



Prof. dr hab. inż. Czesław SZYMCZAK, szymcze@pg.gda.pl
Dr inż. Piotr IWICKI, piwicki@pg.gda.pl
Dr inż. Tomasz MIKULSKI, tomi@pg.gda.pl
Politechnika Gdańska

ANALIZA STANU AWARYJNEGO BIOREAKTORA OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW GDAŃSK-WSCHÓD

FAILURE ANALYSIS OF BIOREACTOR OF SEWAGE-TREATMENT PLANT GDANSK-WSCHOD

Streszczenie W pracy podano opis stanu awaryjnego żelbetowego bioreaktora oczyszczalni ścieków Gdańsk -Wschód. Już w początkowym okresie jego eksploatacji doszło do pewnych przecieków, które stopniowo zwiększały się. W celu ustalenia przyczyn tego stanu awaryjnego zbudowano model komputerowy bioreaktora przy wykorzystaniu pakietu NASTRAN i ROBOT. Przy modelowaniu ścian i dna bioreaktora wykorzystano prostokątne elementy płytowe, natomiast współpracę podłoża gruntowego uwzględniono za pomocą modelu Winklera z uwzględnieniem warstw izolacyjnych. Zbudowany w ten sposób model pozwolił na ustalenie przyczyn stanu awaryjnego, a następnie został wykorzystany do analizy różnych wersji zmian konstrukcyjnych bioreaktora w celu zapewnienia jego szczelności i niezawodności.

Abstract A description of the concrete bioreactor failure in the sewage-treatment plant Gdansk-Wschod is presented. In early stage of the bioreactor exploitation some leakages has been observed that are gradually increased. In order to establish reasons of the failure a computer model of the bioreactor is worked out using the NASTRAN system. The bioreactor walls and the bottom plate are modeled by means of the rectangular plate elements but the interaction of the structure with the subsoil is taken into account using the Winkler type elastic foundation and the isolation layer. The computer model elaborated allows for establishing the reasons of the bioreactor failure, and it is applied to analysis of a few variants of the redesign of the structure in order to fulfill its reliability and leak proof.

1. Wstęp

W ostatnich latach na terenie Polski powstało wiele nowych oczyszczalni ścieków. Technologia oczyszczania ścieków (procesy mechaniczne, biologiczne) narzuca budowę odpowiednich zbiorników. Są to przeważnie walcowe zbiorniki pionowe o średnicy dochodzącej do 50 m lub prostokątne reaktory biologiczne o długości przekraczającej niejednokrotnie 100 m i szerokości stanowiącej około połowę długości. Wysokość płaszcza z reguły wynosi około 6 m, co wynika z technologii procesów oczyszczania ścieków.

