



MARCIN ŁUKACZ, *marcinlukacz@gmail.com*

Studium Doktoranckie Politechniki Krakowskiej

MARIAN PŁACHECKI, *emplacheccy@neostrada.pl*

Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Jarosławiu

## AWARIA DWUKOMOROWEGO ŻELBETOWEGO ZBIORNIKA SPOWODOWANA ODDZIAŁYWANAMI TERMICZNYMI

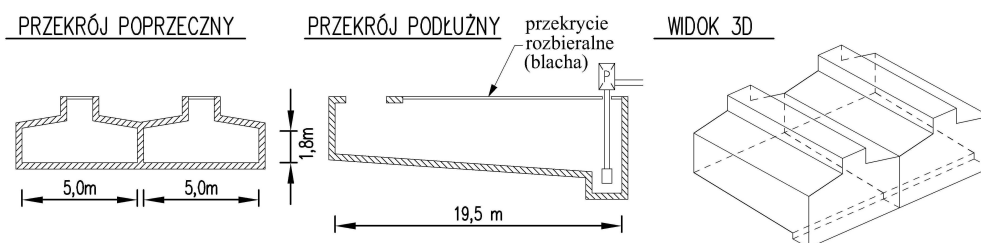
### FAILURE OF TWO-CHAMBERED TANK MADE OF REINFORCED CONCRETE CAUSED BY THERMAL ACTIONS

**Streszczenie** W referacie przedstawiono awarię dwukomorowego żelbetowego zbiornika na fosfor, magazynowany w środowisku wodnym o temperaturze  $+90^{\circ}\text{C}$ . Wskutek błędnie przyjętego, uproszczonego modelu obliczeniowego oraz pominięcia obciążeń termicznych, zastosowano zbrojenie w ścianach zbiornika, nie zapewniające jego szczelności. Dla wybranej ściany zilustrowano efekty oddziaływań termicznych, stanowiących dla niej zasadnicze obciążenie w porównaniu z przyjętymi w dokumentacji projektowej. Sformułowano wnioski oraz koncepcję naprawy zbiornika, uwzględniając warunki jego użytkowania.

**Abstract** The paper deals with the reasons of failure of a reinforced concrete two-chambered underground phosphorus storage tank. Phosphorus is stored in water at  $+90^{\circ}\text{C}$ . The leakage is caused by neglecting thermal loads and applying too simple computational model. There are presented effects of dominating thermal actions for the selected part of the tank. Conclusions and the way of repair are presented.

### 1. Wstęp

Przedmiotem analizy jest żelbetowy, dwukomorowy zbiornik na fosfor (rys. 1). Zbiornik zaprojektowano jako podziemny, zaizolowany 10-cio centymetrową warstwą styropianu. Roboty ziemne przy budowie zbiornika rozpoczęto w porze jesiennej, obiekt przekazano do użytkowania w okresie lata następnego roku.



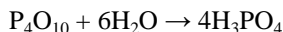
Rys. 1. Geometria zbiornika

W trakcie próby szczelności zbiornika wystąpiły przecieki wzdłuż przerw roboczych, nie stwierdzono objawów zarysowania zbiornika. Po uszczelnieniu przecieków, podgrzano wodę do temperatury około 90°C, odpowiadającej warunkom eksploatacji zbiornika. W trakcie podgrzewania wody ujawniły się regularne zarysowania w ścianach zbiornika. Obciążenie termiczne nie zostało uwzględnione w pierwotnych obliczeniach statycznych dokumentacji wykonawczej zbiornika.

