



AWARIA I ODBUDOWA ZABEZPIECZEŃ PRZECIWPOWODZIOWYCH NOWEGO ORLEANU PO HURAGANIE KATRINA

RYSZARD A. DANIEL, *r.a.daniel@xs4all.nl*
RADAR Structural, Gouda, The Netherlands

Streszczenie: W końcu sierpnia bieżącego roku minie 10 lat od katastrofального zalania Nowego Orleanu przez wody huraganu „Katrina”. Autor niniejszego referatu był konsultantem i opiniodawcą przy pracach nad projektami obiektów – głównie ruchomych zapór morskich – mających zmniejszyć zagrożenie miasta podobną katastrofą w przyszłości. Obiekty te są już w większości zrealizowane. W niniejszym referacie omówione zostaną krótko awarie grobli przeciwpowodziowych, jakie istniały w Nowym Orleanie przed Katriną, oraz nauzki wyciągnięte z tych awarii po powodzi. Następnie już dokładniej przedstawione zostaną zarysy nowego, zmodernizowanego układu zabezpieczeń miasta przed wtargnięciem fali powodziowej. Główną uwagę poświęcono kluczowym elementom tego układu, takim jak nowe lub wzmocnione groble, bariera morska wzdłuż Kanału Portu Wewnętrznego (IHNC) oraz – najbardziej szczegółowo – konstrukcje ruchomych zapór morskich będących przedmiotem doradztwa i opiniowania autora. Omówiono motywy wyboru zarówno ogólnych układów konstrukcyjnych tych obiektów, jak i ich najważniejszych szczegółów technicznych, materiałów i metod realizacji. Referat kończy kilka zdań o przydatności wiedzy o technologii zapór morskich dla sytuacji w Polsce.

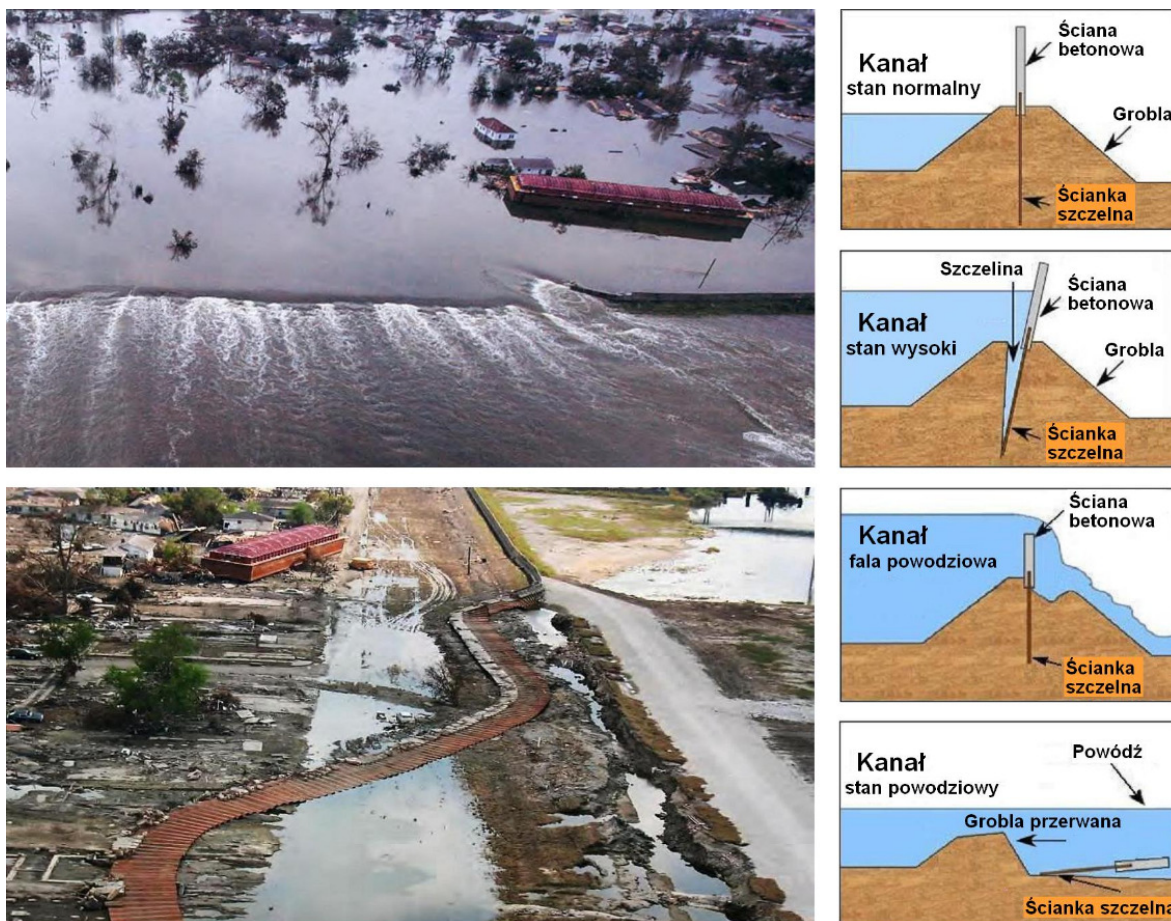
Słowa kluczowe: budownictwo wodne, zapory morskie, powódź, ochrona przeciwpowodziowa, konstrukcje piętrzące, bariery wodne, groble, wrota zapór, Nowy Orlean, Katrina.

1. Nieszczęście i lekcja

We wczesnych godzinach rannych w poniedziałek 29 sierpnia 2005 r. huragan Katrina wkroczył w Nowym Orleanie na ląd stanów Luizjana i Missisipi. Jak wiadomo, huragan ten – zwany też orkanem – powstał on w wyniku tropikalnego cyklonu, zjawiska dość regularnie nawiedzającego południowe rejony Stanów Zjednoczonych. O meteorologicznym podłożu huraganu, jego sile wiatru, wysokościach fal powodziowych oraz innych parametrach można dziś znaleźć wyczerpujące informacje dostępne m.in. w internecie. Odnosi się to także do rozmiarów spowodowanych przez niego zniszczeń. Wypada więc jedynie przypomnieć, że doprowadził on do zalania około 80% powierzchni miasta, śmierci lub zaginięcia prawie 2,5 tysiąca ludzi oraz – spóźnionych wprawdzie ale zakrojonych na szeroką skalę – ewakuacji ludności. Jednym z jego skutków jest fakt, że liczba mieszkańców półmilionowego niegdyś Nowego Orleanu jest dziś mniejsza o ponad sto tysięcy [1] od stanu sprzed Katriny.

