrznym o dużej pojemności cieplnej i o znanej temperaturze  $T_e$  w chwili  $t$  na głębokości  $h$ .

W modelu sekcji przyjęto:

**1a** – wpływ wody piętrowej w zbiorniku. Wykorzystano informacje pochodzące z przebiegów czasowych pomiarów oznaczonych jako Tw601 (poziom 369,5 m), Tw602 (poziom 401,5), Tw603 (poziom 412,0). Dla punktów pośrednich temperaturę interpolowano liniowo.

**1b** – temperatura niezaburzona w ośrodku gruntowym. Przyjęto jako równą temperaturze średniorocznej (7°C dla Bieszczad).

**1c** – temperatura w strefie oddziaływania budynku elektrowni.

**Warunki brzegowe typu 2** – adiabatyczne,  $q_n = 0$ , stosowane tam, gdzie strumień ciepła jest pomijalnie mały. W modelu przyjęto brak przepływu ciepła prostopadle do płaszczyzn bocznych modelu, także w rejonach fug oszczędnościowych. Założono, że woda w fugach znajduje się w stanie równowagi termicznej z otaczającym ją masywem betonowym. Warunki brzegowe tego typu zastosowano także we wnętrzu galerii kontrolnych, które nie są przewietrzane.

**Warunki brzegowe typu 3** – konwekcyjne, tzn.:  $q_n = \alpha_c(T - T_e)$ , na powierzchniach, gdzie zachodzi wymiana ciepła z otaczającą i ciągle zmieniającą się masą powietrza o zadanej temperaturze otoczenia  $T_e$ . W modelu zastosowano je na ścianie odpowietrznej oraz na ścianie odwodnej powyżej powierzchni wody. Przyjęto współczynnik konwekcji (przejmowania ciepła wg PN-91/B-02020)  $\alpha_c = 23$  [W/(m·°K)].

Przebiegi zewnętrznych temperatur wymuszających (wody i powietrza) zostały przyjęte w sposób następujący:

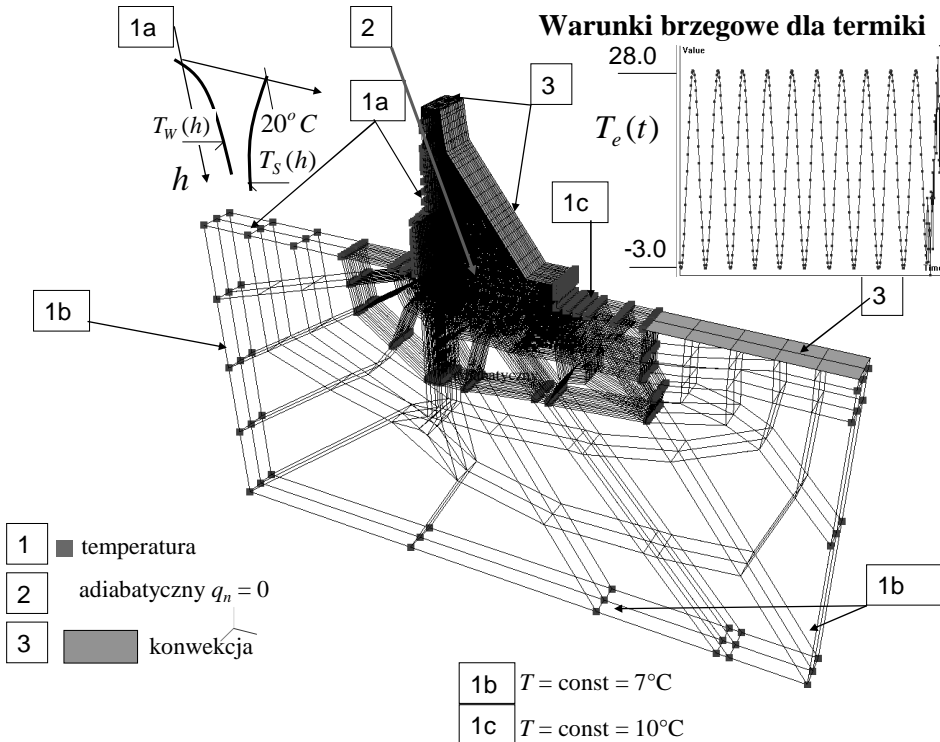
– 10 cykli rocznych o przebiegu określonym wzorem

$$T_e(t) = T_A (1 - \Delta T / (2T_A) \cdot \cos(2\pi t / 365)) \quad (2)$$

gdzie:

$T_A$  – średnia roczna temperatura danego wymuszenia,

$\Delta T$  – amplituda uśrednianych miesięcznie temperatur wymuszenia.



Rys. 2. Sekcja 22. Warunki brzegowe dla problemu termicznego niustalonego

Fig. 2. Section 22. Boundary condition in transient heat problem

Wartości te ustalono na podstawie przebiegów temperatur rejestrowanych w ciągu pierwszej połowy 2007 r. (styczeń–sierpień). Przyjęto:

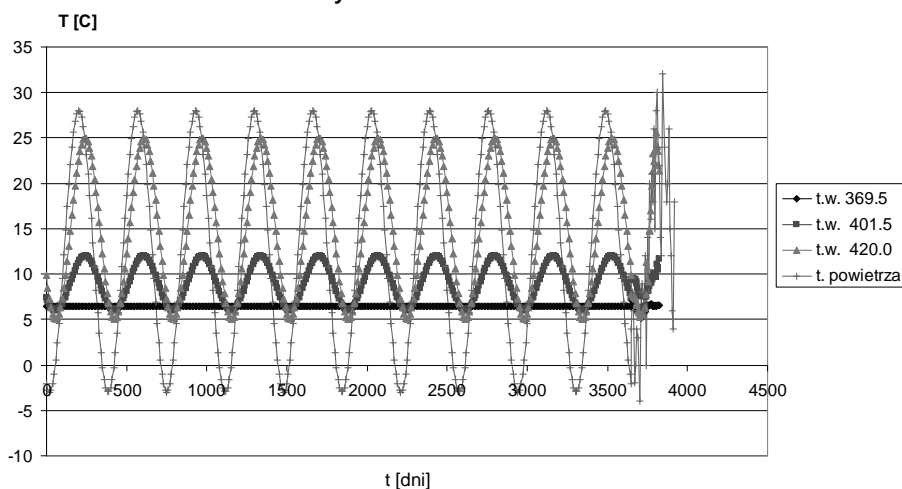
Tabela 1

## Parametry rocznych cykli temperatur wymuszających

	$T_A$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{\min.}$ [°C]	$T_{\max}$ [°C]
Woda poziom 369,5	6,5	0	6,5	6,5
Woda poziom 401,5	9	6	6	12
Woda poziom 412,0	13,5	22	2,5	24,5
Powietrze	11	28	-3,0	25

- w okresie porównawczym ostatniego roku przyjmowano wartości pomierzone. Przebiegi wymuszające pokazano na rys. 3.