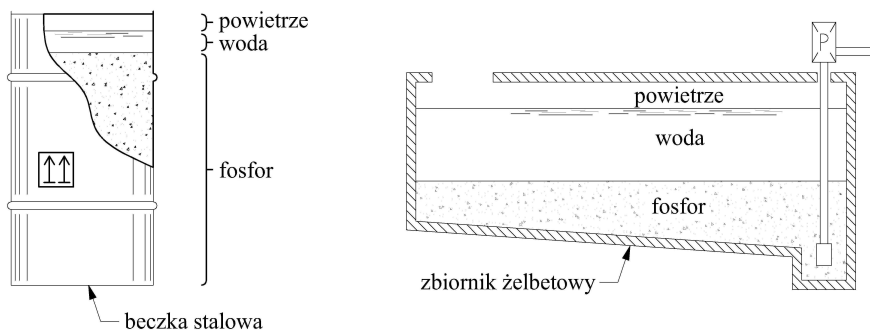
## 2. Technologia magazynowania fosforu

Nietypowy kształt zbiornika wynika z technologii magazynowania fosforu. Butelkowy kształt komory daje ograniczenie powierzchni parowania gorącej wody znajdującej się w zbiorniku; poziom lustra wody utrzymywany jest w „szyjce” zbiornika.

Fosfor żółty jest substancją silnie trującą, dawka śmiertelna dla dorosłego człowieka to około 0,1 g. W kontakcie z powietrzem ulega samozapaleniu, rozgrzewając się do temperatury około 1300°C, a utleniając się powoduje powstanie pięciotlenku fosforu (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Ten przedostaje się do atmosfery i w czasie opadów wiąże z wodą tworząc kwas fosforowy (powstaje tzw. kwaśny deszcz).

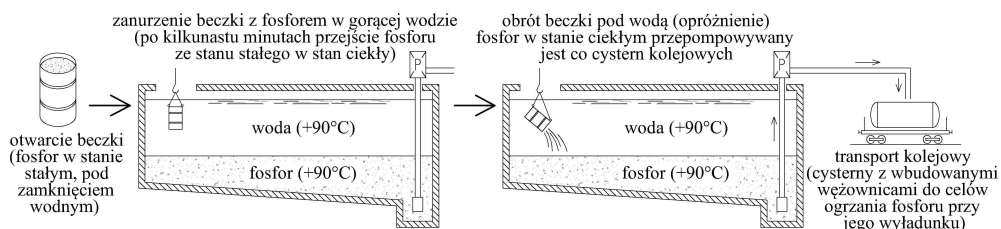


Gęstość fosforu wynosząca 1,8 g/cm<sup>3</sup> pozwala na stosowanie tzw. zamknięcia wodnego jako zabezpieczenia przed kontaktem fosforu z powietrzem. Schemat zabezpieczenia przed zapaleniem fosforu w beczkach i zbiorniku przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zamknięcie wodne chroniące fosfor przed kontaktem z powietrzem

Temperatura topnienia fosforu wynosi 44°C, jednak lepkość umożliwiającą swobodny spływ fosforu oraz jego przepompowywanie osiąga się w temperaturze około 90°C – stąd konieczność podgrzewania do tak wysokiej temperatury.



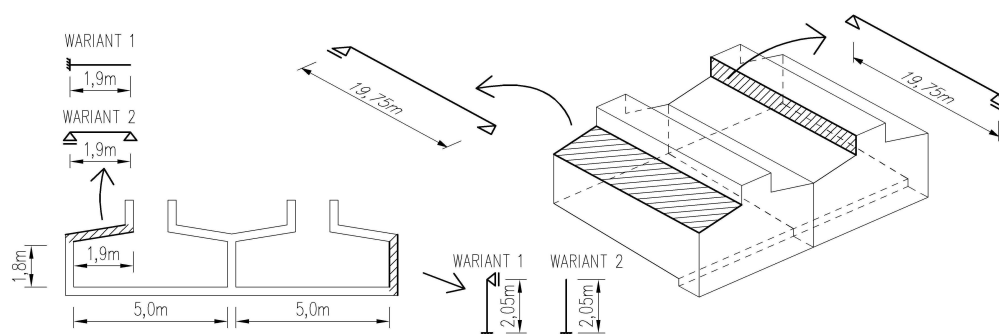
Rys. 3. Schemat technologiczny magazynowania i przeładunku fosforu