O tragedii tej napisano już wiele książek. Rzetelną choć „na gorąco” dokonaną jej analizę zawiera np. pozycja [2]. Dla nas inżynierów tematem, którego nie można pominąć, jest przede wszystkim szczegółowa ocena przeciwpowodziowych zabezpieczeń miasta z okresu przed Katriną oraz naprawa popełnionych tu błędów. Kwestię odpowiedzialności za te błędy wypada wprawdzie pozostawić w rękach odpowiednich instytucji i komisji badawczych, gdyż ich przyczyny wykraczają daleko poza samą technikę, jednak nauzki pod adresem techniki musimy wyciągnąć my sami. Tym bardziej, że spotyka się nawet głosy nazywające awarie obiektów inżynierskich w dniach huraganu „największym zgotowanym przez technikę nieszczęściem na świecie od czasu Czernobyla” [3]. Istnieje więc wezwanie ze strony społeczeństwa do wyciągnięcia lekcji z takich katastrof.

Niniejszy referat nie pretenduje do całościowej oceny błędów techniki. Ocena taka musiałaby przecież obejmować nie tylko rozwiązania i stan techniczny istniejących przed Katrینą systemów tzw. „federalnych” grobli, czyli grobli finansowanych z budżetu państwa. Inne, częściowo również techniczne aspekty to m.in. intensywne bagrowanie pływaczni delty Mississippi w celu ułatwienia żeglugi do platform wiertniczych w Zatoce Meksykańskiej, spotęgowana przez to erozja delty¹, wątpliwe rozwiązania planistyczne tak w samym mieście jak i na całym wybrzeżu, niesprawność systemów ochrony i ewakuacji ludności itp. Zawiodła więc nie tylko technika. Pod stwierdzeniem zaś, że zawiodła technika, należy rozumieć o wiele więcej jej twórców niż tylko konstrukcje przeciwpowodziowe.



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

Jest jednak faktem, że istniejące groble i inne zabezpieczenia nie stanowiły dla Katriny dużej przeszkody. Jedną z typowych ich awarii przedstawiają zdjęcia na rys. 1. Widzimy, jak szerokim frontem powódź wtargnęła tu do dzielnic mieszkalnych. W miejscu przerwanej grobli fala powodziowa (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, która wieńczyła groblę, leży zniszczona w sporej odległości od miejsca, w którym stała. Ściana ta, wykonana na szczycie ścianki szczelnej z grodzic stalowych, reprezentowała typowe przed Katrینą rozwiązanie w Nowym Orleanie – jak widzimy, rozwiązanie daleko niewystarczające. Kilka mechanizmów awarii grobli z taką

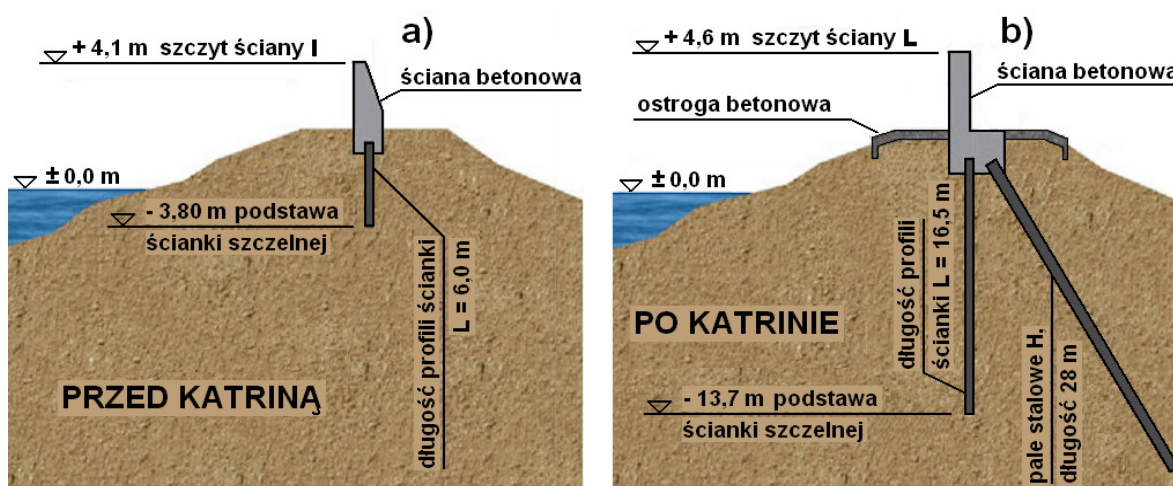
¹ Obliczono, że w 2005 r. stan Luizjana tracił na skutek tej erozji co 38 minut obszar wielkości boiska piłkarskiego [2]. Pogłębianie delty zmniejszyło też amortyzację uderzenia fali powodziowej.

ścianą pokazano schematycznie po prawej stronie rysunku. Na obu zdjęciach z łatwością można rozpoznać te mechanizmy.

Z inżynierskiego punktu widzenia Katrina – poza ogromem zniszczeń – przyniosła więc także coś konstruktywnego: obnażyła ludzkie błędy. Pokazała, jak nie należy konstruować 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.

2. Nauczki z Katriny

Okazuje się, że nie tylko Polak jest „mądry po szkodzie”; także Amerykanie przyswoili sobie tę cechę. Nowy, w większości zrealizowany już system zabezpieczeń składa się z grobli wyższych i znacznie mocniejszych niż groble, które zmyła Katrina. Wydaje się, że odpowiedzialny za ochronę miasta przed powodzią 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. 2.



