

## Wrota ku drugiemu stuleciu – rozbudowa śluz w Kanale Panamskim

Dr inż. Ryszard A. Daniel  
RADAR Structural, Holandia

W bieżącym roku mija setna rocznica uruchomienia żeglugi przez Kanał Panamski, dziś najważniejszą wybudowaną przez człowieka drogę morską na świecie. Za oficjalną datę otwarcia kanału uważa się 15 sierpnia 1914 roku. Budowa Kanału Panamskiego zajęła ponad 30 lat. Rozpoczęli ją, jak wiadomo, Francuzi w 1881 roku, którym opór przyrody i słabość ludzka nie pozwoliły jednak jej ukończyć. Udało się to dopiero po przejęciu przedsięwzięcia przez Amerykanów w 1904 roku i kolejnych 10 latach budowy.

Dla rządu i ludności Republiki Panamy, która od 1977 roku sprawuje kontrolę nad kanałem, obiekt ten jest gospodarczym motorem kraju i najważniejszym źródłem dochodu narodowego. Nic więc dziwnego, że troska o jego stan techniczny i zgodność z wymaganiami współczesnej żeglugi są sprawą nadrzędną w polityce kraju. Jest rzeczą oczywistą, że to, co dla żeglugi wystarczało 100 lat temu, dziś z trudem spełnia jej oczekiwania, nie wspominając już o przyszłości. Trwa więc obecnie, jak wiadomo, poszerzanie Kanału Panamskiego i budowa w nim nowej, tzw. Trzeciej Linii Śluz o korytach szerszych, dłuższych i głębszych od koryt śluz istniejących. Autor niniejszego artykułu był z ramienia rządu holenderskiego konsultantem i opiniodawcą rozwiązań technicznych tego projektu, a w szczególności wrót nowych śluz, ich urządzeń napędowych oraz elementów przyczółków śluz. Pozycję tę należy przypisać dużemu doświadcze-

niu holenderskiego środowiska naukowo-technicznego w podejmowaniu podobnej skali projektów budownictwa wodnego.

W artykule będą na wstępie przedstawione zarysy projektu nowych śluz, motywy wyboru ich głównych parametrów żeglugowych oraz przyjęta strategia realizacji projektu. Zagadnienia te nie wchodziły wprawdzie w zakres bezpośredniego doradztwa autora, ale skala i intensywność tego doradztwa wymagały szczegółowego zapoznania się także z nimi. Dla niezwiązanych z projektem czytelników będzie to krótkim wprowadzeniem w jego tematykę. Następnie – już dokładniej – będą omówione szczegóły konstrukcyjne nowo budowanych śluz, w tym systemy i komponenty będące przedmiotem doradztwa autora. Tekst zakończy kilka refleksji o znaczeniu wiedzy o tym i podobnych „mega-projektach” dla kraju o – jak Polska – skromniejszych ambicjach w budownictwie wodnym.

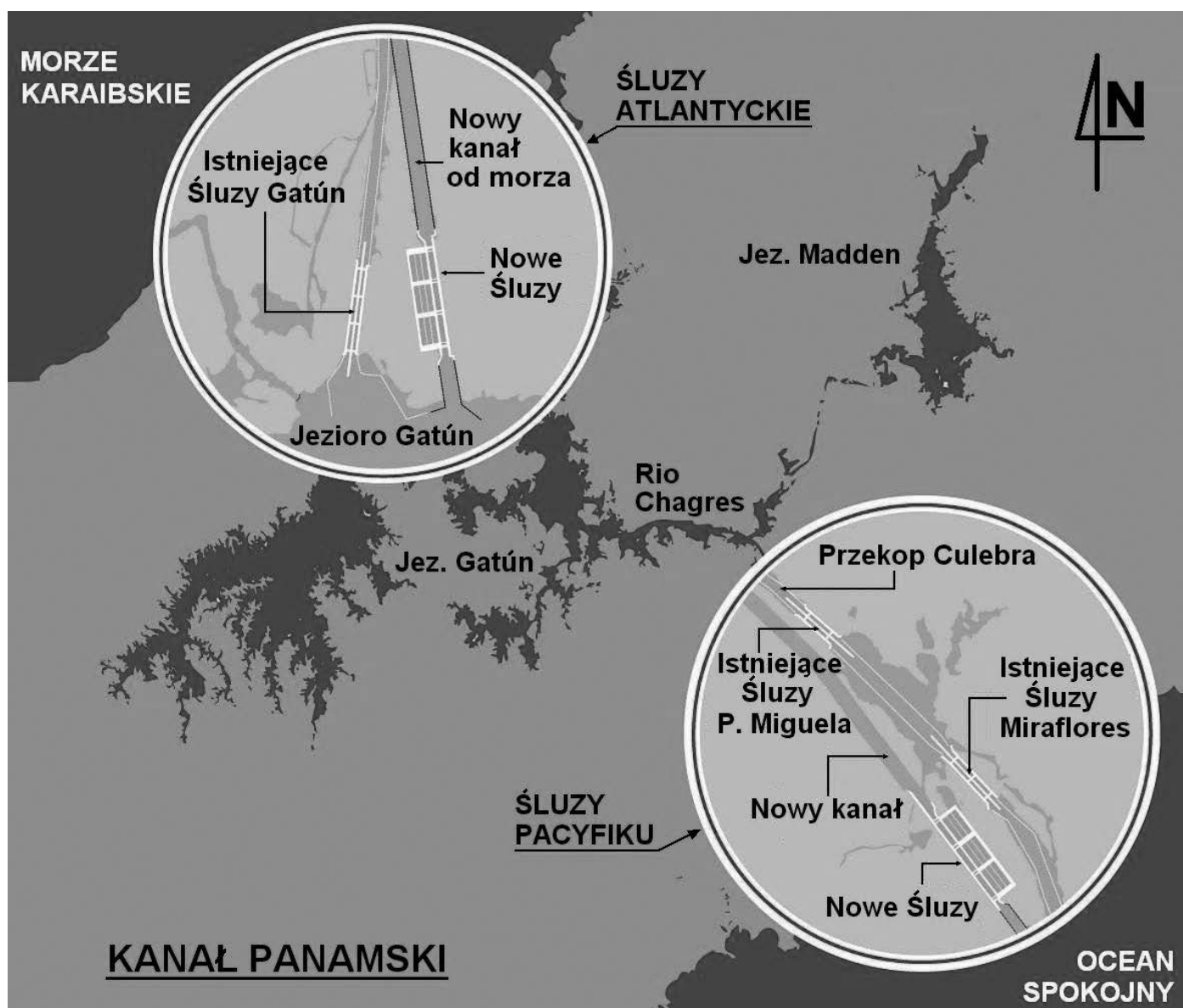
### OGÓLNE ZAŁOŻENIA PROJEKTU

Historia budowy Kanału Panamskiego, postaci związanych z tą budową ludzi i ich zmagania, to jedna z najbardziej przemawiających do wyobraźni epopei budownictwa wodnego. Na ten temat napisano wiele, a wiedza ta jest dziś ogólnie i szybko dostępna dzięki internetowym wyszukiwarkom. Nie ma zatem

potrzeby wracać tu do niej. Nie oznacza to jednak, że czytelnik „Inżynierii Morskiej i Geotechniki” może się bez niej obejść. Choć bowiem w inżynierii prawie każde przedsięwzięcie zasługuje na zaangażowanie, a nawet poświęcenie, to właśnie przedsięwzięcia ekstremalne – jak budowa Kanału Panamskiego – tworzą nowe horyzonty. Z bogatej literatury na temat tej budowy bardzo dobrą jest na przykład książka Davida McCullogh’a [19], ale wiele można dowiedzieć się już z Wikipedii lub tzw. „surfingu” w internecie.