## Wymuszenia termiczne

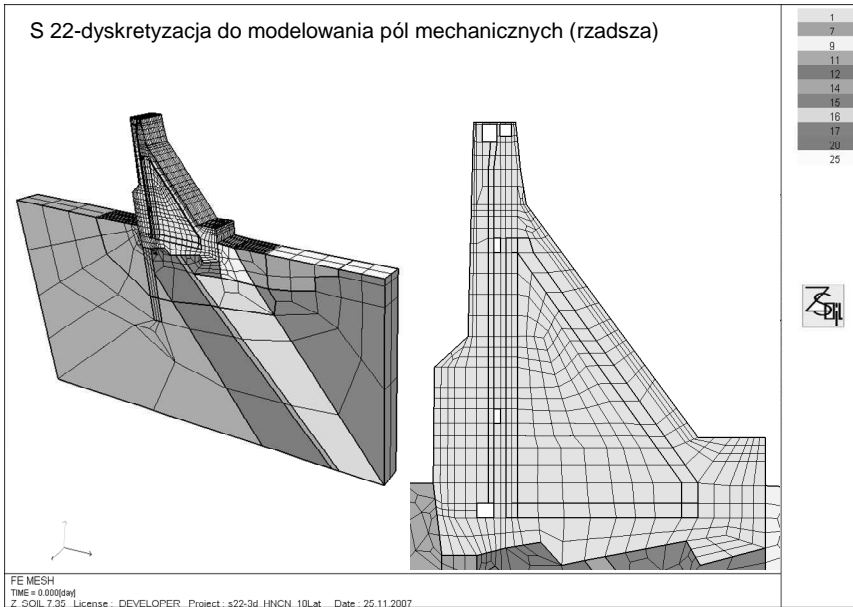


Rys. 3. Przebiegi czasowe wymuszeń termicznych temperaturą wody i powietrza

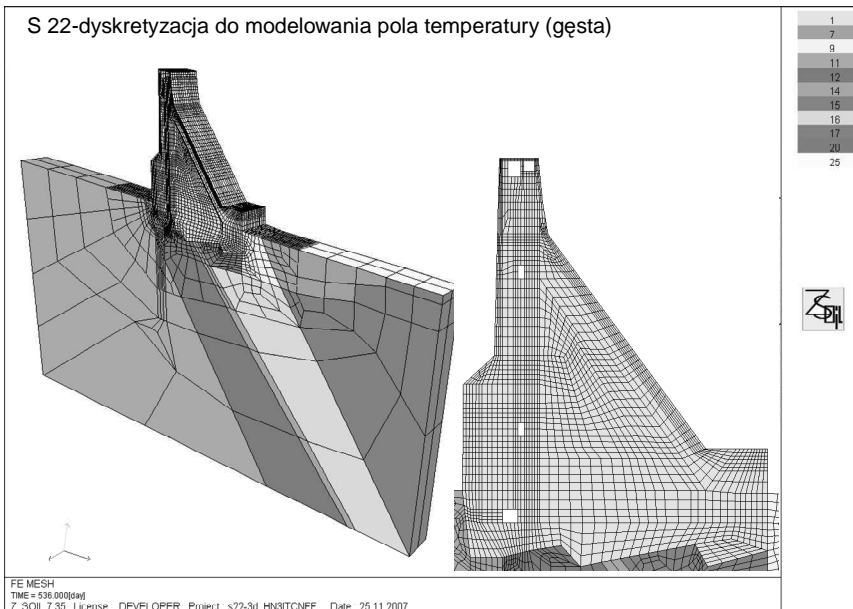
Fig. 3. Time records of external temperatures of water and air

Pierwszym krokiem analizy było ustalenie warunku początkowego przez rozwiązanie problemu ustalonego dla chwili  $t = 0$ . Następnie wykonano całkowanie z krokiem 10 dni obejmującym 10 lat (10 cykli jednorocznych) przy wymuszeniu określonym wg (2). Następnie do tak określonych funkcji wymuszających dołączono przebiegi pomiarowe z 2007 r. (co 7 dni). Celem takiego postępowania jest stabilizacja odpowiedzi układu poddanego wymuszeniom periodycznym, która w pierwszych kilku cyklach jest mocno zaburzona przez warunek początkowy, będący rozwiązaniem stanu ustalonego dla temperatury i generujący pole początkowych temperatur. Pole to różni się jednak znacznie od poszukiwanego pola temperatury pod wymuszeniem quasi-periodycznym. Równania (1) rozwiązywane są z zastosowaniem dyskretyzacji skończonej elementowej w obszarze trójwymiarowym reprezentującym sekcję i jej podłoże. Całkowanie w dziedzinie czasu odbywa się metodą Eulera niejawną, por. [1].

a)



b)



Rys. 4. Siatka MES do analizy termicznej, filtracyjnej i mechanicznej: a) rzadka, b) gęsta

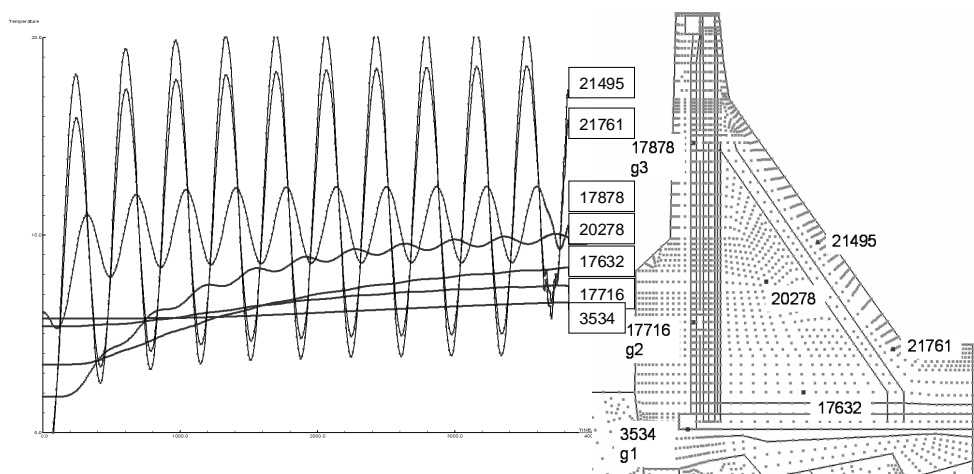
Fig. 4. FE mesh used in thermal, filtration and mechanical analysis: a) rough, b) dense

Dla każdego z zagadnień (termiki i filtracji) zbudowano dwa modele numeryczne 3D z wykorzystaniem elementów skończonych: rzadki (ok. 10 000 węzłów) – rys. 4a oraz gęsty (ok. 40 000 węzłów) – rys. 4b. W ten sposób zapewniono możliwość weryfikacji i oceny dokładności wyników.

