

Zapory morskie w Nowym Orleanie (USA) w 10 lat po huraganie Katrina

Dr inż. Ryszard A. Daniel
RADAR Structural, Holandia

Budowle chroniące ląd przed wtargnięciem wód – tak ze strony rzek, jak i mórz – są wznoszone przeważnie po wielkich powodziach. Na ten fakt my inżynierowie i technicy budownictwa wodnego możemy patrzeć z pewnym sarkazmem, jednak

ma on obok irracjonalnego również racjonalne podłoże. Irracjonalność polega tu ogólnie na tym, że zagrożenie wtargnięciem wód jest po powodzi probabilistycznie takie samo, jakie było przed nią. Nie ma więc powodu, aby kroki zmniejszające to za-

grożenie podejmować akurat po powodzi. Za racjonalnością takich kroków przemawiają jednak inne argumenty: nagły wzrost akceptacji społecznej i poparcia administracyjnego dla inwestycji przeciwpowodziowych; ultymatywna wiedza lub tzw. „naga prawda” o zawodności i niezawodności istniejących zabezpieczeń, jakiej dostarczyła powódź; fakt, że obszar dotknięty powodzią i tak zamieni się wkrótce w plac budowy.

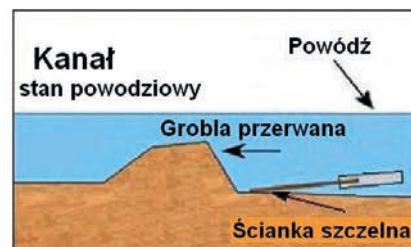
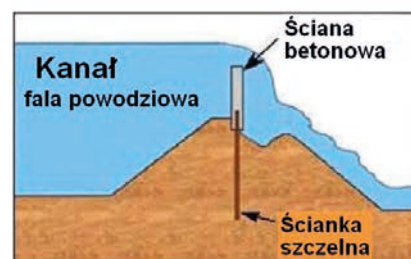
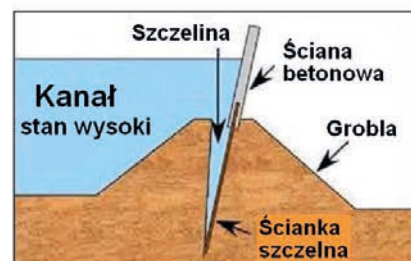
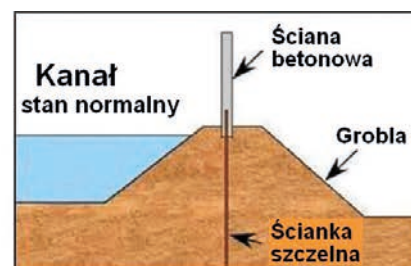
W końcu sierpnia bieżącego roku minęło 10 lat od katastrofalnego zalania Nowego Orleanu przez wody huraganu „Katrina”. Autor niniejszego artykułu był konsultantem i opiniodawcą przy projektowaniu obiektów – głównie ruchomych zapór – mających zmniejszyć zagrożenie miasta podobną katastrofą w przyszłości. Obiekty te są już w większości zrealizowane. I tu można więc zadać pytanie, czy nie za późno... Dyskusje na ten temat będą trwałe i są celowe, ale w świetle tego, co wyżej powiedziano, należy chyba mieć zrozumienie dla takiej, a nie innej kolejności wydarzeń.

W niniejszym artykule będą przedstawione zarysy obecnego układu zabezpieczeń Nowego Orleanu przed powodzią od strony morza, kluczowe elementy tego układu oraz – bardziej szczegółowo – konstrukcje głównych ruchomych zapór mor-

skich będących przedmiotem doradztwa i opiniodawstwa autora. Prezentację tematu zakończy kilka uwag o przydatności wiedzy o technologii zapór morskich dla sytuacji w Polsce.

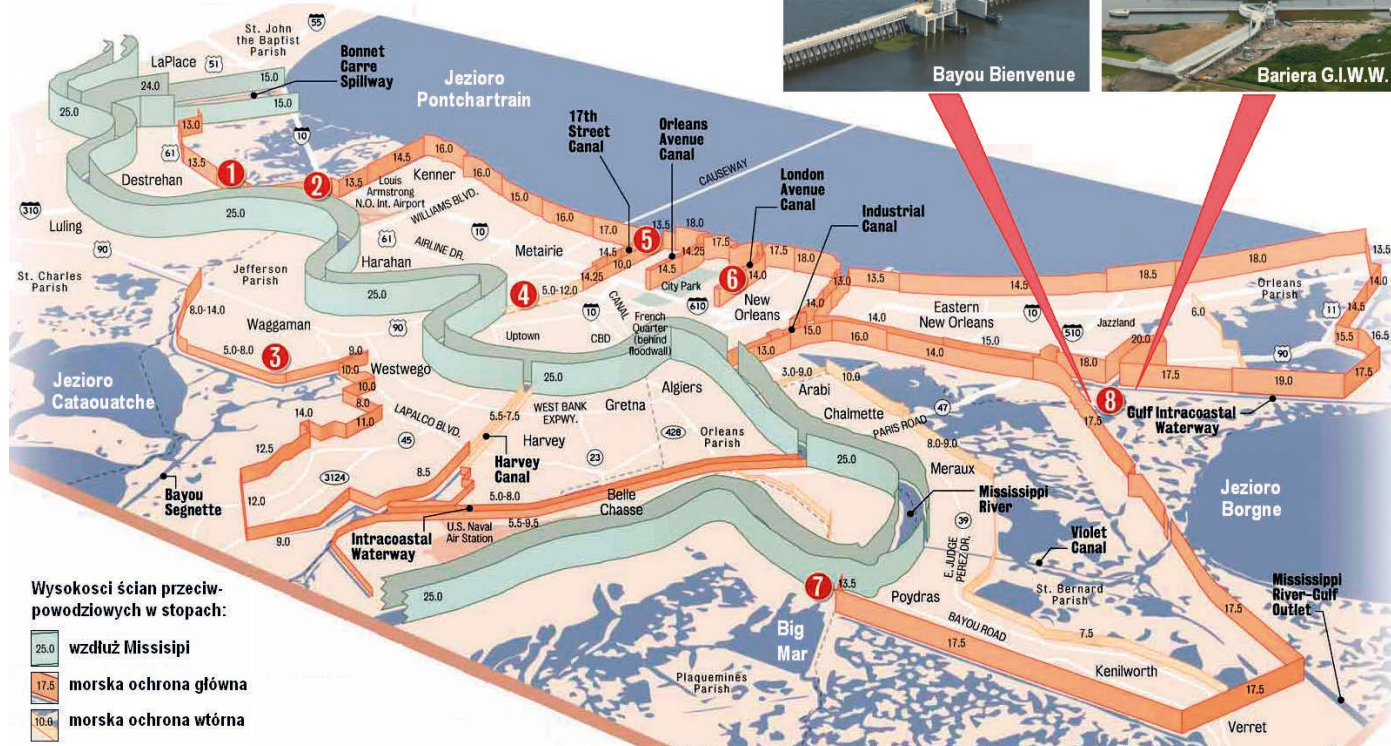
POWÓDŹ NIESZCZĘŚCIEM I LEKCJĄ

Huragan Katrina wkroczył na ląd w Nowym Orleanie we wczesnych godzinach rannych w poniedziałek 29 sierpnia 2005 roku. Jak wiadomo, powstał on w rezultacie tropikalnego cyklonu, zjawiska regularnie nawiedzającego południowe wybrzeża Stanów Zjednoczonych. O jego meteorologicznych przyczynach, sile wiatru, wysokości fali powodziowej oraz innych parametrach, a także o skutkach można dziś znaleźć wyczerpujące informacje w internecie. Przypomnijmy jedynie, że doprowadził on do zalania około 80% powierzchni miasta, śmierci lub zaginięcia prawie 2,5 tysiąca ludzi oraz – spóźnionych wprowadzie ale obszernych – ewakuacji, w wyniku których liczba ludności tego półmilionowego niegdyś miasta do dziś jest mniejsza o ponad sto tysięcy od stanu sprzed huraganu. O kataklizmie tym napisano już wiele książek. Rzetelną, choć „na gorąco” dokonaną, jego analizę zawiera pozycja [2].