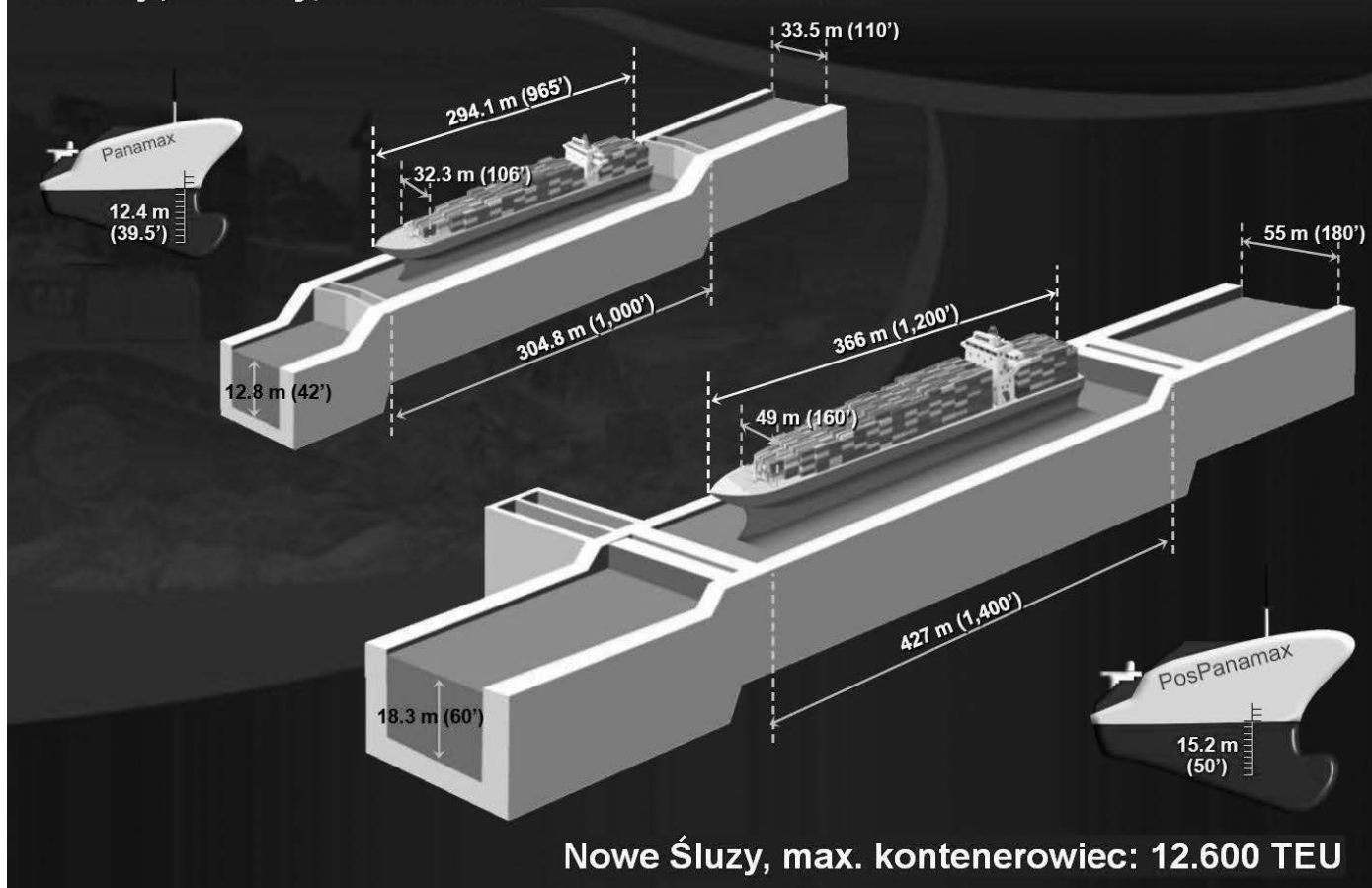
To samo można powiedzieć o prowadzonej rozbudowie Kanału i o przemawiających za tą rozbudową argumentach. Kierująca rozbudową instytucja, Panama Canal Authority (skrót z hiszpańskiego: ACP) zρέcznie nadaje sprawie rozgłos w środ-  
kach przekazu – od popularnych, jak „National Geographic”, do specjalistycznych, jak prasa naukowo-techniczna, konferencje międzynarodowe itp. Rozgłos ten jest zresztą nietrudny do osiągnięcia, gdyż sam Kanał jest obiektem powszechnego zainteresowania. Któż więc nie chciałby być z nim kojarzony?

Ograniczmy się zatem tutaj do jedynie szkicowego przedstawienia założeń projektu. Dane o pogłębieniu, poszerzeniu i innych modernizacjach tego 77-kilometrowego toru wodnego czytelnik znajdzie w internecie. Technicznie najbardziej złożonym i spektakularnym przedsięwzięciem jest budowa nowych śluz przy obu wejściach do Kanału. Ich lokalizację i ogólny zarys przedstawiono na rys. 1. Jak widać, śluzy te mają rozszerzyć moc przepustową istniejących starych śluz, nie zaś je zastąpić. Rozszerzenie to dotyczy nie tylko liczby statków lecz także ich tonażu i rozmiarów. Wynika to głównie ze znacznego powiększenia szerokości, głębokości i długości komór śluz w porównaniu ze śluzami istniejącymi, co przedstawiono na rys. 2. W kategorii kontenerowców – najliczniej dziś korzystających z Kanału Panamskiego – nowe śluzy pozwalają na przejście jednostek z prawie 3-krotnie większą liczbą kontenerów na pokładzie. W budownictwie okrętowym już dziś funkcjonuje nowy standard maksymalnych wymiarów statków, tzw. Post-Panamax (lub z hiszpańskiego Pospanamax), przechodzących przez nowe śluzy. Zastąpi on wkrótce obecne Panamaxy.



Rys. 1. Kanał Panamski – lokalizacja nowobudowanych śluz

## Istniejące Śluzy, max. kontenerowiec: 4.400 TEU



## Nowe Śluzy, max. kontenerowiec: 12.600 TEU

Rys. 2. Główne wymiary śluz istniejących i nowobudowanych

Nowe śluzy, podobnie jak istniejące, będą śluzami 3-stopniowymi. Przeprowadzone studia [14] dowiodły, że opcja ta jest najbardziej ekonomiczna, tak pod względem kosztów budowy, jak i utrzymania. Wymagana głębokość koryta jednego stopnia wynosi wtedy około 32 m, podczas gdy przy śluzie dwustopniowej wyniosłaby ona prawie 38 m, a przy jednostopniowej ponad 50 m. Technicznie wszystkie te opcje można dziś wprawdzie uznać za osiągalne, ale wyniki analizy ryzyka przetłumaczone na koszty jego opanowania dały przewagę opcji pierwszej. Jedyńą różnicą, jaką pod tym względem wprowadza się w stosunku do śluz istniejących, jest to, że wspomniane 3 stopnie będą po obydwu stronach Kanału zrealizowane w jednym obiekcie, podczas gdy w starych śluzach wykonano to od strony Pacyfiku w dwóch obiektach: Śluzach Miraflores i Śluzach Pedro Miguela. Oznacza to, że kanał doprowadzający żeglugę do nowych śluz będzie miał poziom wody o około 9 m wyższy od przyległego istniejącego toru wodnego między obydwoma wspomnianymi obiektami. Warunki geologiczne i geotechniczne pozwalają, jak okazuje się, na tę sztukę i to pomimo tego, że teren jest sejsmicznie aktywny.

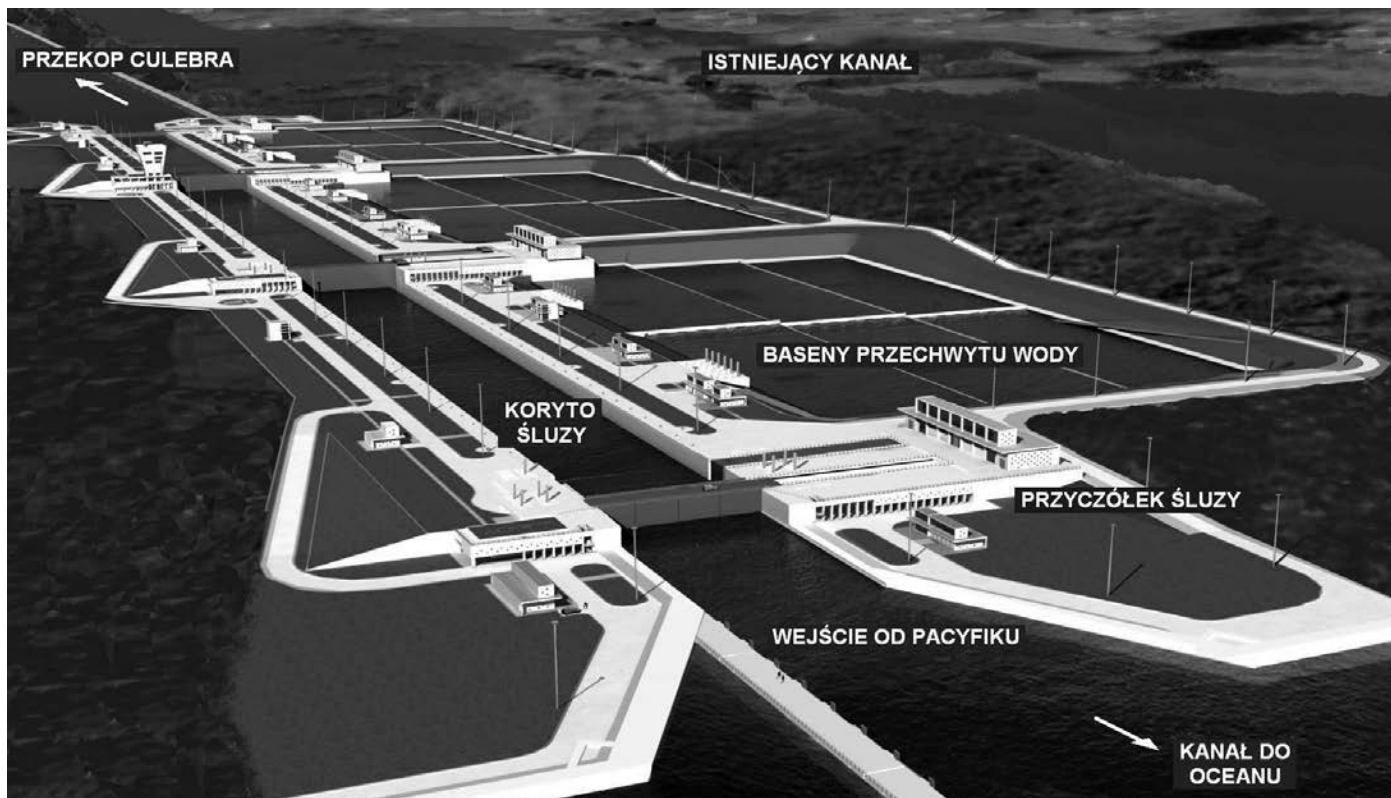
Jest rzeczą znamioną, że na lokalizację nowych śluz od strony Pacyfiku oraz prowadzącego do nich kanału wybrano to samo miejsce, w którym w końcu XIX wieku kopali kanał Francuzi. Amerykanie odbiegli później na tym odcinku od pierwotnych planów, wybierając łatwiejsze rozwiązanie z dzisiejszymi śluzami Pedro Miguela. Jak widać, prace Francuzów nie poszły

jednak i tu na marne, choć wrócono do nich dopiero po ponad stu latach. Ich kontynuacja nie była zresztą także i dziś sprawą prostą. Ogólna objętość robót ziemnych i pogłębiania wyniosła na tym odcinku około 49 mln m<sup>3</sup>, przy znacznym udziale twardych skał w tym bazaltu [20]. W celu porównania, łączną objętość mas ziemnych do usunięcia w ramach całego projektu poszerzania Kanału szacuje się na około 135 mln m<sup>3</sup> [25], co stanowi około połowę mas ziemnych usuniętych w czasie samej budowy Kanału.