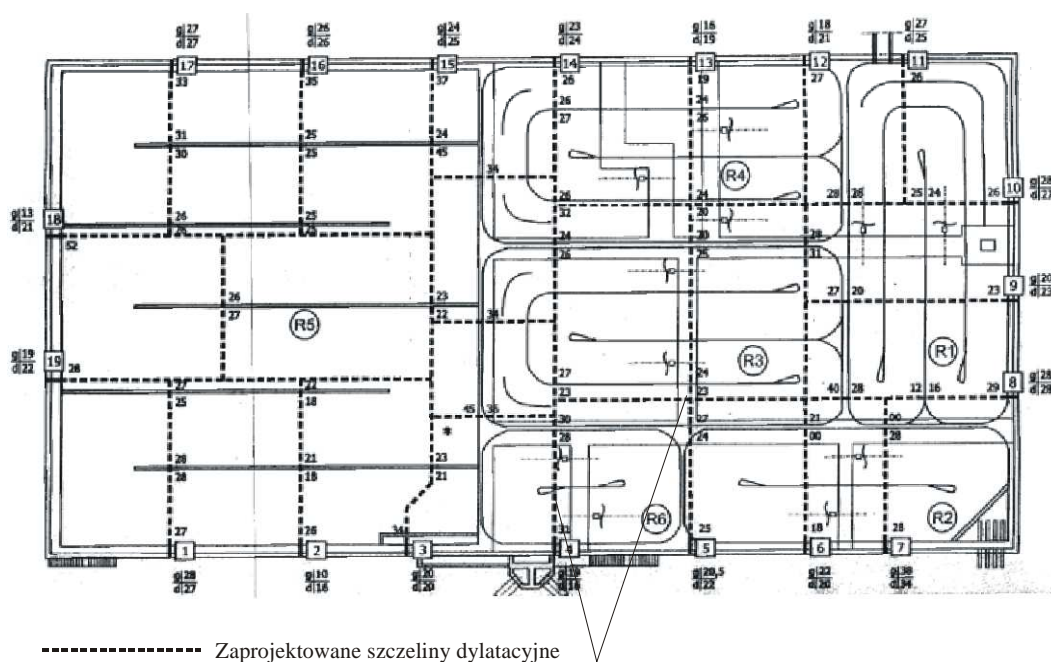
W przypadku znacznych wymiarów konstrukcji żelbetowych wykonuje się dylatacje, aby zminimalizować naprężenia powstałe od skurczu czy wpływów termicznych. W literaturze dotyczącej konstrukcji żelbetowych [1] można znaleźć zalecenia określające maksymalne odstęp dylatacji. W przypadku zbiorników żelbetowych, zaliczanych do konstrukcji

specjalnych, stosowanie dylatacji musi być bardzo wnikliwie przeanalizowane i uzasadnione, a najważniejszym kryterium przy projektowaniu tego typu konstrukcji powinna być ich szczelność. Praktyka budowlana pokazała, że bezkrytyczne dzielenie konstrukcji zbiornika dylatacjami może być przyczyną powstania nieszczelności [2], [3], [4]. Szczególnie jest to ważny problem w przypadku posadowienia zbiornika na słabo nośnych gruntach.

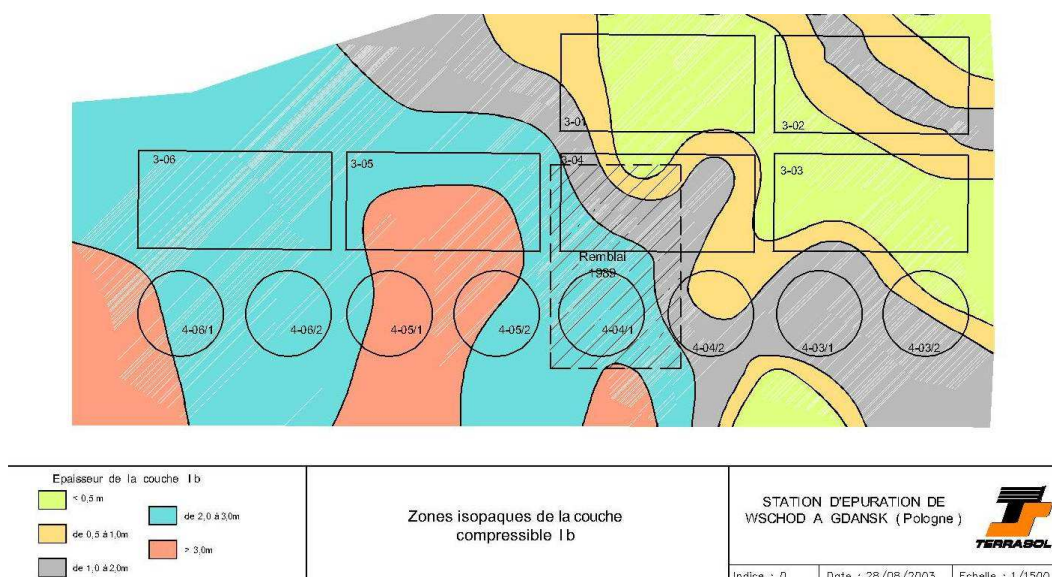
2. Opis konstrukcji i stanu awaryjnego bioreaktora

