



Prof. nzw. dr hab. inż. ZBIGNIEW KLEDYŃSKI, [zbigniew.kledynski@is.pw.edu.pl](mailto:zbigniew.kledynski@is.pw.edu.pl)  
Mgr inż. RAFAŁ OSTROMEŃCKI, [r.ostromecki@il.pw.edu.pl](mailto:r.ostromecki@il.pw.edu.pl)  
Politechnika Warszawska

## UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE I TECHNOLOGICZNE STANU ZARYSOWANIA ŻELBETOWEGO ZBIORNIKA WYDZIELONEJ KOMORY FERMENTACYJNEJ

### DESIGN AND TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF REINFORCED CONCRETE SEPARATED FERMENTATION TANK CRACKING

**Streszczenie** W referacie przedstawiono stan zarysowania powłoki walcowej żelbetowego zbiornika zamkniętej, wydzielonej komory fermentacyjnej (WKFz) w oczyszczalni ścieków, jaki zaistniał na etapie realizacji obiektu. Opisano zakres i najważniejsze wyniki analiz wykonanych w celu rozpoznania przyczyn zarysowania zbiornika. Wskazano na projektowe i technologiczne (wykonawcze) uwarunkowania stanu obiektu.

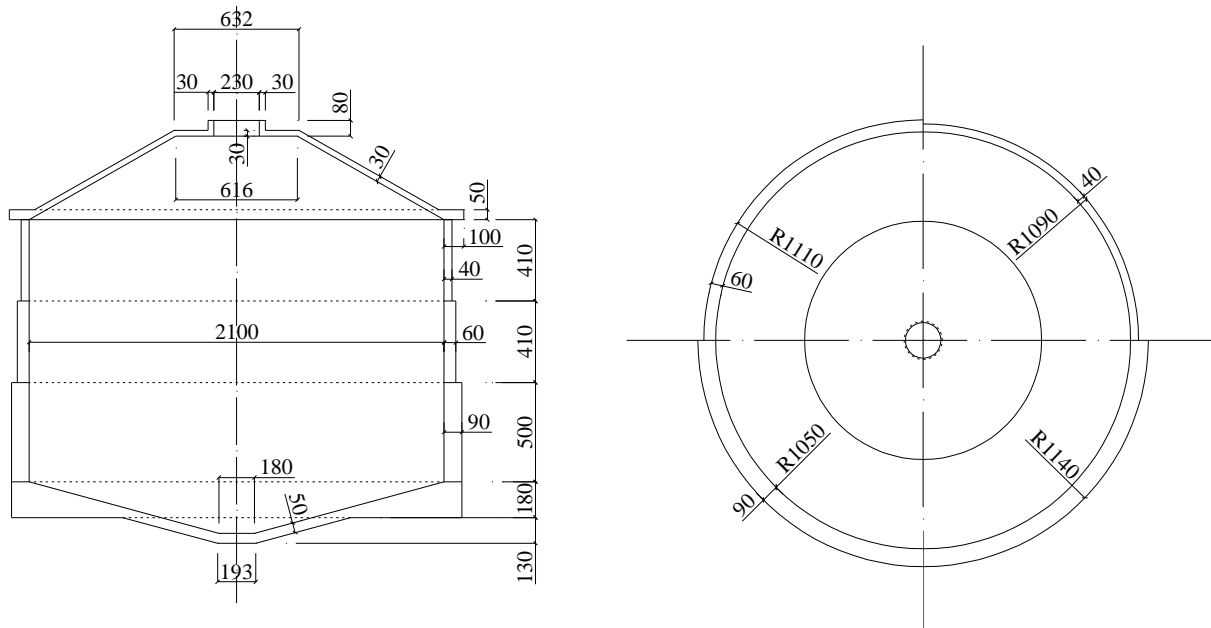
**Abstract** The paper presents state of cracking of a reinforced concrete wall of the cylindrical separated fermentation tank in a wastewater treatment plant, which took place at the stage of its construction. Scope of analyses performed and most important conclusions, leading to recognition of the cracking origin were presented. Design and technological conditions which had an influence on structure state were indicated.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z procesów stosowanych w oczyszczaniu ścieków zawierających znaczne ilości materiału organicznego jest fermentacja metanowa, złożony proces biologiczno-chemicznego przetwarzania przez mikroorganizmy białek, tłuszczów i węglowodanów do produktów końcowych, głównie metanu i dwutlenku węgla, tj. podstawowych składników tzw. biogazu. Najlepsze efekty fermentacji uzyskuje się w tzw. wydzielonych komorach fermentacyjnych, zwłaszcza zamkniętych (WKFz). Są one wyposażone w urządzenia do mieszania osadów oraz przewody odprowadzające gaz, wodę nadosadową i przefermentowany osad. Stwarza to możliwość precyzyjnego sterowania procesami fermentacji.