### WYBRANY SYSTEM ŚLUZ

Jedną z najbardziej zasadniczych decyzji przy tego rodzaju projektach jest wybór systemu śluz. Pod pojęciem „systemu” należy rozumieć nie tylko same układy konstrukcyjne koryt, przyczółków, wrót, ich napędów itp., lecz także – a nawet w pierwszym rzędzie – realizowane przez te układy funkcje. Jest to zgodne z metodyką tzw. „inżynierii systemów”, która stanowi dziś normę w nowoczesnie prowadzonych projektach infrastruktury lądowej i wodnej. W projekcie poszerzania Kanału Panamskiego najważniejszymi decyzjami określającymi system śluz były:

- omówiony już wybór śluz w układzie 3-stopniowym,
- śluzowanie z zastosowaniem przechwyty wody,



Rys. 3. Ogólny układ nowych śluz, od strony Pacyfiku

- wybór podwójnych wrót przesuwnych w każdym przyczółku,
- bezpośrednie posadowienie i wykonawstwo „na mokro” elementów,
- naprowadzanie statków przy użyciu holowników.

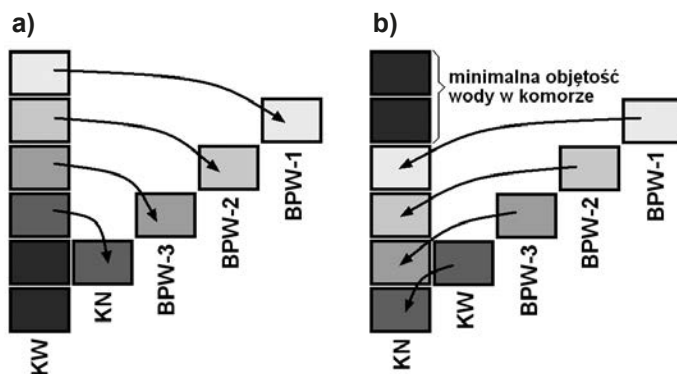
Każda z tych decyzji opiera się na gruntownych badaniach, studiach optymalizacyjnych oraz wielokryterialnych analizach [12]. Nie sposób przedstawić tu wszystkich wyników tych analiz. Poniżej omówiono w dużym skrócie główne argumenty przemawiające za podjętymi decyzjami. Ostateczny zarys przyjętych w wyniku tych decyzji systemów śluz przedstawiono na rys. 3. Obrazuje on wprawdzie sytuację od strony Oceanu Spokojnego, jednak po stronie Atlantyku sytuacja przedstawia się niemal identycznie.

### Baseny przechwyty wody

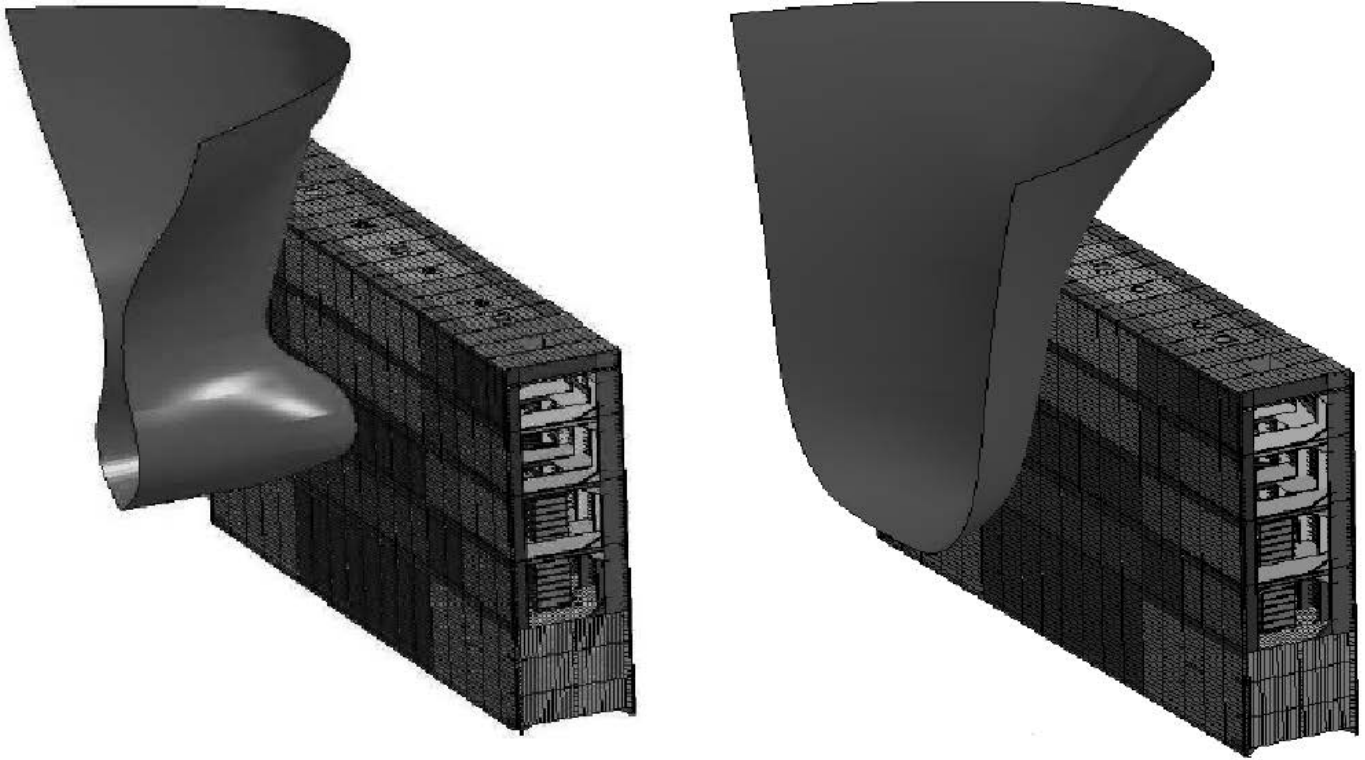
Jak wiadomo, proces śluzowania łączy się z przemieszczeniami mas wodnych z poziomu wyższego na niższy. Utrata wody w wyżej położonym akwenu ma w większości przypadków znaczenie marginalne, gdyż jej objętości są bardzo niewielkie w porównaniu z objętościami akwenów. Jednak przy stosunkowo intensywnym śluzowaniu i niewielkich objętościach akwenów (np. na szeregu holenderskich kanałów) utrata ta może stanowić problem i trzeba jej przeciwdziałać, na przykład za pomocą przepompowni. W przypadku Kanału Panamskiego wymiary nowych śluz oraz przewidywany wzrost intensywności żeglugi po ich otwarciu powodują – szczególnie w okresach suchych – zbyt duże ubytki wody w akwenach jeziora Gatún i rzeki Rio Chagres. Zastosowanie przepompowni nie wchodzi

w rachubę ze względu na dostępność jedynie wody morskiej. Rozwiązania problemu trzeba było szukać w minimalizującej te ubytki konstrukcji samych śluz.

Już sam wybór śluz 3-stopniowych ogranicza nieco utratę słodkiej wody w porównaniu na przykład ze śluzami 2-stopniowymi. Jednak zasadniczym ograniczeniem jest dopiero zastosowanie basenów przechwyty wody. Zasadę działania tych basenów pokazano schematycznie na rys. 4. W procesie śluzowania woda z komory o wyższym poziomie (KW) jest odprowadzana nie bezpośrednio do komory o niższym poziomie (KN), lecz do wyżej położonych basenów przechwyty wody, kolejno BPW-1, BPW-2 i BPW-3 (rys. 4a). Jedynie ostatnia warstwa – z wyłączeniem wody gwarantującej płynność statków w komorze – spływa bezpośrednio między komorami, niwelując tym samym ich poziomy. W śluzowaniu w przeciwnym kierunku (rys. 4b) opróżnia się kolejno baseny BPW-3, BPW-2 i BPW-1, by następnie zniwelować ostatnią warstwę poziomu wody przed otwarciem wrót.



Rys. 4. Schemat śluzowania z basenami przechwyty wody



Rys. 5. Modele dwóch podstawowych przypadków kolizji dziobu okrętu z wrotami śluzy

Samo śluzowanie trwa tu dłużej niż w układzie bez basenów przechwyty wody, ale można to w znacznej mierze skompensować odpowiednim ukształtowaniem kanałów niwelacyjnych<sup>1</sup>. Poza tym system ten poważnie redukuje niekorzystne prądy i inne zjawiska związane z penetracją słonej wody morskiej. Zważywszy przy tym, że cały ten proces nadal odbywa się wyłącznie dzięki siłom grawitacji, można go na pewno zaliczyć do technologii tzw. zrównoważonego rozwoju.