Bioreaktory oczyszczalni ścieków zaprojektowano jako prostokątne zbiorniki żelbetowe o wymiarach $103.22\text{ m} \times 53.55\text{ m}$ każdy. Płyta dna zbiorników ma grubość 0.9 m , ściany zewnętrzne grubość od 0.4 m do 0.9 m . Zbiorniki podzielono dylatacjami na 24 segmenty o wymiarach w granicach od $10\text{ m} \times 12\text{ m}$ do $15\text{ m} \times 21\text{ m}$ (rys.1).

Zaprojektowane szczeliny dylatacyjne przecinają całą konstrukcję zbiornika, zarówno ściany wewnętrzne jak i zewnętrzne, a także dno zbiornika. Elementami zabezpieczającymi zgodność przemieszczeń na styku dylatacji są ławy fundamentowe pod dnem zbiornika o szerokości 1 m i grubości 0.4 m i poziome dyble stalowe o średnicy 4 cm wmontowane w ścianach zewnętrznych w rozstawie co 50 cm . Dyble te nie blokowały jednak możliwości poziomego rozsuwania się segmentów. Pod płytą dna bioreaktora wykonano izolację poziomą w postaci trzech warstw papy o łącznej grubości przekraczającej 1 cm . Bioreaktory posadowiono na uwarstwionym gruncie, w którym na głębokości około 6 m poniżej dna konstrukcji występuje warstwa namulów plastycznych o zróżnicowanej miąższości od 1 m do 3 m (rys.2).



Rys. 1. Rzut bioreaktora z podziałem na segmenty



Rys. 2. Układ namułów plastycznych

Już w czasie prób wodnych zaobserwowano nieszczelności zbiornika przejawiające się przeciekami na szczelinach dylatacyjnych. Przecieki te wystąpiły również w czasie eksploatacji zbiornika. Starano się zatrzymać proces rozsuwania się segmentów poprzez usypywanie wałów ziemnych wokół części konstrukcji bioreaktorów. Ten sposób zabezpieczenia nie zlikwidował jednak przecieków. Obwałowanie wokół bioreaktora w pewnym stopniu zwiększa bezpieczeństwo konstrukcji, ponieważ przy dalszym przesuwie poziomym segmentów zewnętrznych pojawia się bierny odpór gruntu wokół bioreaktorów. Jednak, aby taki odpór się uaktywnił przemieszczenia muszą być znaczne. Podjęto także próby naprawy zaistniałej sytuacji polegające na uszczelnianiu szczelin, najpierw poprzez ich wypełnianie różnymi środkami uszczelniającymi (rys.3), a następnie poprzez obklejanie dylatacji elastycznymi taśmami.



Rys. 3. Wkładka uszczelniająca w ścianie zewnętrznej

Zastosowana naprawa szczelin dylatacyjnych nie okazała się skuteczna, gdyż w dalszym ciągu następuje proces rozsuwania się poszczególnych segmentów bioreaktora. Pękają nawet taśmy, które charakteryzują się znaczną wydłużalnością (rys.4).



Rys. 4. Pęknięcie w miejscu dylatacji w ścianie zewnętrznej

Widoczne są także znaczne rozwarcia szczelin dylatacyjnych obrazujące wzajemne rozsuwanie segmentów. W niektórych szczelinach dylatacyjnych zauważono znaczne deformacje wkładek uszczelniających oraz błędy ich montażu (rys.3). W większości przypadków zaobserwować można zjawisko rozsuwania się dylatacji w ścianach zewnętrznych. Problem ten istnieje również w dnie zbiornika. Jak wynika z pomiarów wykonanych w trakcie dotychczasowych przeglądów gwarancyjnych jednego z bioreaktorów, po jego wyłączeniu z eksploatacji, rozsunęcia dylatacji poziomych osiągnęły nawet 7÷8 cm. Osobnym zjawiskiem, mówiącym o osiadaniu reaktorów jest nierównomierne rozwarcie szczelin dylatacyjnych. Przyczyną może być odmienny charakter pracy poszczególnych segmentów, występowanie różnic miąższości namulów, jak i niejednorodność nośności warstw gruntu zalegających bezpośrednio pod dnem reaktora.