Z konstrukcyjnego punktu widzenia wydzielona, zamknięta komora fermentacyjna to cylindryczny lub rzadziej prostopadłościenny zbiornik, najczęściej żelbetowy lub stalowy, zakończony u dołu lejem ułatwiającym grawitacyjne spuszczenie przefermentowanego osadu, a na górze stożkowym stropem, pod którym gromadzi się biogaz.

Na rys. 1 pokazano przekrój pionowy i poziomy przez żelbetową komorę fermentacyjną, będącą przedmiotem niniejszego referatu. Stosunkowo nietypową cechą pokazanej konstrukcji są skokowe zmiany grubości ściany zbiornika wyznaczające wysokości trzech faz betonowania płaszcza; w układzie poziomym cylindryczne fazy podzielono pionowo na cztery sekcje oznaczane dalej kierunkami stron świata.



Rys. 1. Charakterystyczne przekroje zbiornika

## 2. Stan obiektu i jego historia

Stan zbiornika w dniu oględzin (jesień 2007 r.) przedstawiał się następująco. Na ścianach zewnętrznych widoczne były nieliczne ślady przeciekania oraz wycieki iniektu w miejscach wykonywania prac uszczelniających (rys. 2) oraz przecieki spod pierścienia górnego (od strony północnej) i zacieki z nieszczelności w dwóch niższych, poziomych szwach betonowania. Ściany były gładkie, z pewną liczbą otwartych pęcherzy powietrznych; nie stwierdzono niekontrolowanych szwów roboczych i miejsc żwirowych (tzw. raki). Stan zarysowania płaszcza pokazano schematycznie na rys. 3. Pierwsze rysy (w fazie I) o rozwartości do 0,15 mm zauważono po 3÷4 tygodniach od zabetonowania; rysy w fazach II i III ujawniły się dopiero po napełnieniu zbiornika wodą. W trakcie napełniania zbiornika wystąpiły także przecieki przez poziome szwy betonowania i wówczas wykonano iniekcję tych szwów przez umieszczone w nich wcześniej wężyki iniekcyjne (w trzech poziomych szwach płaszcza, tj. między ławą i fazą I oraz między fazami I i II oraz II i III, wężyk iniekcyjny zdublowano wkładką z taśmy bentonitowej). Iniekcja dała efekty umiarkowane zadawalające, ale przerwała drenowanie nieszczelności szwu przez wężyk i zlikwidowała rozplywanie się wody wzdłuż szwów.

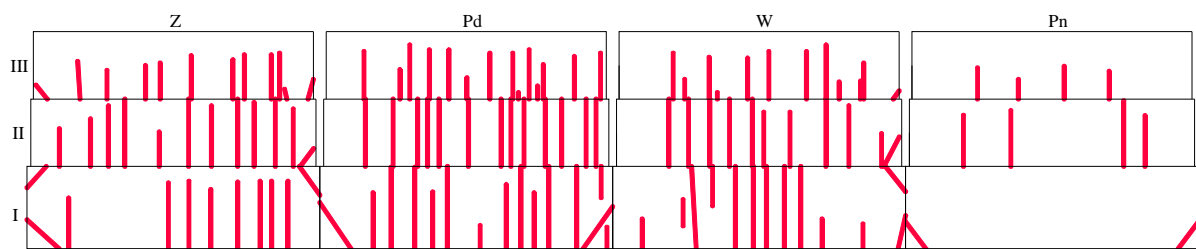
Pierwszemu napełnieniu zbiornika (próba wodna) towarzyszyły pomiary geodezyjne osiadań obiektu. Ich wyniki wskazują na równomierne i stosunkowo niewielkie osiadań zbiornika. Świadczy to dobrze o jakości posadowienia i wyklucza ewentualne różnice osiadań jako potencjalną przyczynę zarysowań.

