



klasy C25/30. Po zewnętrznej stronie ściany zbiornika przewidziano wykonanie belki pierścieniowej połączonej z belką wewnętrzną betonem przedostającym się pod elementami prefabrykowanymi. W środku zbiornika pod płytą fundamentową zaprojektowano stopę fundamentową o wymiarach 2,0 x 2,0 x 0,5 m, pod słup podporowy zadaszenia zbiornika. Ściana zbiorników zaprojektowana została z 61 elementów prefabrykowanych szerokości 1560 mm i zmiennej grubości od 110 do 135 mm. Przekrój poprzeczny płyty prefabrykowanej i rozmieszczenie zbrojenia podano na rysunku 1.

Na obwodzie zbiornika przewidziano dwa elementy typu pilaster, czyli elementy prefabrykowane, w których następuje zakotwienie splotów sprężających. Pilastry podczas montażu ściany zbiornika kotwione są do płyty dennej za pomocą stalowych łączników. Prefabrykaty ściany zbiornika wykonane są z betonu wodoszczelnego klasy C35/45. Na wysokości płyty zlokalizowano 33 otwory, przez które przeprowadzone są obwodowe ciągnia sprężające, naciągane siłą docelową 132 kN. Prefabrykaty połączone są ze sobą za pomocą wodoszczelnej zaprawy klejowej.

### 3. Wymagania stawiane zbiornikom wznoszonym według systemu MULEBY

Informacje tu przytoczone sporządzono w oparciu o instrukcje robocze dotyczące wznoszenia zbiorników w systemie MULEBY MST-0 [5]. Instrukcja robocza zawiera dane dotyczące wszystkich etapów wznoszenia zbiornika, naprawy uszkodzeń, ponadto zawarto opis ogólny i tolerancje wykonawcze. Autorzy instrukcji podkreślają, że prace wykonywane przy wznoszeniu zbiorników wg MULEBY System muszą spełniać wymagania zawarte w Opisie Technicznym Kontroli Zbiornika na Gnojowicę i niniejszej Instrukcji Roboczej. Oznacza to, że rozwiązanie

konstrukcyjne nie może być traktowane jako uniwersalne na cieczce. Wysokość ściany w zbiornikach może wynosić: 3, 4, 4,5 i 6 m. Zbiorniki wykonywane wg systemu MULEBY nie mogą być posadowione poniżej poziomu wody gruntowej i nie mogą być narażone na przemarzanie gruntu.

Montaż elementów prefabrykowanych rozpoczyna się od wytyczenia okręgu i podzielenia go na liczbę montowanych elementów. Prefabrykowane elementy betonowe montowane są na dwóch podkładkach, które powinny być tak osadzone, aby uzyskać prześwit pod spodem płyty o wysokości co najmniej 40 mm. Ma to zapewnić przedostawanie się betonu pod elementami na zewnątrz ściany i pełne jej zabetonowanie. Montaż elementów prefabrykowanych należy rozpocząć od pilastra, stabilizując go do płyty dennej. Każdy kolejny element prefabrykowany stawiany jest z zachowaniem wolnej przestrzeni rzędu od 10 do 20 mm od poprzedzającego elementu nie dotykając go. Ostatni element wsuwany jest od góry. Płyty podczas montażu stabilizowane są za pomocą rozpor stalowych.

Jeśli w danym zbiorniku zastosowano tylko jeden pilaster, pozostałe elementy są kolejno montowane z obu stron pilastra, aż do elementu usytuowanego po przeciwnej jego stronie zamykając obwód. W przypadku zastosowania dwóch pilastrów, ściana montowana jest w dwóch etapach. W pierwszym etapie montuje się dwa pilastry i część obwodu zawartą między nimi. Elementy obwodu są kolejno montowane od obu pilastrów coraz dalej, aż do wykonania połowy obwodu. Element w osi między pilastrami jest najbardziej wysunięty na zewnątrz wyznaczonej linii i jest montowany jako ostatni. Następnie spręża się wstępnie wykonaną część obwodu. Podobnie wykonuje się drugą część obwodu. Aby mieć pewność, że pionowe styki są zaciśnięte zanim nastąpi stwardnienie zaprawy klejo-