### 3. Nieprawidłowości na etapie projektowania

W dokumentacji projektowej stwierdzono następujące nieprawidłowości:

- pominięto obciążenia termiczne związane z podgrzaniem wody do temperatury około 90°C,
- pominięto obciążenia od urządzeń technologicznych zainstalowanych na przekryciu zbiornika i obciążenia klimatyczne oddziaływujące na te urządzenia (wiaty stalowe, kominy wyciągowe),
- przyjęto uproszczone schematy statyczne, niezgodne z rzeczywistymi warunkami pracy konstrukcji zbiornika – całkowicie pominięto przestrzenną pracę konstrukcji zbiornika,
- nie wykonano badań podłoża gruntowego.

Poszczególne ściany zbiornika potraktowano wyłącznie jako zginane, z pominięciem sił osiowych (rys. 4).

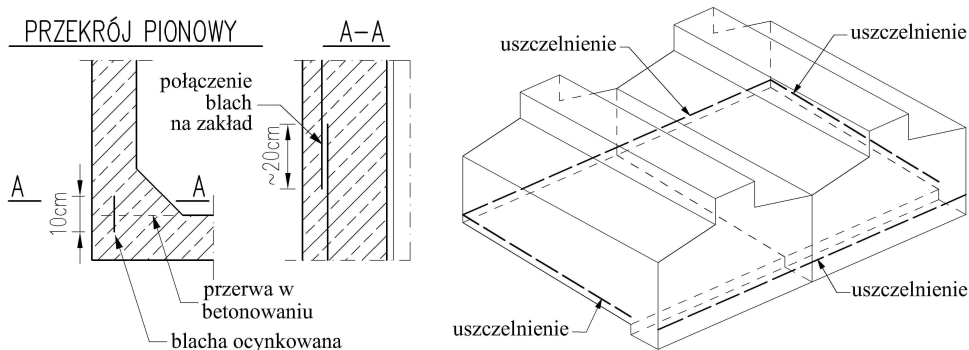


Rys. 4. Schematy statyczne przyjęte w projekcie

### 3. Nieprawidłowości na etapie realizacji obiektu

Analiza dokumentacji budowy oraz dokumentacji fotograficznej i filmowej z realizacji obiektu wskazała następujące nieprawidłowości wykonawcze:

- pozostawienie wykopu na okres zimowy bez dodatkowych zabezpieczeń,
- błędne ukształtowanie taśmy uszczelniającej w przerwach roboczych („na styk”) oraz jej brak w części przerw roboczych (rys. 5),



Rys. 5. Rozmieszczenie i szczegół uszczelnienia w przerwie roboczej

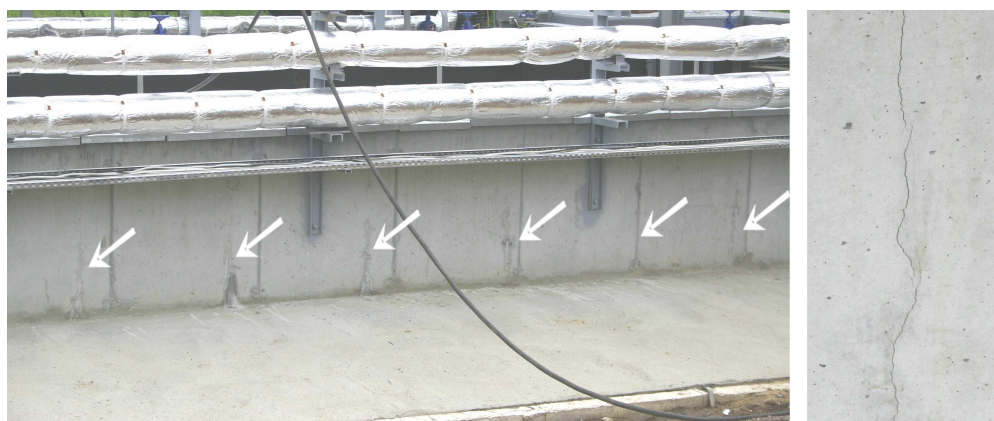
- przeprowadzenie próby szczelności wodnej w obsypanym zbiorniku, co w efekcie ograniczyło próbę szczelności wyłącznie do ściany wewnętrznej między komorami zbiornika,
- uszczelnienie zbiornika wykonano matami z tworzywa sztucznego, naklejonymi na podłoże osuszone palnikiem gazowym, bez kwalifikowanego nadzoru technicznego.