Z uzyskanych danych wynikało, że względem Specyfikacji Technicznych Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych obiektu, za zgodą Inwestora i Projektanta, zmieniono stal zbrojeniową z 18G2 (A-II) na BSt 500 (A-IIIN) – bez zmiany ilości i rozmieszczenia – oraz cement z portlandzkiego CEM I 52,5 NA na hutniczy CEM III/A 32,5 N – LH/HSR/NA. Zastąpiono także część grysów bazaltowych żwirem i użyto superplastyfikatora polimerowego.

W Specyfikacji nie limitowano skurczu betonu ani temperatury mieszanki betonowej lub przyrostu tej wielkości.



Rys. 2. Widok zarysowań płaszczu zbiornika w trakcie prac iniekcyjnych



Rys. 3. Stan zarysowania płaszczu zbiornika – ściana w rozwinięciu, z podziałem na fazy i sekcje betonowania

Realizacyjny podział płaszczu zbiornika na fazy i sekcje betonowania sprowadził się do wykonania:

- na pierścieniowej ławie fazy I o wysokości 5 m, podzielonej na cztery sekcje o długości około 17,4 m każda; najpierw wykonano sekcje nieparzyste, a później parzyste,
- wyżej leżącej fazy II o wysokości 4,1 m, podzielonej w planie jak faza I (bez przesunięcia),
- fazy III o wysokości 4,1 m i podzielonej jak wyżej,
- pierścienia górnego ze stożkiem górnym zbiornika.

Dni i miesiące betonowania poszczególnych sekcji podano na rys. 4, na którym pokazano także odstępy czasowe między betonowaniem sąsiadujących ze sobą bloków.

Pielęgnacja wbudowanego betonu polegała na okryciu uformowanego elementu włókniną i jej intensywnym polewaniu: faza I – ze zraszaczy, fazy wyższe z węży.

| <i>sekcja Z</i>                            | <i>sekcja Pd</i>      | <i>sekcja W</i>                | <i>sekcja Pn</i>      |
|--|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| faza III<br>(6) 5.06 (4)<br><b>11</b> IX   | 1.06<br><b>14</b> X   | (5) 6.06 (7)<br><b>13</b> XII  | 30.05<br><b>13</b> IX |
| faza II<br>(8) 25.05 (7)<br><b>14</b> VIII | 18.05<br><b>18</b> VI | (6) 24.05 (7)<br><b>15</b> VII | 17.05<br><b>21</b> V  |
| faza I<br>(15) 11.05 (11)<br><b>24</b> IV  | 30.04<br><b>13</b> II | (9) 9.05 (13)<br><b>22</b> III | 26.04<br><b>9</b> I   |
| <i>ława pierścieniowa: 17.04</i>           |                       |                                |                       |

Rys. 4. Schematyczne rozwinięcie płaszcza zbiornika z podziałem na sekcje i poziome fazy betonowania wraz z harmonogramem. Objasnienia: 1) w centrum obrysu rozwinięcia bloku podano datę betonowania, a w nawiasach liczbę dni od betonowania sąsiednich bloków (odpowiednio od ich strony); 2) w dolnych wierszach podano liczbę dni od betonowania bloku położonego niżej; 3) w prawych dolnych rogach obrysu bloków – cyframi rzymskimi – ponumerowano bloki w kolejności ich realizacji; 4) na górze pokazano symbole stron świata identyfikujące pionowe sekcje obwodowe; 5) po lewej pokazano numerację poziomych faz betonowania

Wyniki badań kontrolnych betonu wskazują na osiągnięcie zakładanej klasy (B45) i stopnia wodoch szczelności (W8). Na próbkach pobieranych przy węźle i badanych po 28 dniach dojrzewania uzyskano wytrzymałość gwarantowaną (wg [3]) w przedziale od 47,1 MPa do 53,4 MPa, a na próbkach branych w miejscu wbudowania i badanych między 55 i 85 dniem dojrzewania około 47,5 MPa.

