



Prof. dr hab. inż. KRZYSZTOF DYDUCH, kdyduch@imikb.wil.pk.edu.pl
Dr inż. MARIAN PŁACHECKI, mplachec@imikb.wil.pk.edu.pl
Dr inż. RAFAŁ SIENKO, rsienko@imikb.wil.pk.edu.pl

ODBUDOWA ZNISZCZONEGO WYBUchem BIOGAZU STOŻKOWEGO PRZEKRYCIA ŻELBETOWEJ KOMORY FERMENTACYJNEJ ZKF

CONIC COVER ZKF REINFORCED CONCRETE DIGESTION CHAMBER RECONSTRUCTION DESTROYED BY BIOGAS EXPLOSION

Streszczenie Przedmiotem referatu jest analiza sposobu rekonstrukcji stożkowego przekrycia zamkniętej komory fermentacyjnej ZKF uszkodzonej w wyniku wybuchu biogazu w oczyszczalni ścieków o objętości użytkowej około 10 000m³. W referacie przedstawiono przyczyny uszkodzeń konstrukcji, wyniki analizy obliczeniowej zbiornika oraz sposób jego odbudowy.

Abstract The subject of the study is an analysis with regard to reconstruction of the conical cover of ZKF closed digestion chamber in sewage treatment plant of operating capacity of around 10 000 m³. The study presents reasons of damage, structural analysis of a tank and recommended reconstruction.

1. Wstęp

Standardowym rozwiązaniem w nowoczesnych oczyszczalniach ścieków są zamknięte komory fermentacyjne wykonywane jako stalowe lub żelbetowe monolityczne. Oryginalna, w ukształtowaniu geometrii konstrukcji i technologii wykonania, komora fermentacyjna, będąca przedmiotem referatu została opisana w pracy [1]. Zespół grupowej oczyszczalni ścieków stanowią cztery zblokowane komory fermentacyjne ZKF-1–ZKF-4, każda o przekroju poprzecznym pokazanym na rys. 1.

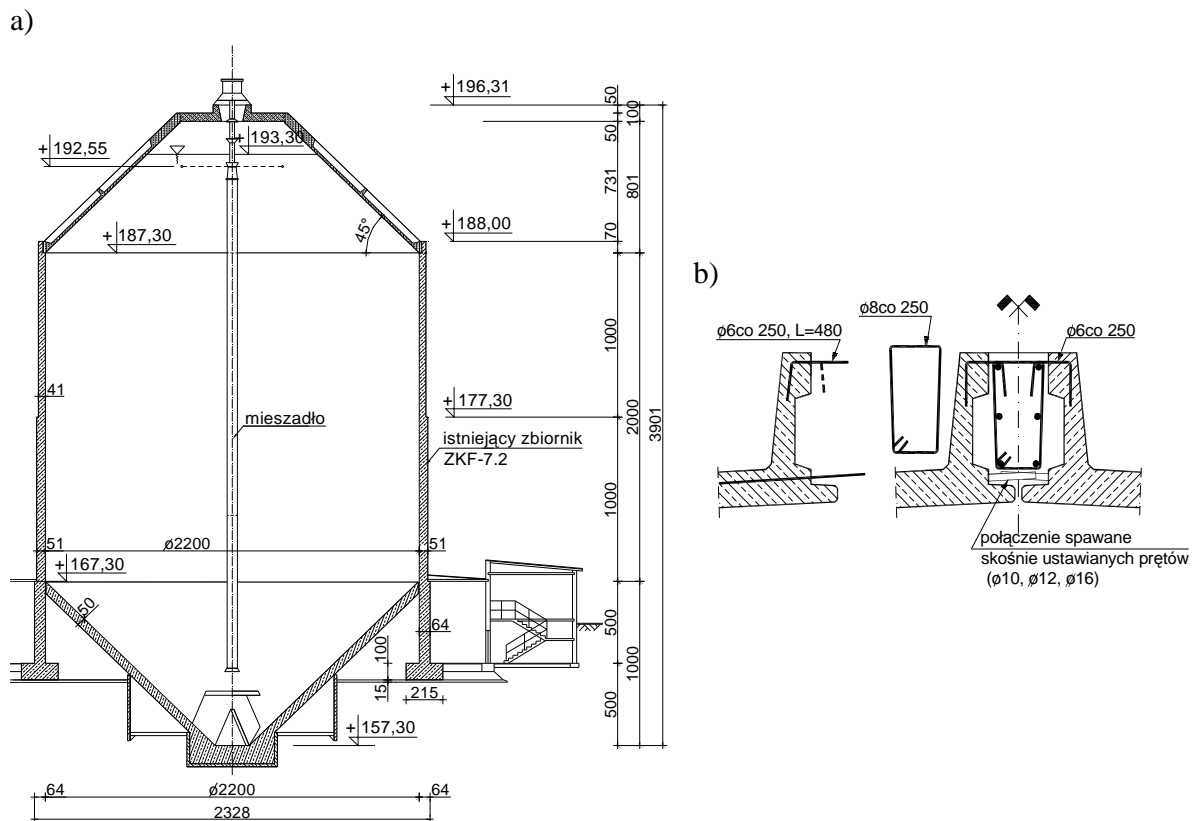
Podczas próby szczelności, w pierwszej kolejności włączonych do użytkowania komór ZKF-1 i ZKF-2, wystąpiły przecieki świadczące o powstaniu rys pionowych w powłoce walcowej, nad stożkowym oddylatowanym dnem. Przecieki wystąpiły również w strefie połączenia powłoki walcowej i przekrycia. Po wykonaniu zabiegów uszczelniających, głównie techniką iniekcji ciśnieniowej, włączono obydwie komory do eksploatacji.