#### 4. Awaria obiektu

Próba szczelności przeprowadzona na obsypanym zbiorniku ujawniła duże przecieki w miejscach przerw roboczych, wzdłuż krawędzi styku ścian zbiornika (rys. 6). Faza rozruchu przeprowadzona została na częściowo termicznie zaizolowanym zbiorniku. Wystąpiło zarysowanie w ścianach powyżej poziomu obsypania (rys. 7). Można przypuszczać, że zarysowanie ścian obejmowało również strefę obsypaną gruntem.



Rys. 6. Przeciek między komorami – górna przerwa technologiczna



Rys. 7. Po lewej: zarysowanie zbiornika, po prawej: rysa w zbliżeniu

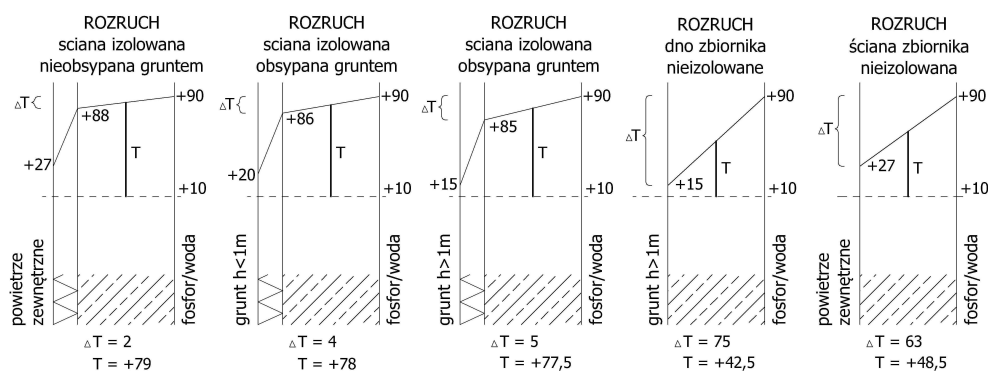
W dokumentacji próby szczelności nie odnotowano informacji o sposobie usunięcia nieszczelności wzdłuż przerw roboczych. Podgrzewanie wody do temperatury  $+90^{\circ}\text{C}$  trwało około 12 godzin. Rozwartość zaobserwowanych rys oszacowano na  $0,4\div 0,5$  mm. W krótkim czasie z rys, widocznych na ścianach powyżej poziomu obsypania gruntem, zaczęła sączyć się woda. Poziom wody w zbiorniku obniżono, po osuszeniu zewnętrzne ściany „szyjki” zbiornika pokryto powłoką uszczelniającą, zaizolowano termicznie i obsypano gruntem. Ostatecznie obiekt został oddany do użytkowania. Komory zbiornika napełnione zostały wodą i fosforem. W efekcie fosfor będący w stanie ciekłym wniknął w szczeliny wzdłuż przerw roboczych i uszczelnił przegrodę (przejście fosforu z fazy ciekłej w stałą przy niższej temperaturze wewnątrz przegrody).