Jak wykazano w badaniach [5] stężenie szkodliwych substancji w gruncie wokół bioreaktora znacznie przewyższa stężenie w dalszej odległości od reaktorów. W badaniach tych napełniono bioreaktor kolorową cieczą i również zaobserwowano zabarwienie wód gruntowych wokół konstrukcji. Świadczy to o nieskuteczności dokonanych napraw.

2. Model matematyczny bioreaktora

W celu ustalenia przyczyn wystąpienia nieszczelności bioreaktora przeprowadzono analizę statyczną konstrukcji podzielonej dylatacjami na segmenty. Obliczenia wykonano za pomocą programu NASTRAN [6] oraz ROBOT Millennium [7]. Wykorzystując program NASTRAN wymodelowano kilka segmentów konstrukcji bioreaktora, dylatacje, uwarstwione podłoże gruntowe, warstwy papy pod dnem bioreaktora oraz dyble w ścianach zewnętrznych. Niezależnie przeprowadzono obliczenia statyczne bioreaktora za pomocą programu ROBOT modelując grunt jako podłoże sprężyste typu Winklera.

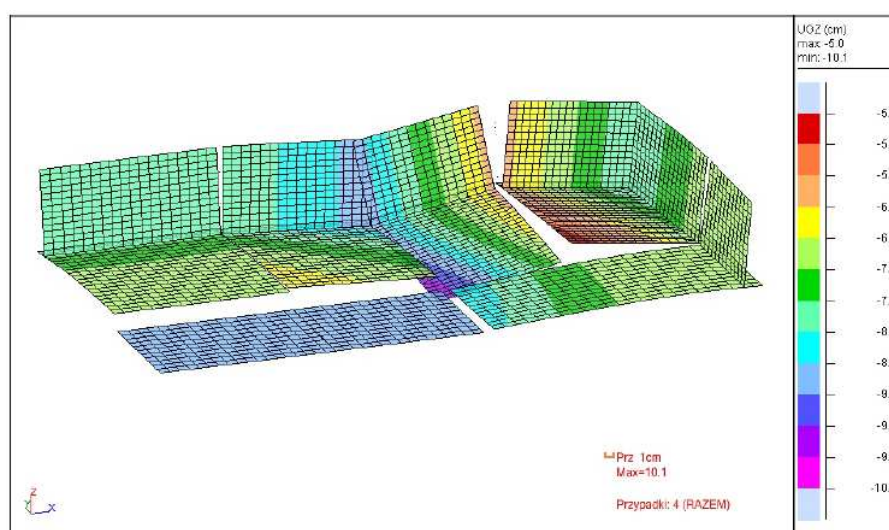
Dyskretyzację konstrukcji, w przypadku wykorzystania programu NASTRAN, wykonano przy zastosowaniu różnego typu elementów :

- ściany zewnętrzne i wewnętrzne, dno zbiornika - elementy powłokowe QUAD4, beton B-25, $E=30 \text{ GPa}$, $\nu=0.2$,
- posadowienie – uwarstwiony grunt - elementy bryłowe SOLID. Przyjęto trzy warstwy gruntu, a każda z nich jest traktowana jako materiał liniowo-sprężysty o podanych poniżej parametrach:
 - warstwa I – grunt po wymianie o miąższości 1m $M_0=93 \text{ MPa}$, $E=77.63 \text{ MPa}$, $\nu=0.23$
 - warstwa II – piasek drobnoziarnisty o miąższości 4.8m $M_0=63 \text{ MPa}$, $E=54.34 \text{ MPa}$, $\nu=0.23$
 - warstwa III – namuł plastyczny o miąższości 2.8m $M_0=1.5 \text{ MPa}$, $E=1.25 \text{ MPa}$, $\nu=0.25$.