Po około rocznym okresie użytkowania wystąpiło rozszczelnienie prefabrykowanej konstrukcji przekrycia ZKF-2, spowodowane awaryjnym napełnieniem zbiornika, około 1,5m powyżej roboczego poziomu ścieków. Osłabioną strefę wzmocniono stalowymi ściągamymi obejmującymi sąsiednie żebra prefabrykatów. W czasie próby szczelności gazowej, po wykonaniu napraw i zapewnieniu szczelności wodnej, nastąpił wybuch biogazu w komorze ZKF-2, a w jego następstwie znaczne uszkodzenie przekrycia zbiornika i górnej części powłoki walcowej.

2. Opis konstrukcji zbiornika

Konstrukcja i wymiary zbiornika przedstawione są na rys. 1a. Powłoka walcowa posadowiona jest na ławie fundamentowej pierścieniowej. Dno zbiornika o kształcie odwróconego stożka jest posadowione na betonowym fundamencie kołowym o skokowo zmiennej grubości; na pobocznicy dodatkowo jest wsparte na trzech współśrodkowych studniach o wysokości 200 cm. Stożkowe dno oddylatowano od powłoki walcowej. Uszczelniony styk umożliwia teleskopowe, niezależne przemieszczenia się dna i powłoki walcowej wzdłuż ich osi pionowej. Przekrycie zbiornika ma kształt stożka ściętego, a jego pobocznice stanowią 44 prefabrykowane, żelbetowe płyty żebrzo-panwiowe. Są one połączone monolitycznymi belkami pachwinowymi zabetonowanymi między żebrami podłużnymi. Ciągłość obwodowego zbrojenia w powłoce stożkowej na szerokości belek pachwinowych zapewniają połączone przez spawanie odcinki zbrojenia obwodowego płyt prefabrykowanych – rys. 1b. Górne zbrojenie poprzeczne łączące belkę pachwinową z żebrami podłużnymi prefabrykatów stanowią krótkie pręty $\phi 6$ mm co 25 cm w kształcie litery L o łącznej długości 48 cm. W górnej części stożka przekrycia wykonana jest monolityczna żelbetowa płyta kołowa o grubości 50 cm i średnicy 600 cm, krzyżowo zbrojona przy obu powierzchniach.

Prefabrykowane przekrycie połączone jest z powłoką walcową wieńcem obwodowym o wymiarach (b×h) 20×70 cm. Zbrojenie węzła podporowego łączące powłokę z kopułą stanowią pręty $\phi 16$ mm i $\phi 12$ mm (6 sztuk o długości 2,5 m), kotwione w powłoce walcowej i w belce pachwinowej oraz zbrojenie górne żeber prefabrykatów, kotwione w wieńcu obwodowym (3 $\phi 16$ mm w każdym żebrze, o długości kotwienia 65 cm).



Rys. 1. a) przekrój poprzeczny przez zbiornik ZKF
b) szczegół połączenia zbrojenia obwodowego prefabrykatów stożka przekrycia

Wszystkie elementy zbiornika wykonano z betonu klasy B30 i stali gatunku 18G2.

Wskutek znacznych uszkodzeń spowodowanych wybuchem biogazu zbiornik ZKF-2 został wyłączony z użytkowania. W kontekście niepowodzeń przy próbie szczelności zbiorników ZKF-1 i ZKF-2 oraz awarii zbiornika ZKF-2 Inwestor podjął decyzję wzmocnienia wszystkich zbiorników przez sprężenie zewnętrzne. Analiza i opis sposobu wzmocnienia zostały zamieszczone w referacie [2].