#### 4. Analiza wpływu pominięcia obciążenia termicznego na awarię zbiornika

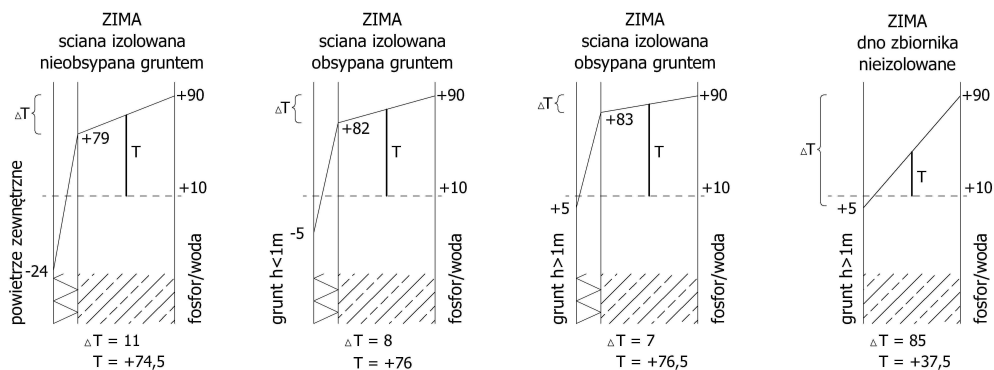
W celu oszacowania wielkości sił wewnętrznych wykonano analizę numeryczną zbiornika. Uwzględniono następujące obciążenia:

- ciężar własny zbiornika,
- ciężar własny konstrukcji zamontowanych na zbiorniku (dwie wiaty stalowe, rurociągi i odciąg oparów) wraz z oddziaływaniami środowiskowymi i użytkowymi z nimi związanymi (śnieg, wiatr, obciążenia od wciągników, obciążenia użytkowe),
- parcie gruntu,
- parcie hydrostatyczne,
- termiczne.

Analizę oparto na normach obowiązujących w czasie projektowania i wykonania zbiornika tj. normach PN. Rozpatrzono cztery kombinacje oddziaływań, odpowiadające: próbie szczelności, projektowanemu rozruchowi, faktycznemu rozruchowi, eksploatacji w okresie zimowym. W każdej kombinacji uwzględniono ciężar własny zbiornika i oddziaływania wynikające z konstrukcji na nim zamontowanych. Dla próby szczelności uwzględniono ponadto parcie cieczy w jednej komorze. W fazach rozruchu uwzględniono parcie cieczy w obu komorach, parcie gruntu, obciążenie termiczne w zbiorniku częściowo albo całkowicie zaizolowanym styropianem.



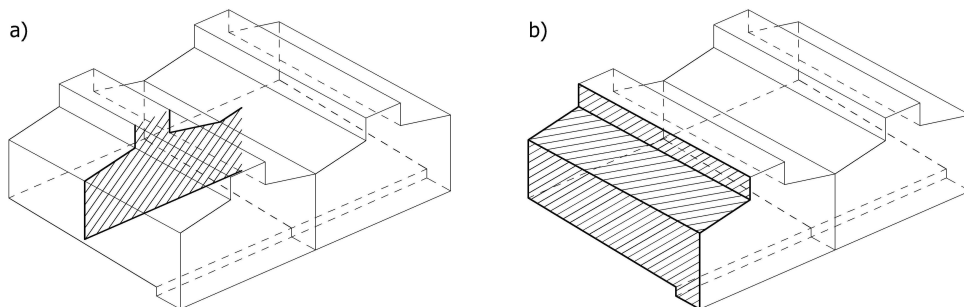
Rys. 8. Obciążenie termiczne poszczególnych ścian zbiornika dla faz rozruchu [°C]