wej, należy jak najszybciej wciągnąć ciągnia sprężające i naciągnąć ją na tyle wcześniej, aby zaprawa została wyciśnięta na zewnątrz wszystkich pionowych styków. Przed naprężeniem i podczas naprężania ciągnien należy sprawdzać przemieszczenie płyt, pion i wzajemną zmianę kąta. Do pomiaru kąta należy stosować przymiar liniowy długości 1,0 m przykładany w linii poziomej, osiowo w stosunku do pionowego styku. Na podstawie pomierzonej odległości pomiędzy krawędziami sąsiednich płyt a przymiarem, wnioskuje się w oparciu o sporządzone tabele o wartości kąta.

Naciąg ciągnien sprężających wykonywany jest za pomocą dwóch pras naciągowych. Do realizacji sprężenia końcowego można przystąpić po trzech dniach, ciągnia o długości obwodu zbiornika, kotwione w pilastrach są naprzemiennie. Przed przystąpieniem do sprężania należy mieć pewność, że proces wiązania kleju jest zakończony. Sprężenie docelowe może być wykonywane w dwóch etapach. Obwodową belkę pierścieniową na płycie fundamentowej można zabetonować po pierwszym etapie docelowego sprężenia, lub po całkowitym sprężeniu. W zakończeniu Instrukcji Roboczej podane są warunki i sposoby naprawy płyty dna zbiornika, elementów prefabrykowanych oraz ciągnien sprężających. W założeniach systemu dotyczącego zbiorników na gnojowicę dopuszczono szerokość rys 0,3 mm. Rysy jednostronne i przelotowe należy wypełnić kompozycjami żywic epoksydowych z iniekcją włóczni. Jeśli nastąpiło zerwanie splotu na skutek zewnętrznych uszkodzeń mechanicznych lub korozji w zakotwieniu, należy dokonać wymiany splotu i naciągnąć nowy splot z odpowiednią siłą.

### 4. Awaria zbiornika

Podczas montażu zbiornika nr 5 i realizacji sprężenia nastąpiło za-

walenie się ściany zbiornika. Jako przyczynę podano omyłkowe zastosowanie niewłaściwego kleju (o właściwościach trwale plastycznych) wypełniającego pionowe styki między prefabrykatami. Ściana została rozebrana, przystąpiono do ponownego montażu ściany zbiorników na istniejącej płycie dennej z zastosowaniem właściwego kleju. Pomimo iż, ściana zbiornika nr 4 nie uległa awarii, podjęto decyzję o przeprowadzeniu rozbiórki i wykonaniu jej ponownie z zastosowaniem właściwego kleju. Po powtórnym zmontowaniu obu zbiorników i docelowym ich sprężeniu 30 cięgnami, po 5 dniach zbiornik nr 5 ponownie zawalił się. Zniszczony zbiornik pokazano na rysunku 2. W tej sytuacji, wymagana była ekspertyza przyczyn zniszczenia zbiornika nr 5 i możliwości bezpiecznego użytkowania bliźniaczego zbiornika nr 4.

Zbiorniki o małej liczbie elementów, czyli krótkim obwodzie, z jednym pilastrzem muszą być zmontowane w całości w ciągu jednego dnia. Klej wypełniający styki musi być równomiernie wyci-

nięty na całej wysokości płyty przed jego związaniem. Brak wypełnienia styku na górnej krawędzi, co zaobserwowano, świadczy o braku kleju, zakończonym przed sprężeniem procesem wiązania kleju, lub o rozchyleniu się prefabrykatów w wyniku błędnego montażu. Elementy prefabrykowane zostają wzajemnie dociśnięte za pomocą kilku cięgien obwodowych kotwionych w pilastrze, który jest unieruchomiony w płycie dennej. Największe przemieszczenia radialne występują w elemencie znajdującym się po przeciwległej stronie pilastra na obwodzie zbiornika. W przypadku zbiorników o dużym obwodzie, takich jak zbiorniki będące przedmiotem analizy (z dwoma pilastrami), montaż ściany zbiornika wykonywany jest w dwóch etapach. Największe przemieszczenia powinny być zarejestrowane na elemencie w środku między pilastrami. Przy tej technologii montażu konieczny jest pośpiech w obawie przed przedwczesnym związaniem kleju. Wspomniana konieczność zakończenia etapu montażu zbiorników w ciągu jednego dnia gene-

