

OCENA GŁĘBOKOŚCI PÓŁNOCNEGO TORU PODEJŚCIOWEGO DO PORTU ŚWINOUJŚCIE OD POZYCJI GAZOCIĄGU NORD STREAM DO TERMINALU LNG W ASPEKCIE OBSŁUGI JEDNOSTEK O MAKSYMALNYCH GABARYTACH – METODY UPROSZCZONE

Niniejsze opracowanie obejmuje ocenę maksymalnego zanurzenia statku handlowego, który przy działaniu różnych warunków zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) mógłby bezpiecznie prowadzić żeglugę (manewrować) północnym torem wodnym prowadzącym od pozycji gazociągu Nord Stream do portu Świnoujście, zachowując przy tym wymagany zapas wody pod stępką, czyli minimalną rezerwę nawigacyjną głębokości. Do określenia maksymalnego zanurzenia statku posłużono się metodą praktyczną, wykorzystując definicję ryzyka nawigacyjnego oraz model przestrzenny domeny statku. Otrzymane wyniki porównano z wytycznymi Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 czerwca 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne obsługujące statki o określonych gabarytach.

WPROWADZENIE

Niniejsze opracowanie obejmuje ocenę maksymalnego zanurzenia statku handlowego, który przy działaniu różnych warunków zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) mógłby bezpiecznie prowadzić żeglugę (manewrować) północnym torem wodnym prowadzącym od pozycji gazociągu Nord Stream do portu Świnoujście, zachowując przy tym wymagany zapas wody pod stępką, czyli minimalną rezerwę nawigacyjną głębokości.

Pod pojęciem toru północnego prowadzącego do portu Świnoujście rozumiemy będziemy wyznaczony tor wodny na akwencie spłyconym ograniczonym od północy pozycją gazociągu Nord Stream (średnica 1,5 m), ułożonym na dnie morskim na głębokości wody wynoszącej co najmniej 17,5 m (tzn. nad nim głębokość wody wynosi co najmniej 16 m) oraz od południa torem podejściowym do budowanego terminalu LNG Świnoujście mającego obsługiwać statki o zanurzeniu T_{\max} do 13,2 m, długości L do 270 m, szerokości B do 42 m oraz nośności N do 100 tys. ton. Strona Polska chce jednak zachować możliwość, aby statki o zanurzeniu 15 m mogły wpływać do Świnoujścia północnym torem podejściowym. W tym przypadku strona polska musiałaby jednak pogłębić Bałtyk na odcinku około 40 mil morskich

(ok. 74 km) wyznaczając nowy pogłębiony tor wodny o głębokościach akwenu rzędu 17 m.

Do określenia maksymalnego zanurzenia statku mogącego bezpiecznie manewrować na torze wodnym północnym o głębokościach kontrolowanych nie mniejszych niż 14,3 m oraz szerokościach toru od 180 do 220 m posłużymy się metodą praktyczną, wykorzystując definicję ryzyka nawigacyjnego oraz model przestrzenny domeny statku [14].

Ocenę rezerwy nawigacyjnej głębokości (zapasu wody pod stępką) dokonamy przy działaniu różnych zakłóceń zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) dla przykładowych statków handlowych, a w szczególności:

- masowca o gabarytach: długość $L = 270$ m, szerokość $B = 42$ m, zanurzenie na Bałtyku¹ $T_D = T_R = 15$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,85$;
- kontenerowca o gabarytach: długość $L = 275$ m, szerokość $B = 32$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 13,2$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,7$;
- promu pasażerskiego o gabarytach: długość $L = 140$ m, szerokość $B = 16$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 7,5$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,65$;
- zbiornikowca LNG o gabarytach: długość $LOA = 280$ m, szerokość $B = 43$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 12,3$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,746$.

Otrzymane wyniki porównamy z wytycznymi Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 czerwca 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne obsługujące statki o określonych gabarytach [10].

1. WYTYCZNE MINISTRA TRANSPORTU I GOSPODARKI MORSKIEJ W SPRAWIE GŁĘBOKOŚCI AKWENÓW PRZY BUDOWLACH MORSKICH I ICH USYTUOWANIE ORAZ SUMARYCZNY ZAPAS GŁĘBOKOŚCI WODY POD STĘPKĄ KADŁUBA STATKU – METODA UPROSZCZONA 1

Rozważając ewentualną budowę pogłębionego toru wodnego na podejściu do portu Świnoujście, zastosowanie będą miały wytyczne Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 1 czerwca 1998 r., dział II, rozdział 3, § 25 do § 35 [10].

Dla każdej budowli morskiej znajdującej się w obrębie obszaru polskiego określa się następujące trzy głębokości wody:

- głębokość projektowaną H_p ,
- głębokość dopuszczalną $H_{dop.}$,
- głębokość techniczną H_t .

¹ Limitowane zanurzenie $T = 15$ m przyjmowało się na Bałtyku jako maksymalne dla statków chcących bezpiecznie przepłynąć przez cieśniny duńskie (Wielki Belt). Od listopada 2007 r. na skutek wypłynięcia akwenu limitowane zanurzenie statków przepływających przez Wielki Belt zredukowano jednak do 14,5 m (*Notice to Mariners*, November 2007).

Głębokość projektowana H_p określona jest wzorem:

$$H_p = H_t + t_b \quad (1)$$

gdzie:

- H_p – głębokość projektowana [m],
- H_t – głębokość techniczna [m],
- t_b – tolerancja bagrownicza [m].