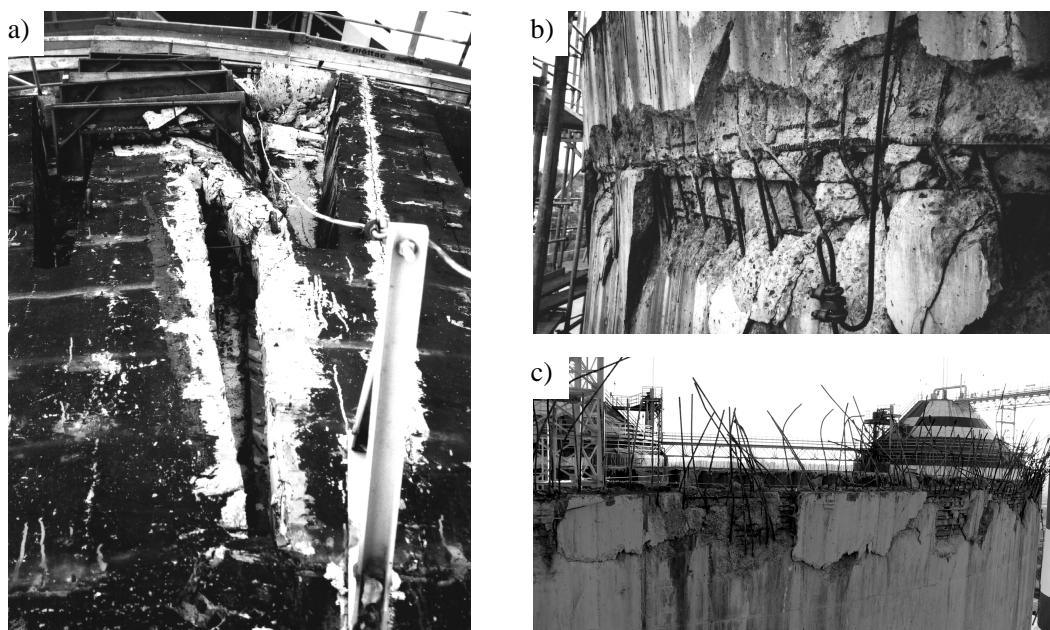
3. Opis uszkodzeń zbiornika ZKF-2 i analiza przyczyn ich powstania

3.1. Zakres uszkodzeń

Widok uszkodzonego przekrycia ZKF-2 przedstawiono na (rys. 2).

Główne elementy uszkodzeń to:

- rozerwanie w kilku przekrojach na obwodzie połączenia prefabrykowanych żeber z nadbetonem (rys. 2a), wskutek przeciążenia uogólnionymi równoleżnikowymi siłami wewnętrznymi,
- rozerwanie na części obwodu połączenia prefabrykowanego przekrycia z powłoką walcową w poziomie wieńca obwodowego (poziom +187,30m),
- lokalne rozerwanie wieńca obwodowego oraz przemieszczenie wieńca obwodowego na zewnątrz wzdłuż płaszczyzny jego połączenia z powłoką walcową zbiornika (rys. 2b), z jednoczesnym uszkodzeniem górnej części powłoki walcowej (rys. 2c),
- zarysowanie obwodowe górnej monolitycznej płyty przekrycia zbiornika,
- zarysowanie pionowe powłoki walcowej pod wieńcem obwodowym.



Rys. 2. Morfologia uszkodzeń górnej części zbiornika ZKF-2 spowodowanych wybuchem gazu (opis w tekście)

3.2. Przyczyny uszkodzenia przekrycia zbiornika

a) model obliczeniowy przekrycia zbiornika

Przekrycie zbiornika, złożone z prefabrykowanych panwiowych płyt żelbetowych, zbieżnych na długości, po zmonolityzowaniu z betonem pachwinowym, stanowi uźebrowaną powłokę

stożkową o grubości płyty 12 cm, z promieniowymi żebrami o przekroju poprzecznym $b \approx 50$ cm, $h = 55$ cm, w górnej części łączącymi się przy monolitycznej poziomej kołowej płycie. Takie ukształtowanie uźebrowania przekrycia prawdopodobnie skłoniło autorów dokumentacji projektu wykonawczego do odwzorowania pracy stożka przekrycia pionowymi ramownicami, obciążonymi zmiennym na wysokości parciem ścieków. W konsekwencji wyeksponowana została praca przestrzenna powłoki przekrycia w płaszczyźnie południkowej, przy całkowitym zaniedbaniu płaszczyzny równoleżnikowej.