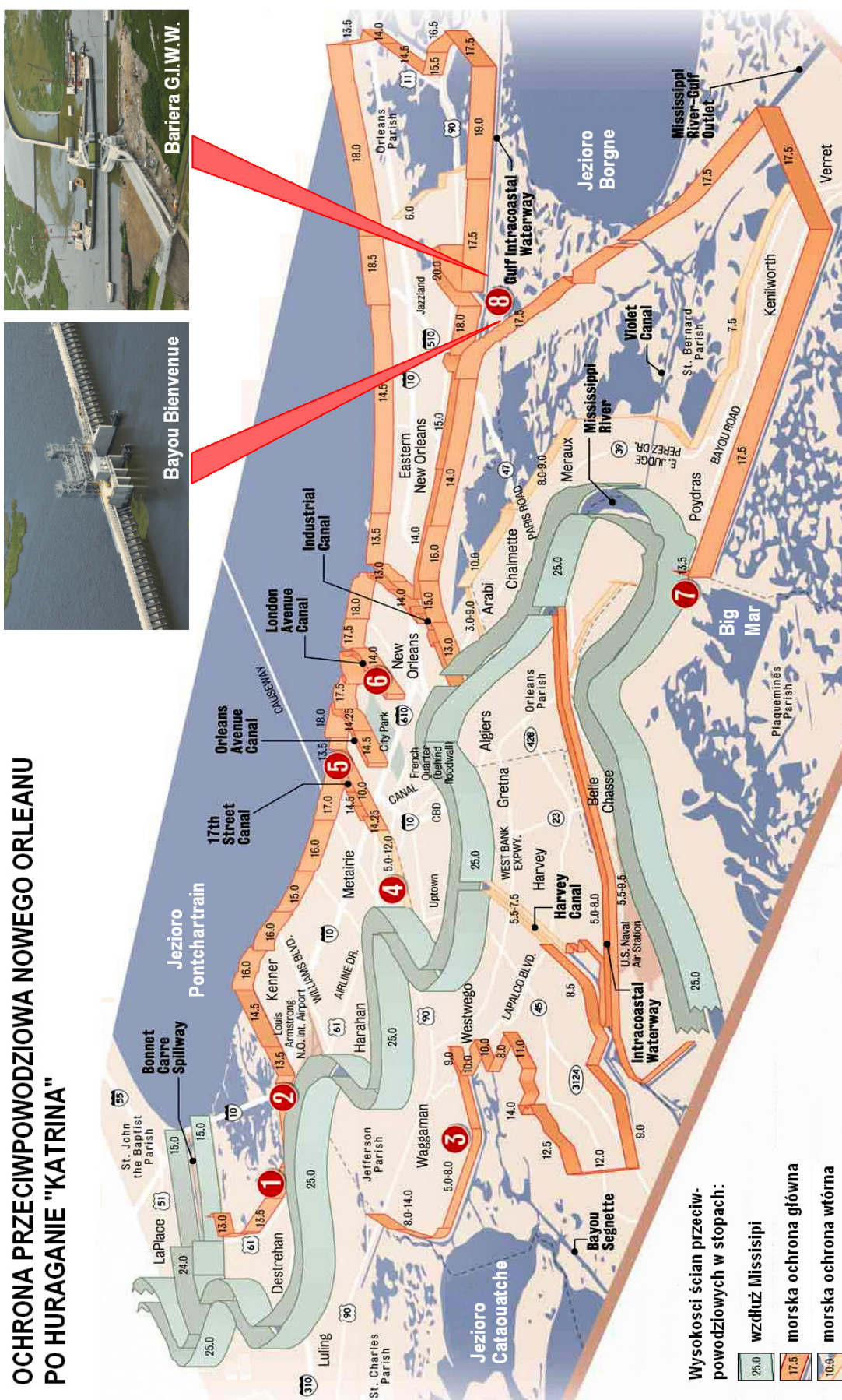
Rys. 2. Typowy przekrój grobli przeciwpowodziowej przed Katriną (a) i po niej (b)

USACE utrzymuje oficjalnie, że to nie groble były za słabe, lecz Katrina za silna. Jest to dość typowa w podobnych przypadkach linia obrony, pod którą kryją się kwestie finansowe, gdyż łatwo zauważyć, że rozwiązanie z rys. 2b jest znacznie droższe. Nie osądzając, kto tu zawinił, logicznym jest jednak wniosek, że rozwiązanie z rys. 2a okazało się błędne. Trzy główne błędy popełnione przy budowie pierwotnych grobli, to:

- ścianka z grodzic za krótka;
- ścianka z grodzic niestężona;
- korona grobli niezabezpieczona przed rozmyciem.

Uniknięcie tych błędów nie uchroniłoby wprawdzie miasta przed lokalnymi przelewami fali powodziowej nad ścianami grobli, ale objętości tych przelewów i wyrządzone przez nie szkody byłyby znacznie mniejsze i łatwiejsze do usunięcia. W przypadku braku akceptacji dla takich przelewów, można wyróżnić czwarty błąd:

- ściana betonowa za niska.



Rys. 3. Ogólny schemat grobli przeciwpowodziowych Nowego Orleanu po Katinie

Trasy grobli z podziałem na główne sekcje ochrony miasta (cyfry 1–8 w kółeczkach) przedstawiono na rys. 3. Dwa zdjęcia w prawym górnym rogu rysunku wskazują miejsca ruchomych zapór morskich omawianych w dalszej części referatu. Groble obydwu brzegów Missisipi pomijamy w niniejszych rozważaniach, choć także one są lokalnie przedmiotem troski. Wypada pamiętać, że ostatnia przed Katrینą wielka powódź miasta miała miejsce w 1927 r. i przyniosło ją nie morze lecz właśnie Missisipi.