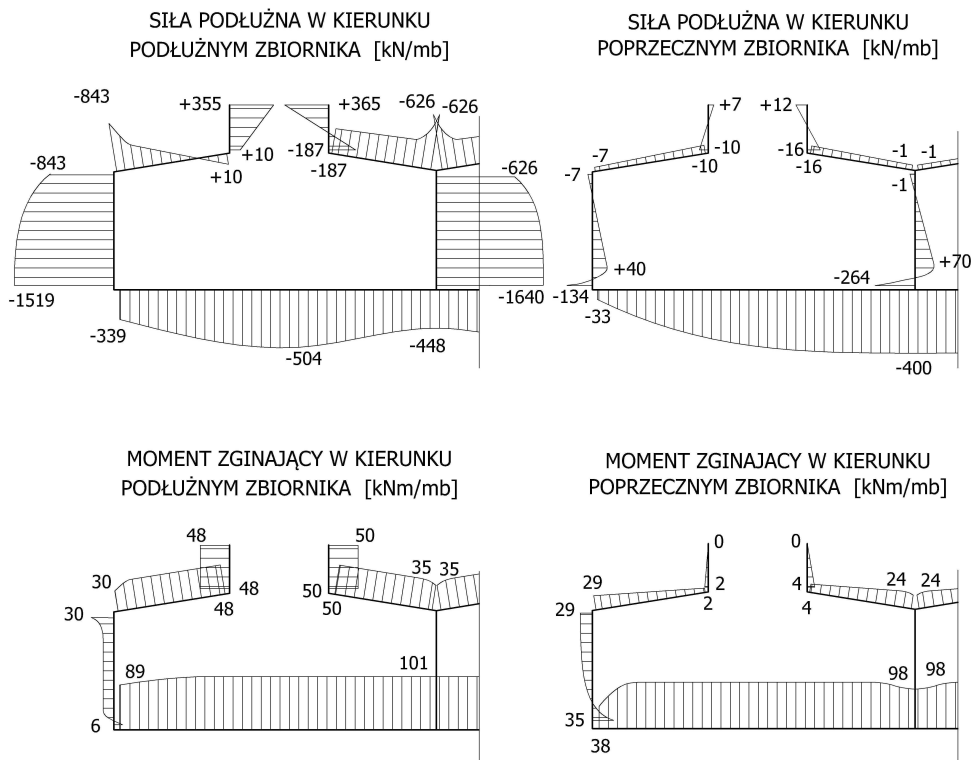
Rys. 9. Obciążenie termiczne poszczególnych ścian zbiornika dla eksploatacji w okresie zimy [°C]

Dno i ściany zbiornika, w zależności od głębokości, obciążono gradientem temperatury oraz temperaturą równomiernie rozłożoną w przekroju (rys. 8 i 9). Dla jednej ze ścian szczytowych, nie obsypanej gruntem, przyjęto obciążenie (stałe na jej wysokości) gradientem temperatury oraz temperaturą równomiernie rozłożoną w przekroju. Przyjęto temperaturę wykonania konstrukcji  $+10^{\circ}\text{C}$ . Dla sytuacji zimowej przyjęto temperaturę powietrza zewnętrznego  $-24^{\circ}\text{C}$ , temperaturę w gruncie  $-5^{\circ}\text{C}$  do głębokości 1 m oraz  $+5^{\circ}\text{C}$  w warstwach głębszych. Dla fazy rozruchu przyjęto temperaturę powietrza  $+27^{\circ}\text{C}$ , w gruncie odpowiednio  $+20^{\circ}\text{C}$  i  $+15^{\circ}\text{C}$ . Rozkład temperatury dla poszczególnych przegród wyznaczono przyjmując  $\lambda_{\text{żelbet}} = 1,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  tj. jak dla żelbetu wilgotnego oraz  $\lambda_{\text{styropian}} = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  tj. jak dla styropianu FS40 (rys. 8, 9). Uwzględniono sprężyste posadowienie zbiornika na warstwie piasków średnich, o średnim stopniu zagęszczenia.