Zbrojenie obwodowe (równoleżnikowe) prefabrykatów przekrycia ustalono przy schemacie jednokierunkowo zbrojonej płyty, zamocowanej w żebrach, obciążonej zmiennym na wysokości parciem ścieków. Połączenie zbrojenia obwodowego prefabrykatów przekrycia zrealizowano poprzez spawanie na długości zakładu w belkach pachwinowych (rys. 1b). Połączenie obwodowe żeber przekrycia w ich górnej części, w obrębie nadbetonu pachwinowego, zrealizowano przy zastosowaniu łączników z prętów gładkich $\phi 6$ mm co 25 cm, typu kąтового (rys. 1b). Pręty te były zaginane po ułożeniu zbrojenia pachwiny.

Wyszczególnione powyżej dwa detale konstrukcyjne połączenia obwodowego prefabrykatów stanowiły najłabsze ogniwo stożkowego przekrycia, które w pierwszej kolejności zawiodło już w początkowym okresie użytkowania zbiornika, wskutek nieznacznego przeciążenia (około 3%) w stosunku do roboczego obciążenia komory ZKF. Podczas wybuchu biogazu, wzdłuż płaszczyzny połączenia prefabrykatów z nadbetonem pachwinowym, nastąpiło rozerwanie konstrukcji przekrycia zbiornika ZKF-2.

b) model obliczeniowy powłoki walcowej zbiornika

Na etapie projektowania, w modelu obliczeniowym powłoki walcowej zbiornika, nie uwzględniono oddziaływania górnego pierścienia dna zbiornika na powłokę. Zapewnienie pionowego teleskopowego przemieszczania się dna zbiornika względem powłoki walcowej (np. wskutek zróżnicowanego osiadania) nie wyeliminowało możliwości wystąpienia oddziaływań radialnych. Przy niezależnym oddziaływaniu powłoki walcowej i stożka dna, zastosowanym w projekcie wzmocnienia zbiorników ZKF-1, ZKF-3 i ZKF-4 [2], uzyskano około 2,5-krotnie większe przemieszczenia dna w porównaniu z przemieszczeniem na tej wysokości powłoki walcowej. Oszacowane, równomiernie rozłożone na obwodzie, liniowe obciążenie powłoki walcowej, odpowiadające różnicy przemieszczeń powłoki walcowej i górnego pierścienia dna, wyniosło około 340kN/m. Spowodowana jego działaniem siła równoleżnikowa, nie uwzględniona na etapie projektowania, była prawdopodobnie główną przyczyną zarysowania zbiornika w tej części wysokości powłoki walcowej, które nastąpiło podczas próby szczelności (rysy pionowe o rozwarości około 0,2–0,3 mm, równomiernie rozłożone na obwodzie zbiornika). Powyższa wada dokumentacji projektowej nie miała wpływu na pracę statyczną powłoki stożkowej przekrycia.

4. Analiza możliwych rozwiązań konstrukcyjnych przy odbudowie przekrycia zbiornika

Zaawansowane uszkodzenia konstrukcji przekrycia przesądziły o konieczności jego rozbiórki. Lokalne uszkodzenia, na wysokości około 0,80m, wystąpiły także w górnej części powłoki walcowej (por. rys. 2b i 2c).

Analizując możliwości odbudowy przekrycia rozpatrzono wariant przekrycia monolitycznego oraz prefabrykowanego. W obydwu rozwiązaniach uwzględniono przypadek wystąpienia awaryjnego napełnienia ściekami, do całkowitego wypełnienia komory, łącznie z ciśnieniem biogazu.

Przy założeniu, że powłoka stożkowa nie będzie sprężona, w wersji monolitycznej konstrukcji przekrycia uzyskano w najbardziej wyteżonych przekrojach znaczną koncentrację zbrojenia, zarówno w strefie ściskanej jak i rozciąganej. W tabelicy 1 pokazano przykładowo wyniki analizy wytrzymałościowej w wybranych, ekstremalnie wyteżonych przekrojach południkowych powłoki stożkowej o gr. 18 cm. Kolejno przytoczono wartości momentów zginających i sił rozciągających, pola powierzchni zbrojenia wymaganego ze względu na spełnienie warunku stanu granicznego nośności na mimośrodowe rozciąganie, obliczone dla przyjętego zbrojenia szerokości rozwarcia rys oraz wyznaczone z warunku zapewnienia szczelności $w_k \leq 0,1$ mm zbrojenie minimalne, które powinno zostać zastosowane w przekroju.