### Podwójne wrota przesuwne

Odpowiedź na pytanie, dlaczego podwójne, nie jest trudna. Już ze wstępu do niniejszego artykułu wynika, że w żadnym przypadku nie można dopuścić do nieplanowego, awaryjnego wstrzymania żeglugi przez nowe śluzy. Jedną z przyczyn takiego wstrzymania, nieopanowaną dotychczas przez współczesną technikę, jest kolizja okrętu. Istnieją wprawdzie technologie i metody projektowania pozwalające na zmniejszenie ryzyka takiej kolizji, ale całkowite jego wyeliminowanie jest niemożliwe. Czytelnika zainteresowanego tą problematyką wypada tu odesłać do niedawno opublikowanego raportu Grupy Roboczej PIANC [24], w pracach której brał udział także autor niniejszego artykułu.

Ze względu na to, że wykonane obliczenia (rys. 5) również nie wykazały odpowiedniego opanowania ryzyka kolizji [17], zdecydowano się zastosować podwójne wrota w każdym przyczółku. W przypadku kolizji uszkodzone wrota wycofuje się do

<sup>1</sup> Autor celowo używa tu terminu „kanały niwelacyjne”, choć w polskiej literaturze technicznej przeważają określenia opisowe, np. „kanały napelnienia i opróżniania komory” [18]. Termin „kanały niwelacyjne” bardziej odpowiada jednak nazewnictwu stosowanemu w krajach przodujących w budownictwie śluz.

doku i po jego zamknięciu zasuwami awaryjnymi wypompuje się z niego wodę. Wrota można wtedy na sucho remontować bezpośrednio na miejscu, podczas gdy ich pracę przejmują drugie wrota w przyczółku. Cała ta operacja wymaga zaledwie kilkugodzinnej przerwy w żegludze. Z przeprowadzonej analizy ryzyka (*risk analysis*) wynika, że przy tym scenariuszu można pozwolić sobie na rezygnację z wrót rezerwowych, jakie należą zwykle do inwentarza śluz morskich. Prawdopodobieństwo, że w czasie remontu uszkodzonych wrót także te drugie doznają poważnej kolizji z okrętem, jest bowiem znikome. Tak sprawa wygląda z dzisiejszego punktu widzenia. Trudno jednak wykluczyć, że przyszłe lata dostarczą danych prowadzących do innych wniosków. W takim przypadku można oczywiście zamówić dodatkowo wrota rezerwowe.

Wszystkie zamknięcia w korytach nowych śluz są wrotami przesuwными, co stanowi dużą różnicę w porównaniu z wrotami wspornymi obecnie działającymi śluz. Decyzja o wyborze wrót przesuwnych podyktowana była głównie życzeniem ACP, by wszystkie systemy nowych śluz reprezentowały tzw. *proven technology*, czyli technologię sprawdzoną w praktyce. Do takiego postawienia sprawy można mieć zastrzeżenia z punktu widzenia nauki, gdyż – przestrzegane rygorystycznie – blokuje ono drogę ku postępowi technicznemu. Od strony zarządzania ryzykiem (*risk management*) wypada jednak w tym przypadku wykazać zrozumienie. Największe wrota wsporne w śluzach żeglugowych – nie licząc niezbyt według dzisiejszych norm sprawnych konstrukcji I.K. Brunela z początku XIX wieku – nie osiągają szerokości koryt rzędu 35 m. Ekstrapolacja systemu do koryt 55-metrowej szerokości niesie z sobą spore ryzyko. Problemem jest tu przede wszystkim praca łożysk wrót [6, 7] ze względu na ich olbrzymie obciążenia i złą dostępność. Wybrano zatem wrota przesuwne, które dziś stanowią niemal standardo-

we rozwiązanie w szerokich śluzach morskich. Dowodzą tego projekty dużych śluz w portach belgijskich, holenderskich [8] i niemieckich [10].

### **Bezpośrednie posadowienie I wykonawstwo „na mokro”**

Jak już wspomniano, w wybranym terenie śluz od strony Pacyfiku zalegały w większości skały z przewagą bazaltu. Przez teren przebiegał ukośnie jeden aktywny uskok tektoniczny, nie licząc paru innych nieaktywnych uskoków. Od strony Atlantyku w podłożu przeważały również skały, choć już nieco słabsze, bo piaskowce; za to istniejące uskoki tektoniczne były mniej wyraźne i nieaktywne [22]. Szczegółowe przedstawienie wykonanych badań i analiz geologicznych wychodzi poza ramy niniejszego artykułu. Wrażenie o ich skali daje fakt, że liczba przeprowadzonych wierceń badawczych przekroczyła 2000, a ich łączna długość wyniosła około 70 tys. m. Ogólnie można na ich podstawie stwierdzić, że podłoże gruntowe nowych śluz było silne, ale wymagało uwagi ze względu na stronę tektoniczną.

Najefektywniejsze w tych warunkach okazało się prowadzenie wykopów z w większości mechanicznym urobkiem skał oraz bezpośrednie posadowienie betonowanych na miejscu ementów koryta i przyczółków śluz. Mimo bowiem dość znacznej powtarzalności tych elementów ich prefabrykacja nie okazała się korzystna. Przyczyną były stosunkowo duże problemy transpor-

towe oraz brak odpowiedniego zaplecza. Opcja prefabrykacji byłaby ponadto jedynie do przyjęcia w „wydaniu” wielkowiarymowym, ze splawem, na przykład sekcji ścian koryt na miejsce przeznaczenia i ich podwodnym montażem. Wymagałoby to uprzedniego wprowadzenia wody do wykopów. Taka technologia – możliwa w europejskich warunkach – w Panamie nie wchodziła raczej w rachubę.

Ogólne wrażenie o przyjętej technologii budowy komór śluz oddaje zdjęcie z rys. 6. Ściany komór nie są tu jeszcze wybetonowane do pełnej wysokości, ale widać już wyraźnie ich przekroje z kanałami niwelacyjnymi nad płytami dennymi. Jak widać, zarówno wykop pod koryto, jak i wykop pod kanał zbiorczy do basenów przechwyty wody (na pierwszym planie) mają ściany prawie pionowe, w drugim przypadku lekko tylko stabilizowane. Jest to możliwe dzięki skalnemu podłożu. Można też zauważyć, że monolityczny przekrój ścian z kanałami będzie cechować się wysoką stabilnością pod zmiennym parciem wody.

### **Wprowadzanie statków holownikami**

Przy budowie śluz morskich w innych krajach metoda wprowadzania do nich statków nie byłaby przedmiotem dyskusji. Ogólnie przyjętą metodą jest bowiem użycie holowników (rys. 7a). Sęk w tym, że akurat w Panamie jest inaczej. Wszystkie cztery (po dwie po obydwu stronach Kanału) śluzy morskie tego kraju pracują w systemie wprowadzania i ustawiania stat-



Rys. 6. Budowa koryta i wykop pod kanał do basenów przechwyty wody (z uprzejmości ACP)



Rys. 7. Prowadzenie statków w śluzie holownikami, Śluza Północna w IJmuiden (a); lokomotywami, Śluzy Miraflores w Panamie (b)

ków za pomocą lokomotyw (rys. 7b). Co dla reszty świata jest dziś rarytasem przeszłości, dla mieszkańców Panamy jest chlebem powszednim. Co więcej, w kraju tym istnieje cała armia dumnych ze swego zawodu maszynistów lokomotyw i służb utrzymania tego systemu. Jak bowiem widać na zdjęciu, po każdej stronie śluzowanego okrętu pracują cztery ciągniki, co przy liczbie sekcji torów wzdłuż komór wszystkich śluz, pracy wielozmianowej, urlopach, szkoleniach itd. daje liczbę miejsc pracy samych tylko maszynistów przekraczającą 500.

Trzeba także przyznać, że system wprowadzania statków lokomotywami ma – przy całej swej archaiczności – też pewne zalety. Jak wykazuje doświadczenie, system ten daje, przy odpowiednim opanowaniu, stosunkowo niewielkie ryzyko kolizji okrętu z wrotami. Poza tym łatwo jest w nim wykorzystać całą dostępną szerokość koryta na śluzowanie jednostek maksymalnych rozmiarów, podczas gdy holowniki mają w takich sytuacjach ograniczone miejsce manewru.

Przeprowadzone symulacje nawigacyjne oraz ekonomiczne porównania dały jednak wyraźną przewagę rozwiązaniu z zastosowaniem holowników. Ich asystencja nie będzie zresztą w tej

samej mierze potrzebna przy prowadzeniu każdego statku. Obok podwójnych i stosunkowo odpornych na uderzenia wrót potrzebę tę ograniczają także inne podjęte środki, jak obecność odbojnic (tzw. *fendering*) wzdłuż ścian koryta, umiejscowienie elementów o zasadniczym znaczeniu w pracy śluz poza obszarami potencjalnych kolizji itp. Poza tym zawód pilota holownika ma w Panamie status na pewno nie niższy niż zawód maszynisty lokomotywy, więc akceptacja społeczna tej zmiany nie będzie aż tak trudna.