W modelu dyskretnym MES w strefie podłoża do wszystkich typów analizy zastosowano więzy kinematyczne (*kinematic constraints*), por. [1]. Więzy te umożliwiają rozrzedzenie siatki poza obszarem sekcji i podłoża bezpośrednio pod nią, tak by wielkość modelu numerycznego pozwalała na przeprowadzenie wielokrokowej symulacji na komputerze typu PC (Pentium 4, 2.4 GHz, 1024 kB RAM).

## 2.2. Wyniki analizy termicznej

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane numerycznie przebiegi temperatury w wybranych punktach (odpowiadających punktom pomiarowym) dla 10 letniej symulacji. W toku kolejnych cykli (praktycznie od cyklu piątego) odpowiedź staje się periodyczna, a tym samym stanowi coraz lepsze przybliżenie stanu poszukiwanego. W końcowych 180 dniach wymuszenia bazują na wynikach pomiarów temperatury wody i powietrza.



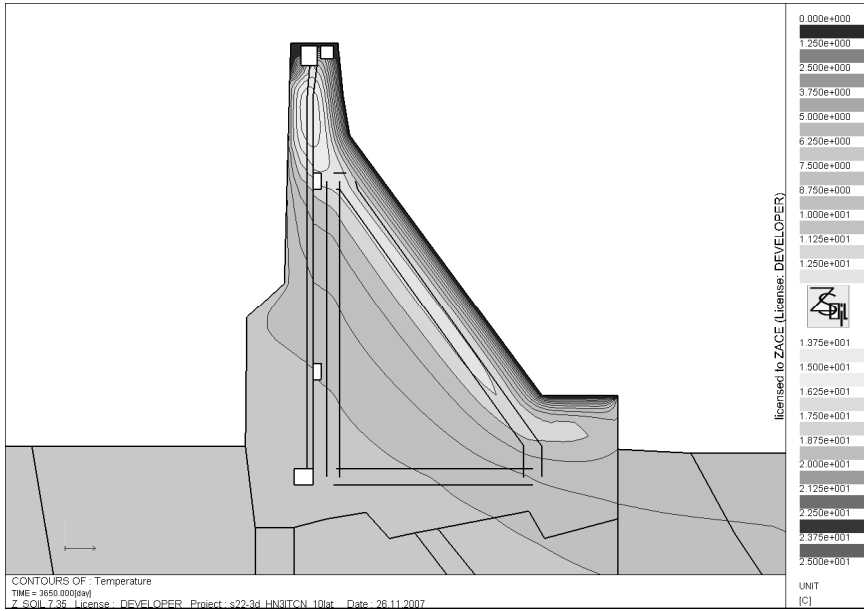
Rys. 5. Przebiegi temperatury w wybranych punktach w ciągu dziesięcioletniej symulacji

Fig. 5. Temperature records at selected points in 10 years simulation.

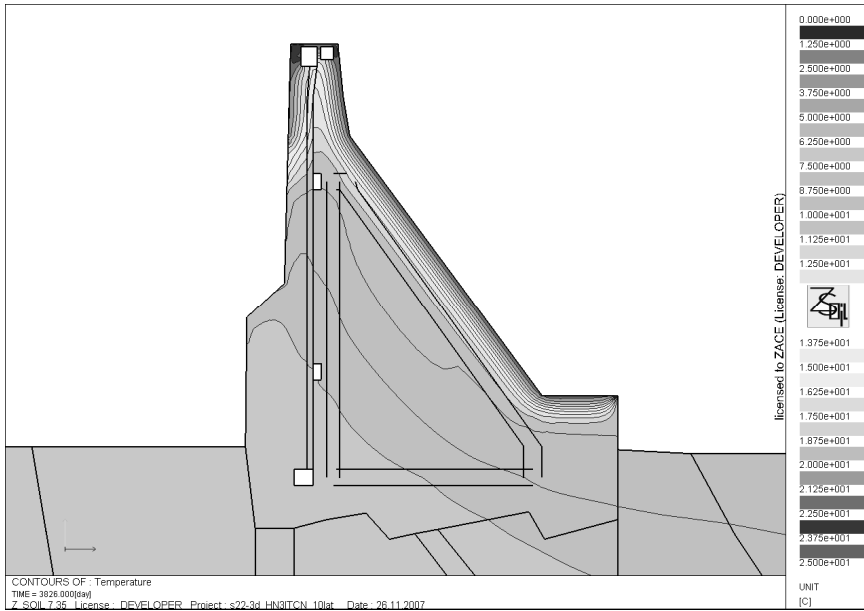
Na rysunku 6 przedstawiono rozkłady pola temperatury w płaszczyźnie przekroju pionowego, który przechodzi przez środek sekcji. Dotyczą one dwóch wybranych chwil, reprezentatywnych dla rozkładu temperatury w okresie zimy (styczeń) i lata (lipiec) 2007 r.

Wyniki analizy wskazują na występowanie silnych niejednorodności pola temperatury w rejonie ściany odpowietrznej. Jest to wynikiem znacznej bezwładności cieplnej masywu betonowego, który w swoim wnętrzu ma temperaturę bliską średniej rocznej, przy jednoczesnej jego zdolności do wchłaniania ciepła w okresie letnim i przypowierzchniowego ochładzania się w okresie zimowym. Powstające wówczas wysokie gradienty temperatury mogą być przyczyną uszkodzeń mechanicznych, co będzie przedmiotem rozważań w punkcie 4.

a) styczeń 2007



b) lipiec 2007



Rys. 6. Rozkłady temperatury wewnątrz zapory: a) w zimie, b) w lecie

Fig. 6. Temperature distribution inside the dam section: a) in the winter, b) in the summer



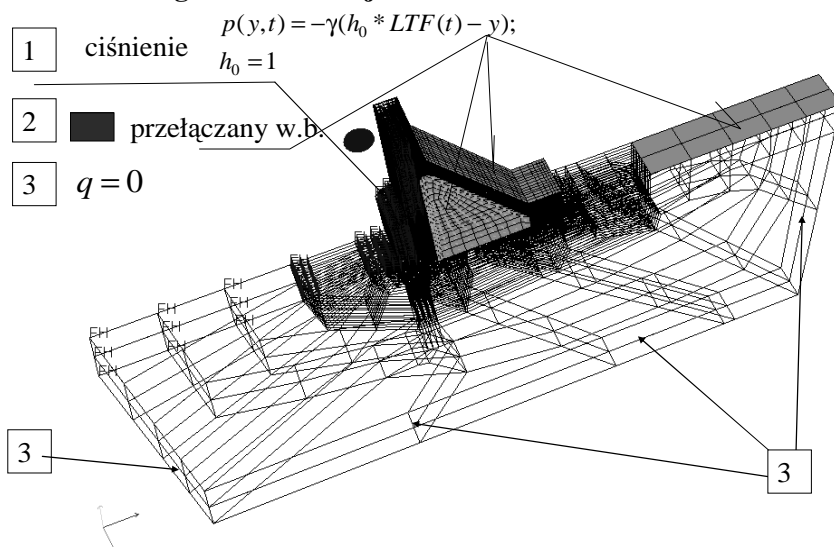
### 3. Analiza filtracji

Celem analizy filtracji było odtworzenie pola ciśnień wody w korpusie sekcji, dlatego podłoże traktowano w sposób uproszczony. Szczegółowa analiza filtracji przez podłoże wymaga wiarygodnego zasobu informacji o budowie i parametrach filtracyjnych podłoża oraz analizy całości obiektu. W analizie pola filtracji w obrębie sekcji uwzględniono obecność wód w szczelinach dylatacyjnych między sekcjami.