Tablica 1. Wybrane wyniki analizy wytrzymałościowej monolitycznej powłoki stożkowej zbiornika – zbrojenie równoleżnikowe

ZBROJENIE RÓWNOLEŻNIKOWE				
wielkości statyczne	$M_{Sd} = -32$ kNm $N_{Sd} = 210$ kN	$M_{Sd} = -40$ kNm $N_{Sd} = 700$ kN	$M_{Sd} = -36$ kNm $N_{Sd} = 550$ kN	$M_{Sd} = -36$ kNm $N_{Sd} = 200$ kN
zbrojenie wyznaczone z warunku SGN na mimośród. rozciąg.	$A_{s1} < 0$	$A_{s1} = 20,92$ cm ²	$A_{s1} = 17,54$ cm ²	$A_{s1} < 0$
	$A_{s2} < 0$	$A_{s2} = 1,66$ cm ²	$A_{s2} = 0,20$ cm ²	$A_{s2} < 0$
zbrojenie przyjęte	$A_{s1} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s1} = 21,16$ cm ² => φ16co9,5 cm	$A_{s1} = 18,28$ cm ² => φ16co11cm	$A_{s1} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm
	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm
zarysowanie wyliczone dla przyjętego zbrojenia	$w_k = 0,36$ mm	$w_k = 0,36$ mm	$w_k = 0,38$ mm	$w_k = 0,39$ mm
zbrojenie wyliczone z SGU ($w_k < 0,1$ mm)	$A_{s1} = 28,73$ cm ² => φ16co7 cm	$A_{s1} = 53,38$ cm ² => φ20co6 cm	$A_{s1} = 47,24$ cm ² => φ20co6,5 cm	$A_{s1} = 28,73$ cm ² => φ16co7 cm
	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm	$A_{s2} = 13,40$ cm ² => φ16co15 cm

Ograniczenie szerokości rozwarcia rys do 0,1 mm spowodowało, że zbrojenie zapewniające spełnienie tego warunku ze względów technicznych (znaczące zagęszczenie dużych średnic prętów zbrojeniowych) było praktycznie niewykonalne. Zwiększanie grubości powłoki nie dawało pożądanych rezultatów w postaci istotnej redukcji pola powierzchni wymaganego zbrojenia, gdyż powodowało wzrost jej sztywności, a w konsekwencji także przyrost wyteżenia.

Nadto nachylenie tworzącej stożka wynoszące około 45° wymuszało zastosowanie obustronnego deskowania powłoki podczas jej betonowania.

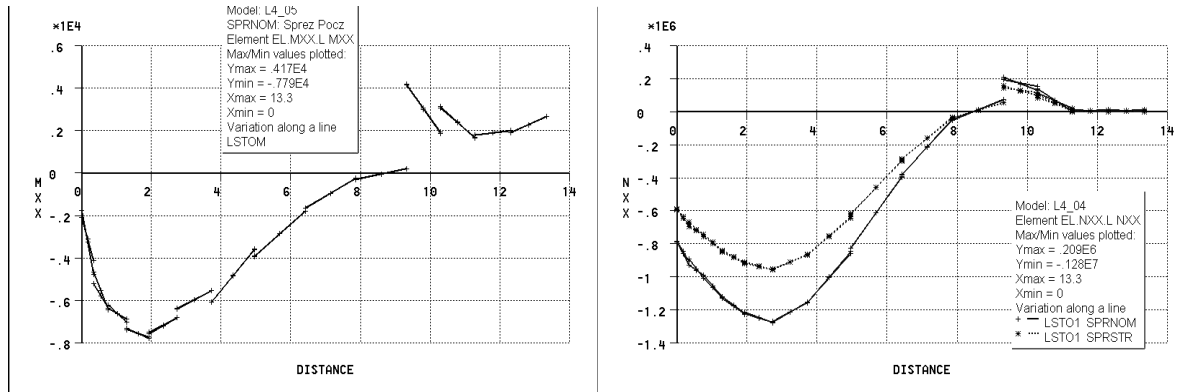
Efektywne zmniejszenie wartości momentów zginających i sił rozciągających (równoleżnikowych) można uzyskać przez sprężenie powłoki. Zabieg ten w istotny sposób redukuje niezbędne zbrojenie miękkie powłoki stożkowej, jednak wymaga wprowadzenia jej uźebrowania w celu właściwego zakotwienia stabilizatorów cięgien sprężających, co dodatkowo utrudnia realizację monolitycznego przekrycia zbiornika ZKF.