## KONSTRUKCJE BETONOWE

Podstawowe masywne konstrukcje nowych śluz można – zgodnie z metodyką „inżynierii systemów” – podzielić na cztery grupy lub podobiekty odpowiadające tzw. częściowym funkcjom tych konstrukcji. Przedstawiono to w tabl. 1:

Dokładne omówienie wszystkich tych podobiektów wychodzi poza objętość niniejszego artykułu. Poniższe ogólne uwagi koncentrują się więc na podobiektach grupy 2 i 3, choć mają one częściowo zastosowanie również do obu pozostałych grup.

Tabl. 1. Funkcje cząstkowe i spełniające je podobiekty w konstrukcjach betonowych śluz

Nr	Funkcja cząstkowa	Podobiekt
1	Usprawnienie wchodzenia statków do – i ich wychodzenia ze śluzy	➡ Stanowiska czekania, przedporcia* i kierownice śluzy
2	Pomieszczenie zacumowanych statków w procesie śluzowania	➡ Komory koryt śluzy (zasadniczo ściany i płyty denne)
3	Pomieszczenie wrót i przejęcie obciążeń różnicą poziomu wody	➡ Przyczółki (głowice, korony) śluzy
4	Zapewnienie parametrów przepływu wody w procesie niwelacji	➡ Kanały niwelacyjne i baseny przechwyty wody

\* Przedporcia śluz zwane są także, np. przez prof. Mazurkiewicza [18], awnportami.





niniejszego artykułu podano obok pełnych nazw wymienionych norm betonów także adresy, pod którymi normy te można ściągnąć bezpłatnie z internetu.

Takie zróżnicowanie gatunków i klas betonu sprzyjało zastosowaniu deskowań ślizgowych, choć ich konkretne rozwiązanie – szczególnie dla pochyłych tylnych ścian z SMC – nie było wcale proste. Dodatkową zaletą zastosowanej metody było też nieco lepsze odprowadzenie ciepła hydratacji dzięki zmniejszeniu grubości betonowanych sekcji. Odprowadzenie ciepła hydratacji stanowi, jak wiadomo, poważny problem przy betonowaniu wielkowymiarowych konstrukcji budownictwa wodnego. Czytelnika zainteresowanego tym tematem autor odsyła tu do porównania technologii betonów i betonowania zastosowanych przy budowach pochylni Wulkan Nowy w Szczecinie oraz tzw. Nawiduktu (śluz na akwedukcie) w Enkhuizen w Holandii [5].

### Przyczółki śluz

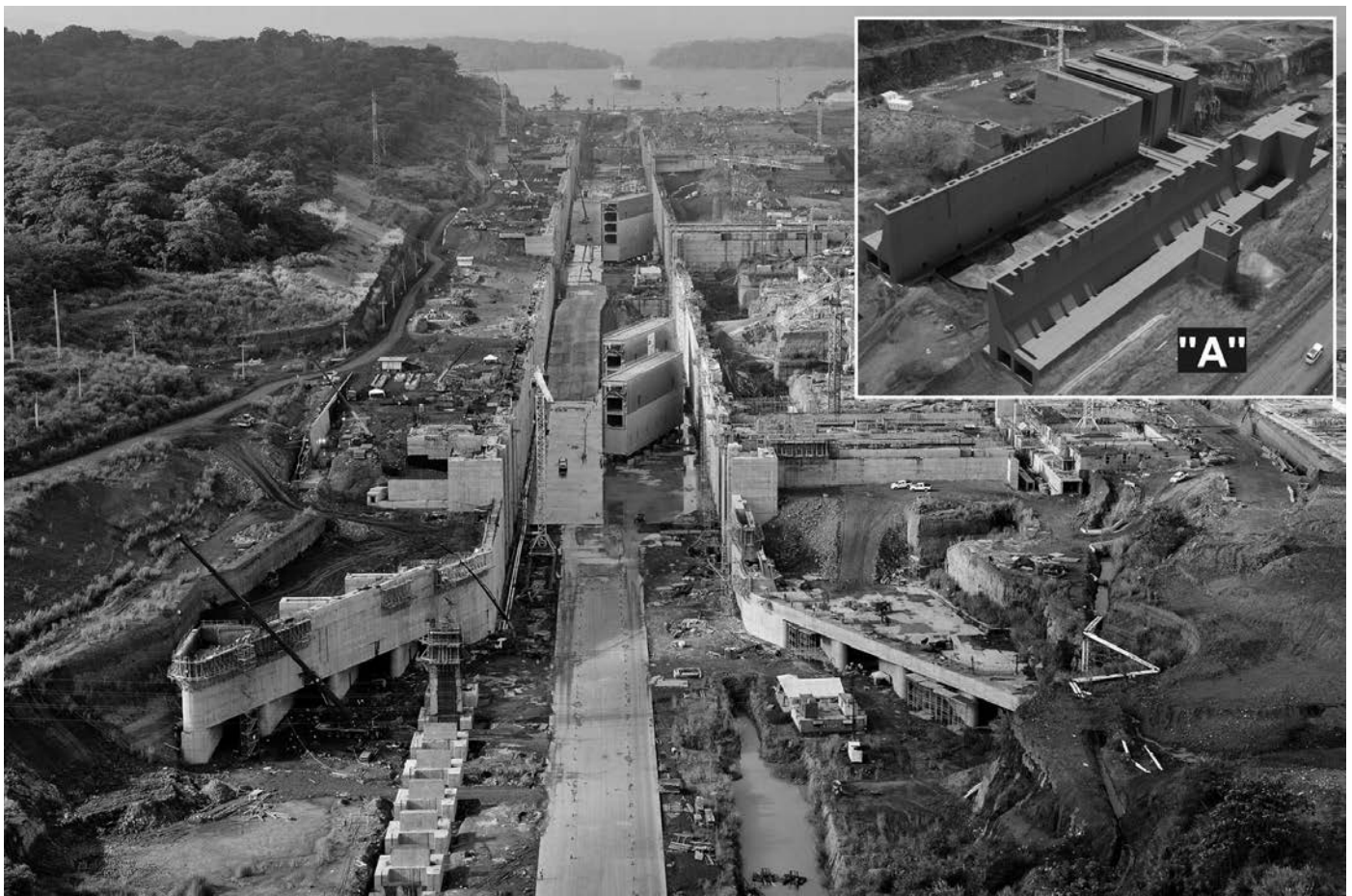
Wybór terminu „przyczółki” śluz ma tu charakter subiektywny. W technicznej literaturze polskiej spotyka się także terminy „głowice” i „korony”. Pierwszy z nich kojarzy się dziś raczej z burzeniem niż z budowaniem, drugi pasuje bardziej do samych zwieńczeń budowli piętrzących. Najsympatyczniejszy i najtrafniejszy wydaje się więc termin „przyczółki”.

W przypadku stosowania wrót przesuwnych przyczółki śluz obejmują nie tylko konstrukcje do pomieszczenia wrót w korycie i przeniesienia obciążeń od tych wrót, ale także doki do

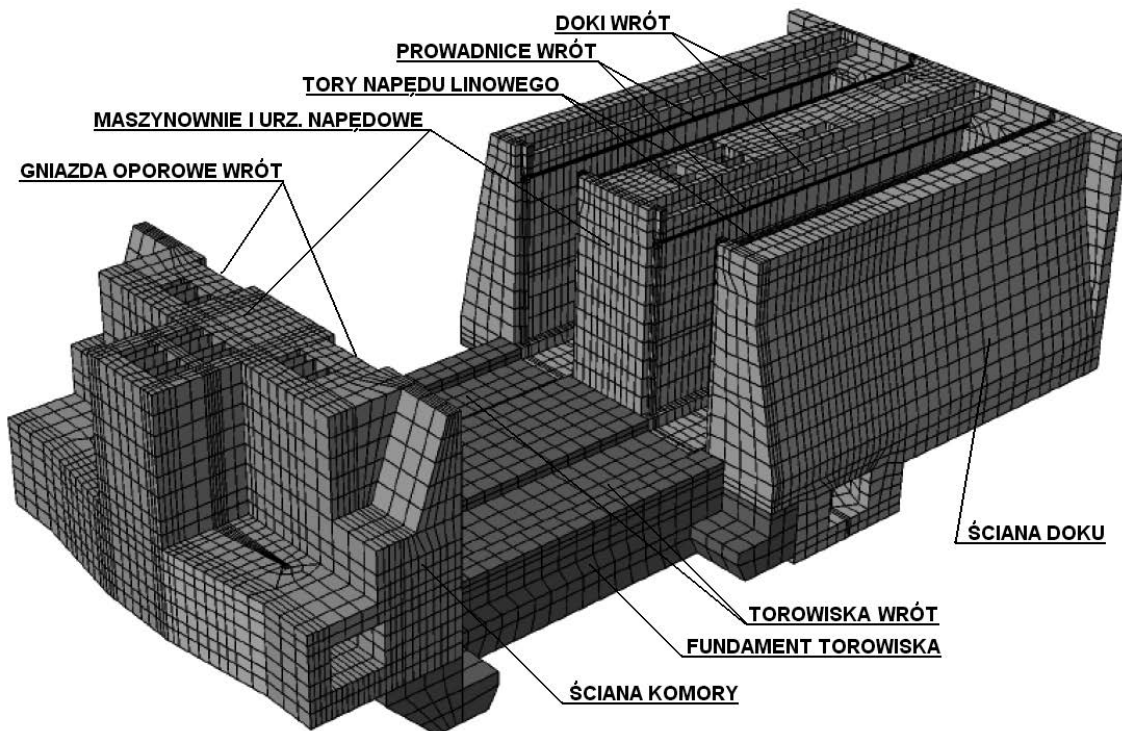
pomieszczenia wrót w pozycji otwartej. Te ustawione poprzecznie do koryta doki poszerzają dwukrotnie teren wymagany pod budowę śluz, co w wielu przypadkach – jak na przykład przy budowie nowej śluzy morskiej do portu w Amsterdamie [8] – stanowi poważny problem. Przy budowie nowych śluz w Kanale Panamskim problem ten nie odgrywał na szczęście aż tak dużej roli. Ograniczenia terenowe nie występowały w zasadzie ani od strony Pacyfiku, ani Atlantyku. Ponadto przy stosowaniu basenów przechwyty wody i lokalizacji doków po tej samej stronie koryta to właśnie baseny, a nie doki, współokreślały wymaganą szerokość terenu.