### 3. Analiza stanu i jego przyczyn

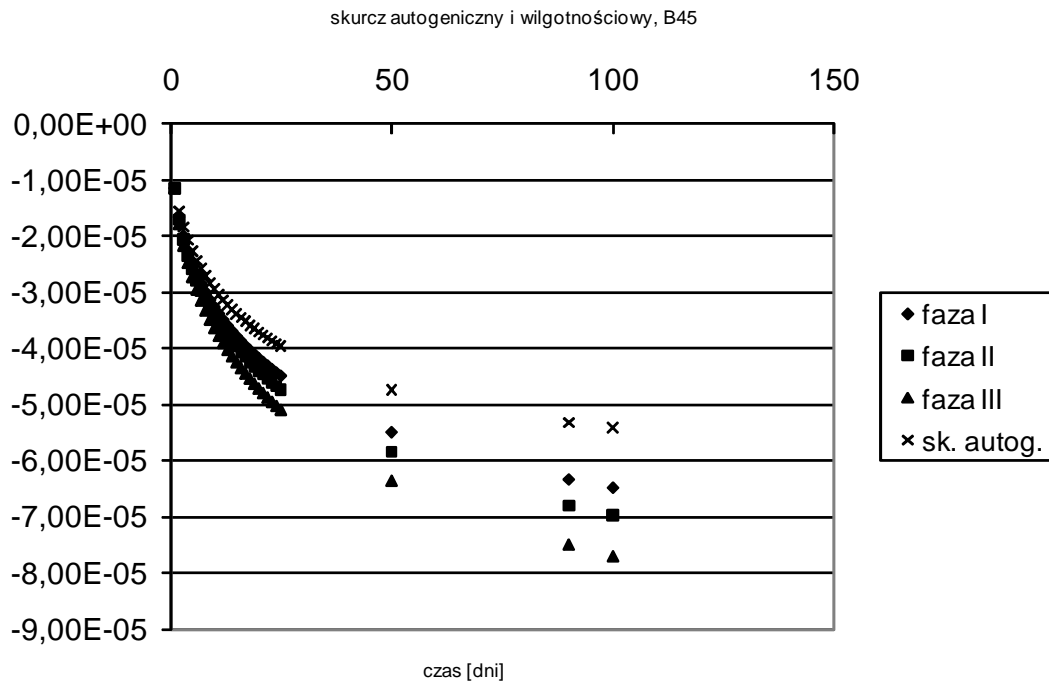
#### 3.1. Technologia realizacji a odkształcenia i naprężenia termiczne i skurczowe

W recepcie zwraca uwagę korzystna zmiana rodzaju cementu na hutniczy i niekorzystna, wysoka jego zawartość – 395 kg/m<sup>3</sup>, jakkolwiek zgodna ze Specyfikacją. Zmiana rodzaju cementu spowodowała, przy utrzymaniu normalnego tempa przyrostu wytrzymałości, obniżenie ilości wydzielającego się ciepła (ważne ze względu na masywność płaszcza na wysokości fazy I i pół-masywność na wysokości fazy II), ale nie zmieniła w istotnym stopniu wielkości skurczu. Ponieważ odkształcenia skurczowe są silnie zależne od ilości cementu (skurcz autogeniczny), dlatego nawet bardzo staranne działania pielęgnacyjne obniżające dynamikę skurczu wilgotnościowego (zależnego m.in. od tzw. zastępczego wymiaru elementu), nie mogły w analizowanym przypadku okazać się dostatecznie skuteczne. Przekonują o tym obliczenia odkształceń skurczowych, wykonane według [4], których wyniki pokazano na rys. 5. Skurcz autogeniczny stanowi od 70 do 85% skurczu całkowitego.