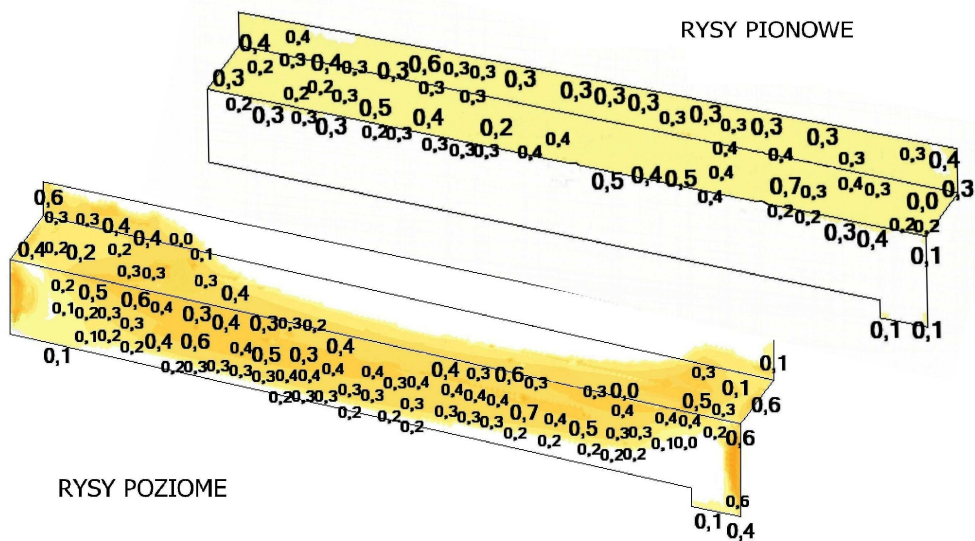
Poniżej przedstawiono wykresy sił wewnętrznych dla przekroju oznaczonego na rys. 10a oraz mapy rozwarcia rys dla ścian oznaczonych na rys 10b.



Rys. 10. Lokalizacja przekroju i ścian dla których podano wykresy sił wewnętrznych oraz mapy rozwarcia rys



Rys. 11. Wykresy sił wewnętrznych dla przekroju poprzecznego przez zbiornik dla fazy faktycznego rozruchu



Rys. 12. Mapa rozwartości rys dla fazy faktycznego rozruchu [mm]

Zaprezentowane mapy rozwarłości rys dowodzą, że zbiornik w wielu strefach miał niedobór zbrojenia, co uzasadnia intensywne przecieki wodne przez ściany zbiornika podczas rozruchu. Również w pozostałych ścianach zbiornika stwierdzono znaczne przekroczenie dopuszczalnej rozwarłości rys.

### 5. Metoda naprawy

Najtrudniejszym zagadnieniem związanym z naprawą zbiornika będzie jego całkowite opróżnienie z fosforu. Fosfor zalegający na dnie zbiornika zostanie wypompowany, ale jego resztki zawarte w rysach nie zostaną usunięte. W rezultacie obniżenie poziomu wody doprowadzi do kontaktu resztek fosforu z powietrzem, a w efekcie do jego zapalenia. Przewiduje się, że konieczna będzie chemiczna neutralizacja resztek fosforu jeszcze w stanie pełnego napełnienia zbiornika wodą.

Po opróżnieniu zbiornik powinien zostać odkopany, a izolacja termiczna usunięta. Po oczyszczeniu powierzchni zewnętrznych, zbiornik powinien być poddany próbie szczelności. Zależnie od wyniku, przegrody zbiornika powinny zostać w całości lub w części zainiekowane środkiem uszczelniającym. Wewnątrz komór zbiornika konieczne jest wykonanie szczelnej membrany. Należy zwrócić szczególną uwagę na trudne warunki pracy materiału uszczelniającego (wysoka temperatura, parcie hydrostatyczne).

### 6. Wnioski

W analizowanym zbiorniku odciążenie termiczne generuje największe siły wewnętrzne, tym samym stanowi podstawowe obciążenie dla konstrukcji. Pominięcie obciążenia termicznego oraz przeprowadzenie rozruchu instalacji przy braku części izolacji termicznej zbiornika stanowiło przyczynę jego zarysowania. Przyczyną powstania przecieków w miejscach przerw roboczych była niewłaściwie dobrana technologia ich uszczelnienia.

### Literatura

1. Dyduch K., Płachecki M.: Błędy projektowe i wykonawcze w żelbetowych zbiornikach na wodę i ścieki, XII Konferencja Naukowo-Techniczna: Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 2003, s. 63÷72.
2. PN-86/B-02015 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą.
3. PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
4. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.