Ogólny widok budowy koryta śluz od strony Atlantyku z już prawie gotowymi do przyjęcia wrót dokami przedstawiono na rys. 9. We wstawce ”A” pokazano widziany z przeciwnej strony model fragmentu koryta z przyczółkiem na tle wykopu w początkowej fazie budowy. Przyczółki – każdy z dwoma dokami wrót – obliczono jako konstrukcje monolityczne zdolne do samodzielnego przejęcia obciążeń od wrót, tzn. bez współpracy ze ścianami przylegających komór koryta. Są one też zdylatowane od tych ścian, z zagwarantowaniem odpowiedniej szczelności dylatacji. Najogólniejszy model komputerowy przyczółka do obliczeń metodą elementów skończonych (FEM) przedstawiono na rys. 10.

Zastosowane rodzaje i klasy betonów oraz sama metoda betonowania były podobne do tych do ścian koryta. Zasadnicza różnica dotyczy tu jedynie płyt dennych. O ile w korycie ich obciążenia są nieznaczne, to w przypadku przyczółków płyty denne muszą nie tylko przejść bardzo wysokie i zmienne obciążenia



Rys. 9. Budowa koryta śluzy z dokami wrót po prawej stronie (z uprzejmości ACP)



Rys. 10. Ogólny model FEM przyczółka śluzy [4]

żenia od torów wrót, ale także zagwarantować trwałą precyzję wymiarową tych torów. Dna doków wrót oraz fundamenty torów w poprzek koryta są zatem konstrukcjami bez porównania cięższymi niż dna koryt w przekrojach komorowych.

## WROTA I ICH TOROWISKA

### Konstrukcje wrót

W chwili ukazania się niniejszego numeru „Inżynierii Morskiej i Geotechniki” wszystkie wrota obydwu śluz przybędą już do Panamy. Wykonawstwo tak specjalistycznych obiektów to bowiem zadanie, któremu nie każda wytwórnia konstrukcji stalowych potrafi sprostać. Wykonawcą wrót nowych śluz w Kanale Panamskim jest przedsiębiorstwo Cimolai S.p.A. w północnych Włoszech, znane w Polsce między innymi z budowy Stadionu Narodowego w Warszawie. Wykonawcą zasuw w kanałach nivelacyjnych, których opis pomijamy w niniejszym artykule, jest też nie byle kto, bo koreański koncern Hyundai. Ogólne wymiary i tonaż tych konstrukcji przedstawiono w tabl. 2, opracowanej na podstawie danych z [15]. Dane w tabelicy dotyczą samych tylko zamknięć operacyjnych i nie obejmują konstrukcji stalowych, na przykład: awaryjnych zamknięć doków wrót, torów, prowadnic, podpór napędów i innych zabetonowanych na stałe lub luźno stojących elementów.

Warto w tym miejscu dodać, że do ekskluzywnego klubu wykonawców wrót wielkich śluz morskich dołączyła w ostatnich latach stocznia CRIST S.A. z Gdyni. Jej znak firmowy figuruje dziś, między innymi na wrotach przesuwanych Śluzy Cesarzkiej w Bremerhaven (rys. 11) o rozpiętości podobnej do śluz Kanału Panamskiego [10]. Fakt ten nie jest w świecie niezauwa-

Tabl. 2. Ilość, wymiary i tonaż stalowych zamknięć wodnych w nowych śluzach

Rodzaj zamknięcia	Ilość (sztuki)	Wymiary $L \times B \times H$ (m)	Masa jednostkowa (tony)
Wrota od Pacyfiku PA1	2	57,6 × 8,0 × 22,30	2.410
Wrota od Pacyfiku PA2 i PA3	4	57,6 × 10,0 × 31,92	4.245
Wrota od Pacyfiku PA4	2	57,6 × 10,0 × 33,04	4.325
Wrota od Atlantyku AT1	2	57,6 × 8,0 × 22,30	1.920
Wrota od Atlantyku AT2 i AT3	4	57,6 × 10,0 × 30,19	3.380
Wrota od Atlantyku AT4	2	57,6 × 10,0 × 29,07	2.950
Łączna masa stali we wrotach			53.710
Zasuw kanałów głównych	64 + 2	4,690 × 6,786	15,5
Zasuw wyrównawcze	16 + 2	3,545 × 4,285	6,0
Zasuw rozdzielcze basenów	72 + 2	4,690 × 6,786	15,5
Łączna masa stali w zasuwach			2.280
<b>Łączna masa stali we wrotach i zasuwach</b>			<b>55.990</b>

żany, o czym świadczą, między innymi publikacje w Holandii, gdzie przygotowuje się budowę dwóch wielkich śluz morskich – w IJmuiden i Terneuzen [11, 13].

Wracając do wrót śluz Kanału Panamskiego, wypada zauważyć, że ich konstrukcja (rys. 12) stanowi kompromis między „szkołą belgijską” a „szkołą holenderską” w budowie wrót przesuwanych. Zarządca Kanału, ACP, konsultował bowiem w tej kwestii specjalistów z obu krajów. Zasadnicze różnice między obydwoma „szkołami” można streścić następująco [7]:



Rys. 11. Śluza Cesarska w Bremerhaven z wrotami wykonanymi w stoczni CRIST S.A. (na podstawie materiałów bremenports GmbH & Co. KG)

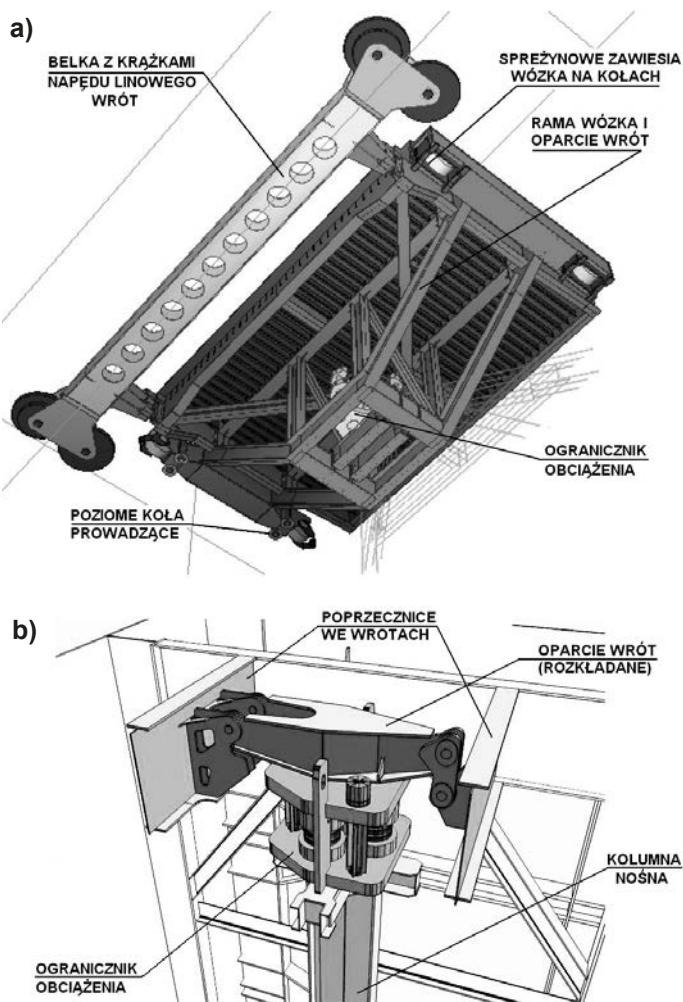
- Inżynierowie holenderscy stosują dziś z reguły podparcie wrót za pomocą dwóch wózków dolnych na wspólnym torze biegnącym przez całą szerokość koryta i długość doku wrót. Ze względu na to, że w przeszłości miały miejsce problemy z utrzymaniem takich torów w należytym stanie technicznym, wybiera się obecnie elastyczne w kierunku poziomym podparcie wrót na tych wózkach, najczęściej za pomocą łożysk gumowych. Poprzeczne ruchy wrót na tych łożyskach ogranicza się przez stosowanie (przeważnie ślizgowych) prowadnic: dołem przy torze oraz górą na ścianach doku. Ze względu na to, że szyny toru przenoszą wtedy bardzo małe obciążenia poprzeczne, ich rozstawy, podobnie jak same wózki, mogą być niewielkie.
- Inżynierowie belgijscy preferują tzw. „taczkowy” układ wrót. W tym układzie wózki są zlokalizowane po przekątnej wrót: wózek przedni jest wózkiem dolnym i porusza się po torze w korycie, wózek tylny jest zaś wózkiem górnym opartym na szynach u szczytu ścian doku. Daje to nieco stabilniejszy układ i łatwiejsze utrzymanie toru wózka górnego. Drugą różnicą jest brak prowadnic górnych. Wrota oparte są w wózku dolnym na dwóch sztywniejszych niż u Holendrów łożyskach „kołyskowych”, podobnie jak w Śluzie Cesarskiej [10]. Tor dolny i same wózki przenoszą wtedy większe obciążenia poprzeczne, przez co muszą one być szerokie i ciężkie, a ich żywotność jest krótsza.