Masywność fazy I, w połączeniu z ekspozycją niektórych sekcji płaszcza na nasłonecznienie, spowodowała rozgrzew betonowanego elementu. Przy jego grubości 0,9 m rozpraszanie ciepła hydratacji nie było swobodne i powstał w ścianie gradient temperatury, a wraz z nim naprężenia własne (w górnej części płaszcza) i naprężenia wymuszone (w dolnej części płaszcza). W fazie rozgrzewu w środku ściany występowały naprężenia ściskające, a przy powierzchni – rozciągające. Te ostatnie sumowały się z naprężeniami rozciągającymi od skurczu. W fazie stygnięcia występuje tzw. inwersja naprężeń termicznych, co oznacza, że we wnętrzu ściany pojawia się rozciąganie, a na powierzchni ściskanie, które niestety nie jest

w stanie zrównoważyć naprężeń rozciągających od narastającego skurczu. Tym prawdopodobnie spowodowane było zarysowanie sekcji fazy I.

W dolnej części fazy dominujący wpływ na stan naprężenia miały naprężenia wymuszone, wynikające z więzów podparcia. Dlatego większość rys inicjowała się w kontakcie z łąwą i „przędła” ku górze. Ze względu na znaczącą grubość fazy I i mitygujące działanie efektów termicznych na naprężenia skurczowe większość rys nie była przelotowa i przecieki, mimo większych ciśnień wody, były mniejsze niż w fazach wyżej położonych.



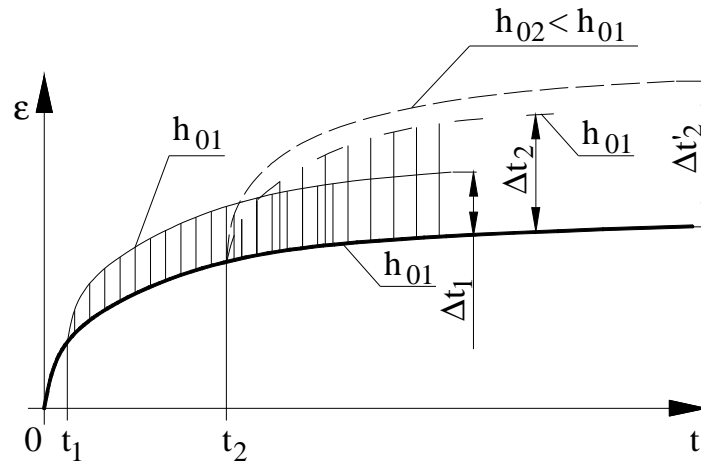
Rys. 5. Rozwój odkształceń skurczowych w czasie w fazach betonowania zbiornika. Klasa betonu B45. Obliczenia wg [4]

W fazach II i III udział zjawisk termicznych był proporcjonalnie mniejszy, gdyż fazy te mają znacząco mniejsze grubości. Towarzyszyło temu zwiększone oddziaływanie odkształceń skurczowych, pozostających w związku z zastępczym wymiarem przekrojów poprzecznych faz betonowania (rys. 5). W tych fragmentach płaszcza rysy były przede wszystkim skurczowe i – ze względu na mniejszą grubość powłoki – w większości przelotowe (przecieki były intensywniejsze, mimo niższych ciśnień wody niż na wysokości fazy I).

Skomplikowany układ rys w płaszczu zbiornika (rys. 3) jest rezultatem opisanych wyżej procesów i ich nakładania się, odpowiednio do czasoprzestrzennego schematu wznoszenia konstrukcji (rys. 4).

Odstęp czasowy wykonania sąsiednich bloków wpływa znacząco na różnice odkształceń między nimi rys. 6, a co za tym idzie na naprężenia generowane w tych blokach i potencjalny stan ich zarysowania.