Rozpatrzono również odbudowę przekrycia zbiornika przy zastosowaniu elementów prefabrykowanych, o podobnej konstrukcji do pierwotnego rozwiązania projektowego. Za takim rozwiązaniem przemawiała możliwość wykorzystania istniejącego wyposażenia techno-

logicznego zespołu czterech zbiorników ZKF, łatwiejsze wykonanie oraz możliwość uzyskania wysokiej jakości betonu prefabrykatów, co wpływa na ogólną trwałość konstrukcji zbiornika.

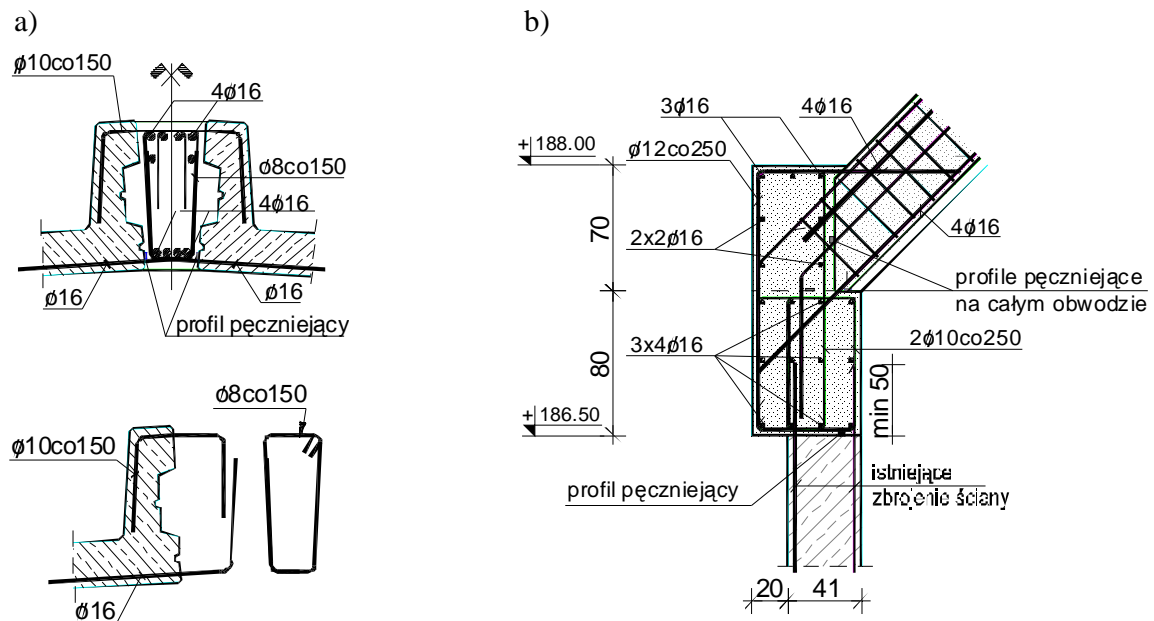
Ostatecznie zastosowano do odbudowy przekrycia zbiornika prefabrykaty, z jednoczesnym wprowadzeniem istotnych zmian konstrukcyjnych w ich zbrojeniu oraz w połączeniu prefabrykatów wzdłuż ich styku, a także wzdłuż ich oparcia na powłoce walcowej.

Przewidziano sprężenie powłoki walcowej i stożkowej, analogicznie jak we wzmocnionych już zbiornikach ZKF-1, ZKF-3 i ZKF-4 [2]. Na rys. 3 pokazano wartości momentów zginających i sił działających w płaszczyźnie równoleżnikowej stożka prefabrykowanego wywołanych sprężeniem zewnętrznym.



Rys. 3. Momenty i siły równoleżnikowe w powłoce stożkowej spowodowane sprężeniem (w przypadku sił dodatkowo pokazano wyniki dla siły sprężającej po wszystkich stratach)

W rozwiązaniu szczegółowym wyeliminowano wady projektowe pierwotnego rozwiązania połączenia obwodowego prefabrykatów. Wprowadzono niezbędne korekty zbrojenia przekrycia, dostosowane do modelu przestrzennej pracy powłoki walcowej, stożka przekrycia i stożkowego dna. Szczegóły wzmocnienia istniejącej powłoki walcowej i projektowanego prefabrykowanego przekrycia oraz połączenia obwodowego prefabrykatów przedstawiono na rys. 4.