Jest rzeczą zrozumiałą, że w sytuacji wielkomiejskiej nie wystarczały projekty samych przekrojów grobli. Należało m.in. zaprojektować dodatkowo połączenia grobli chronionych sektorów, ich skrzyżowania z drogami publicznymi, istniejącymi kanałami, drogi awaryjne, przejścia dla pieszych, linii tramwajowych, przewodów kanalizacyjnych itp. Miasto pragnie bowiem funkcjonować jako społeczność otwarta na świat i swobodnie komunikująca się między sobą – przy możliwie jak najmniejszych przeszkodach ze strony obiektów ochrony przeciwpowodziowej. Rozwiązań w tym zakresie jest dużo i nie sposób omówić ich w tym referacie. Kilka zdjęć ich przykładów przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przejścia dróg komunikacyjnych przez groble przeciwpowodziowe (zdjęcia autora)

Zwróćmy uwagę, że w rejonach o niewielkiej dostępnej powierzchni – np. przy gęstej zabudowie lub w pobliżu obiektów infrastruktury – groble ziemne ustępują miejsca ścianom betonowym. W przypadku zagrożenia powodziowego przejścia w tych ścianach dla dróg kołowych lub linii kolejowych zamyka się wrotami, przeważnie o konstrukcji stalowej. Przy przejściach dróg samochodowych, w poprzek których stosunkowo łatwo jest wykonać tor jezdny wrót, najczęściej stosuje się wrota przesuwne. Przy przejściach linii kolejowych przeważają wrota obrotowe. Oczywiście w obu przypadkach wrota umieszcza się z zasady po stronie spodziewanego nadejścia fali powodziowej, tak by parcie wodne „docisnęło” je do krawędzi betonowych ścian piętrzących zmniejszając przez to przecieki. Konstrukcyjnie jest to również rozwiązanie poprawniejsze, gdyż nie wymaga kotwienia wrót do tych krawędzi.

Choć wrota często zaopatrzają się w uszczelki, kwestia szczelności nie jest tak istotna jak np. w przypadku wrót śluz żeglugowych czy doków stoczniowych. Teren chroniony pozwala bowiem zwykle na wtargnięcie stosunkowo niewielkich objętości wód z przecieków. Mniej wymagań stawia się tu także pod adresem czasu zamknięcia wrót i ewentualnych urządzeń napędowych. Dzięki obrazom satelitarnym i współczesnym metodom prognozowania fali powodziowej decyzję o zamknięciu wrót w groblach podejmuje się odpowiednio wcześniej, co pozwala na powolne, nierzadko ręczne ich ustawienie w pozycji zamkniętej. Czynności te oraz ich koordynacja z innymi przygotowaniami są oczywiście przedmiotem regularnych ćwiczeń powołanych do tego służb.

3. Bariera Kanału Portu Wewnętrznego (IHNC)

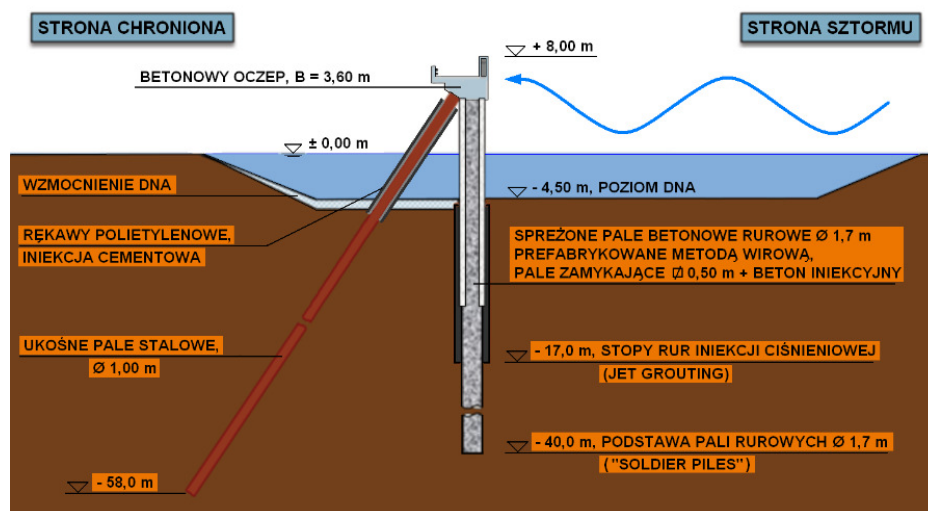
Obok technicznych danych o wytrzymałości i mechanizmach awarii istniejących grobli Katrina dostarczyła szeregu innych informacji. Do najistotniejszych z nich należał scenariusz samej fali powodziowej: jej wysokości oraz kierunku w różnych miejscach i przedziałach czasu, lokalne spiętrzenia poziomu wody a także wzajemne relacje między obecnością i zachowaniem się obiektów ochrony a zatapianiem coraz to nowych rejonów miasta. Przy złożonych systemach ochrony dużych miast są to wbrew pozorom rzeczy trudne do symulacji numerycznych a nawet fizycznego modelowania. Oczywiście następny huragan tzw. 3. kategorii² nie musi mieć dokładnie takich samych kierunków wiatru i innych parametrów. Jednakże scenariusz, jaki „napisała” Katrina, był przebogatym źródłem danych do projektowania nowych, bardziej niezawodnych konstrukcji przeciwpowodziowych.

Dzięki obecnej technice przebieg fali powodziowej oraz mechanizmy i współzależności kolejnych faz powodzi zostały udokumentowane lepiej niż gdziekolwiek i kiedykolwiek dotąd na świecie. W najogólniejszym skrócie postępy tej fali można dziś nawet prześledzić w internecie, np. w animacji [4] wykonanej przez redakcję *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 klinem między Wschodni Nowy Orlean a tereny mokradeł i portu wewnętrznego na południu. Przy naporze fal sztormowych nieznajdujące ujścia masy wód prowadzą do ich spiętrzenia na wierzchołku i groblach bocznych klina. Czytelnika bliżej zainteresowanego tą sytuacją autor zachęca do przyjrzenia się jej na zdjęciach satelitarnych dostępnych w Google Earth.

Na zdjęciach tych widać też nowy element ochrony przeciwpowodziowej, barierę Kanału Żeglugowego Portu Wewnętrznego (Inner Harbor Navigation Canal, IHNC). Wzniesiona wzdłuż kanału bariera łączy jak gdyby dwie ściany klina redukując przez to spiętrzenia wód sztormowych. Wraz z przebudową grobli stanowi ona dziś najważniejsze usprawnienie systemu ochrony przeciwpowodziowej Nowego Orleanu. Główne elementy jej konstrukcji pokazano w przekroju poprzecznym na rys. 5.

Jak widzimy, i tu wybudowano już ścianę o silnej, głęboko posadowionej i odpowiednio stężonej konstrukcji, zwieńczoną szerokim betonowym oczepem umożliwiającym nawet ruch pojazdów służb utrzymania. Statycznie konstrukcja ta przypomina ściany grobli z rys. 2b, ale wszystkie jej elementy są bez porównania większe i mocniejsze. Wynika to nie tylko z najwyższego poziomu obciążeń hydraulicznych (efekt klina), ale i z głębokości kanału oraz możliwości kolizji ze strony statków i innych obiektów pływających.