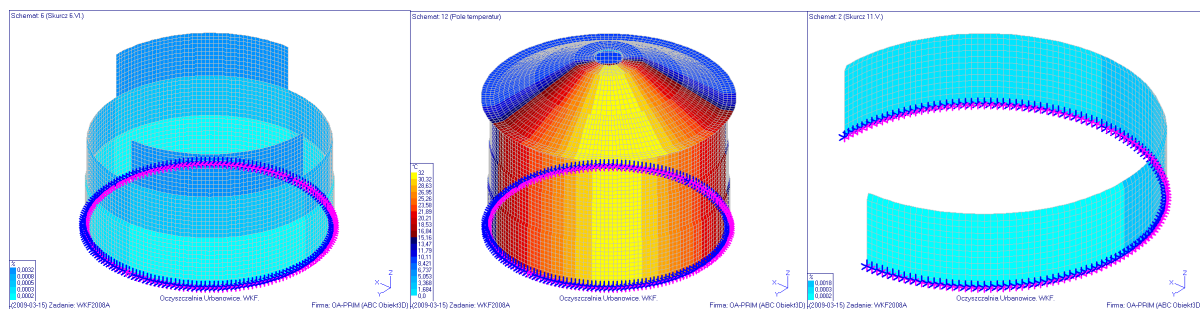
Jeszcze bardziej skomplikowane są oddziaływania bloków masywnych, gdyż są one początkowo w okresie rozgrzewu i rozszerzania się, a później w okresie stygnięcia i kurczenia się. Ważne jest, w której fazie tego procesu powstaje sąsiedni blok: gdy w okresie rozszerzania się bloku wykonanego wcześniej, dystorsje są mniejsze, gdy w okresie stygnięcia – będą one większe. Oddziaływania tego typu występowały prawdopodobnie między blokami w fazie I oraz – być może – między niektórymi blokami fazy I i II. Oddziaływania te mogą prowadzić zarówno do powstawania rys w blokach wykonywanych w drugiej kolejności, jak i w blokach już ułożonych, co wpływa na stan zarysowania (rys. 3).



Rys. 6. Schemat zmian w czasie odkształceń skurczowych bloków betonowych: wykonanego w czasie  $t = 0$  i kolejnych, wykonanych w chwili  $t_1$  lub  $t_2$ . Wysokość obszarów zakreślonych to różnice odkształceń skurczowych między blokami; dążą one do wartości  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_2'$  zależnych od zwłoki w wykonaniu kolejnego bloku i jego wymiaru zastępczego  $h_0$ , wpływającego na wielkość i intensywność zmian skurczu

### 3.2. Praca statyczno-wytrzymałościowa zbiornika

W celu potwierdzenia przypuszczeń o przyczynach powstania uszkodzeń w ścianach zbiornika przeprowadzono stosowne obliczenia statyczne [2, 4]. Wpływ odkształceń skurczowych, nierównomiernego nagrzewania konstrukcji w okresie letnim oraz parcia wody na rozkład sił wewnętrznych w poszczególnych przekrojach obiektu oszacowano przy zastosowaniu programu ABC-Obiekt 3D. Oddziaływania powyższe analizowano w kolejności ich zaistnienia, z uwzględnieniem schematów statycznych odpowiadających rozważanemu etapowi realizacji konstrukcji. Rysunek 7 przedstawia wybrane warianty obciążenia modelu statycznego. Wartości sił wewnętrznych w poszczególnych przekrojach wyznaczano stosując superpozycję wielkości otrzymanych w wyniku obliczeń.

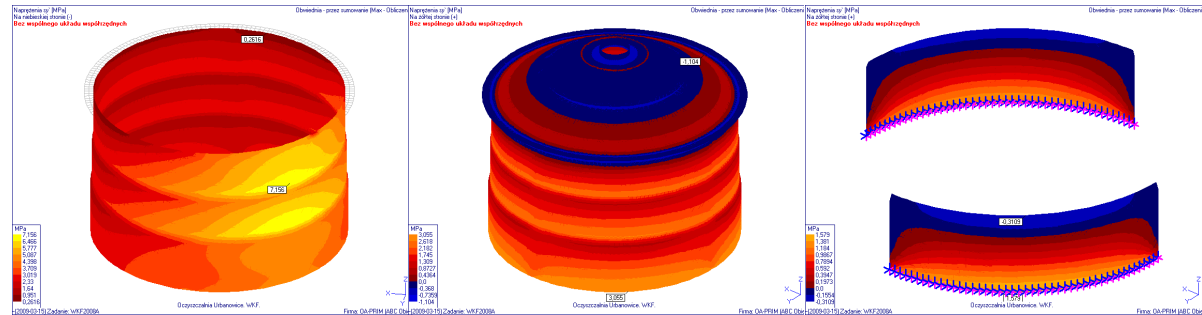


Rys. 7. Kolejne schematy obciążenia modelu: skurcz w trakcie wznoszenia sekcji 1 i sekcji 3, nierównomierne nagrzewanie zbiornika w okresie letnim