Ze względu na niedużą zmienność wysokości piętrzenia analizę ograniczono do stanu ustalonego przy wysokości piętrzenia WG = 416,2 m n.p.m. Jedynie w ostatnim półroczu okresu objętego analizą wzięto od uwagę zanotowane wahania poziomu WG. Poziom wody w dylatacjach oszczędnościowych, na podstawie obserwacji, wynosi WF = 364,5 m n.p.m.

W analizie filtracji ustalonej w celu wyznaczenia przebiegu powierzchni swobodnej (filtracji) stosuje się nieliniowy model filtracji bazujący na koncepcji Van Genuchtena, w którym współczynnik filtracji jest funkcją parametru nasycenia  $S$ . Strefę wycieków o nieznanym zasięgu po stronie odpowietrznej, a także wewnątrz dylatacji, modelowano, stosując brzegowe elementy przełączające z funkcją kary (ang. *seepage surface elements*). Na rys. 7 przedstawiono przyjęte warunki brzegowe w analizie filtracji.

#### Warunki brzegowe dla filtracji

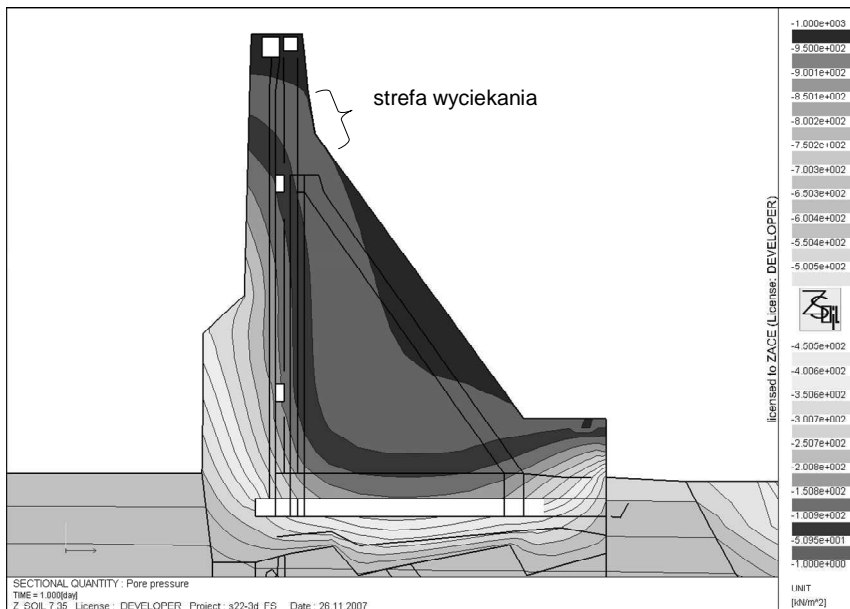


Rys. 7. Warunki brzegowe dla filtracji

Fig. 7. Boundary condition for filtration problem

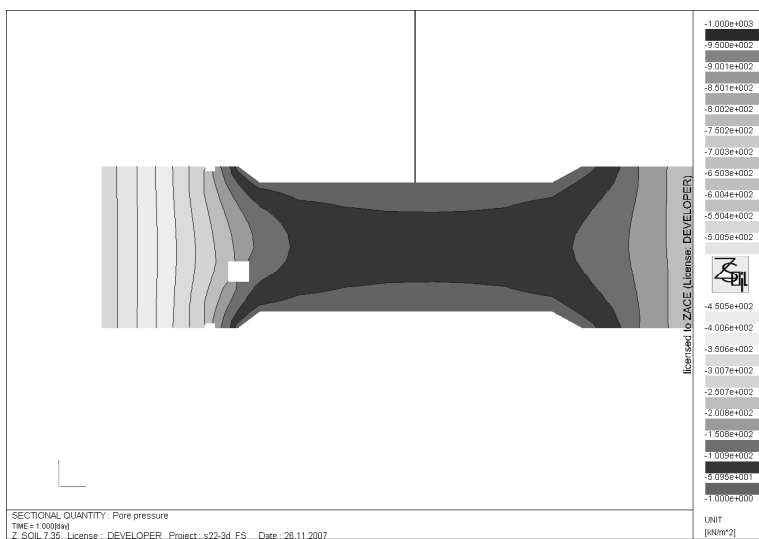
Na rysunku 8 przedstawiono uzyskane pole ciśnień porowych w przekroju środkowym sekcji, natomiast na rys. 9 rozkład ciśnień w przekroju poziomym na rzędnej 364,5 m n.p.m. (średni poziom wody w poszerzonych dylatacjach). Przedstawione rozkłady pola ciśnień świadczą o istotnej roli drenażowej dylatacji, która redukuje stopień nawodnienia

korpusu w jego górnej części. Obserwacje ściany odpowietrznej potwierdzają występowanie strefy wyciekania w górnej części ściany.



Rys. 8. Pole ciśnień porowych w przekroju środkowym sekcji

Fig. 8. Pore pressure in the mid of section



Rys. 9. Rozkład ciśnień w przekroju poziomym (364,5 m n.p.m. średni poziom wody w dylatacjach)

Fig. 9. Pore pressures in horizontal section at 364,5 m (mean water level in concave space)

## 4. Analiza numeryczna MES pól mechanicznych w sekcji zapory

### 4.1. Metodyka i przebieg obliczeń

Celem analizy jest utworzenie obrazu rozkładu przestrzennego oraz ewolucji w czasie pól mechanicznych, czyli przemieszczeń, odkształceń, naprężeń. Na konstrukcję sekcji oddziałują: siła ciężkości (deformacja wstępna towarzysząca temu stanowi jest po jego wyznaczeniu zerowana), parcie wody, gradienty ciśnienia, temperatura.