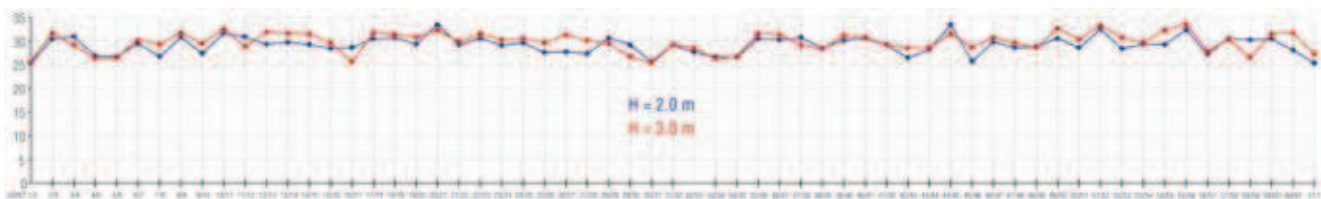
ruje niedoskonałości montażu elementów prefabrykowanych.

### 5. Badania przeprowadzone po awarii zbiornika

W celu dokonania oceny betonu, z którego wykonany był pierścień obwodowy, pobrano próbki sześciennie o boku 100 mm. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie w przeliczeniu na wytrzymałość kostkową o boku 150 mm wynosiła 20,13 MPa. Wytrzymałość gwarantowana wynosi 15,27 MPa. W świetle otrzymanych wyników beton nie spełnia założeń projektowych. Wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie stali zbrojeniowej pobranej z pierścienia obwodowego wynosi 675,7 MPa, a granica plastyczności 582,96 MPa. Na podstawie informacji otrzymanych od producenta stwierdzono, że średnia wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach jw. po 28 dniach wynosi 53,77 MPa. Na istniejącym, bliźniaczym zbiorniku nr 4 zmierzono szerokości rys i ich rozmieszczenie na elementach prefabrykowanych oraz szerokości rozwarcia styków mię-



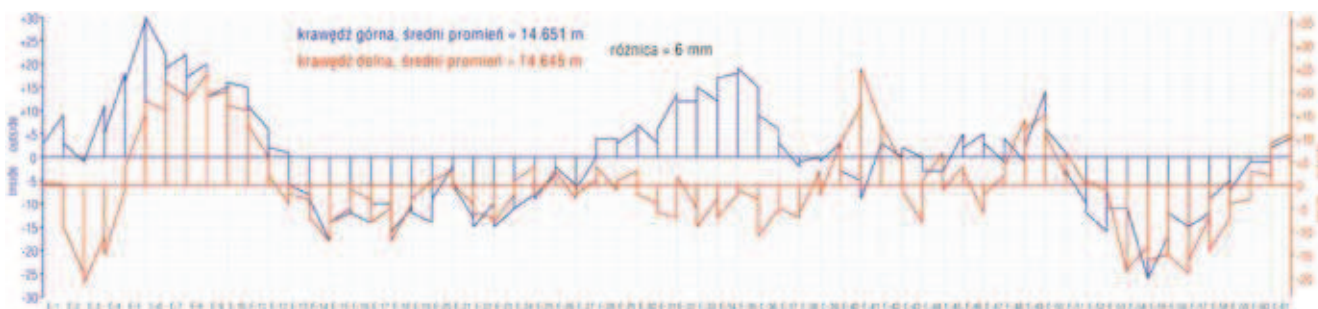
Rys. 2. Zbiornik nr 5 po katastrofie



Rys. 3. Wykres zmian rozwarcia styków między prefabrykatami na wewnętrznej powierzchni zbiornika



**Rys. 4.** Zabezpieczone zakotwienia cięgien sprężających, nieprawidłowe obcięcie cięgien sprężających – uszkodzenie zakotwienia, pęknięte zabezpieczenie antykorozyjne, zakotwienia poniżej powierzchni terenu po odkopaniu – widoczny brak zabezpieczenia zakotwień