Rys. 1. Przykładowa awaria grobli kanału (zdjęcia USACE)

OCHRONA PRZECIWPOWODZIOWA NOWEGO ORLEANU PO HURAGANIE "KATRINA"



Rys. 2. Plan grobli przeciwpowodziowych Nowego Orleanu po Katrina (rysunek USACE)

Dla nas inżynierów tematem, którego nie wolno pominąć, jest przede wszystkim szczegółowa ocena przeciwpowodziowych zabezpieczeń miasta z okresu przed Katrina oraz naprawa popełnionych tu błędów. Wnioski co do odpowiedzialności za te błędy wypada wprawdzie złożyć w ręce odpowiednich instytucji i komisji badawczych, gdyż ich przyczyny wykraczają daleko poza samą technikę, ale nauzki pod adresem techniki musimy wyciągnąć sami. Tym bardziej, że spotyka się nawet głosy określające Katrinę „największym zgotowanym przez technikę nie-szczęściem na świecie od czasu Czernobyla” [11].

Całościowej oceny błędów techniki nie sposób zaprezentować w jednym artykule. Składają się na nią bowiem nie tylko rozwiązania i stan techniczny istniejących przed Katriną układów tzw. „federalnych” grobli, czyli grobli finansowanych z budżetu centralnego. Inne, częściowo również techniczne aspekty, to między innymi intensywne bagrowanie płycznin delty Missisipi w celu ułatwienia żeglugi do platform wiertniczych w Zatoce Meksykańskiej, spotęgowana przez to erozja całej delty¹, wątpliwe rozwiązania planistyczne tak w samym mieście, jak i na całym wybrzeżu, niesprawność systemów ochrony i ewakuacji ludności itp. Zawiodła zatem nie tylko technika. Zaś pod stwierdzeniem, że zawiodła technika, należy rozumieć o wiele więcej jej twórców niż tylko same groble przeciwpowodziowe.

Faktem jest jednak, że groble te nie stanowiły dla Katriny specjalnej przeszkody. Typową ich awarię przedstawiono na rys. 1. Widzimy, jak szerokim frontem powódź wtargnęła tu do dzielnic mieszkalnych. W miejscu przerwanej grobli fala powo-

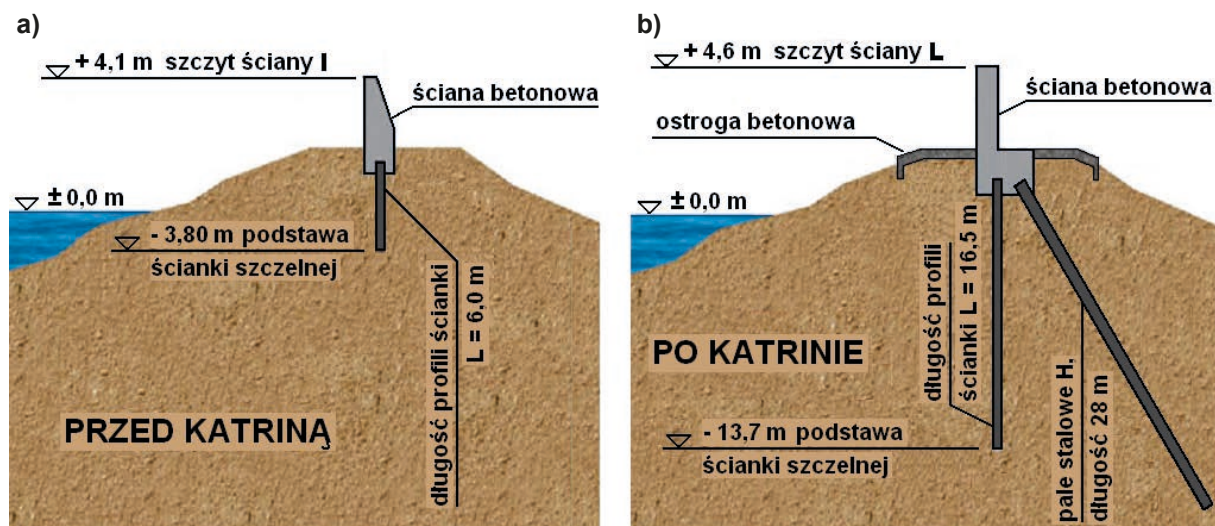
dziowa (na zdjęciu górnym już cofająca się) zmyła zabudowania do samych fundamentów. Nieco dalej niektóre budynki wprawdzie jeszcze stoją, ale nadają się już tylko do rozbiórki. Betonowa ściana piętrząca, wzniesiona na szczycie grobli, leży zniszczona w sporej odległości swego miejsca. Ściana ta, wieńcząca ściankę szczelną z grodzie stalowych, stanowiła typowe przed Katriną rozwiązanie w Nowym Orleanie – jak widać, rozwiązanie daleko niewystarczające. Kilka mechanizmów awarii grobli z taką ścianą pokazano schematycznie z prawej strony rysunku. Czytelnik łatwo rozpozna te mechanizmy na zdjęciach.

Z inżynierskiego punktu widzenia Katrina – przy całym ogromie zniszczeń – przyniosła także coś konstruktywnego. Obnażyła ludzkie błędy. Przyniosła wiedzę, jak nie należy budować grobli przeciwpowodziowych, jakie ich rozwiązania, elementy, wymiary itp. są krytyczne i wymagają zmian lub wzmocnień. Wiedza ta okazała się niezwykle cenna przy projektowaniu i wykonawstwie nowego systemu ochrony przeciwpowodziowej miasta i całego regionu.

NAUCZKI Z KATRINY

Jak okazuje się, nie tylko Polak jest „mądry po szkodziu”. Również Amerykanie przyswoili sobie tę cechę. Nowy, w większości zrealizowany już system zabezpieczeń składa się z grobli wyższych i znacznie mocniejszych niż groble sprzed Katriny. Ich ogólny plan z podziałem na główne sekcje (cyfry 1 – 8 w kółkach) przedstawiono na rys. 2. Dwa zdjęcia w prawym górnym rogu rysunku wskazują miejsca ruchomych zapór morskich omawianych w dalszej części artykułu. Groble brzegów Missisipi-

¹ Obliczono [2], że w 2005 roku stan Luizjana tracił wskutek tej erozji co 38 minut obszar wielkości boiska piłkarskiego. Pogłębianie płycznin delty zmniejszało też ich funkcję amortyzującą uderzenie fali powodziowej.



Rys. 3: Typowy przekrój grobli przeciwpowodziowej przed Katrinią (a) i po niej (b)

pi pomijamy w niniejszych rozważaniach, choć i one są lokalnie przedmiotem troski. Należy pamiętać, że ostatnia przed Katrinią wielka powódź miasta miała miejsce w 1927 roku i przyniosło ją nie morze, lecz właśnie rzeka Missisipi.

Budowa ścian betonowych w celu podwyższenia grobli nie jest sama w sobie rozwiązaniem błędnym. Redukuje ona powierzchnię podstawy grobli, a więc jest szczególnie atrakcyjna na terenach zurbanizowanych, gdzie powierzchnia ta jest droga. Aglomerację Nowego Orleanu na pewno trzeba zaliczyć do takich terenów. Już z samych zdjęć i szkiców na rys. 1 widać jednak trzy główne błędy, jakie popełniono przy budowie tych ścian, w każdym razie błędy na miarę huraganu o sile Katriny:

- za krótka ścianka z grodzic;
- ścianka z grodzic niestężona;
- korona grobli niewzmocniona przeciw rozmyciu.

Uniknięcie tych błędów nie uchroniłoby wprawdzie miasta przed lokalnymi przelewami wody nad ścianami grobli, ale objętości tych przelewów i wyrządzone przez nie szkody byłyby niewielkie i nietrudne do usunięcia. W przypadku braku akceptacji dla takich przelewów, trzeba mówić o czwartym błędzie:

- za niska ściana betonowa.