- dyble w ścianach pionowych – elementy belkowe BEAM – pręt okrągły o średnicy 40 mm kotwiony w jednym segmencie z możliwością przesuwu w tulei w drugim (trzcienie nie przenosi sił osiowych), $E=205 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$,
- klamry spinające w dnie i ścianach pionowych – elementy belkowe BEAM – pręt okrągły o średnicy 40 mm kotwiony obustronnie w łączonych segmentach, $E=205 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$,
- dylatacje w dnie – elementy kontaktowe o wstępnej szczelinie równej 2 cm (kontakt między elementami nastąpi po ich zsunięciu się o 2 cm i wówczas wystąpi między nimi oddziaływanie).

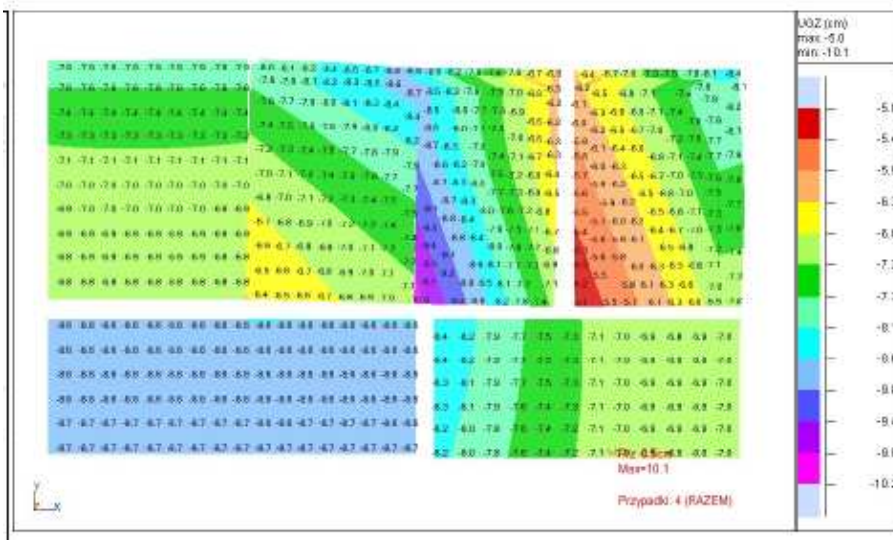
3. Analiza statyczna podzielonego na segmenty bioreaktora spoczywającego na sprężystym podłożu

Analiza bioreaktora podzielonego na segmenty wykazała, że poszczególne segmenty konstrukcji pracują niezależnie, występują różnice osiadań na styku segmentów oraz poziome rozsuvanie się segmentów (rys.5). Istota problemu znacznych wzajemnych przesunięć segmentów bioreaktora leży głównie w poziomym poślizgu konstrukcji i górnych warstw gruntu spoczywających na warstwie namułów. Warstwa namułu o miąższości od 1 m do 3 m zalegająca na głębokości około 6÷7m pod płytą dolną bioreaktora jest przyczyną poziomych poślizgów segmentów konstrukcji (rys.6). Należy również dodać, że grubości namułów są zróżnicowane w obrębie bioreaktora ma to także duży wpływ na nierównomierne osiadanie konstrukcji i prowadzące do rozszechnienia klawiszowanie segmentów bioreaktora. Projektując bioreaktory przeceniono siły tarcia dna zbiornika o podłoże. Przyjęcie współczynnika tarcia 0.2 na podstawie normy [8] nie uwzględnia faktu, że podany w normie współczynnik tarcia chropowatego betonu o papę dotyczy materiałów w stanie powietrzno-suchym. W przypadku konstrukcji bioreaktora woda gruntowa może spowodować znaczne zmniejszenie tego współczynnika, a tym samym spowodować możliwość powstania wzajemnych rozsunięć poszczególnych segmentów. Ponadto, w przypadku dwóch warstw papy, istnieje realna możliwość przesuwu papy po papie, a nie po betonie, a w takim przypadku współczynnik tarcia może być znacznie mniejszy niż 0.2, szczególnie w warunkach nawodnionych powierzchni.