### Układy oparc i prowadnic wrót

Ogólne rozwiązanie oparc wrót widać już częściowo na rys. 12. Projektanci (biuro Iv Groep z Papendrechtu w Holandii) wybrali zmodernizowany „belgijski” układ taczkowy przy „holenderskim” zastosowaniu wąskich wózków oraz ślizgowych prowadnic, tak górą, jak i dołem (rys. 12a,b). Modernizacja układu „belgijskiego” polega na zastosowaniu wahaczowej kolumny nośnej do podparcia wrót na wózku dolnym. Kolumna ta (rys. 12c) biegnie przez niemal całą wysokość wrót i dopiero u szczytu jest obciążona ich ciężarem własnym. W celu zapewnienia stabilności układu, poziome ruchy kolumny są też ze wszystkich stron ograniczone prowadnicami, ale z takim prześwitem, by w czasie jazdy wrót oraz bezpośrednio po ich zamknięciu były możliwe równoległe poziome przemieszczenia wrót w granicach prześwitów ich prowadnic. Dzięki temu wrota nie przekazują w zasadzie żadnych poprzecznych obciążeń na wózki dolne i ich szyny, w wyniku czego konstrukcje te są wąskie i lekkie.

Odbojnice ślizgowe, bloki nośne oraz pionowe oparcia boczne wrót mają powierzchnie z wysokogatunkowej stali nierdzewnej odpornej na działanie wody morskiej. Podczas pracy wrót przylegają one do prowadnic i ciosów oporowych w przyczółkach śluz, których powierzchnie kontaktowe wyłożone są płytami o grubości około 100 mm z UHMPE (*Ultra High Molecular Polyethylene*). Rozwiązania takie [9] wypierają w ostatnich latach tradycyjnie dotychczas stosowane wykładziny z twardych





Rys. 13. Oparcia wrót na wózku górnym (a) i kolumnie nośnej (b) (z uprzejmości ACP)

– najczęściej tropikalnych – gatunków drewna, których pozyskanie odbywa się niestety najczęściej w sposób rabunkowy i ze szkodą dla środowiska naturalnego.

Na uwagę zasługuje także zastosowanie tzw. „ograniczników obciążenia” przy oparciu wrót na wózku górnym oraz na kolumnie nośnej do wózka dolnego (rys. 13). Ograniczniki te stanowią rodzaj sprężynowych łożysk i mają za zadanie elastyczne przejście przyspieszeń pionowych wrót oraz otaczającego terenu podczas trzęsienia ziemi. Ma to przede wszystkim zapobiec przeciążeniu i awarii wózków lub opartych na nich konstrukcji nośnych. Jak widać, analiza obciążeń sejsmicznych stanowiła także w przypadku wrót ważny aspekt w procesie projektowania. Z rys. 13b wynika również, że oparcie wrót na kolumnie jest rozkładane, co umożliwia wyciągnięcie kolumny z jej szybu lub jej zamocowanie w pozycji wyższej niż pokazano na rys. 12c. To ostatnie jest celowe przy spławie wrót w przypadkach remontów poza dokiem postojowym (na przykład w celu odnawiania powłok antykorozyjnych) oraz przy niektórych pracach remontowych w samym doku.

### Transport wrót na miejsce budowy

Jak wyżej wspomniano, wrota nowych śluz Kanału Panamskiego skonstruowano w północnych Włoszech. Najbliższym

wykonawcy portem morskim o odpowiednim zapleczu był Triest. Przy transporcie wrót do Panamy trzeba było pokonać Adriatyk, Morze Śródziemne, Atlantyk i Morze Karaibskie. Chociaż wrota do celów remontowych są zaprojektowane jako konstrukcje spławne, ich spławianie przez tyle mórz byłoby operacją powolną, ryzykowną i angażującą zbyt dużo sprzętu i ludzi. Zdecydowano się na transport okrętowy.

Odpowiednimi jednostkami do tego celu okazały się częściowo zanurzalne okręty (*semi-submersible vessels*) klasy STX, zdolne do wzięcia na pokład i przewiezienia w pozycji pionowej czterech wrót na raz. Możliwość przewozu wrót w pozycji pionowej czyli „stojące” była tu o tyle korzystna, że pozwoliła uniknąć dodatkowych, angażujących ciężki sprzęt operacji obrotu wrót do pozycji „leżące” i ponownie do „stojące” po przybyciu na miejsce budowy. Dodatkowo, częściowa zanurzalność okrętu pozwalała na ustawienie jego pokładu na poziomie nabrzeża tak, by możliwe było wprowadzenie wrót na pokład metodą Ro-Ro przy użyciu transporterów SPM (*Self Propelled Modular Transporters*). Pomosty tych długich, wieloosiowych transporterów są wyposażone w podnośniki hydrauliczne umożliwiające równoległe podniesienie obiektu z jego podpór i – po przetransportowaniu – ponowne jego opuszczenie na podpory w innym miejscu.

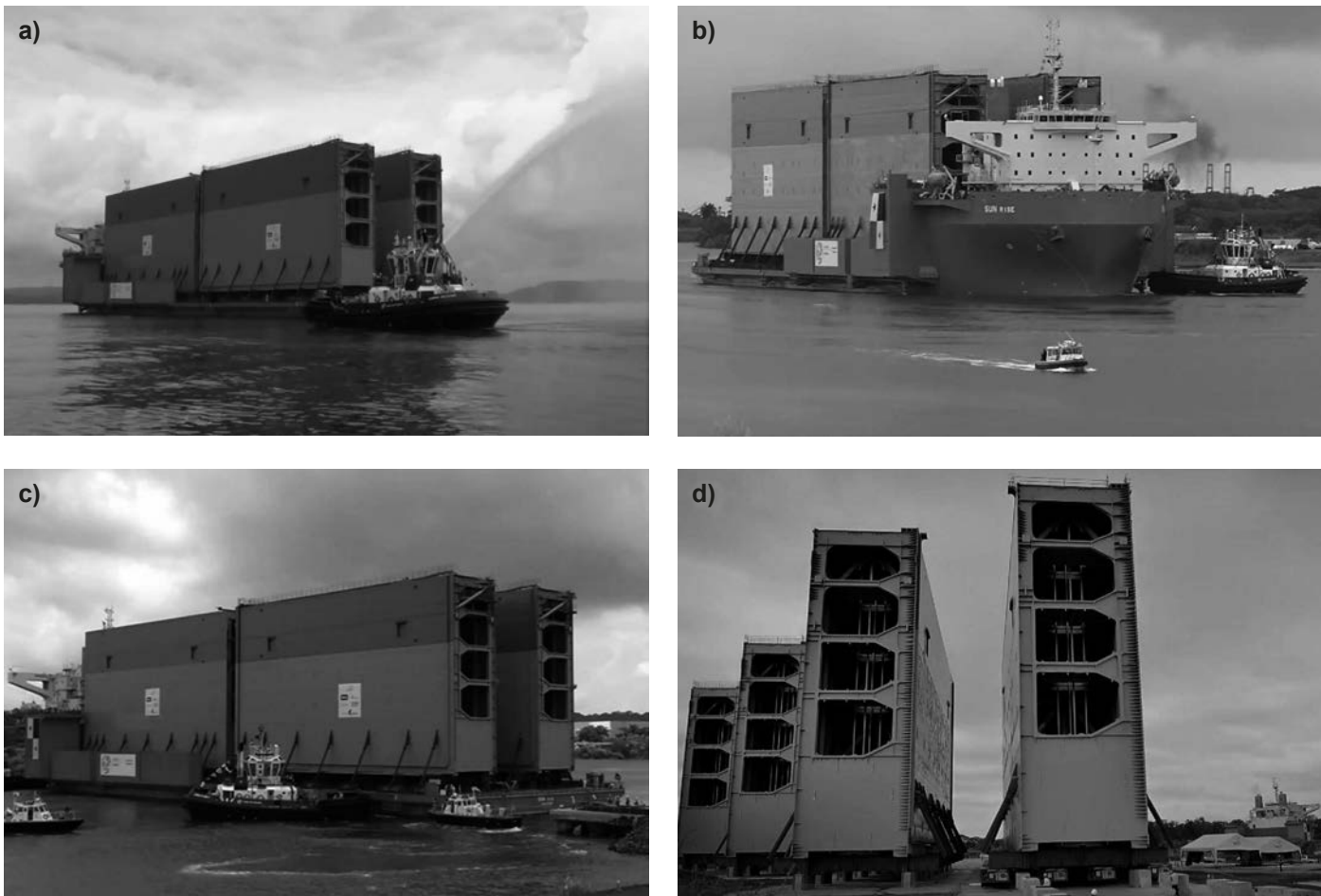
Czytelnika, któremu powyższy opis nie do końca wyjaśnia technologię transportu wrót, autor zachęca do obejrzenia animacji tego transportu w YouTube [16]. Wykonawcą wszystkich operacji transportowych oraz autorem animacji jest znana w tej branży firma Geodis Wilson. W animacji pokazano również operacje rozładunku wrót po przybyciu do Panamy, której kilka faz przedstawiają zamieszczone zdjęcia – już bezpośrednio z Panamy (rys. 14). Transport przez Kanał na plac budowy śluz od strony Pacyfiku odbywał się już pojedynczo, co także można prześledzić w animacji.