Wydaje się, że odpowiedzialny za ochronę miasta przed powodzą Korpus Inżynieryjny Armii USA (USACE) podjął właściwą decyzję, zachowując zasadę grobli ziemnych ze ścianami na grodzicach, lecz odpowiednio je modyfikując i wzmacniając. W konstrukcji nowych grobli wykorzystano w ten sposób do maksimum nauczki z Katriny. Główne zmiany w porównaniu ze stanem przed powodzią przedstawiono na rys. 3. I tu czytelnik bez trudu rozpozna, w jaki sposób usunięto wyżej wymienione błędy.

Zrozumiałe jest, że w sytuacji wielkomiejskiej nie wystarcza projekt samego przekroju grobli. Trzeba między innymi zaprojektować dodatkowo połączenia grobli chronionych sektorów, ich skrzyżowania z drogami publicznymi, istniejącymi kanałami, drogi awaryjne, przejścia dla pieszych, linie tramwajowe, przewody kanalizacyjne i kablowe itp. Każde miasto pragnie bowiem funkcjonować jako otwarta na świat i swobodnie komunikująca się między sobą społeczność, przy możliwie jak najmniejszych przeszkodach ze strony obiektów ochrony przeciw-

powodziowej. Rozwiązań w tym zakresie jest dużo i nie sposób ich omówić w tym artykule. Na rys. 4 przedstawiono kilka zdjęć takich rozwiązań.

Zauważmy, że w rejonach o ograniczonej dostępnej powierzchni – np. przy gęstej zabudowie lub w pobliżu obiektów infrastruktury – groble ziemne ustępują miejsca betonowym ścianom. Przy zagrożeniu powodziowym przejścia w tych ścianach, np. dla dróg lub linii kolejowych, zamyka się wrotami, przeważnie o konstrukcji stalowej. W przejściach dróg samochodowych, w poprzek których stosunkowo łatwo jest wykonać tor jezdny wrót, najczęściej stosuje się wrota przesuwne; w przejściach linii kolejowych przeważają wrota obrotowe. Oczywiście w obu przypadkach wrota umieszcza się z zasady po stronie fali powodziowej, tak by parcie wody „docisnęło” je do krawędzi ścian zmniejszając przez to przecieki. Konstrukcyjnie jest to również rozwiązanie poprawniejsze, gdyż nie wymaga kotwienia wrót do tych krawędzi. Choć wrota często zaopatrza się w uszczelki, kwestia szczelności nie jest tu tak istotna jak w przypadku np. wrót śluz żeglugowych czy doków stoczniowych. Teren chroniony pozwala bowiem zwykle na wtargnięcie stosunkowo niewielkich objętości wód z przecieków. Mniej wymagań stawia się także pod adresem czasu zamknięcia wrót i ich urządzeń napędowych. Przy obecnych metodach prognozowania powodzi wspartych obrazami satelitarnymi decyzja o zamknięciu wrót zapada odpowiednio wcześniej, pozwalając na powolne, nierzadko ręczne ich ustawienie w pozycji zamkniętej. Czynności te oraz ich koordynacja z innymi działaniami są oczywiście przedmiotem regularnych ćwiczeń odpowiednich służb.

BARIERA W KANALE PORTU WEWNĘTRZNEGO

Niezależnie od czysto technicznej wiedzy o funkcjonalności i mechanizmach awarii grobli Katrina dostarczyła szereg innych informacji. Do najistotniejszych z nich należał scenariusz samej fali powodziowej, jej wysokości i kierunki w różnych miejscach i przedziałach czasu, lokalne spiętrzenia wody oraz wzajemne relacje między obecnością i funkcjonowaniem obiektów ochrony a zachowaniem się fali powodziowej w różnych rejonach miasta. Są to wbrew pozorom rzeczy trudne do symulacji nume-



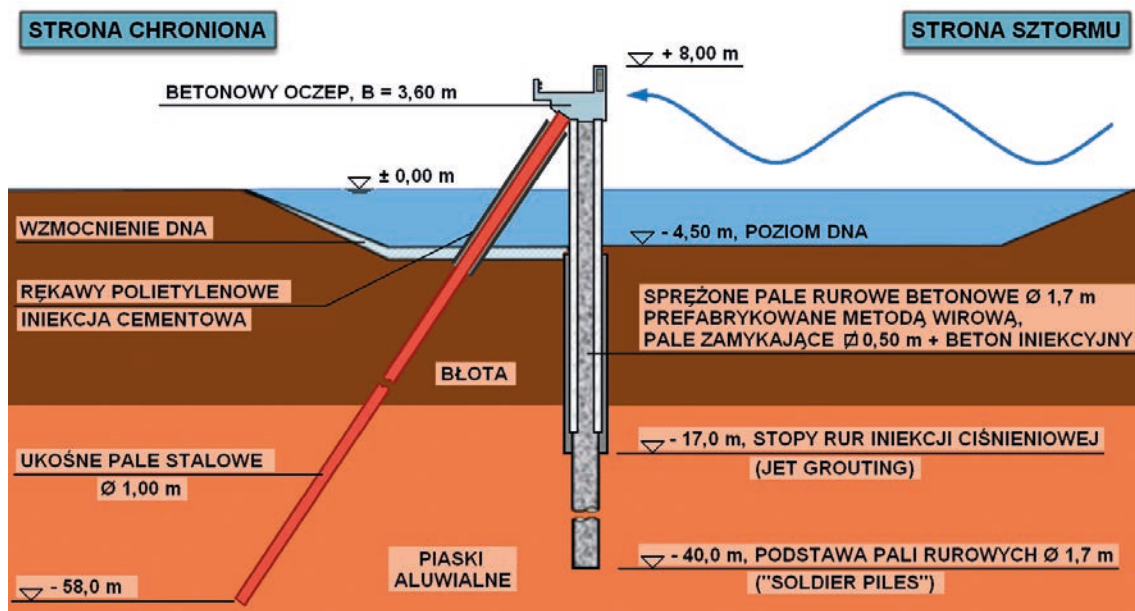
Rys. 4: Przejścia dróg komunikacyjnych przez groble przeciwpowodziowe (zdjęcia autora)
a), e) przejścia torów kolejowych, b), c) przejścia dróg samochodowych, d), f) przejścia dla pieszych i zwierząt

rycznych, a nawet fizycznego modelowania przy złożonych systemach ochrony dużych miast. Oczywiście następny huragan, tzw. 3. kategorii² nie musi mieć dokładnie tych samych kierunków wiatru i innych parametrów, ale scenariusz, jaki „napisała” Katrina, stał się przebogatym źródłem danych do projektowania nowych, lepszych konstrukcji przeciwpowodziowych.

Dzięki współczesnej technice sam przebieg powodzi oraz mechanizmy i współzależności kolejnych jej faz zostały udo-

² Przypomnijmy, że 12 godzin przed wejściem na ląd Katrina była huraganem 5. kategorii o prędkościach wiatru dochodzących do 280 km/h. Po wejściu jej siła zmniejszyła się do 3. kategorii, a prędkości wiatru nie przekraczały około 200 km/h. Na poziom fali sztormowej miały jednak wpływ także te wcześniejsze wiatry.

kumentowane lepiej niż gdziekolwiek i kiedykolwiek dotąd na świecie. W najogólniejszym skrócie przebieg powodzi można dziś krok po kroku prześledzić w internecie w animacji [12] wykonanej przez zespół *Times-Picayune* – dziennika, który jak żaden inny towarzyszył mieszkańcom miasta w dniach katastrofy. Już z animacji tej widać, że główne uderzenie Katriny przyszło od strony Jeziora Borgne we wschodniej części miasta (patrz rys. 1). Jezioro to – będące właściwie zatoką morską – wcina się jak gdyby klinem między Wschodni Nowy Orlean a tereny mokradeł i portu wewnętrznego na południu miasta. Przy naporze fal sztormowych nieznajdujące ujścia masy wód prowadzą do ich spiętrzenia na wierzchołku i groblach bocznych klina.