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



Rys. 5. Przekrój bariery przeciwpowodziowej wzdłuż kanału IHNC

Zważywszy, że długość bariery wynosi około 3,0 km a jej budowę należało prowadzić szybko i w stosunkowo trudnych warunkach (offshore, sąsiedztwo żeglugi), zastosowane metody budowy cechują się dużym stopniem prefabrykacji. Ścianę piętrzącą wykonano ze sprężonych pali betonowych o przekroju rurowym, prefabrykowanych nowoczesną tzw. „wirową” (*spun-cast*) metodą. W metodzie tej zagęszczanie betonu następuje przez działanie siły odśrodkowej. Pale prefabrykowano w odcinkach 4,9 metrowych (16 ft), po czym 9 takich odcinków łączono i sprężano do całkowitej długości równej 44 m (144 ft). W tych długościach pale transportowano następnie barkami po 18 do 21 sztuk na teren budowy. Zarówno transport pali jak i operacje ich pozycjonowania oraz zagłębiania leżały na granicach możliwości dostępnego sprzętu, choć ich nie przekraczały. Pozwoliło to na pewne oszczędności w kosztach budowy. Zagłębianie prowadzono metodą udarową bez wybierania gruntu z rur. Mamy tu więc istotnie do czynienia z palami a nie studniami fundamentowymi, chociaż średnica 1,7 m przywodzi już na myśl te drugie.

Pale ustawiano przy użyciu dźwigów na pontonach i specjalnych szablonoń, po czym wbijano z zastosowaniem ciężkich palownic. Szczeliny między palami zamykano z obydwu stron lżejszymi i krótszymi już palami betonowymi o przekroju kwadratowym, w połączeniu z iniekcją ciśnieniową (*jet grouting*). Zastosowane tu technologie nie różniły się już wiele od niektórych polskich realizacji [5]. Tak wykonaną ścianę piętrzącą stężano potem ukośnymi stalowymi palami rurowymi, na które po wbiciu nasuwano dodatkowo „rękawy” z rur polietylenowych. Elementem zwieńczającym ścianę i pale ukośne jest masywny oczep betonowy dostarczany na miejsce budowy również w prefabrykowanych sekcjach, po czym montowany i odpowiednio kotwiony. Złącza oczepu betonowano na mokro przy lokalnym już tylko użyciu specjalnie wykonanych stalowych kompletów deskowań.

Wrażenia o rozmiarach samej bariery Kanału Portu Wewnętrznego (IHNC) oraz o jej technologii wykonania dostarczają migawki z terenu budowy pokazane w kolażu na rys. 6. Zwróćmy uwagę na potężny pomost roboczy z torem jezdny dla dźwigów i palownic, jaki musiano wykonać dla przeprowadzenia opisanych robót. Oczywiście – podobnie jak całość sprzętu – pomost ten też był konstrukcją wielokrotnego użytku, rozbieraną i przemieszczaną wraz z przesuwaniem się frontu robót. Zdjęcia do kolażu z rys. 6 pochodzą od kolegów z USACE – zleceniodawcy prac projektowych z udziałem doradztwa autora. Konstrukcja i technologia budowy samej bariery IHNC nie była jednak bezpośrednim przedmiotem tego doradztwa. Koncentrowało się ono na wchodzących w skład bariery dwóch ruchomych zapórach morskich, o których mowa w dalszej części referatu.



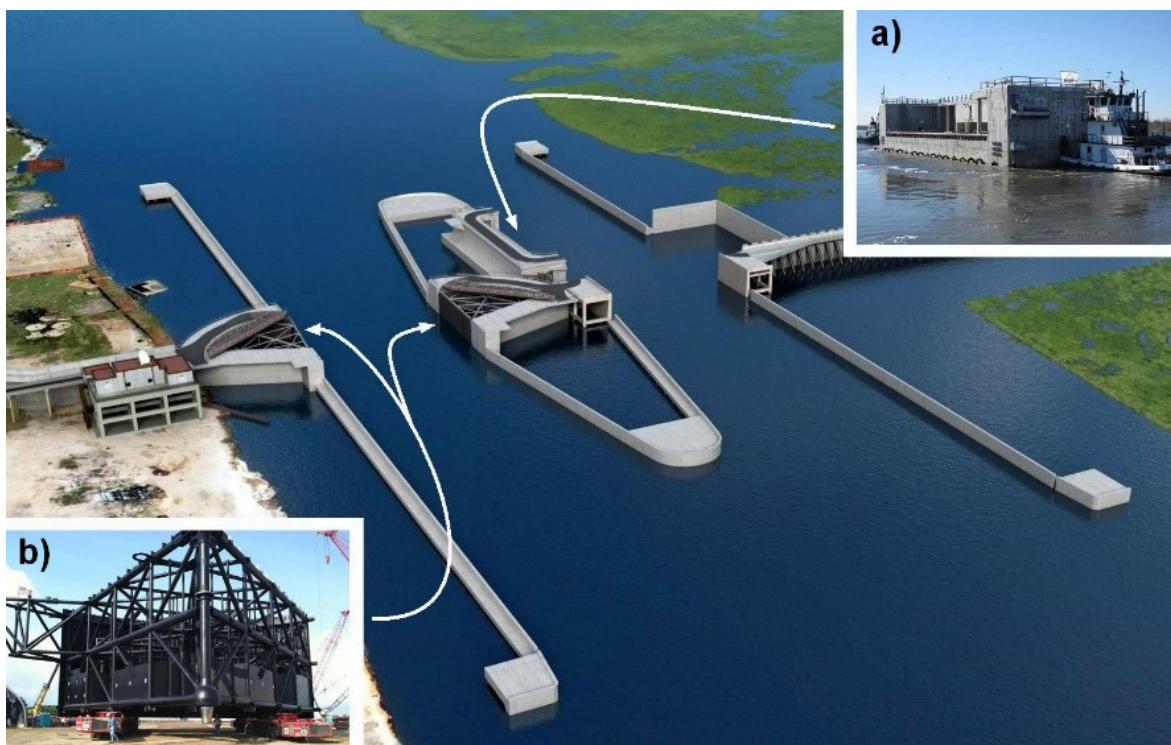
Rys. 6. Zdjęcia z budowy bariery wzdłuż kanału IHNC (z uprzejmości USACE): a) montaż pomostu i transport pali ściany piętrzącej, b) wbijanie betonowych pali rurowych ściany piętrzącej, c) wypełnianie pali ściany i wbijanie ukośnych zastrzałów stalowych, d) nakładanie polietylenowych „rękawów” na stalowe zastrzały, e) montaż prefabrykatów oczepu bariery z jezdnią