Rys. 5. Deformacja fragmentu bioreaktora podzielonego na segmenty, widok aksonometryczny

Naprawa bioreaktorów poprzez uszczelnianie dylatacji musi nastąpić dopiero po zahamowaniu procesu rozsuwania się segmentów. W przeciwnym razie uszczelnianie dylatacji będzie nieskuteczne.

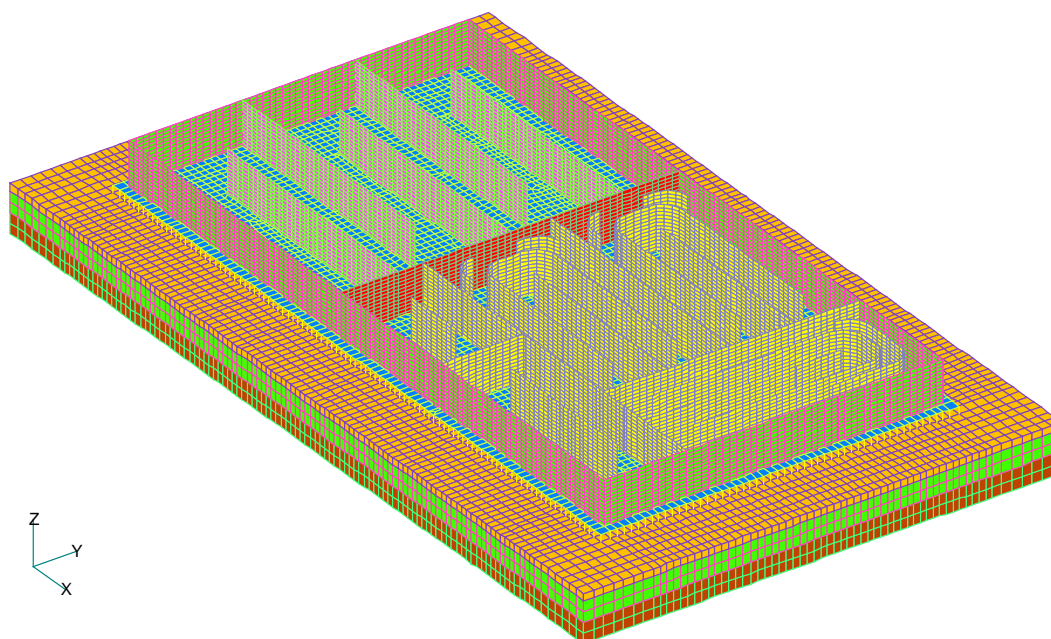


Rys. 6. Deformacja fragmentu dna bioreaktora podzielonego na segmenty, rzut poziomy