Rys. 5. Przekrój bariery przeciwpowodziowej wzdłuż Kanału IHNC



Rys. 6. Budowa bariery morskiej w Kanale IHNC (zdjęcia USACE)

a) dostawa pali ściany piętrzącej i montaż pomostu, b) wbijanie pali ściany piętrzącej, pali zamykających i ukośnych, c) pale ściany przed założeniem „rękawów” i oczepu, d) montaż i kotwienie sekcji oczepu, e) betonowanie złącz sekcji oczepu w deskowaniach stalowych

Czytelnika bliżej zainteresowanego tą sytuacją autor zachęca do przyjrzenia się jej na zdjęciach satelitarnych dostępnych w Google Earth.

Na tychże zdjęciach widać też już nowy element ochrony przeciwpowodziowej, tzw. barierę Kanału Żeglugowego Portu Wewnętrzznego (*Inner Harbor Navigation Canal, IHNC*). Bariera ta biegnie wzdłuż kanału i łączy dwie ściany klina, redukując przez to spiętrzenia wód podczas powodzi. Wraz z przebudową grobli stanowi ona dziś najważniejsze bodajże usprawnienie systemu ochrony przeciwpowodziowej Nowego Orleanu. Główne elementy jej konstrukcji widzimy w przekroju poprzecznym na rys. 5.

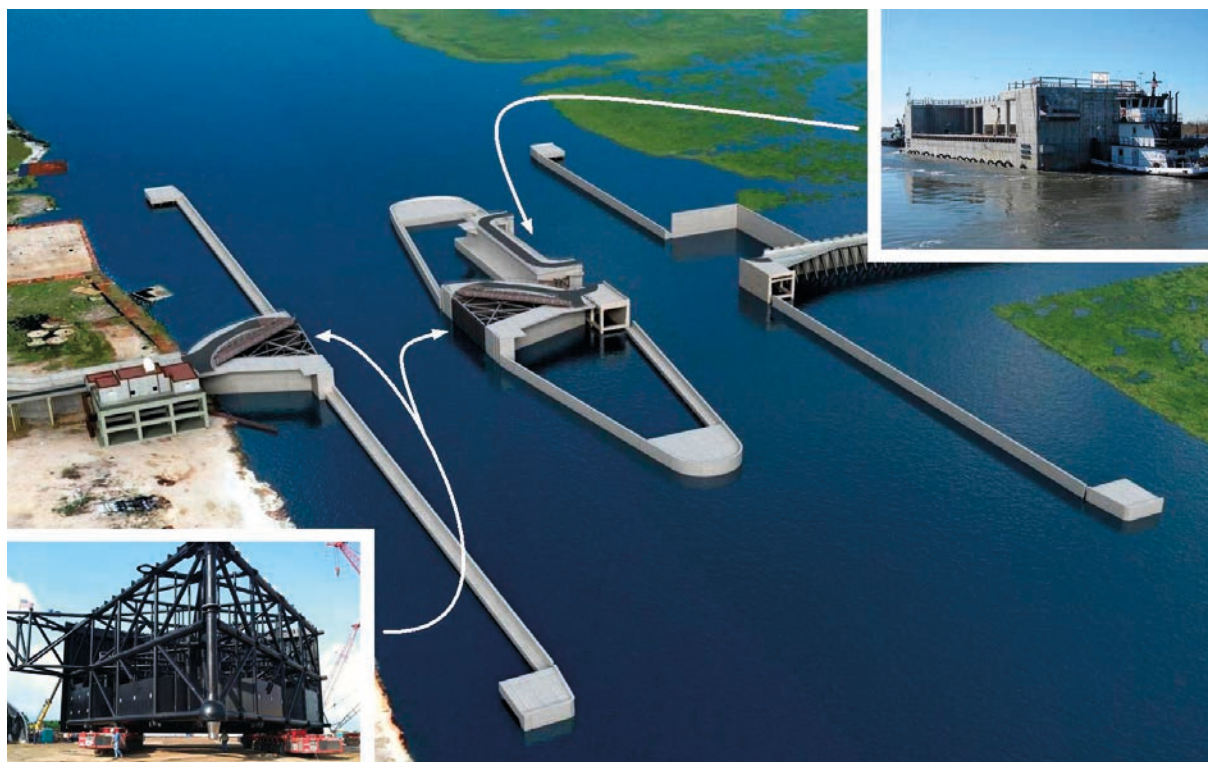
Zatem i tu wybudowano już ścianę o silnej, głęboko posadowionej i odpowiednio stężonej konstrukcji. Jej zwieńczenie stanowi szeroki betonowy oczep umożliwiający nawet ruch pojazdów służb utrzymania. Statycznie konstrukcja ta przypomina ściany grobli z rys. 3b, ale wszystkie elementy są tu o wiele większe i mocniejsze. Wynika to nie tylko z najwyższego poziomu obciążeń hydraulicznych (efekt klina), ale i z głębokości kanału oraz ryzyka kolizji ze strony statków i innych obiektów pływających.

Ze względu na to, że łączna długość bariery wynosi około 3 km, a jej budowę należało prowadzić szybko i w stosunkowo trudnych warunkach (*offshore*, sąsiedztwo żeglugi), w budowie zastosowano duży stopień prefabrykacji. Ścianę piętrzącą wykonano ze sprężonych pali betonowych o przekroju rurowym, prefabrykowanych nowoczesną tzw. metodą „wirową” (*spun-cast*), w której zagęszczanie betonu następuje dzięki działaniu siły odśrodkowej. Pale prefabrykowano w odcinkach 4,9-metrowych (16 ft). Dziewięć takich odcinków łączono następnie z sobą, sprężano do całkowitej długości równej 44 m (144 ft) i transportowano barkami po 18 do 21 sztuk na teren budowy.

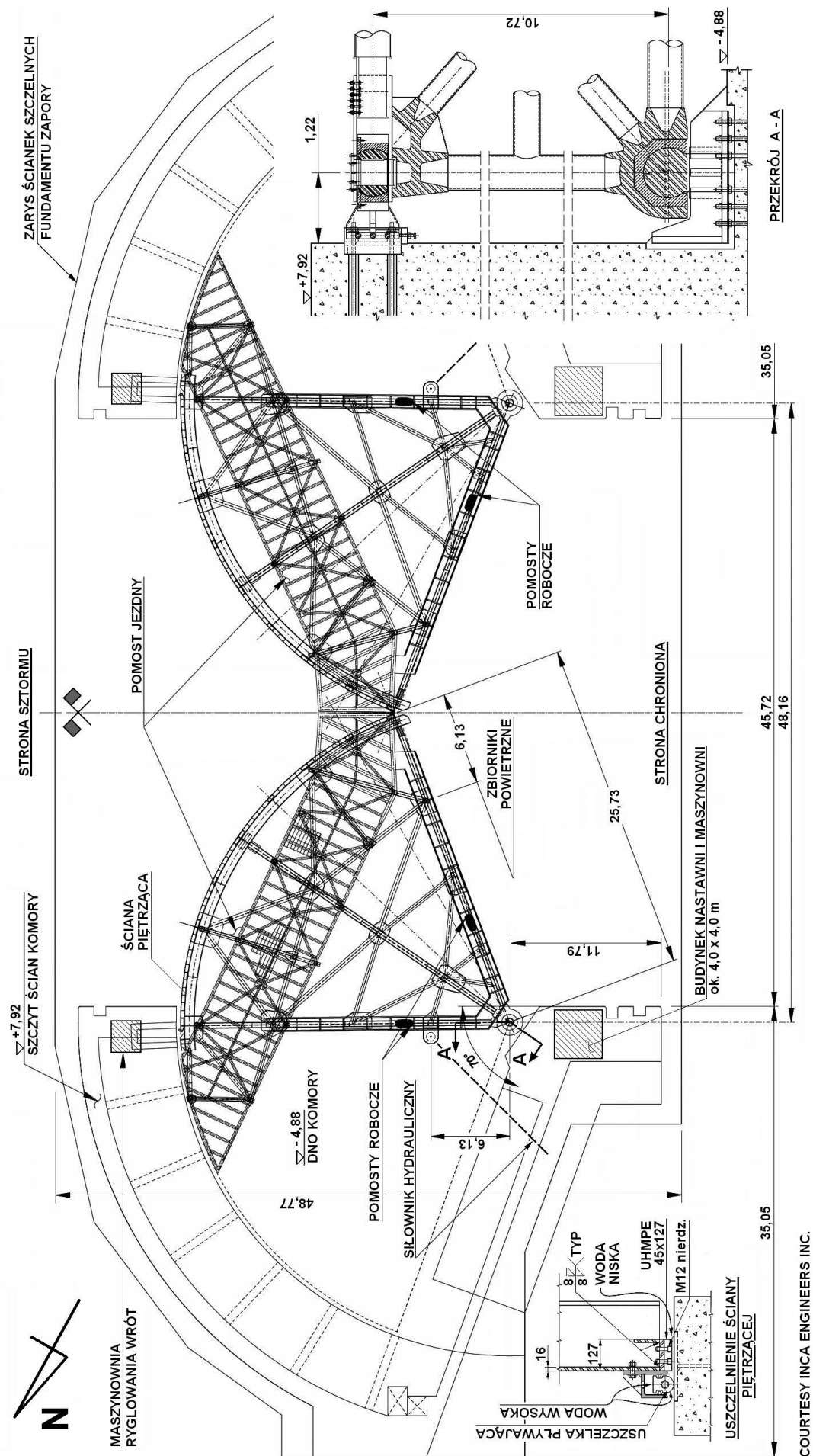
Zarówno sam transport pali, jak i operacje ich ustawiania i zagłębiania leżały na krańcach możliwości dostępnego sprzętu [7], lecz ich nie przekraczały. Ograniczyło to koszt budowy, gdyż nie trzeba było konstruować specjalnego sprzętu. Zagłębianie prowadzono metodą udarową bez wybierania gruntu z rur.