W toku symulacji rozważono następujące po sobie stany:

- 1)  $t = 0$ , stan wstępny, obciążenie siłami ciężkości. Deformacja towarzysząca temu stanowi jest zerowana,
- 2)  $t = 1$ , stan po spiętrzeniu wody. Założono wysokość piętrzenia WG = 416,2 m n.p.m.,
- 3)  $2000D < t < 3650D$ ,  $\Delta t = 10D$  stan w ok. 4 cyklach rocznych wymuszeń termicznych (sztucznie wykreowanych, uwzględniających średnie wahania temperatury wody i powietrza, patrz p. 2),
- 4)  $3655D < t < 3826D$ ,  $\Delta t = 7D$ , stan od 01.01.2007 do 13.07.2007, symulacja pracy pod wpływem zarejestrowanych temperatur oraz stanu WG.

W punkcie 2 przeprowadzono analizę pola temperatury w korpusie zapory (sekcji 22) w trakcie rocznego cyklu zmian wymuszeń termicznych wynikających ze zmieniających się zewnętrznych warunków atmosferycznych (temperatura wody i powietrza). Wyniki te (przebiegi czasowe temperatury w węzłach) stanowią tu dane wejściowe, automatycznie podłączane do analizy mechanicznej. Zaczynając od stanu mechanicznego układu, w każdym kroku analizy przyrostowej wprowadza się zmienne w czasie i przestrzeni przyrosty odkształceń narzuconych, wyznaczone w punktach Gaussa elementów skończonych modelu do analizy mechanicznej

$$\Delta \varepsilon_{ij}^0(\mathbf{x}, t) = \alpha \Delta T(\mathbf{x}, t) \delta_{ij} \quad (3)$$

gdzie  $\Delta T(\mathbf{x}, t)$  jest wyznaczonym w zagadnieniu termicznym niestacjonarnym polem przyrostu temperatury odniesionym do chwili początkowej dla danej analizy.

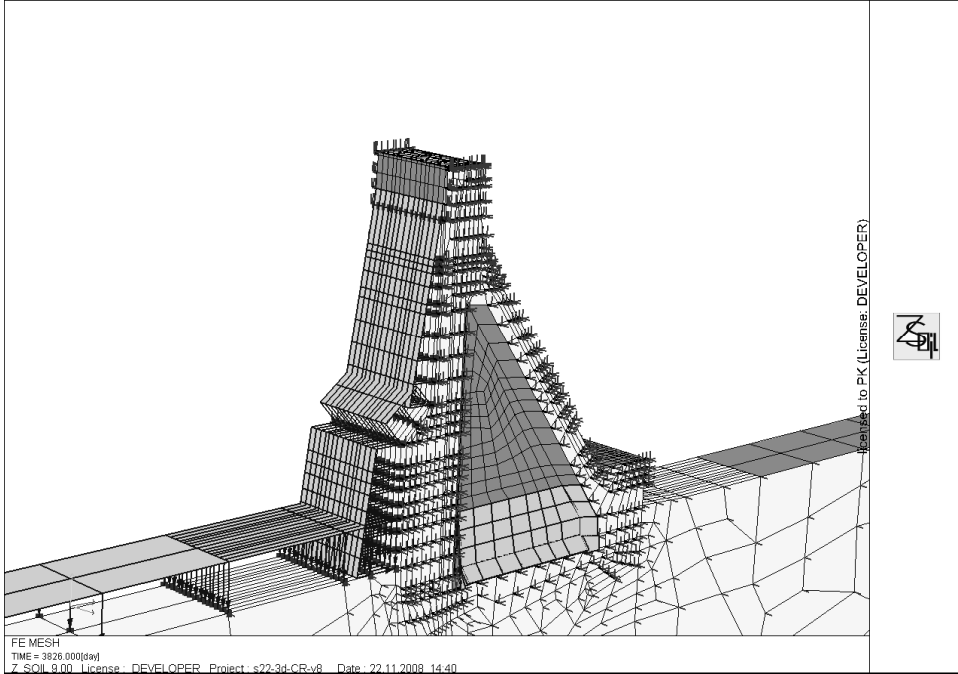
Współczynnik rozszerzalności termicznej dla betonu przyjęto jako stały i równy  $\alpha = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{K}$ . W następstwie pojawiają się dodatkowe odkształcenia i towarzyszące im naprężenia termiczne, ponieważ pole narzuconych odkształceń termicznych nie musi spełniać warunków nierozdzielności. W przypadku rozważanej zapory pole odkształceń termicznych wykazuje znaczne odstępstwa od pola liniowo zmiennego w przestrzeni (rys. 6). Zachodzi potrzeba oceny towarzyszących naprężeń.

Pole ciśnienia i obciążenia parciem wody wyznacza się w toku każdego kroku przyrostowego na podstawie notowań poziomu WG.

Analizę przeprowadzono, budując model 3D sekcji 22 zapory, wraz z podłożem. W płaszczyznach bocznych modelu zapory wprowadzono elementy nieprzenoszące rozciągania, pokazane na rys. 10, symulujące obecność sąsiednich sekcji (w okresie letnim – zaciskanie dylatacji, w okresie zimowym – swoboda deformacji).

Rozważono dwa warianty obliczeń (ze względu na przyjęty model materiałowy betonu):

- sprężysty (porównawczy),
- lepkosprężysty (realistyczny).



Rys. 10. Obciążenia parciem wody. Elementy nieprzenoszące rozciągania

Fig. 10. Loads due to water pressure. No-tension elements

W modelu lepkosprężystym pełzanie opisuje się równaniami

$$\boldsymbol{\sigma}^{n+1} = \boldsymbol{\sigma}^n + \mathbf{D}(\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^o - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{pl} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{cr}) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{cr} = \mathbf{D}_0^{-1} C(t, \boldsymbol{\tau}) \quad (5)$$

gdzie  $\mathbf{D}_0(\boldsymbol{v}) = \frac{1}{E} \mathbf{D}(E, \boldsymbol{v})$  jest macierzą sprężystą dla jednostkowego  $E$ .

Jądro pełzania typu wykładniczego

$$C(t, \boldsymbol{\tau}) = A \left( 1 - \exp\left(-\frac{1}{B}(t - \tau)\right) \right) \quad (6)$$

z parametrami:  $A = 3,268e-008$  1/kPa,  $B = 33,3$  d. Wartość współczynnika pełzania  $A$  określono na podstawie załącznika A normy PN/B-03264 [7]. Dla wilgotności  $RH = 80\%$  (na zewnątrz), wymiarów elementu dla połowy wysokości zapory, wieku betonu w chwili przyłożenia obciążenia  $t_0 = 365$ d, wytrzymałości jak dla B30, przyjęto  $\phi = 1,0$ , co generuje stała  $A = \phi/E = 3,268e-008$  1/kPa. Czas retardacji, nieuregulowany w przywołanej normie [7], przyjęto za Aleksandrowskim [2]  $B = 33,3$ D.