4. Ruchome zapory Zatokowego Toru Wodnego (GIWW)

Wariant stałej, ciągłej bariery morskiej wzdłuż Kanału Portu Wewnętrznego nie wchodził w rachubę, gdyż oznaczałby odcięcie dojścia do Portu Wewnętrznego – szóstego na liście portów Stanów Zjednoczonych – od morza przez tzw. *Gulf Intracoastal Waterway* (GIWW), czyli Zatokowy Tor Wodny. Ucierpiałaby na tym też drobna żegluga rekreacyjna i rybicka korzystająca z wyjścia na morze odnogą Bayou Bienvenue, biegnącą w poprzek Kanału Portu Wewnętrznego. Dla obu dróg wodnych należało więc przewidzieć przejścia w postaci ruchomych zapór morskich, zamykanych jedynie na czas zagrożenia powodziowego.

Dodatkowym problemem była konieczność prowadzenia robót w taki sposób, by obydwa wymienione dojścia do Portu Wewnętrznego były dostępne dla żeglugi również 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 tej budowy żegluga była więc kierowana przez przejście boczne, z którego zresztą będzie mogła w przyszłości korzystać także podczas remontów wrot przejścia głównego. Plan sytuacyjny obydwu przejść pokazano w widoku perspektywnym na rys. 7.



Rys. 7. Ogólna sytuacja ruchomych zapór GIWW w barierze IHNC (zdjęcia USACE): a) transport betonowych wrot pływających (*barge gate*) na miejsce budowy, b) skrzydło wrot sektorowych (*sector gate*) zapory głównej przed transportem

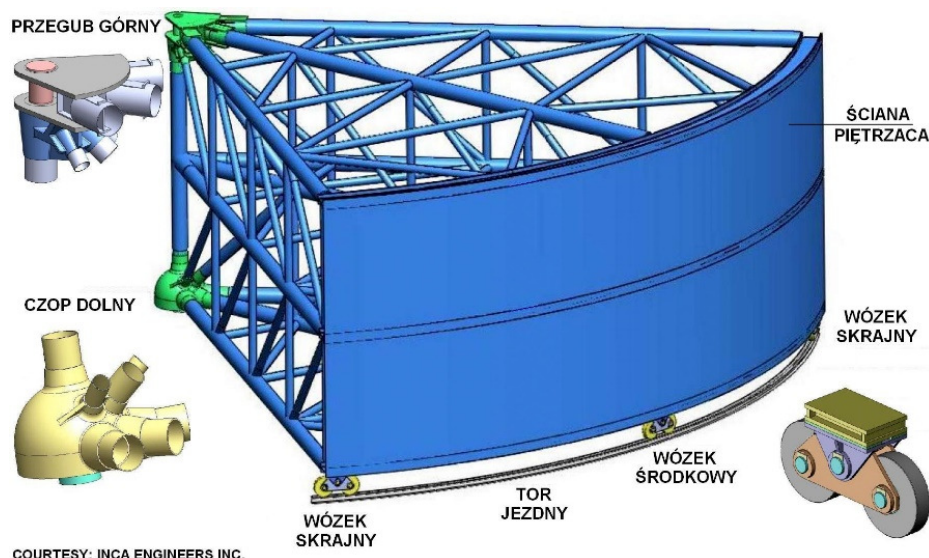
Główna zapora ruchoma GIWW posiada wrota typu sektorowego. Najważniejsze jej geometryczne i techniczne dane podano w tab. 1 oraz na rys. 8 [6]. Dane te pochodzą z niepublikowanych rozwiązań projektowych będących przedmiotem opiniodawstwa autora.

Tabela 1. Najważniejsze wymiary i dane techniczne zapory głównej GIWW w barierze IHNC

Dane geometryczne			Dane techniczne	
Szerokość fundamentu do kanału	48,77 m	Beton zbrojony łącznie	ok. 5200 m ³	
Długość fundamentu ⊥ do kanału	115,82 m	Ilość 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	ok. 1250 ton	
Szerokość wrot w osiach obrotu	48,16 m	... w tym łożyska, wózki i tor	ok. 80 ton	
Głębokość komór = wysokość wrot	12,80 m	Stal profili rurowych	API 5L gr X52	
Promień ściany piętrzącej wrot	25,73 m	Stal kształtowników i blach	A992/572 gr 50	
Kąt obrotu skrzydła wrot	70,0°	Obciążenie użytkowe pomostu	pojazd 100 kN	
Przybliżony łączny koszt budowy zapory (bez narzutów): \$ 200.000.000,-				

³ Są to jednoskrzydłowe wrota betonowe, nieomawiane w referacie ze względów objętościowych.

Budowę rozpoczęto od wbijania sprzętem pływającym pali pod fundament zapory. Obrys przyszłego fundamentu wygrodzono następnie ściankami z grodzic, wypompowano wodę i wybetonowano płytę denną, ściany komór wrót, ich próg, przeguby i inne elementy. Same sektorowe wrota dostarczono i zainstalowano dźwigami pływającymi dopiero po ponownym wprowadzeniu wody. Są to wrota ze zbiornikami powietrznymi, a więc częściowo pławne. Ich „konkurentem” były przez długi czas częściej stosowane w USA wrota ze ścianą piętrzącą na wózkach (rys. 9). Napęd obu skrzydeł wrót stanowią siłowniki hydrauliczne zaczepione do pasa górnego w odległości około $\frac{1}{4}$ promienia ściany piętrzącej od osi obrotu.



Rys. 9. Wrota sektorowe ze ścianą piętrzącą na wózkach (z uprzejmości INCA Engineers Inc.)