Do ustawiania pali posłużyły dźwigi na pontonach oraz specjalne szablony, zaś ich wbijanie prowadzono za pomocą ciężkich palownic. Szczeliny między palami zamykano z obydwu stron lżejszymi już i krótszymi palami betonowymi o przekroju kwadratowym, w połączeniu z iniekcją ciśnieniową (*jet grouting*). Zastosowane tu technologie w zasadzie niewiele różniły się od niektórych polskich realizacji [15]. Tak wykonaną ścianę piętrzącą stężano potem ukośnymi stalowymi palami rurowymi, na które nasuwano „rękawy” antykorozyjne z rur polietylenowych. Elementem zwieńczającym ścianę i pale ukośne jest masywny oczep betonowy, dostarczany także w prefabrykacjach na miejsce budowy, po czym montowany i odpowiednio kotwiony. Złącza oczepu betonowano na mokro przy lokalnym już tylko użyciu specjalnie wykonanych stalowych zestawów deskowań.

Rozmiary samej bariery Kanału Portu Wewnętrzznego (IHNC) oraz jej technologie budowy obrazują zdjęcia w kolażu na rys. 6. Zwróćmy uwagę na obszerny pomost roboczy z torem jezdnym dla dźwigów i palownic, jaki musiano wykonać w celu przeprowadzenia opisanych robót. Oczywiście – podobnie jak całość sprzętu – pomost ten był konstrukcją wielokrotnego użytku, rozbieraną i przemieszczaną wraz z postępem frontu robót. Zdjęcia do kolażu z rys. 6 pochodzą od kolegów z USACE – zlecającego prace projektowe z udziałem doradztwa autora. Konstrukcja i technologia budowy samej bariery IHNC nie była jednak bezpośrednio przedmiotem tego doradztwa. Koncentrowało się ono na wchodzących w skład bariery dwóch ruchomych zaporach morskich, o których mowa w dalszej części artykułu.



Rys. 7. Sytuacja ruchomych zapór morskich na torze wodnym GIWW (zdjęcia USACE)



Rys. 8. Główna ruchoma zapora morska na torze wodnym GIWW, rzut poziomy

COURTESY INCA ENGINEERS INC.

ZAPORA NA ZATOKOWYM TORZE WODNYM (GIWW)

Projekty bariery w kanale IHNC oraz ruchomych zapór w tej barierze są rezultatem tzw. *joint venture* dwóch amerykańskich biur projektowych INCA Engineering (dziś oddział Tetra Tech) i Gerwick Inc. Biura te pracowały na zasadzie kontraktu D&B (*design and build*) w zespole, w którym rolę głównego wykonawcy pełnił koncern The Shaw Group. Aby umożliwić żeglugę, w barierze IHNC wykonano dwie ruchome zapory morskie:

- na Zatokowym Torze Wodnym (*Gulf Intracoastal Waterway, GIWW*), dla dużych pełnomorskich jednostek,
- na torze Bayou Bienvenue, dla jednostek mniejszych i żeglugi rekreacyjnej.

GIWW to jeden z najważniejszych torów żeglugi śródlądowej USA, biegnący równoległe do wybrzeża Zatoki Meksykańskiej. Obie zapory będą zamykane jedynie podczas zagrożenia powodziowego.

Problemem dodatkowym było wymaganie takiego prowadzenia robót, by wymienione dwa tory wodne były dostępne dla żeglugi także w czasie budowy. W przypadku GIWW problem

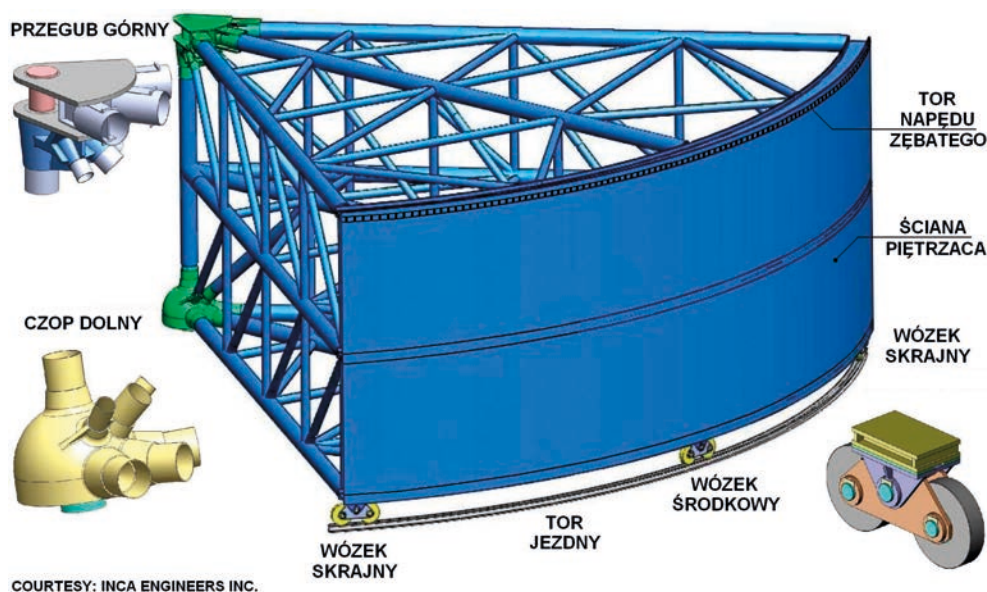
ten rozwiązano, budując najpierw obok głównego toru wodnego przejście żeglugowe z zatapianymi wrotami pływającymi (*barge gate*)³ i dopiero potem przystępując do budowy ruchomej zapory na samym torze. W okresie budowy żegluga była kierowana przez przejście boczne, z którego zresztą będzie mogła w przyszłości korzystać również podczas remontów wrót przejścia głównego. Na rys. 7 przedstawiono plan sytuacyjny obydwu przejść w widoku perspektywicznym. Zdjęcia samych wrót tych przejść umieszczono we wstawkach (a) i (b). Główna zapora ruchoma GIWW ma wrota rodzaju sektorowego. Przy wyborze rodzaju zarówno tych, jak i innych wrót w barierze, rozpatrzono szereg wariantów, zaś ostateczne decyzje zapadły na podstawie wyników analizy wielokryterialnej przeprowadzonej metodą zbliżoną do opisanej w [5].