#### 4.2. Dane materiałowe

Właściwości betonu określono w toku badań wykonanych w ramach oceny stanu obiektu. Pozostałe parametry podłoża przyjęto na podstawie materiałów archiwalnych. Dane do obliczeń podano w tabeli 2. Rozkład stref materiałowych pokazano na rys. 4.

Tabela 2

**Parametry materiałowe modelu obliczeniowego 22 sekcji zapory Solina**

Nr	Opis	Ciężar właściwy $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga E [GPa]	Współczynnik Poissona $\nu$ [-]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha$ [1/°K]·10 <sup>-5</sup>
1	Beton	23,55	34,22	0,17	1,13
6	Przesł.c. I	26,00	9,20	0,30	1,30
8	Mur oporowy	10,10	11,47	0,13	
9	Piask.str.+ce.	26,25	12,00	0,30	1,0
11	Piask.-łupki	26,30	4,00	0,29	1,0
17	Łołupki I	26,00	0,50	0,37	1,0
19	Beton IV 15 m	23,55	26,106	0,15	1,13
20	Łołupki+cem	26,00	0,80	0,37	1,0
24	Piask-łupko. 12 m	20,94	3,38	0,29	1,0

#### 4.3. Wyniki obliczeń

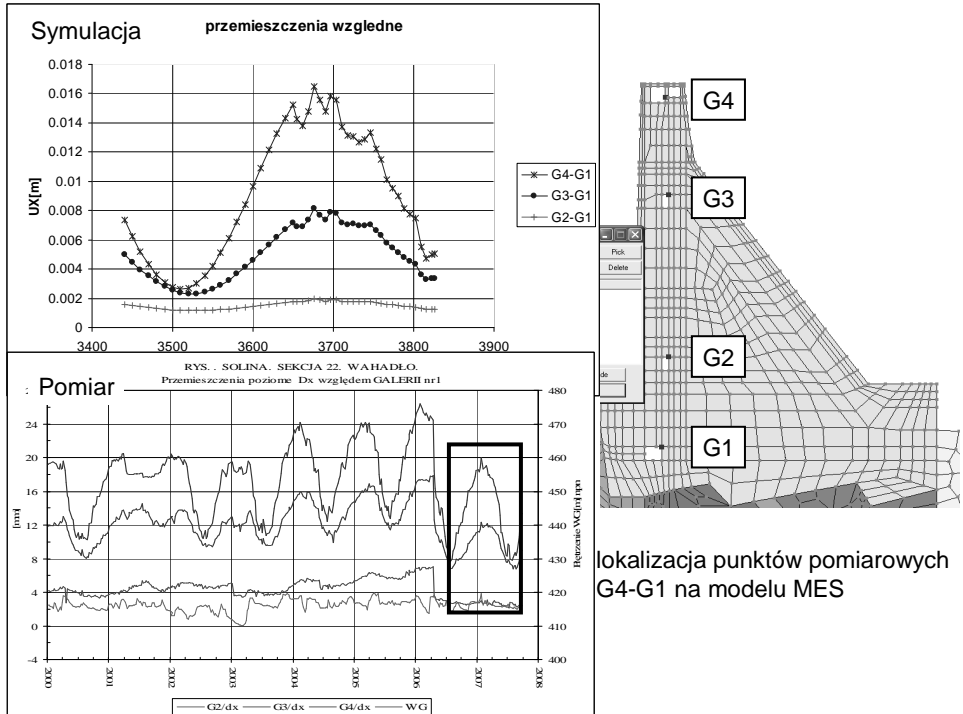
##### 4.3.1. Pole deformacji

Jednym z głównych zadań niniejszego artykułu była ocena zgodności wyników przeprowadzonych pomiarów za pomocą wahadeł, szczególnie w okresie poprzedzającym ocenę, z wynikami obliczeń przy przyjętych z badań danych materiałowych. W tym celu zapisy wyników pomiarów były skonfrontowane z wynikami symulacji przemieszczeń poziomych UX.

Tabela 3

**Porównanie amplitud przemieszczeń**

	Gi	Symulacja Gi-G1 [mm]	Pomiar wahadłem [mm]
Zima 2006/07	G3	8,1	12,0
Lato 2007	G3	3,2	7,0
Różnica: zima-lato	G3	<b>4,9</b>	<b>5,0</b>
Zima 2006/07	G4	16,5	20,0
Lato 2007	G4	4,7	8,0
Różnica: zima-lato	G4	<b>11,8</b>	<b>12,0</b>



Rys. 11. Przebiegi czasowe przemieszczeń UX względnych. Pomiar i symulacja

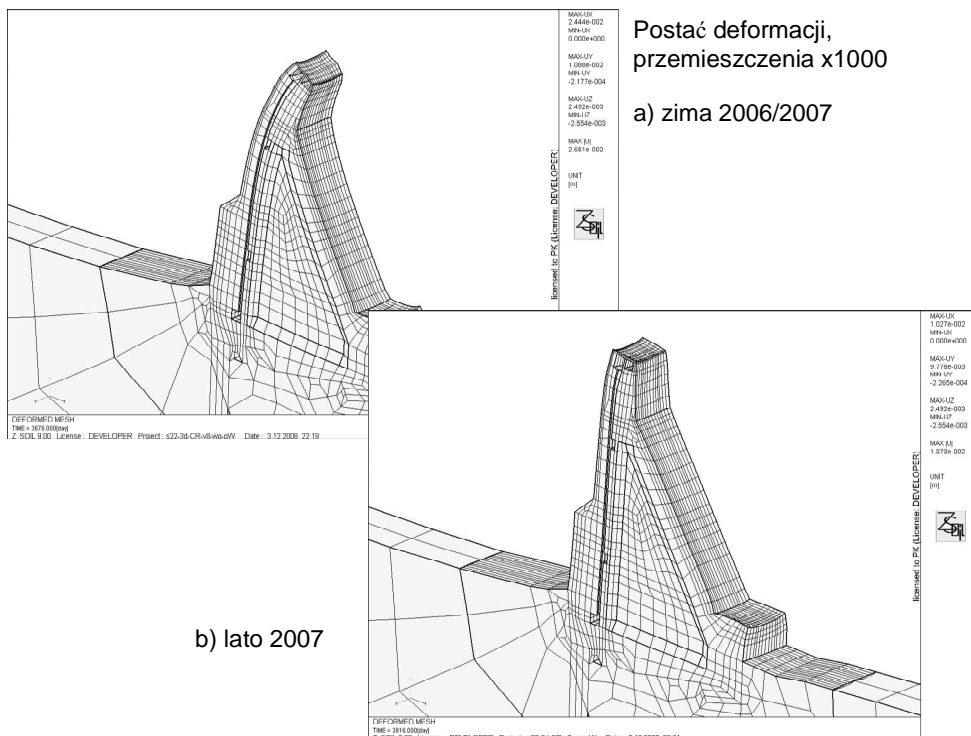
Fig. 11. Time history of relative displacements UX. Measurements and simulation

Obliczenia wykazały, że główną przyczyną obserwowanych obecnie deformacji obiektu jest zmienne w czasie pole temperatury wewnątrz sekcji, wywołane rocznym cyklem zmian temperatury wody piętrzonej i powietrza. Przemieszczenia całkowite UX w poziomie galerii G4 (bez uwzględnienia temperatury) wynoszą od 10 do 13 mm przy piętrzeniu od 416,9 do 419,5 m n.p.m. Rozpatrując łącznie oba wpływy (termikę i piętrzenie), uzyskano 22 mm (zima) i 10 mm (lato).