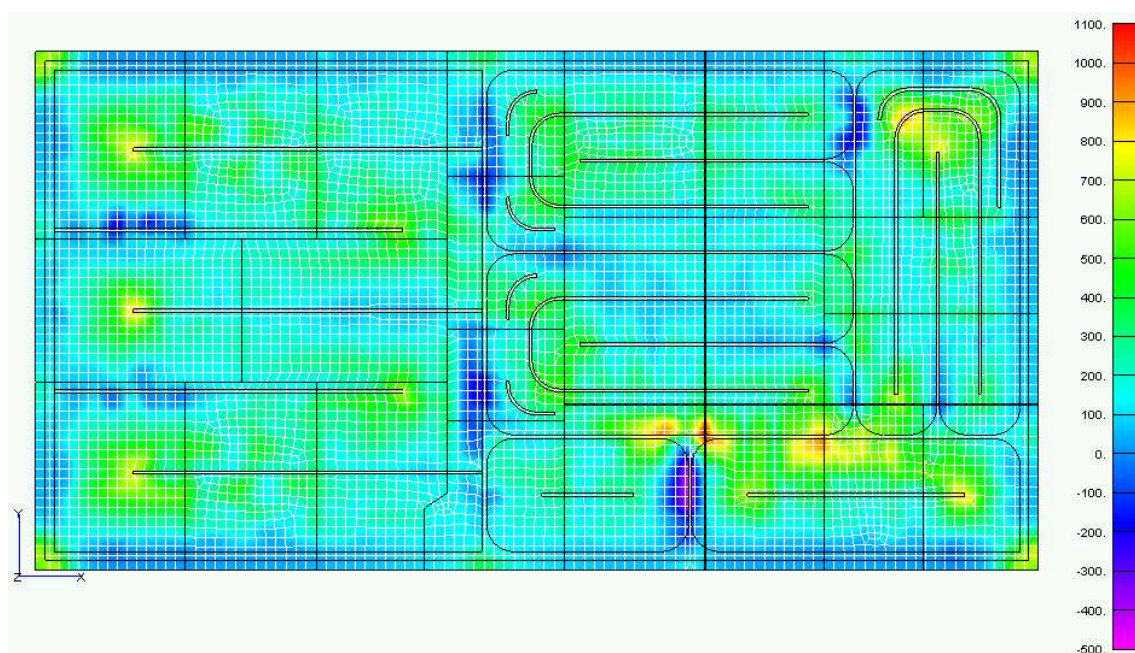
4. Warianty naprawy konstrukcji bioreaktora

W celu zapewnienia szczelności bioreaktora rozważono trzy wersje połączenia poszczególnych segmentów:

- Wariant I - połączenie ciągłe płyt dennych wszystkich segmentów bioreaktora (likwidacja dylatacji w dnie),
- Wariant II - połączenie wszystkich segmentów bioreaktora (likwidacja wszystkich dylatacji dna i ścian),
- Punktowe połączenie płyt dennych segmentów bioreaktora za pomocą klamer.



Rys. 7. Model obliczeniowy MES, program NASTRAN



Rys. 8. Momenty zginające w płycie dna bioreaktora m_x [kNm/m] w kierunku osi X
Wariant I - obciążenie parciem cieczy i ciężarem własnym

Celem przeprowadzonej analizy statycznej było porównanie i ocena poszczególnych wariantów w aspekcie uzyskanych efektów w zakresie szczelności, rozkładu i wielkości sił wewnętrznych i przemieszczeń.

Otrzymane wyniki analizy numerycznej trzech rozważanych wariantów naprawy konstrukcji bioreaktora pozwalają wysunąć następujące wnioski :

Wariant I

W tym przypadku zaproponowano połączenie wszystkich płyt dennych segmentów bioreaktora. Takie rozwiązanie uniemożliwia wzajemne rozsuwanie się segmentów, a na grunt przekazują się jedynie pionowe naciski. Z analizy tego wariantu wynika, że jest możliwe takie rozwiązanie przy zachowaniu istniejącego zbrojenia płyt. Koncentracje momentów zginających w dnie występują jedynie w miejscach dylatacji ścian (rys.8).

Wariant II

W przypadku likwidacji wszystkich dylatacji bioreaktora uzyskujemy najlepsze efekty w zakresie szczelności. Jednakże w tym przypadku powstają w konstrukcji znaczne siły rozciągające w dnie, które przekraczają nośność płyty.