Wyniki analizy wskazują, że równoleżnikowe naprężenia rozciągające, wywołane przez skurcz są bliskie wytrzymałości młodego betonu na rozciąganie już na etapie wykonania fazy I konstrukcji zbiornika. Odkształcenia równoleżnikowe trzeciej sekcji tej fazy po dwóch dniach od zabetonowania mogą osiągnąć wartość powodującą, przy założeniu liniowej sprężystości, naprężenia rzędu  $0,70 \div 0,90$  MPa, podczas gdy wytrzymałość betonu na rozciąganie oszacowano na poziomie ok.  $0,70$  MPa. Potwierdzać to może stwierdzone przez wykonawcę zarysowanie się dolnych fragmentów ściany w niedługim czasie od jej wykonania. Obliczenie wpływu skurczu do dnia poprzedzającego wykonanie próby wodnej pozwala oszacować naprężenia rozciągające w poszczególnych sekcjach fazy I na poziomie  $3,3 \div 3,5$  MPa, są to



wartości zbliżone do spodziewanej, docelowej wytrzymałości betonu na rozciąganie. W rezultacie obliczeń odwzorowujących nierównomierne nagrzewanie przez słońce oszacowano, że odkształcenie wewnątrz zbiornika (rys. 8) może sięgać 0,20‰, podczas gdy odkształcenie graniczne przy rozciąganiu wynosi 0,15‰. Wynik ten potwierdza możliwość pojawienia się rys po stronie wewnętrznej zbiornika i wyjaśnia obecność zarysowań wskrośnych (oddziaływanie skurczowe powodowały głównie zarysowania po stronie zewnętrznej ściany).



Rys. 8. Naprężenia równoleżnikowe w zbiorniku: od skurczu w fazie budowy sekcji 1; działanie skurczu i parcia wody; nierównomierne nagrzewanie w okresie letnim

Obliczeniowe sprawdzenie szerokości rozwarcia rys w czasie próby wodnej wykazało, że może być ona większa od dopuszczalnej wartości 0,10 mm. Przykładowo, szerokość rysy w sekcji Pn fazy I oszacowano na poziomie 0,29 mm, a w sekcji Pn fazy III równą 0,24 mm.

#### 4. Przyczyny uszkodzeń zbiornika

Bezpośrednią przyczyną zarysowań płaszczki zbiornika były oddziaływania pośrednie: odkształcenia skurczowe i termiczne betonu. Na wielkość tych odkształceń wpłynęły: masowość płaszczki na wysokości fazy I i jego pół-masywność w fazie II oraz znaczący potencjał skurczu betonu wynikający przede wszystkim z dużego dozowania cementu (skurcz autogeniczny). Duży potencjał skurczowy betonu, wynikający bezpośrednio z dozowania cementu, jest związany z wysoką klasą betonu (B45). Odkształcenia te wygenerowały znaczące naprężenia własne i wymuszone w realizowanych elementach, przy czym wzrostowi tych ostatnich sprzyjały duże długości sekcji w obrębie faz (ponad 17 m); pewne znaczenie mógł mieć również harmonogram betonowania, wynikający z przesłanek organizacyjnych.

Rysy skurczowe były dodatkowo inicjowane przez lokalnie znaczące różnice odkształceń i naprężeń skurczowych, wynikające m.in. ze skokowo zmiennej grubości płaszczki.

W projekcie uwzględniono obciążenie skurczem w sposób typowy, jako obciążenie ekwiwalentną różnicą temperatury, co w analizowanym przypadku okazało się niewystarczające. Nie uwzględniono nierównomiernego nagrzewania się płaszczki i kopuły zbiornika w wyniku nasłonecznienia, co jest szczególnie ważne w okresie próby wodnej, gdy nie ma jeszcze izolacji termicznej ścian.