Ogólne geometryczne i techniczne dane zapory GIWW z wrotami sektorowymi podano w tabl. 1 oraz na rys. 8 [14]. Dane pochodzą z niepublikowanych rozwiązań projektowych będących przedmiotem opiniodawstwa autora.

³ Są to jednoskrzydłowe, zatapialne wrota betonowe, których oś obrotu stanowił duży średnicy. Ze względu na objętość wrota te nie są omawiane w niniejszym artykule, chociaż także zasługują na uwagę.

Tabl. 1. Ogólne wymiary i dane techniczne zapory głównej GIWW w barierze IHNC

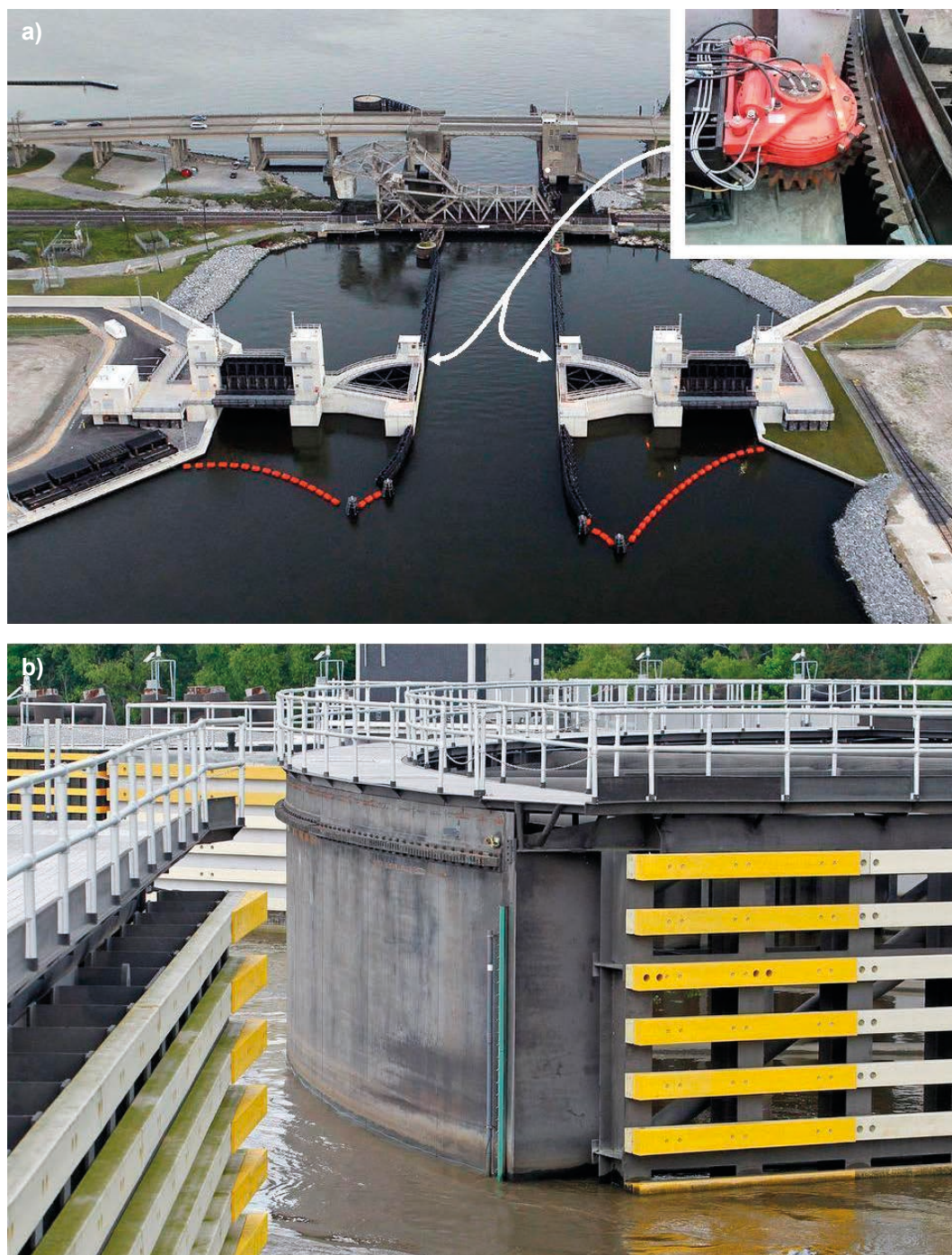
Dane geometryczne		Dane techniczne	
Szerokość fundamentu do kanału	48,77 m	Beton zbrojony łącznie	około 5200 m ³
Długość fundamentu ⊥ do kanału	115,82 m	Liczba pali fundamentowych	478 sztuk
Obwód w ściankach z grodzic	300 m	Przekrój pali fundamentowych	91 × 91 cm
Szerokość skrajni żeglugi	45,72 m	Konstrukcje stalowe łącznie	około 1250 ton
Szerokość wrót w osiach obrotu	48,16 m	... w tym łożyska, wózki i tor	około 80 ton
Głębokość komór = wysokość wrót	12,80 m	Stal przekrojów rurowych	API 5L gr X52
Promień ściany piętrzącej wrót	25,73 m	Stal kształtowników i blach	A992/572 gr 50
Kąt obrotu skrzydła wrót	70,0°	Obciążenie użytkowe pomostu	pojazd 100 kN
Przybliżony łączny koszt budowy zapory (bez narzutów): \$ 200.000.000,-			



Rys. 9. Model skrzydła wrót sektorowych na wózkach

Budowę zapory rozpoczęto od wbijania pali pod jej fundament za pomocą ciężkich palownic i dźwigów na pontonach. Obrys przyszłego fundamentu wygradzono następnie ściankami z grodzic, ścianki te rozparto, usunięto muły wprowadzając w ich miejsce podwodnie warstwę betonu, wypompowano wodę, po czym wybetonowano płytę denną, ściany komór wrót, ich próg, fundamenty przegubów i inne elementy. Same wrota sektorowe dostarczono i zainstalowano dźwigami pływającymi dopiero po ponownym wprowadzeniu wody. Są to wrota ze zbiornikami powietrznymi, zatem częściowo pławne. Napęd obu skrzydeł wrót stanowią siłowniki hydrauliczne zaczepione do pasów górnych ramion w odległości około $\frac{1}{4}$ promienia ściany piętrzącej od osi obrotu.

Konkurentem tego rozwiązania były przez długi czas wrota ze ścianą piętrzącą na wózkach (rys. 9), częściowo stosowane w USA. Natomiast konkurentem napędu hydraulicznego wrót był elektro-mechaniczny napęd zębaty z zespołem napędowym i przekładnią u wejścia do komory (doku) wrót i torem napędu przy górnej krawędzi ściany piętrzącej, również zaznaczonym na rysunku. Warto dodać, że podobne – tradycyjne – rozwiązania znalazły zastosowanie we wrotach sektorowych także innych zapór morskich Nowego Orleanu. Przykładem mogą tu być przeciwpowodziowe zapory *Seabrook Floodgates* na Kanaale Przemysłowym i tzw. *West Closure* na odcinku GIWW po przeciwnej stronie Missisipi (rys. 10).



Rys. 10. Wrota sektorowe zapór a) Seabrook Floodgates i b) West Closure (zdjęcia USACE)

ZAPORA NA TORZE WODNYM BAYOU BIENVENUE

Zapewnienie przejścia dla żeglugi w torze Bayou Bienvenue stanowiło stosunkowo łatwiejsze wyzwanie dla projektantów niż ruchoma zaporą GIWW. Wymagana szerokość skrajni żeglugi była tu bowiem mniejsza i wynosiła 17 m. Nie było także konieczności budowy dodatkowego, awaryjnego przejścia. Żegluga rekreacyjna, główny użytkownik Bayou Bienvenue, miała pod tym względem niższe wymagania. Do przepływu wód wzdłuż tego „bayou” (termin trudno przetłumaczalny na polski a oznaczający pierwotnie naturalny ciek wodny w płycznach delty, utrzymywany głównie do celów żeglugowych i ekologicznych) należało jednak skonstruować na okres budowy tymczasowe przepusty.