Opisana technologia transportu, a szczególnie przewozy wrót do Panamy „czwórkami”, jak również czasy pojedynczych rejsów równe około 22 dni, bardzo odpowiadały przyjętemu harmonogramowi projektu. Nie one są przyczyną około rocznego poślizgu w budowie poszeszanego Kanału. Przyczyny te są złożone i dla polskiego czytelnika mniej interesujące. Niezależnie od nich realizację projektu dziś już na pewno można uznać za sukces. Jest rzeczą godną podziwu, że kraj tak niewielki i w wielu dziedzinach zaliczający się jeszcze do tzw. „trzeciego świata” był w stanie zmobilizować potencjał tak własny, jak i międzynarodowy, by przeprowadzić najambitniejszą chyba dotychczas inwestycję budownictwa morskiego w bieżącym stuleciu.

### REFLEKSJE KOŃCOWE

W ostatnich dniach pracy nad niniejszym artykułem do skrzynki listowej autora wpadła przesyłka, a w niej numer 5/2014 „Inżynierii Morskiej i Geotechniki” przypominający o 110-leciu Politechniki Gdańskiej. Gdy otwierano Politechnikę Gdańską, wówczas „Technische Hochschule zu Danzig”, Kanał Panamski musiał czekać na swoje otwarcie jeszcze 10 lat, choć do jego budowy właśnie wtedy już przystępowano.

Dwie rocznice – dwie historie... Czy mają one ze sobą coś wspólnego? Na pozór niewiele, ale i tu pozory mylą. Przede wszystkim obydwaj przedsięwzięcia podejmowali ludzie patrzą-



Rys. 14. Zdjęcia z przybycia kolejnej czwórki wrót do Panamy (z uprzejmości ACP)

a) przywitanie transportu na morzu, b) holowanie transportu do nabrzeża, c) cumowanie okrętu i ustawianie poziomu pokładu, d) rozładunek wrót transporterami SPM.

cy daleko w przyszłość – ludzie z wizją. Można też zauważyć inne podobieństwa, jak na przykład fakt, że także Kanał zmienił gospodarza w przeciągu tych lat, i także wtedy niektórzy twierdzili, że ten nowy gospodarz nie zapewni mu poziomu funkcjonowania, jaki zapewniał gospodarz stary. I także oni się mylili... Jednak akcentowanie tych spraw nie pasuje dziś już do atmosfery ani w dzisiejszej Europie, ani między Republiką Panamy a Stanami Zjednoczonymi. Wróćmy więc do tej podstawowej wspólnej cechy – ludzi z wizją.

Spuścizna tych ludzi zobowiązuje. Nie tylko do zachowania tego, co już osiągnięto, ale i do dalszego patrzenia w przyszłość. W Panamie znajduje to dziś wyraz w prowadzonym bardzo ambitnym poszerzaniu Kanału i budowie w nim nowych śluz. W Polsce, po – przynajmniej to – ograniczeniu ambicji w budownictwie morskim mniej więcej od czasów budowy Portu Północnego, budownictwo to znów zyskuje w ostatnich latach na znaczeniu. Ponownie aktualny stał się na przykład temat przekopania kanału żeglugowego przez Mierzęję Wiślaną i budowy w nim odpowiednich śluz.

Autor nie jest wtajemniczony w studia nad tym projektem, ale wiadomo mu, że są rozważane koncepcje budowy jednej tylko śluzy o głębokości koryta 5,50 m. Według obecnych norm głębokość ta rzeczywiście spełnia wymagania żeglugi śródlądowej do klasy Vb włącznie oraz zalecenia PIANC dotyczące przybrzeżnej żeglugi mieszanej, tzw. klas R/S (*river/sea*) [23]. Nasuwa się jednak pytanie, czy takie podejście do sprawy repre-

zentuje patrzeć w przyszłość. Wiadomo, że Elbląg był przed wojną portem morskim i odtworzenie infrastruktury takiego portu nie byłoby w nadchodzących dziesięcioleciach sprawą trudną. Można także przewidzieć, że zainteresowanie regionem Zalewu Wiślanego po wybudowaniu kanału na pewno wzrośnie – gospodarczo, a być może także militarnie. Autor pragnie przyłączyć się do dyskusji w kraju na ten temat i poprzeć zdanie tych, którzy uważają, że planowany kanał powinien być znacznie głębszy. Wydaje się, że warto również – o ile nie ma to jeszcze miejsca – rozważyć budowę nie jednego, lecz dwóch równoległych koryt śluz. Zapewniłoby to ciągłą dostępność kanału do żeglugi, tzn. również w czasie remontów śluz, tak planowanych, jak i awaryjnych. Z doświadczeń holenderskich wynika, że sprawa ta ma podstawowe znaczenie dla armatorów i przedsiębiorstw rozważających założenie własnych baz w regionie. I tu przychodzi na myśl Kanał Panamski jako przykład patrzenia w przyszłość.

#### LITERATURA

1. ACI 222.R-01: Protection of Metals in Concrete against Corrosion. ACI Committee 222, September 2001, [http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/222r\\_01.pdf](http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/222r_01.pdf).
2. ACI 207.1R: Guide to Mass Concrete, American Concrete Institute. December 2005, <http://concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/207105.pdf>.

3. ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute. June 2008, <http://www.maestriaenconstrucciones.com.ec/archivos/guide-to-durable-concrete.pdf>.
4. CICIP: Panama Canal Third Set of Lock Project, Pacific Lock Gate Type "C", Combined FEM Models. CICIP Consultores Internacionales, July 2010 (niepublikowane).
5. Daniel R. A.: Niektóre tendencje w budownictwie hydrotechnicznym. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8/2002.
6. Daniel R. A.: Contact problems in lock gates and other hydraulic closures. Politechnika Gdańska (praca doktorska) 2005, <http://fbc.pionier.net.pl/id/oai:pb.gda.pl:6124>.
7. Daniel R. A.: Contact behavior of lock gates and other hydraulic closures. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken 2011.
8. Daniel R. A.: O rozbudowie zespołu portowego Amsterdam Sesports. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2012.
9. Daniel R. A., Augustijn J.: Use of synthetic materials and the comeback of sliding gates versus rolling gates. Proceedings of the Workshop on Locks at PIANC "Smart Rivers" Conference, New Orleans, September 2011.
10. Daniel R. A., Mahrholz D.: Na miarę czasu – Rozbudowa i zmiany profilu zespołu portowego bremenports w Bremerhaven. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/2013.
11. Daniel R. A., Mahrholz D.: Sluisdeuren van de Kerzersluis in Bremerhaven – Innovatief nivellieren met gespleten roldeuren. *Bouwen met Staal*, nr 04/2013.
12. Daniel R. A., Rigo Ph., Dembicki E.: Multi-criteria selection of hydraulic gates. PIANC International Navigation Seminar, China Communications Press, Beijing 2008.
13. Daniel R. A. i inni: New Sea Lock IJmuiden – Wide Navigation Lock under Narrow Space Conditions. Proceedings of the PIANC "Smart Rivers" Conference, Liège-Maastricht, 2013.
14. De Regge, J.: Preliminary Design of the New Locks. Proceedings of the International Engineering and Infrastructure Congress, Panama 2012.
15. Gonzales B., Ametller S.: Diseño y Construcción del Tercer Juceo de Esculadas. Proceedings of the International Engineering and Infrastructure Congress, Panama 2012.
16. Heavy Lift Specialist: Panama Lock Gates transportation simulation. 28 January 2013, <http://www.heavyliftspecialist.com/shipping-related-videos/panama-lock-gates-transportation-animation/>
17. Iv-Groep: Vessel impact analysis for the Third Set of Locks project. Expansion of the Panama Canal, not published, Papendrecht 2010.
18. Mazurkiewicz B. K.: Porty Jachtowe-Mariny Projektowanie. Fundacja Promocji Przem. Okrętowego i Gosp. Morskiej, Gdańsk 2004.
19. McCullough D.: The Path Between the Seas – the Creation of the Panama Canal 1870-1914. Simon and Schuster, New York, 1977.
20. Moens S., Verplanken S.: Dredging for the Panama Canal's New Locks at the North Entrance of the Pacific Access Channel. *Terra et Aqua* No. 124, September 2011.
21. Ollero J., Bode A., Hempelt L.: Construction of the 2nd Navigation Lock in Zerben. Proceedings of the PIANC "Smart Rivers" Conference, Liège-Maastricht, 2013.
22. Ottsen Ch.: Geotechnical design of the Third Set of Locks. Proceedings of the International Engineering and Infrastructure Congress, Panama 2012.
23. PIANC Working Group 16: Standardization of Ships and Inland Waterways for River/Sea Navigation. Report PTC I, PIANC, Brussels, 1996.
24. PIANC Report 151: Design of Lock Gates for Ship Collision. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure PIANC, Brussels 2014.
25. URS: Panama Canal Expansion – Third Set of Lock Project. Category III Environmental Impact Study, URS Holdings Inc., Fredericksburg (VA), July 2007.