#### 5. Zalecenia dotyczące zbiornika wykonanego

Rysy w płaszczce zbiornika zostały uszczelnione przez iniekcję, przy czym wykonano ją przy naporze wody, a więc przy maksymalnym rozwarciu rys. Część iniektu przeszła na wskroś ściany i doszczelniła rysy w powłoce antykorozyjnej.

Zbiornik został opróżniony i po zamontowaniu wyposażenia technologicznego ponownie napełniony. Należy mieć nadzieję, że ten cykl pracy konstrukcji: odciążenie – obciążenie nie

wywołał już dodatkowych zarysowań. Przewidywane warunki pracy zbiornika (praktycznie stałe napełnienie i stała temperatura ścieków) są korzystne dla zachowania szczelności zainiektowanego płaszczu.

## 6. Zalecenia dotyczące projektowania analogicznych zbiorników

Praktyka projektowania i wykonawstwa zbiorników zamkniętych komór fermentacyjnych, jako obiektów hydrotechnicznych, wskazuje, że należy stosować beton hydrotechniczny średniej klasy, np. BH25 lub BH30 według [1], a klasa stali powinna być odpowiednia do przyjętej klasy betonu (np. A-III). Grubość ściany powinna wynikać z gradientu hydraulicznego i założonego stopnia wodoszczelności betonu, np. wg [3], a redukcji obciążenia na wysokości zbiornika powinna odpowiadać redukcja nośności przekroju żelbetowego zrealizowana przez zmniejszenie mocy zbrojenia, a nie grubości ściany. Należy stosować pręty o możliwie niewielkiej średnicy, aby ograniczyć szerokość rozwarcia ewentualnych rys. Przekroje powinny być wymiarowane jako niezarysowane, a zbrojenie powinno ograniczyć rozwarcie ewentualnych rys poniżej 0,1 mm.

Mieszanka betonowa powinna zawierać możliwie mało cementu o niskiej kaloryczności; cement może być wolnowiążący. Kruszywo powinno być otoczkowe i płukane, a stos okruszowy możliwie szczelny, o możliwie dużej, maksymalnej średnicy ziarna. Ze względu na powszechne ocieplanie WKF-ów stopień mrozoodporności betonu nie musi być wysoki i w większości przypadków napowietrzanie mieszanki nie jest konieczne.

Podział na fazy i sekcje betonowania oraz jego harmonogram musi uwzględniać dynamikę procesów termicznych i wilgotnościowych w betonie. Długość sekcji po obwodzie nie powinna przekraczać 9–12 m. Najpierw należy betonować sekcje (odcinki walca) nieparzyste, później parzyste, przy czym sekcje parzyste należy wykonać możliwie późno i w możliwie niskiej temperaturze scalenia. Wyżej leżące sekcje powinny być betonowane bez zbędnej zwłoki.

Szwy należy uszczelniać wewnętrznymi taśmami z tworzyw sztucznych, zgrzewanymi w miejscach skrzyżowań. Najlepiej w miejscach połączeń stosować kształtki fabrycznie odlewane (np. typu X lub T), zgrzewane doczołowo do prostych odcinków taśm.

Pielęgnacja betonu powinna być wdrożona szybko, po końcu wiązania i trwać co najmniej 14 dni (ze względu na wymaganą wodoszczelność betonu).

W miarę możliwości należy wykorzystywać sprzyjające warunki atmosferyczne (jesień, niezbyt ostra zima lub wiosna) i wbudowywać stosunkowo chłodną mieszankę wykorzystując efekt samonagrzewu betonu w stosunkowo grubych ścianach (metoda zachowania ciepła).

## Literatura

1. Bialik G., Kempa Cz., Misiak W., Strzemiecki S.: Warunki techniczne wykonania i odbioru robót w dziedzinie gospodarki wodnej w zakresie konstrukcji hydrotechnicznych z betonu, Ministerstwo Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa, 1994.
2. CEB-FIB Model Code 1990, Bulletin d' Information No 213–314, Lausanne, 1993.
3. PN-B/88-06250: Beton zwykły.
4. PN-B-03264: 2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.