W odróżnieniu od zapory GIWW zaporą Bayou Bienvenue musiała zapewnić możliwość przejazdu samochodów służb obsługi i utrzymania także w pozycji otwartej. Rozwiązano to, budując na tych samych przyczółkach tuż za wrotami zapory dodatkowy obiekt – ruchomy most. Jest to most podnoszony pionowo, zawieszony między dwoma wieżami wyciągowymi na umieszczonych w narożach i odpowiednio zsynchronizowanych podnośnikach śrubowych. Wysokość podnoszenia wynosi 4,0 m, (jest to dużo w przypadku podnośników śrubowych).

Na wrota zapory wybrano stalową zasuwę pionową w prowadnicach przyczółków i również stalowych wież wyciągowych. Mechanizm podnoszenia jest rodzaju linowego bez przeciwwagi, ale za to z układem krążków znacznie redukującym wymaganą siłę napędu. Sama zasuwa nie imponuje wprowadzone rozpiętością, ma jednak znaczną jak na ten rodzaj wrót wysokość. Wrażenie o konstrukcji i proporcjach obiektu daje rys. 11. Duża wysokość zasuwy wynika z faktu, że jest ona rodzaju nieprzelewowego, tzn. jej górna krawędź jest wyższa niż poziom przyjętej w projekcie fali powodziowej. Dla całej bariery

wzdłuż IHNC – z zaporami GIWW i Bayou Bienvenue łącznie – falę tę przyjęto na poziomie tzw. „sztormu stuletniego”, czyli sztormu o częstotliwości występowania równej $1 \cdot 10^{-2}$ na rok.

Autor pragnie zaznaczyć, że podejście takie różni się dość istotnie od praktyki holenderskiej. Według tej praktyki fale sztormowe o częstotliwości występowania $1 \cdot 10^{-2}$ na rok także nie powinny prowadzić do przelewów, jednak miarodajne obciążenia projektowe dostarcza dopiero fala sztormowa o częstotliwości $1 \cdot 10^{-4}$, czyli raz na 10 000 lat [13]. Przy takich obciążeniach dopuszcza się zwykle niewielkie przelewy, gdyż chroniony ląd jest w stanie je przyjąć, jednak nie dopuszcza się przerywania barier. Przykładem takiego podejścia są – zaprojektowane przez autora – zasuwy pionowe bariery na Kanale Hartel do portu w Rotterdamie [3, 4]. Zasuwy te są rodzaju przelewowego. Przez to są one nieco niższe, chociaż ich rozpiętości (98,0 i 49,3 m) wielokrotnie przekraczają rozpiętość zasuwy Bayou Bienvenue. Przelewowość zasuwy wymaga ich specjalnego ukształtowania i rozwiązania dodatkowych problemów, jak np. drgania konstrukcji. Problemy te nie występują w zaporze Bayou Bienvenue. Nie występują one także w nieprzelewowej zaporze morskiej w Sankt Petersburgu [1], której 110 metrowa zasuwa odebrała rekord rozpiętości zasuwy południowej zapory na Kanale Hartel.

Główne wymiary i inne dane zapory Bayou Bienvenue przedstawiono w tabl. 2 oraz na rys. 12. Podobnie jak w przypadku zapory GIWW dane te pochodzą z opracowań projektowych [6] będących przedmiotem opiniodawstwa autora. Dane konstrukcyjne już zrealizowanych mogą wykazywać drobne różnice, które jednak nie mają znaczenia w rozważaniach w tym artykule. Różnice te mogą głównie dotyczyć przytoczonych kosztów budowy.

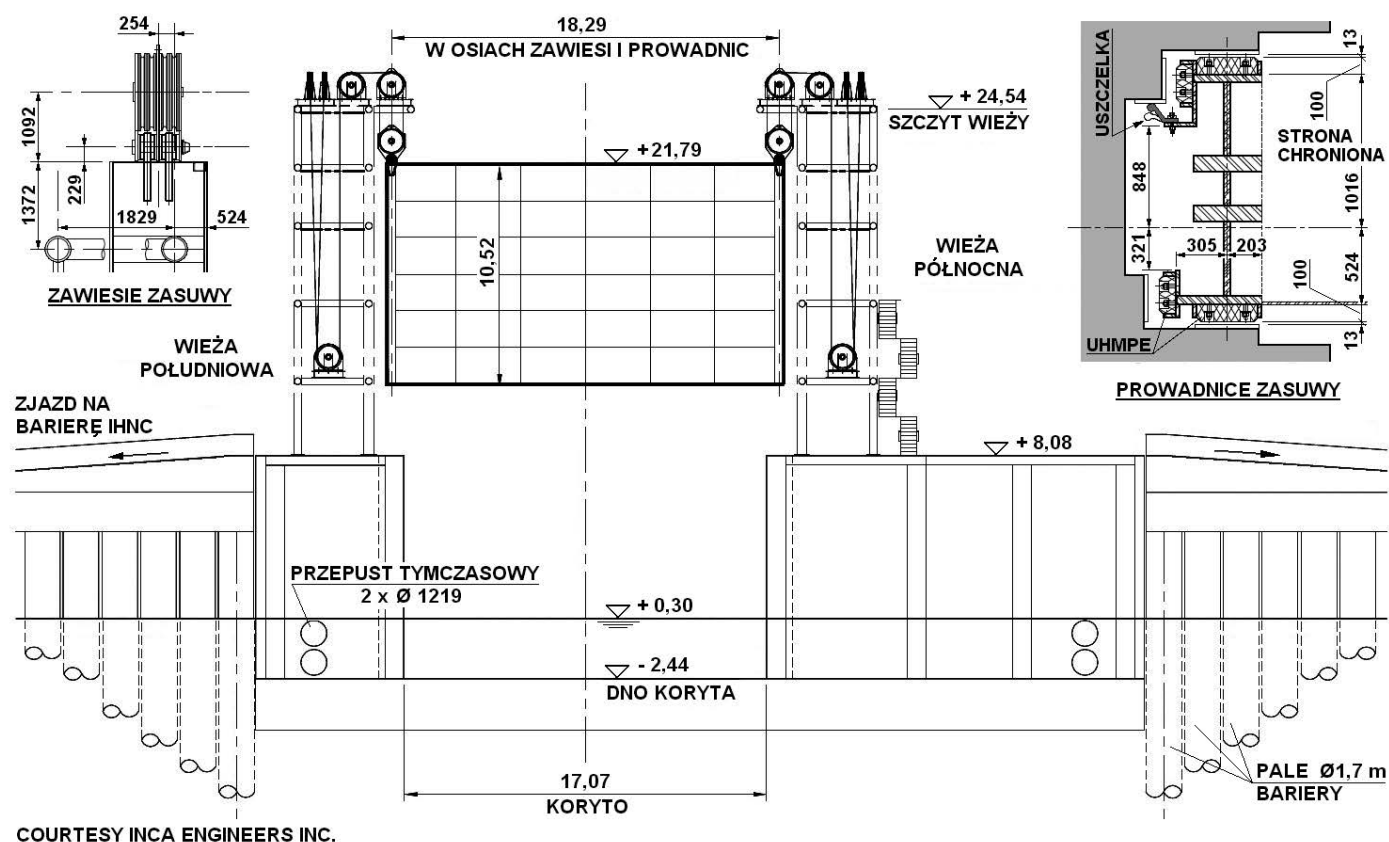
Charakterystyczne w obydwu zaporach, GIWW i Bayou Bienvenue, jest bardzo szerokie zastosowanie profilów rurowych w konstrukcji wrót. Można to wytłumaczyć względami natury obiektywnej – gdyż przekroje rurowe mają istotnie szereg zalet