**Rys. 5.** Odchylenia płyt na górnej i dolnej krawędzi w stosunku do średnich promieni zbiornika nr 4. Wykresy są przesunięte o różnicę między średnim promieniem na górnej i dolnej krawędzi

dzy elementami. Niektóre elementy były szpachlowane na całej powierzchni lub na pewnych fragmentach, co oznacza, że Wykonawca zlokalizował na tych obszarach rysy o szerokości 0,3 mm i postąpił zgodnie z instrukcją systemu MULEBY. Stwierdzono występowanie ciągłej rysy na części obwodu między elementami nr 11 i 39 na wysokości około 1,0 m. Szerokości tych rys są zróżnicowane na różnych płytach, a maksymalna wartość nie przekracza 0,15 mm. Charakter rysy (ciągła) oraz jest usytuowanie pozwalają stwierdzić, że powstała ona w końcowym etapie sprężenia w wyniku obecności belki pierścieniowej. Pozostałe rysy o szerokości 0,025 mm do 0,15 mm występujące losowo na różnych wysokościach są wynikiem obciążeń montażowych. Rysy te występują na wysokości elementu w przedziale od 1,90 m do 4,70 m.

Rozwarcie styków mierzone na dwóch wysokościach 0,3 m i 2,0 m (rys. 3). Można stwierdzić, że średnie rozwarcie styku na wysokości 0,3 m wyno-

si 29,82 mm przy wartości maksymalnej 33,43 mm. Maksymalne rozwarcie styku na wysokości 2,0 m wynosi 33,69 mm.

### 6. Ocena stanu zakotwień cięgien sprężających w pilastrach

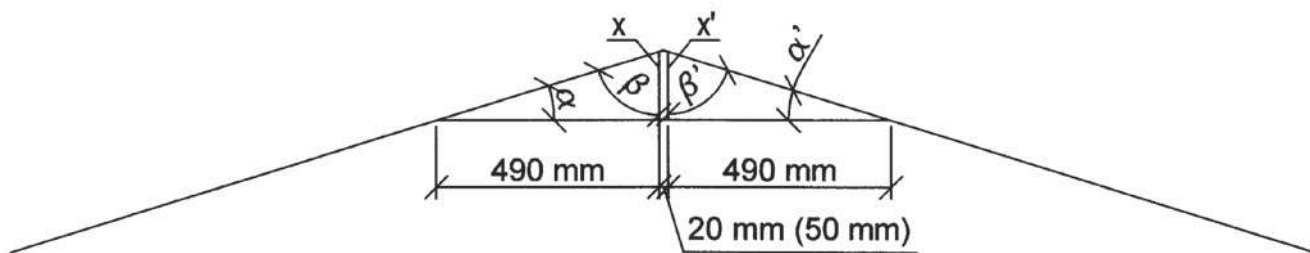
W systemie MULEBY przewiduje się umieszczenie zakotwienia w wyniku naciągu należy obciąć splot w odległości nie bliższej niż 15 mm od zakotwienia szczękowego, a następnie po uzupełnieniu kanału cięgna smarem, założyć kapturek wypełniony smarem i dosunąć do bloku kotwiącego. Ostatnią czynnością jest osadzenie w czole pilastra na wejściu do wnęki (gniazda) plastikowej zaślepki z uszczelką i przyklejenie jej do zewnętrznej powierzchni czoła pilastra.

W wyniku przeprowadzonych oględzin stwierdzono (rys. 4), że tylko w nielicznych przypadkach sploty są obcięte w odległości nie mniejszej niż 15 mm. Stwierdzono liczne przypadki uszkodzeń zakotwień szczękowych, co mogło spowo-

dować poślizg jednej z 3 szczęk w zakotwieciu. Ze względu na gęsto rozmieszczone wzdłuż wysokości i połączone ze sobą gniazda zakotwień w dolnej części płyty, nie ma możliwości zabezpieczenia zakotwień przez zastosowanie zaślepki, co skutkuje korozją zakotwień. Brak zabezpieczenia zakotwień stoi w sprzeczności z ustaleniami normy [6].