W okresie porównawczym (zima 2006/2007–lato 2007) uzyskano bardzo dobrą zgodność obliczonych półrocznych amplitud przemieszczeń względnych UX ( $G_i-G_1$ ,  $i = 3,4$ ) z wynikami pomiarów za pomocą wahadła. Świadczy to o tym, że wyniki badań geologicznych właściwości materiałowych podłoża i powykonawczych badań betonu oraz badań *in situ* temperatur betonu, wody i powietrza oraz ciśnień filtracyjnych wody były prawidłowe i pozwoliły m.in. na przyjęcie właściwego rozkładu temperatury w sekcji (warunków brzegowych, współczynników konwekcji).

Wyznaczone w toku symulacji stan naprężeń w sekcji charakteryzuje się znacznym wpływem zjawisk termicznych. Szczególnie wrażliwa jest ściana odpowietrzna, gdzie w okresie zimowym mogą wystąpić znaczne naprężenia rozciągające o wartości  $\sigma_{CR} = 3,5$  MPa z uwzględnieniem pełzania (rys. 7.9a). Analogiczne wartości dla modelu sprężystego  $\sigma_E = 8,0$  MPa (rys. 7.10a) należy uznać za nierealne ze względu na brak efektu relaksacji. Naprężenia rozciągające o największych ww. wartościach występują

lokalnie przy powierzchni (do 1 m), na wysokości ok. 20 m, licząc od posadowienia. Mogą być one przyczyną degradacji ściany odpowietrznej, ale nie stanowią bezpośredniego zagrożenia konstrukcji.



Rys. 12. Postać deformacji, przemieszczenia  $\times 1000$ : a) zima 2006/2007, b) lato 2007

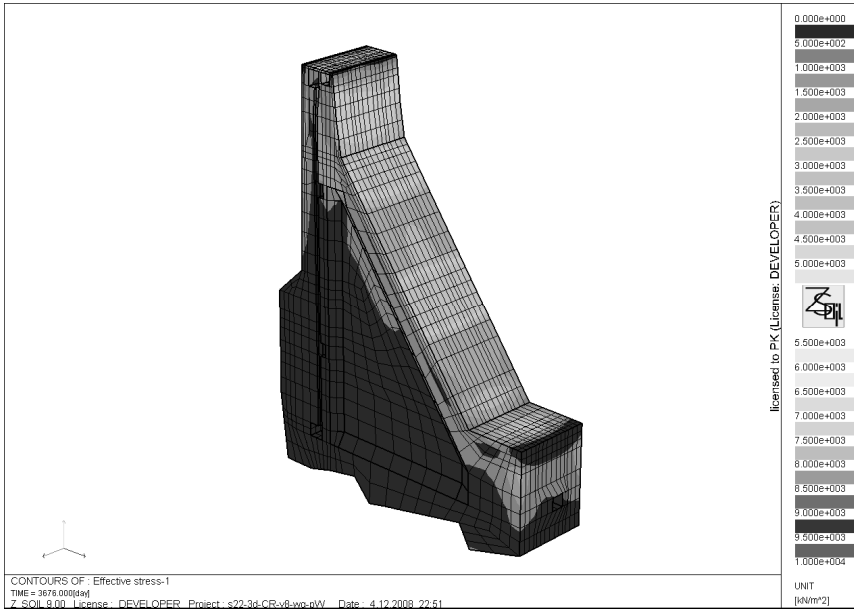
Fig. 12. Deformed shape, displacement  $\times 1000$ : a) in the winter 2006/2007y, b) in the summer 2007y

#### 4.3.2. Pole naprężeń

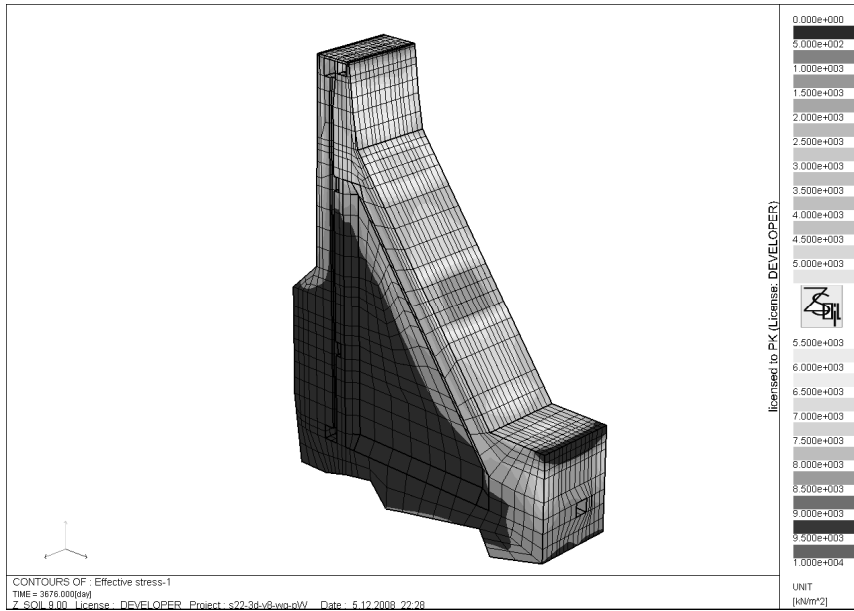
W pozostałych rejonach/stanach pracy konstrukcji naprężenia nie przekraczają wytrzymałości betonu.

Na rysunku 13 pokazano mapę naprężenia głównego  $\sigma_1$  w okresie zimy (a) z uwzględnieniem pęcznienia, (b) bez uwzględniania pęcznienia (model sprężysty). Na rysunku 14 przedstawiono krzyże naprężeń głównych na powierzchni modelu MES dla przypadku z pęcznieniem w okresie (a) zimy, (b) lata.