5. Ruchoma zapora Toru Wodnego Bayou Bienvenue

Przejsięcie dla toru wodnego Bayou Bienvenue stanowiło dla projektantów połączonych biur INCA Engineers i Gerwick Inc. stosunkowo łatwiejsze wyzwanie niż ruchoma zapora GIWW, ponieważ wymagana szerokość skrajni żeglugi była tu mniejsza i wynosiła 17 m. Nie istniała także konieczność budowy dodatkowego, awaryjnego przejścia. Żegluga rekreacyjna, główny użytkownik Bayou Bienvenue, miała pod tym względem niższe wymagania.

I ten projekt posiadał jednak swoją specyfikę oraz ciekawe, innowacyjne rozwiązania. W odróżnieniu od zapory GIWW zapora Bayou Bienvenue musiała np. także w pozycji otwartej zapewnić możliwość przejazdu samochodów służb obsługi i utrzymania. Rozwiązano to budując na tych samych przyczółkach tuż za wrotami zapory dodatkowy obiekt – ruchomy most. Jest to most pionowo podnoszony, zawieszony między dwoma wieżami wyciągowymi na odpowiednio zsynchronizowanych podnośnikach śrubowych umieszczonych w narożach przęsła. Wysokość podnoszenia wynosi 4,0 m i jest duża dla tego typu podnośników.

Jako rodzaj wrót zapory wybrano stalową zasuwę pionową w prowadnicach przyczółków oraz również stalowych wież wyciągowych. Mechanizm podnoszenia jest tu typu linowego bez przeciwwagi, ale za to z układem krążków znacznie redukującym siłę napędu. Zasuwę nie imponuje wprawdzie rozpiętością, ma jednak znaczną jak na ten rodzaj wrót wysokość. Wrażenie o konstrukcji i proporcjach obiektu daje rys. 10. Duża wysokość zasuw wynika stąd, że jest ona typu 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 100-letniego”, czyli sztormu o rocznym prawdopodobieństwie wystąpienia równym $1 \cdot 10^{-2}$.



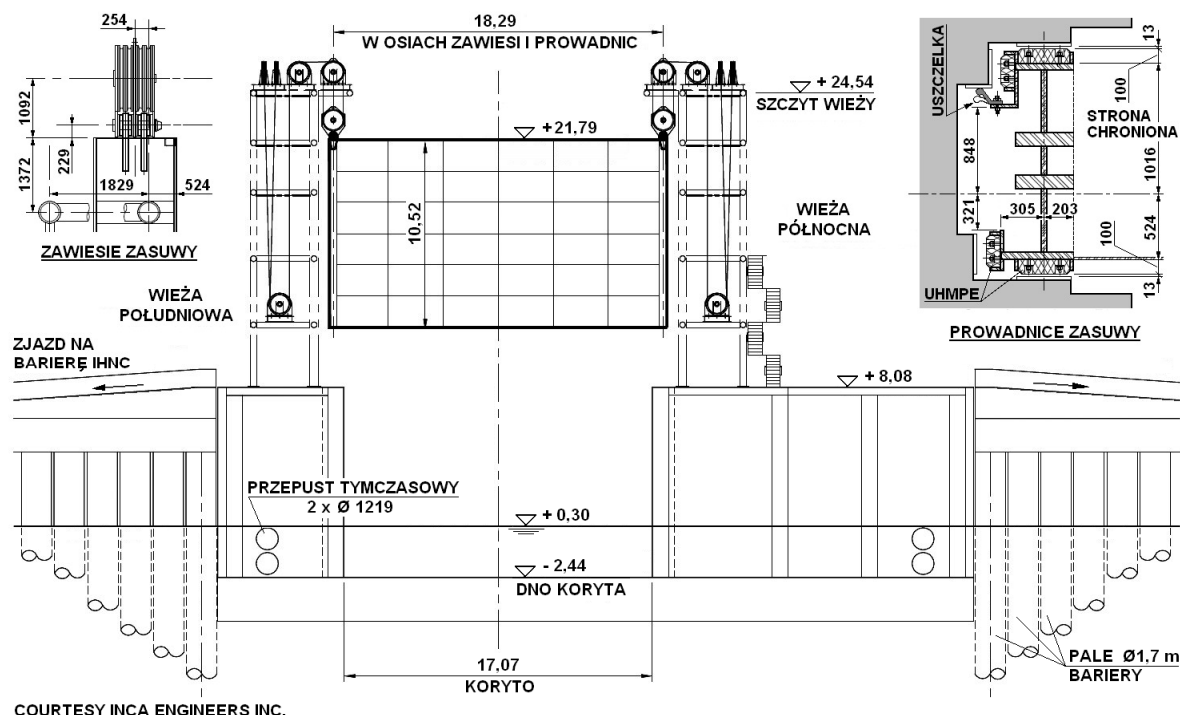
Rys. 10. Ruchoma zapora Bayou Bienvenue (zdjęcie USACE)

Autor pragnie zaznaczyć, że podejście to różni się dość istotnie od praktyki holenderskiej. Według tej praktyki fale sztormowe o częstotliwości występowania $1 \cdot 10^{-2}$ na rok nie powinny również prowadzić do przelewów, jednak miarodajne obciążenia projektowe dostarcza dopiero fala sztormowa o częstotliwości $1 \cdot 10^{-4}$, czyli raz na 10.000 lat [7]. Przy takich obciążeniach dopuszcza się zwykle niewielkie przelewy, gdyż chroniony ląd jest w stanie je przyjąć, jednak nie dopuszcza się przerwania barier. Przykładem takiego podejścia są – zaprojektowane przez autora – zasuw pionowe bariery na Kanale Hartel do portu w Rotterdamie [8, 9]. Zasuw te są typu przelewowego. Przez to są one nieco niższe, chociaż ich rozpiętości (98,0 i 49,3 m) wielokrotnie przekraczają rozpiętość zasuw Bayou Bienvenue. Oczywiście przelewowość zasuw wymaga rozwiązania szeregu problemów, jak np. drgania konstrukcji.