### 7. Geodezyjne pomiary geometrii istniejących zbiorników

W celu przeprowadzenia pomiarów geodezyjnych, na każdym prefabrykowanym elemencie w narożach oznaczono 4 punkty odniesienia. Na rysunku 5 zestawiono różnicę  $\Delta R$  odległości punktów pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów zbiornika nr 4 od średniego promienia zbiornika. Znak minus oznacza, że dany element jest wewnątrz promienia średniego. Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego do środka zbiornika na górnej krawędzi wynosi -18 i -26 mm, natomiast na dolnej krawędzi wynosi -19 i -21 mm.



Rys. 6. Schemat pomiaru poprawności geometrii zbiornika podczas montażu.

Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego na zewnątrz zbiornika na górnej krawędzi wynosi 29, 30, 22 i 19 mm, natomiast na dolnej krawędzi wynosi 24, 20 i 22 mm.

### 8. Analiza poziomych kątów zawartych pomiędzy kolejnymi elementami prefabrykowanymi

Stosowanym sposobem kontroli poprawności wykonania montażu prefabrykowanych elementów podczas realizacji wstępnego sprężenia w systemie MULEBY, jest pomiar kątów w płaszczyźnie poziomej zawartych pomiędzy sąsiednimi elementami prefabrykowanymi. Pomiary takie zostały przeprowadzone przez pracowników uczestniczących w montażu elementów prefabrykowanych. Pomiar kąta pole-

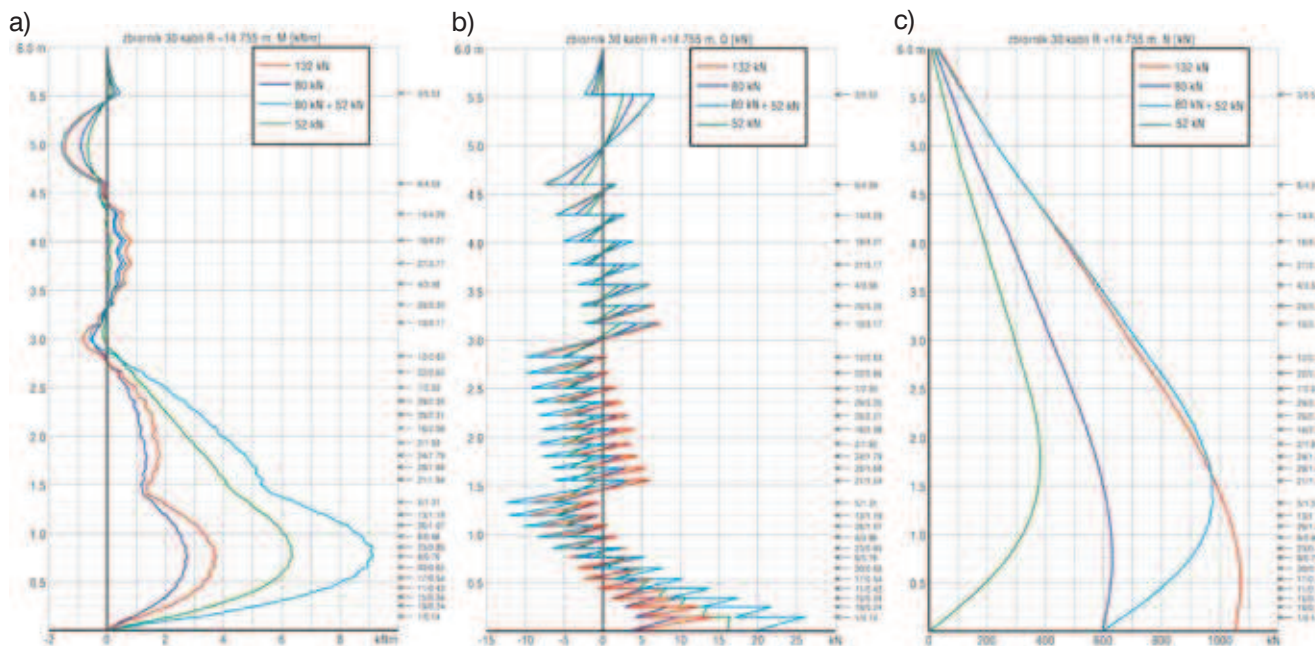
ga na określeniu odległości pomiędzy prawą krawędzią płyty lewej „x” wyrażoną w milimetrach oraz odległości pomiędzy lewą krawędzią płyty prawej „x'” (rys. 6). Na rysunku przedstawiono układ dwóch sąsiednich płyt oraz przymiar liniowy długości 1000 mm przyłożony w osi pionowego styku. Suma kątów  $\beta$  i  $\beta'$  jest kątem zawartym między sąsiednimi płytami wyznaczonym na podstawie pomierzonych odległości x oraz x'. Nie prowadzi się pomiaru szerokości styków.