## a) z pełzaniem



## b) bez pełzania

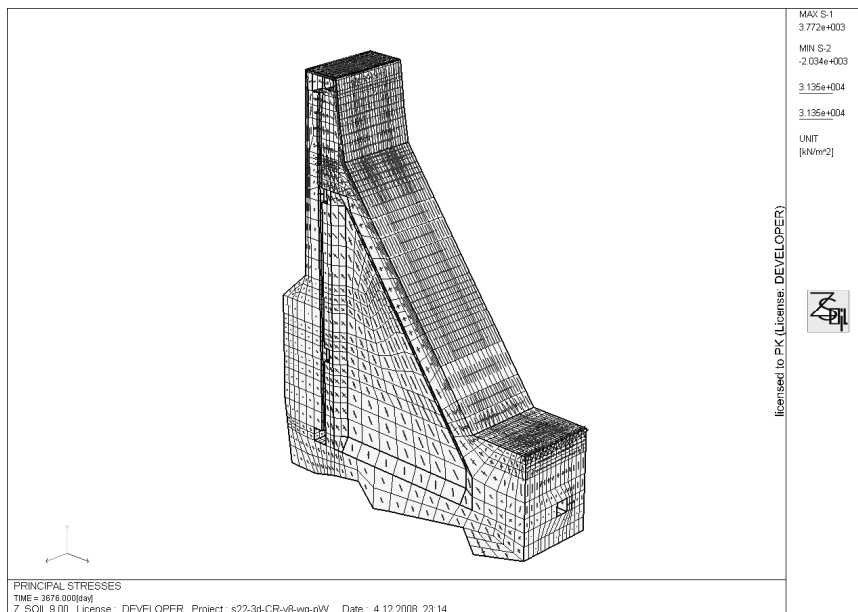


Rys. 13. Naprężenia główne  $\sigma_1$  w okresie zimy: a) z uwzględnieniem pełzania betonu, b) bez uwzględniania pełzania

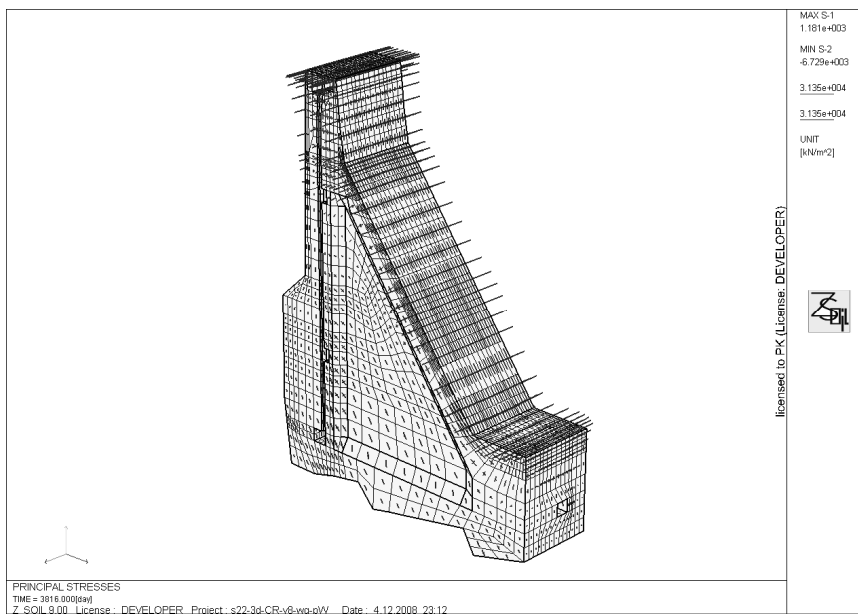
Fig. 13. Principal stress  $\sigma_1$  in winter season: a) creep in concrete, b) no creep in concrete



a) zima



b) lato



Rys. 14. Krzyże naprężeń głównych z uwzględnieniem pełzania: a) zima, b) lato

Fig. 14. Principal stress crosses with creep in concrete: a) in winter, b) in summer

## 5. Wnioski

Podstawowym dla oceny stanu zapory wnioskiem, wynikającym z analizy numerycznej częściowo sprzężonych pól temperatury, ciśnień porowych i pól mechanicznych (deformacji i naprężeń), jest stwierdzenie, że zjawiska zachodzące w zaporze mają swoje uzasadnienie w czynnikach oddziałujących na jej konstrukcję. Nie są naruszone warunki bezpiecznej eksploatacji.

Jeszcze raz potwierdzona została teza, podobnie jak w pracach [3–6], że głównym źródłem obserwowanych deformacji oraz stanów naprężeń masywnej konstrukcji zapory betonowej jest wpływ zjawisk termicznych wynikających ze zmieniających się zewnętrznych warunków temperatury wody i powietrza w rocznych cyklach.

Ponadto wykazano, podobnie jak w pracach [8, 9], że ewolucyjne, obejmujące wieloletnie, analizy złożonego, wielofazowego i wielopolowego trójwymiarowego problemu brzegowego, wynikającego z praktycznych potrzeb hydrotechniki, mogą być efektywnie wykonywane z zastosowaniem systemu Z\_Soil.PC.

## Literatura

- [1] Z\_Soil.PC 2007, *User Manual*, ZACE Services Ltd., Lausanne 2007.
- [2] Aleksandrowskij S.W., *Razcet betonnych i zelezobetonnych konstrukcij na izmenenija temperatury i blaznosti s ucetom polzucesti*, Stroizdat, Moskwa 1973.
- [3] Hrabowski W., Urbański A., Hrabowska J., *Analiza porównawcza pracy najwyższych sekcji zapory w Zatoniu w świetle wyników obserwacji i modelowania komputerowego*, Materiały XIV Konferencji Naukowej Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbiewów 2002, Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
- [4] Urbański A., Hrabowski W., Konwerska-Hrabowska J., *Analiza numeryczna 3D stanu wyężenia sekcji środkowych zapory w Zatoniu z uwzględnieniem pełzania*, Materiały XV Konferencji Naukowej Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbiewów 2003, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [5] Hrabowski W., Urbański A., Hrabowska J., *Model numeryczny 2D najwyższej sekcji zapory w Solinie*, Materiały XV Konferencji Naukowej Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbiewów 2003, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [6] Urbański A., Hrabowski W., Konwerska-Hrabowska J., *Trójwymiarowe modelowanie numeryczne i analiza in-situ pól termicznych, filtracyjnych i mechanicznych w wybranej sekcji zapory betonowej w Zatoniu*, Materiały X Konferencji Technicznej Kontroli Zapór, Kielce 2003, IMiGW, Kraków 2003.
- [7] PN/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprzężone. Obliczenia statyczne i projektowanie, 2002.
- [8] Geiser F., Commend S., *Seismic verification of a dam*, GeoMod ing. conseils SA, prezentacja na stronie [www.zace.com](http://www.zace.com), 2007.
- [9] Mellal A., *Heightening of an existing gravity dam – Static and dynamic analyses*, STUCKY SA, Lausanne, prezentacja na stronie [www.zace.com](http://www.zace.com), 2009.