Tabela 2. Najważniejsze wymiary i dane techniczne zapory Bayou Bienvenue w barierze IHNC

Dane geometryczne			Dane techniczne	
Szerokość fundamentu do kanału	22,56 m	Beton zbrojony łącznie	ok. 3500 m³	
Długość fundamentu ⊥ do kanału	40,08 m	Ilość pali fundamentowych	191 sztuk	
Obwód w ściankach z grodzic	130 m	Przekrój pali fundamentowych	61×61 cm	
Szerokość skrajni żeglugi	17,07 m	Konstrukcje stalowe łącznie	ok. 250 ton	
Wysokość skrajni żeglugi	10,67 m	... w tym sama zasuw	ok. 75 ton	
Rozpiętość zasuw w prowadnicach	18,29 m	Stal profili 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,-				

Główne wymiary i inne dane zapory Bayou Bienvenue podano w tab. 2 oraz na rys. 11. Podobnie jak w przypadku zapory GIWW dane te pochodzą ze studiów projektowych [10] będących przedmiotem opiniodawstwa autora. Dane konstrukcji już zrealizowanych mogą wykazywać drobne różnice, które dla obecnych rozważań nie mają jednak znaczenia.



Rys. 11. Ruchoma zapora Bayou Bienvenue, widok boczny (z uprzejmości INCA Engineers i Gerwick Inc.)

W obydwu zaporach, GIWW i Bayou Bienvenue, zwraca uwagę szerokie zastosowanie profili rurowych w konstrukcji wrót. Można to wytłumaczyć względami natury obiektywnej – gdyż profile rurowe mają istotnie szereg zalet w porównaniu z przekrojami otwartymi – ale ma to także subiektywne podłoże. Rejon Zatoki Meksykańskiej jest bowiem, jak wspomniano, zdominowany przez przemysł petrochemiczny, na usługi którego pracuje większość lokalnych biur projektowych. Ponieważ w petrochemicznym budownictwie morskim przekroje rurowe są najszerzej stosowane, więc 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 dla zasów pionowych – może być także duża wyporność konstrukcji rurowych. Projektant pragnie bowiem, by takie i podobne zasuwki zamykały się w każdych warunkach pod własnym ciężarem.

6. Uwagi końcowe

Bariera wzdłuż Kanału Portu Wewnętrzznego IHNC (zwana także *Lake Borgne Barrier*) z ruchomymi zaporami morskimi GIWW i Bayou Bienvenue kosztowała 1,1 miliarda USD. Jest ona na pewno najważniejszym ale nie jedynym nowozrealizowanym obiektem ochrony przeciwpowodziowej Nowego Orleanu. W referacie pominięto szereg innych projektów, przy realizacji których udział autora był znikomy lub żaden. Do najciekawszych z nich należą:

- wspomniane wzmocnienia i podwyższania grobli do wysokości jak na rys. 3;
- ruchome zapory *Seabrook Floodgates* na *Industrial Canal*;
- ruchome zapory i przepompownie na *West Closure* i *Outfall Canals*.

Na cały realizowany przez USACE program zmniejszenia ryzyka powodzi regionu Kongres USA przyznał sumę 14,4 miliardów USD [11]. Kolegom zainteresowanym wyżej wspomnianymi innymi projektami tego programu autor poleca wyszukiarki internetowe.

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 rzędu Katriny jest znacznie mniejsze niż w Nowym Orleanie lub w Holandii. Nie powinno to jednak nas zwalniać od czujności w tej sprawie. Chociaż bowiem w najbliższej przyszłości trudno spodziewać się w naszym kraju 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 zmian klimatycznych poziom morza, przewidywany wzrost liczby i siły sztormów itp.

Literatura

1. The Data Center: Total population by parish for the New Orleans metro, March 28, 2014, <http://www.datacenterresearch.org/data-resources/population-by-parish/>
2. Brinkley D. The Great Deluge: Hurricane Katrina, New Orleans and the Mississippi Gulf Coast, Harper Perennial, New York-London-Toronto-Sydney, 2006.
2. 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.
4. Svenson D., Marshall B. Interactive graphic sheets "Flash Flood", The Times-Picayune, <http://www.nola.com/katrina/graphics/flashflood.swf>
5. Topolnicki M. Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą iniekcji geotechnicznych, Konferencja Awarie Budowlane, Szczecin-Miedzyzdroje 2011.
6. Tondravi H. et al. IHNC Hurricane Protection Project – GIWW Buoyant Gate Study, J.V. INCA-Gerwick, New Orleans, May 5, 2009 (pozycja niepublikowana).
7. TAW Committee: Fundamentals on Water Defences, Directorate-General for Public Works and Water Management (Rijkswaterstaat), Delft, 1998.
8. Daniel R.A., Leendertz J.S: Geïntegreerd ontwerp van de hefschuiven Hartelkering, Civ. Techniek 1994(4), dostępne na <https://independent.academia.edu/RyszardDANIEL>
9. Daniel R.A. Hartelkering – Schuiven met mogelijkheden, Bouwen met Staal, mei/juni 1996, dostępne na <https://independent.academia.edu/RyszardDANIEL>
10. Lapene D.J. IHNC Hurricane Protection Project – Bayou Bienvenue Vertical Lift Gate Study, J.V. INCA-Gerwick, New Orleans, April 9, 2009 (pozycja niepublikowana).
11. Miller D. et al. Hurricane Katrina and the Inner Harbour Navigation Canal Lake Borgne Surge Barrier, proceedings of the 33rd PIANC World Congress, San Francisco 2014.

DAMAGE AND RECONSTRUCTION OF THE NEW ORLEANS' FLOOD DEFENCES IN THE AFTERMATH OF URRICANE KATRINA

Abstract: This year, it is the 10th anniversary of the disastrous landfall of hurricane Katrina in New Orleans. The author of this paper contributed as consultant and reviewer to the design of structures – particularly movable flood barriers – that should reduce the risk of a similar disaster in the future. The paper briefly presents the failures of New Orleans' levees; lessons learned from those failures; and – in more details – outlines of the city's new flood defense system. Attention is focused on the principal components of that system, such as reinforced levees and the Inner Harbor Navigation Canal Barrier, with its two movable surge barriers that have been subjected to the author's consulting services and reviews. Discussed are the design choices of both the entire systems and the main technical details of those structures.

Keywords: hydraulic engineering, storm surge barriers, flooding, flood defense, hydraulic closures, levees, flood barriers, hydraulic gates, New Orleans, Katrina.