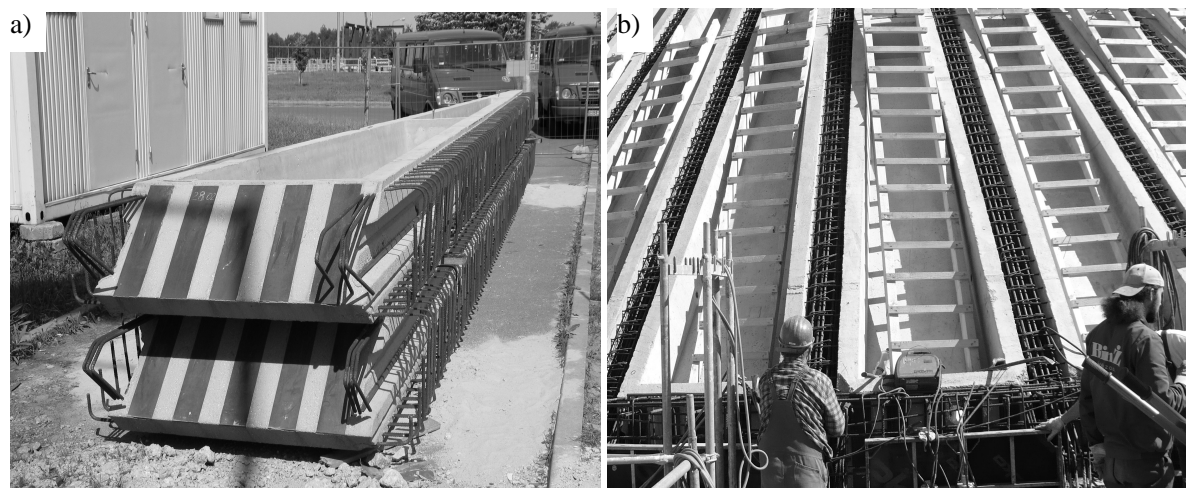
Rys. 4. a) szczegół zmodyfikowanego zbrojenia belki pachwinowej
b) wzmocnienie górnej części powłoki walcowej

Wprowadzona zmiana połączenia prefabrykatów ma następujące zalety:

- stwarza możliwość dostosowania deskowania żebra monolitycznego do rzeczywistego usytuowania dolnych krawędzi przyległych podłużnych żeber sąsiednich prefabrykatów przekrycia,
- zapewni właściwe, niezbędne ze względów wytrzymałościowych, zakotwienie zbrojenia obwodowego prefabrykatów przekrycia w obszarze żebra monolityzującego,
- eliminuje zasadniczą wadę pierwotnej dokumentacji projektowej zbiorników ZKF, w której założono połączenie zbrojenia obwodowego prefabrykatów w obszarze żebra monolityzującego przez spawanie.

Z uwagi na geometrię stożka przekrycia, odcinki prętów obwodowych wypuszczone poza lico żeber podłużnych, ułożone były względem siebie skośnie przestrzennie. W takich warunkach nie było możliwe wykonanie prawidłowego, wzdłużnie spawanego połączenia tych prętów w obrębie monolityzującego żebra między prefabrykatami (pręty $\phi 16$ do $\phi 12$ mm ze stali A-II). Ta wada połączenia uwidoczniła się w rozerwanej powłoce stożka przekrycia zbiornika ZKF-2.

Na rys. 5 pokazano prefabrykaty bezpośrednio po ich wykonaniu oraz widok szczegółu połączenia płyt wzdłuż żebra monolitycznego.



Rys. 5. a) prefabrykaty stożka przekrycia b) widok zbrojenia żeber monolitycznych pomiędzy sąsiednimi płytami powłoki bezpośrednio przed ich betonowaniem