Rys. 11 Ogólny widok zapory na torze wodnym Bayou Bienvenue (rysunek USACE)

Tabl. 2. Ogólne wymiary i dane techniczne zapory Bayou Bienvenue w barierze IHNC

Dane geometryczne		Dane techniczne	
Szerokość fundamentu do kanału	22,56 m	Beton zbrojony łącznie	około 3500 m³
Długość fundamentu ⊥ do kanału	40,08 m	Liczba pali fundamentowych	191 sztuk
Obwód w ściankach z grodzic	130 m	Przekrój pali fundamentowych	61 x 61 cm
Szerokość skrajni żeglugi	17,07 m	Konstrukcje stalowe łącznie	około 250 ton
Wysokość skrajni żeglugi	10,67 m	... w tym sama zasuwą	około 75 ton
Rozpiętość zasuw w prowadnicach	18,29 m	Stal przekrojów rurowych	API 5L gr X52
Głębokość koryta = wysokość zasuw	10,52 m	Stal kształtowników i blach	A992/572 gr 50
Wysokość podnoszenia zasuw	13,41 m	Obciążenie użytkowe mostu	pojazd 100 kN
Przybliżony łączny koszt budowy zapory (bez narzutów): \$ 43.000.000,-			



Rys. 12 Ruchoma zapora na torze wodnym Bayou Bienvenue, widok boczny

w porównaniu z przekrojami otwartymi – ale ma to także subiektywne podłoże. Rejon Zatoki Meksykańskiej jest bowiem zdominowany przez przemysł petrochemiczny, na usługi którego pracuje większość lokalnych biur projektowych. Ze względu na to, że w petrochemicznym budownictwie morskim przekroje rurowe są najszerszej stosowane, wykształciło to – obok gruntownej wiedzy – także swoistą kulturę budowlaną. Nie negując pozytywnych jej cech trzeba pamiętać, że w ruchomych zamknięciach wodnych przekroje rurowe mają także pewne wady. Prowadzą one np. do tworzenia się wirów von Karmana wywołujących drgania konstrukcji. Wadą – szczególnie zasuw pionowych – może być także duża wyporność konstrukcji rurowych. Wymaga się bowiem

zwykle, by takie i podobne zasuwy zamykały się w każdych okolicznościach pod własnym ciężarem.

UWAGI KOŃCOWE

Bariera w Kanale Portu Wewnętrznego IHNC (zwana też *Lake Borgne Barrier*) z ruchomymi zaporami morskimi GIWW i Bayou Bienvenue kosztowała 1,1 miliarda USD. Jest ona dziś na pewno najważniejszym, ale nie jedynym nowo zrealizowanym obiektem ochrony Nowego Orleanu przed powodzią. W artykule pominięto szereg innych projektów, przy realizacji których autor nie był bezpośrednio zaangażowany. Do najciekawszych z nich należą:

- wspomniane już wzmocnienia i podwyższania grobli do wysokości jak na rys. 2,
- ruchome zapory *Seabrook Floodgates* na *Industrial Canal* (rys. 10a),
- wielka przepompownia i ruchoma zaporą w tzw. *West Closure* (rys. 10b),
- ruchome zapory na kanałach do Jeziora Pontchartrain, tzw. *Outfall Canals*.

Na cały realizowany przez USACE program zmniejszenia ryzyka powodzi Nowego Orleanu i jego regionu Kongres Stanów Zjednoczonych przyznał 14,4 miliardów USD [8]. Kolegów zainteresowanych wyżej wspomnianymi innymi projektami tego programu autor zmuszony jest odesłać do wyszukiwarek internetowych.

Można zadać pytanie, czy wiedza o konstrukcjach zabezpieczających ląd przed powodzią od strony morza jest w Polsce potrzebna. W Gdańsku czy Szczecinie prawdopodobieństwo fali powodziowej o rozmiarach Katriny jest znacznie mniejsze niż w Nowym Orleanie lub np. w Holandii. Nie powinno to nas jednak zwalniać z czujności w tej sprawie. Chociaż bowiem w najbliższej przyszłości trudno spodziewać się w Polsce podobnych projektów, to aktualność tematyki zabezpieczeń morskich – szczególnie w deltach Wisły i Odry – będzie niewątpliwie rosła. Wpłyną na to takie czynniki jak słabość obecnych zabezpieczeń, wzrastający potencjał ekonomiczny wybrzeża, podwyższający się w wyniku klimatycznych zmian poziom Bałtyku, przewidywany wzrost częstotliwości i siły sztormów na północnych wybrzeżach Europy itp.

Dochodzi do tego fakt postępującej erozji polskiego wybrzeża morskiego, na skutek której kraj nasz traci średniorocznie obszar 0,7 km² nawet bez sztormów o wyjątkowej sile [9]. To wprawdzie wielokrotnie mniej niż w Luizjanie, ale także wymaga przeciwdziałania – tym bardziej, że współczesna nauka i technika dostarcza coraz pewniejszych metod, by procesy takie hamować, a nawet częściowo odwracać.

Jak uczy doświadczenie Katriny, każda poprawa odporności wybrzeża na działanie sił przyrody zmniejsza rozmiary nieszczęścia w momencie, gdy siły te osiągną formy i wartości ekstremalne. Bardzo pouczający jest w tej sprawie niedawny raport PIANC [10], dający szereg praktycznych wskazówek systematycznego podejścia do kwestii takiej odporności. Wypada mieć nadzieję, że nauczki z Katriny oraz wypracowane na ich podstawie metody postępowania także w Polsce znajdą odpowiedni oddźwięk.

1. Bierawski L.: Bariera przeciwpowodziowa Sankt Petersburga. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2010.
2. Brinkley D.: The Great Deluge – Hurricane Katrina, New Orleans and the Mississippi Gulf Coast. Harper Perennial, New York-London-Toronto-Sydney, 2006.
3. Daniel R. A.: Schuiven met mogelijkheden. Bouwen met Staal, mei/juni 1996, dostępne na <https://independent.academia.edu/RyszardDANIEL>.
4. Daniel R. A., Leendertz J.S.: Geïntegreerd ontwerp van de hefschuiven Hartelkering. Civ. Techniek, 4/1994, dostępne na <https://independent.academia.edu/RyszardDANIEL>.
5. Daniel R. A., Rigo Ph., Dembicki E.: Multi-criteria selection of hydraulic gates. International Navigation Seminar – PIANC-AGA, Beijing, May 2008.
6. Lapene D. J.: IHNC Hurricane Protection Project – Bayou Bienvenue Vertical Lift Gate Study, J.V. INCA-Gerwick, New Orleans, April 9, 2009 (raport niepublikowany).
7. McCraven S.: In the face of fury. Precast Inc. Magazine, National Precast Concrete Association, Archive 2009-2010, July 2010.
8. Miller D. i in.: Hurricane Katrina and the Inner Harbour Navigation Canal Lake Borgne surge barrier. Proc. of the 33rd PIANC World Congress, San Francisco 2014.
9. Paleczek W.: O możliwościach modelowania zmian geometrii przekroju pionowego skarpy morskiego wybrzeża klifowego wskutek abrazji. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2014.
10. PIANC: Navigation structures: Their role within flood defence systems. Resilience and performance under overloading conditions, report no. 137, PIANC, Brussels, 2014.
11. Seed R. B. et al.: Investigation of the performance of the New Orleans flood protection systems, final report. NSF and Berkeley University of California, July 2006.
12. Swenson D., Marshall B.: Interactive graphics „Flash Flood”. The Times-Picayune, <http://www.nola.com/katrina/graphics/flashflood.swf>.
13. TAW Committee: Fundamentals on water defences. Directorate-General for Public Works and Water Management (Rijkswaterstaat), Delft, 1998.
14. Tondravi H. i in.: IHNC Hurricane Protection Project – GIWW Buoyant Gate Study, J.V. INCA-Gerwick, New Orleans, May 5, 2009 (raport niepublikowany).
15. Topolnicki M.: Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych, Konferencja Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 2011.