Przeprowadzono analizę obliczeniową przyjmując szerokość styku równą 20 mm, jako wartość minimalną. Jako drugą wartość przyjęto szerokość styku równą 50 mm. Jest to wartość hipotetyczna, której osiągnięcie oznaczałoby nieuchronne otwarcie się styku pionowego. Z ta-

kimi wartościami szerokości styku mamy do czynienia na etapie scalania ściany zbiornika. Z analizy wynika, że bez względu na szerokość styku, zmiana kąta przy poziomach sprężenia 30 kN i 80 kN zawiera się w przedziale 1 stopnia. Przeprowadzona analiza obliczeniowa wykazuje, że stosowany system pomiarowy nie jest wrażliwy na rzeczywistą szerokość pionowego styku. Oznacza to, że szerokość styku w przedziale 20÷50 mm nie powoduje zauważalnych zmian poziomego kąta.

### 9. Obliczenia

W niniejszej analizie przeprowadzono obliczenia statyczne zbiornika w procesie sprężania. Powłokę walcową sprężano w kilku etapach. W pierw-



Rys. 7. a) wykres sił M; b) wykres sił Q; c) wykres sił N

szym etapie dla określonej liczby cięgien sprężono część obwodu między dwoma pilastrami wprowadzając siłę do każdego cięgna równą 30 kN, w drugim etapie po zmontowaniu pozostałych elementów ten odcinek ściany sprężono taką samą liczbą cięgien z siłą również 30 kN. W kolejnym etapie wprowadzono cięgna sprężające na pełną długość obwodu zbiornika i wszystkie zostały naciągnięte do siły 40 kN. W czwartym etapie sprężania zwiększono siłę naciągową we wszystkich cięgnach do 80 kN. Oznacza to, że do tego okresu sprężania powłoka walcowa połączona była z płytą denną w sposób przesuwny z siłą tarcia na dolnej krawędzi, okresowo była skrępowana na dwóch pilastrach. Następną czynnością było zabetonowanie belki pierścieniowej po obu stronach ściany zbiornika. W ostatnim etapie sprężania następuje zmiana schematu statycznego. Ponieważ z elementu prefabrykowanego nie jest wypuszczone żadne zbrojenie do belki pierścieniowej, można przyjąć, że ściana zbiornika pracuje jako połączona przegubowo z fundamentem.

W prezentowanej analizie obliczenia statyczne przeprowadzono przyjmując 3 etapy sprężenia. Pierwszy etap – 9 cięgien z siłą 30 kN (scalenie obwodu), drugi etap – wszystkie cięgna naciągnięte do siły 80 kN dla połączenia przesuwnego z siłą tarcia przy sile naciągowej 80 kN oraz trzeci etap – dla połączenia przegubowego z siłą 52 kN. Otrzymałe rozkłady sił dla zbiornika o pojemności 3990 m<sup>3</sup>, 61 elementów prefabrykowanych, 30 cięgien sprężających. M, Q, N przedstawiono na rysunkach 9 a–c.

## 10. Wnioski i przyczyny awarii

Z uwagi na fakt, że zawalenie ściany nastąpiło 5 dni po jej docelowym sprężeniu, można wnioskować, że szerokość styków przy ostatniej montowanej płycie była jeszcze na granicy nośności połączenia. Wskutek trwającego ucisku pochodzącego od cięgien spręża-

jących w przypadku zbyt grubej warstwy zaprawy klejowej i jeszcze postępującego procesu jej wiązania, następował powolny wzrost szerokości styku, w którym stopniowo wzrastała już znaczna siła poprzeczna. Gdyby pierścień fundamentowy był w stanie przenieść siłę na dolnej krawędzi ściany ( $Q_{\max} = 26,07$  kN) to nie nastąpiłoby wyrwanie płyty, któremu towarzyszyło ścięcie betonu pierścienia i rozerwanie zbrojenia prętem  $\phi$  6 mm.