Wariant III

Spięcie płyt dennych poszczególnych segmentów klamrami powoduje powstanie znacznych koncentracji naprężeń w strefach kotwienia klamer. Pojawia się zatem bardzo poważny problem odpowiedniego wykonstruowania zakotwień, co podnosi koszty prac budowlanych oraz zmniejsza niezawodność konstrukcji.

Możliwe i korzystne dla konstrukcji jest, zdaniem autorów, wykorzystanie wariantu pośredniego pomiędzy I i II, przez wprowadzenie, oprócz uciąglenia dna, częściowej likwidacji dylatacji ścian do wysokości 1÷1.5 m od dna. Powoduje to wzmocnienie dna płyty i redukcję momentów zginających w rejonie występowania dylatacji ścian. Takie rozwiązanie ma także swoje uzasadnienie technologiczne, związane z rozkuciem dylatacji dna, połączeniem zbrojenia i odpowiednim ustawieniem starych taśm dylatacyjnych ścian.

5. Wnioski końcowe

Zbiorniki żelbetowe należy zaliczyć do konstrukcji specjalnych. Stosowanie dylatacji musi być bardzo wnikliwie przeanalizowane i uzasadnione. Nie można bezkrytycznie do tego typu konstrukcji stosować zawartych w literaturze zaleceń dotyczących maksymalnych odległości między dylatacjami. Błędne także, zdaniem autorów, jest stosowanie normy dotyczącej murów oporowych w celu sprawdzenia warunku stateczności poszczególnych segmentów zdylatowanego reaktora biologicznego. Ponieważ o szczelności zbiornika decydują wzajemne przemieszczenia poszczególnych segmentów, zatem taką konstrukcję należy analizować jako całość. Nie bez znaczenia jest także ocena zasadności stosowania dylatacji konstrukcji w zależności od warunków gruntowych jej posadowienia. Na słabych gruntach występuje duże prawdopodobieństwo nierównomiernego osiadania, a zatem duże zagrożenie wzajemnego przesuwania się poszczególnych segmentów zbiornika, co może prowadzić do zniszczenia taśm dylatacyjnych i przecieków.

Należy podkreślić, że najważniejszym problemem w projektowaniu bioreaktorów oczyszczalni ścieków jest zapewnienie szczelności konstrukcji, aby zapobiec zanieczyszczeniu środowiska. W tym celu najkorzystniejszym rozwiązaniem jest wykonanie konstrukcji bez szczelin dylatacyjnych. Dodatkowe naprężenia w konstrukcji żelbetowej powstałe na skutek skurczu, można skutecznie zminimalizować stosując odpowiednią technologię betonowania elementów konstrukcji. Natomiast pozostałe wpływy obciążenia ściekami, wpływy termiczne, nierównomierne osiadanie można uwzględnić na etapie projektowania nie wprowadzając żadnych dylatacji.

Literatura

1. Kobiak, Stachurski : Konstrukcje żelbetowe, Arkady Warszawa 1991.
2. Buczkowski W.: W sprawie dylatacji w zbiornikach prostopadłościennych, XII Konferencja naukowo-techniczna Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Kraków 2003.
3. Pietras R.: W sprawie przyczyn awarii żelbetowych zbiorników prostokątnych, Inżynieria i Budownictwo nr 5/2004.
4. Buczkowski W., Czajka S., Kowalski I.: O przyczynach awarii żelbetowego zbiornika prostokątnego, Inżynieria i budownictwo nr 12/2003.
5. Mikołajski S., Kąkol M.: Monitoring szczelności konstrukcji bioreaktorów w oczyszczalni ścieków Gdańsk – Wschód. LI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2005.
6. Program MSC NASTRAN for Windows ver. 2002, Mac-Neal-Schwendler Corporation.
7. Program ROBOT Millenium wersja 19.
8. PN-82/B-02003 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologicznie. Podstawowe obciążenia technologiczne i montażowe.