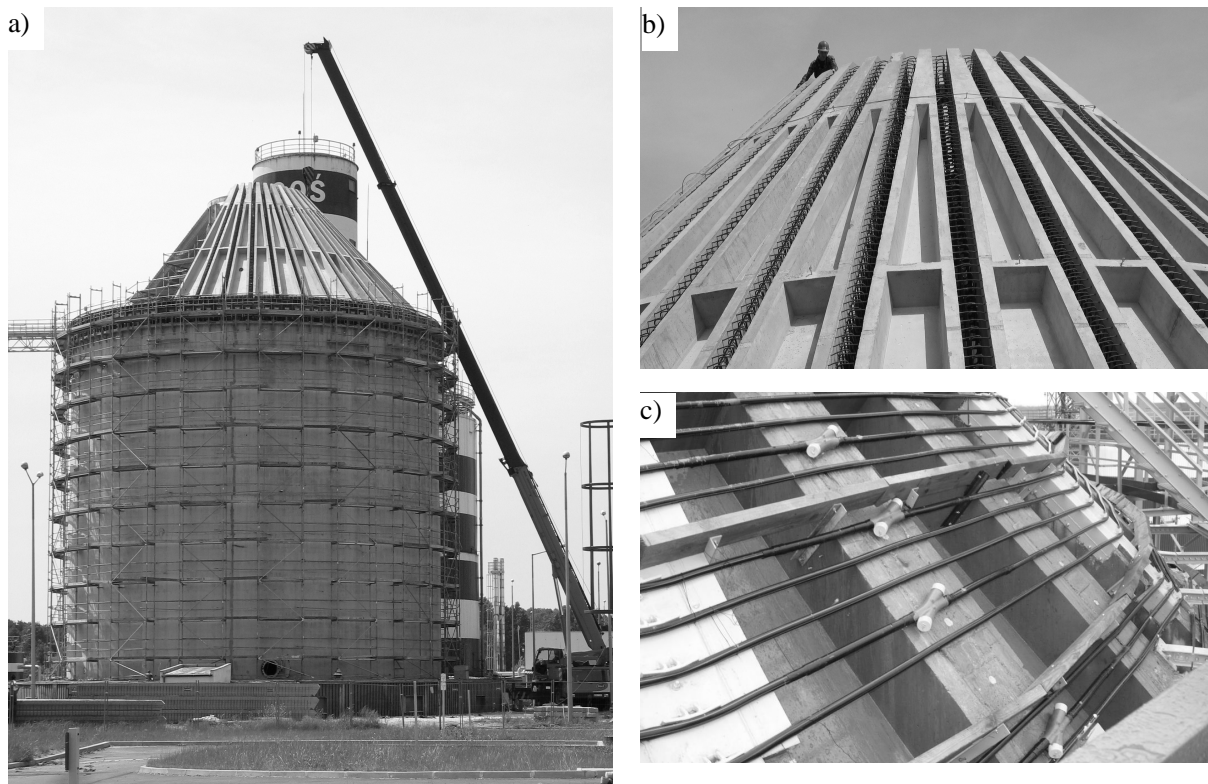
5. Odbudowa przekrycia zbiornika

Na rys. 6 przedstawiono sposób montażu prefabrykatów przekrycia (rys. 6a) oraz widok kopuły przed zabetonowaniem żeber (rys. 6b). Gabaryty obiektu, a przede wszystkim jego wysokość wymagały zastosowania wielu specjalistycznych urządzeń oraz konstrukcji pomocniczych podczas odbudowy zbiornika. Opracowany przez Wykonawcę projekt montażu i organizacji robót zapewnił sprawny montaż prefabrykatów, zabetonowanie styków między prefabrykowanymi płytami powłoki stożka, wieńca dolnego oraz płyty górnej przekrycia.

Odbudowaną powłokę stożkową oraz powłokę walcową zbiornika sprężono zewnętrznymi ciągniami niskotarciowymi o 4-ro krotnym zabezpieczeniu antykorozyjnym z zakotwieniami typu „X” (rys. 6c). Sprężenie powłoki stożka przekrycia zostało wykonane przez specjalistyczną firmę budowlaną.

6. Podsumowanie

Przedstawione w referacie zamknięte komory fermentacyjne ZKF posiadają złożoną konstrukcję. Wyróżnia je oryginalność rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Niestety na etapie projektowania tych konstrukcji nie w pełni odwzorowano rzeczywiste warunki obciążeń i przestrzennej pracy, czego konsekwencją był brak szczelności zbiorników i ich wrażliwość na przeciążenie. Wzmocnienie konstrukcji zbiorników przez zewnętrzne sprężenie zapewniło niezawodną ich pracę, sprawdzoną już na trzech zbiornikach przez okres około 8 lat. Zbiornik ZKF-2 uszkodzony wskutek wybuchu biogazu odbudowano wg analogicznego rozwiązania ze zmianami połączeń w węzłach likwidującymi pierwotne wady dokumentacji projektowej.



Rys. 6. Widok zbiornika podczas odbudowy stożka przekrycia
a) montaż prefabrykatów, b) widok przed zabetonowaniem żeber, c) sprężona powłoka

Literatura

1. Suwalski J.: Projekt i realizacja ZKF oczyszczalni ścieków w Łodzi, *Inżynieria i Budownictwo* nr 6/93, s. 219–221.
2. Dyduch K., Płachecki M., Wojtasiewicz M.: Analiza obliczeniowa i realizacja wzmocnienia żelbetowych zamkniętych komór fermentacyjnych w oczyszczalni ścieków, *Materiały Konferencyjne „Awarie Budowlane. XX Konferencja Naukowo-Techniczna”*, Szczecin-Międzyzdroje 2001, tom 1, s. 167–174.