Ważnym czynnikiem decydującym o zespoleniu pierścienia fundamentowego z dnem zbiornika jest obecność strzemion (prętów wypuszczonych z płyty fundamentowej do pierścienia fundamentowego). Długość zakotwienia tych strzemion nie spełnia wymagań normowych. Podobnie należy stwierdzić, że powierzchnia zbrojenia pierścienia fundamentowego (jeden pręt  $\phi$  6 mm) nie spełnia wymagań normowych. W zaistniałej sytuacji należy stwierdzić, że mamy do czynienia tylko z pierścieniem fundamentowym betonowym. Tak wykonany pierścień fundamentowy nie był w stanie przenieść siły poprzecznej na dolnej krawędzi ściany.

Ponadto należy stwierdzić, że:

– Zbiorniki są zaprojektowane w sposób oszczędny, a ich autorzy podkreślają, że są przeznaczone wyłącznie na gnojowicę. Umieszczenie siatek zbrojeniowych w elemencie prefabrykowanym (rys.1) jest niewłaściwe, brakuje zbrojenia w wystającej części płyty. Przy zwiększonym rozwarciu styku nastąpi ścięcie gniazda płyty, co zaobserwowano na zniszczonych elementach. Zbiorniki w tej postaci nie mogą być stosowane jako konstrukcje do magazynowania wody pitnej lub przeznaczonych jako komory fermentacyjne.

– Zdjęcia (rys. 4) dotyczące rozmieszczenia zakotwień w dolnej części ściany zbiornika potwierdzają wyniki otrzymane z analiz obliczeniowych, że prezentowane rozwiązanie konstrukcyjne nie może być stosowane do wykonywania

zbiorników o większej pojemności niż 1400 m<sup>3</sup> (obwód ściany montowany w jednym etapie). Rozstaw zakotwień w strefie maksymalnego zagęszczenia musi być taki, aby była możliwość indywidualnego osadzenia zaślepki zewnętrznej. Rozwiązanie czoła pilastra uniemożliwia prawidłowe zabezpieczenie zakotwienia i cięgna sprężającego przed korozją. Gniazda służące do osadzenia zakotwień powinny być tak pogłębione, aby można było sploty obcinać w odległości nie mniejszej niż 30 mm od powierzchni zakotwienia i umożliwić prawidłowe osadzenie elementu zabezpieczającego.

– Na podstawie oględzin rumowiska i zdjęć z budowy zbiornika stwierdzono jednoznacznie, że płytą inicjującą zniszczenie zbiornika, był ostatni montowany element, co może świadczyć o dużych niedokładnościach montażu. Należy podkreślić, że ostatnia montowana płyta między pilastrami doznaje największych przemieszczeń podczas zaciskania obwodu i wyciskania kleju ze styków.

– Stosowany system kontroli poprawności montażu zbiornika nie gwarantuje dokładnej oceny rozwarcia styków.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Libura S., Sprężanie konstrukcji kołowo symetrycznych cięgnami bez przyczepności. X Konferencja „Zelbetowe i Sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze” 23–25 listopada 1995, Kraków
- [2] Seruga A., Projektowanie prefabrykowanych betonowych zbiorników cylindrycznych na cieczę sprężonych cięgnami bezprzyczepnościowymi. Inżynieria i Budownictwo nr 2, 2001, str. 112–117
- [3] Seruga A., Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego, Monografia 189, Politechnika Krakowska, Kraków 2003, str. 1–200
- [4] Brøndum-Nilsen T., Collapse of Danish Prestressed Tanks. Concrete International, April 1999
- [5] Work Instruction regarding the erection of THE MULEBY – SYSTEM – TANKS MST-0 z 01.01.2003 r.
- [6] PN-EN-1992-3, Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji betonowych – Część 3 Silosy i zbiorniki, sierpień 2006