Wartość tolerancji bagrowniczej przyjmowana do obliczeń budowli morskich i projektowania robót czerpalnych, w zależności od miejsca prowadzenia robót czerpalnych, jest następująca:

- $t_b = 0,25$ m – przy robotach czerpalnych wykonywanych w portach morskich,
- $t_b = 0,35$ m – przy robotach czerpalnych wykonywanych na zewnątrz portów morskich, a w szczególności na redach, na torach podejściowych, na trasach układania kabli i rurociągów na morzu terytorialnym i na morskich wodach wewnętrznych oraz przy profilowaniu dna morskiego pod budowle morskie.

Projekt budowlany zawiera określenie szerokości pasa dna wzdłuż budowli morskiej, w którym ma być zachowana **głębokość dopuszczalna** ($H_{dop.}$). Jeżeli posiadana dokumentacja techniczna (np. mapa morska) dla istniejących budowli morskich określa tylko jedną głębokość akwenu, uznaje się ją za głębokość dopuszczalną ($H_{dop.}$). Wówczas **głębokość techniczną** (H_t) można wyrazić w metrach na podstawie wzoru:

$$H_t = H_{dop.} - t_b \quad (2)$$

gdzie:

- H_t – głębokość techniczna [m],
- $H_{dop.}$ – głębokość dopuszczalna [m],
- t_b – pełna tolerancja bagrownicza [m].

Przez **głębokość nawigacyjną** (H_n) rozumie się różnicę rzędnych, mierzoną od średniego poziomu morza SW do płaszczyzny poziomej, która jest styczna do najwyższej położonego dna w rozpatrywanym akwenu przeznaczonym do żeglugi.

Przez głębokość nawigacyjną aktualną (H_{na}) rozumie się głębokość nawigacyjną (H_n) odniesioną do aktualnego poziomu wody.

Dopuszczalne zanurzenie statku (T_a) na akwenach żeglugowych określa się, odejmując od głębokości nawigacyjnej aktualnej (H_{na}) wymagany w danych warunkach żeglugowych sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku (R_t):

$$T_a = H_{na} - R_t \quad (3)$$

gdzie:

- T_a – dopuszczalne zanurzenie statku [m],
- H_{na} – głębokość nawigacyjna aktualna [m],
- R_t – sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku charakterystycznego, umożliwiający w miejscu usytuowania danej budowli morskiej pływalność tego statku w najniekorzystniejszych warunkach hydrologicznych [m].

Kolejna zależność przedstawia relację zachodzącą pomiędzy największym dopuszczalnym zanurzeniem kadłuba statku (T_c) a głębokością techniczną (H_t):

$$H_t = T_c + R_t \quad (4)$$

gdzie:

- T_c – jest największym dopuszczalnym zanurzeniem kadłuba, równomiernie załadowanego statku [m],
- R_t – sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku charakterystycznego, umożliwiający w miejscu usytuowania danej budowli morskiej pływalność tego statku w najniekorzystniejszych warunkach hydrologicznych [m].

Sumaryczny zapas głębokości wody, o którym mowa we wzorach (3) i (4), nie może być mniejszy od minimalnego sumarycznego zapasu głębokości wody (R_t^{\min}), określonego w metrach według zależności:

$$R_t^{\min} \geq \eta \cdot T_c \quad (5)$$

gdzie:

- T_c – największe dopuszczalne zanurzenie kadłuba równomiernie załadowanego statku [m],
- η – współczynnik bezwymiarowy, zależny od rodzaju akwenu lub toru wodnego, określony w tab. 1.

Tabela 1. Wartości bezwymiarowego współczynnika η w zależności od rodzaju akwenu lub toru wodnego [10]

Table 1. Values of not dimensional coefficient η , with respect to the type of area or fairway [10]

Rodzaj akwenu lub toru wodnego	η
Akweny portowe osłonięte od falowania	0,05
Wewnętrzne tory wodne, obrotnice statków, baseny i kanały portowe, na których jednostki pływające korzystają z holowników	0,05
Zewnętrzne tory podejściowe z morza do portów i przystani morskich	0,10
Otwarte akweny morskie	0,15

W przypadku badanego akwenu minimalny sumaryczny zapas głębokości wody R_t^{\min} obliczony dla różnych typów statków przedstawiono w tabeli 2.

Przyjmując głębokość nawigacyjną akwenu przy przeciętnych warunkach nawigacyjnych $H_{na} = 14,3$ m oraz gabaryty jednostek największych, jakie mogą wpłynąć na Bałtyk przez cieśniny duńskie (Wielki Bełt, $H_{na} = 17,0$ m, $T = 15$ m), minimalny zapas głębokości wody pod stępką powinien wynosić na akwenach otwartych nie mniej niż 2,25 m oraz na zewnętrznych torach podejściowych nie mniej niż 1,5 m. W badanym przypadku kryterium bezpieczeństwa nawigacyjnego głębokości dla jednostek największych (np. masowca o zanurzeniu $T = 15$ m) nie zostanie więc spełnione, bowiem: $H_t = 14,3$ m – 1,5 m = 12,8 m i jest mniejsze od maksymalnego zanurzenia jednostki $T_a = 15$ m.

W przypadku warunków ekstremalnych (duże falowanie) sytuacja byłaby znacznie gorsza, w rozważaniach należałoby bowiem zredukować głębokość nawigacyjną akwenu do $H_{n1} = 13,8$ m oraz zwiększyć maksymalne zanurzenie statku T_a wskutek oddziaływania fali (przechyły boczne, wzdłużne itp.). Dla przykładu sam przechył boczny do $\pm 5^\circ$ statku o szerokości $B = 42$ m i zanurzeniu początkowym $T_{a0} = 15$ m może zwiększyć nam maksymalne zanurzenie statku o 1,77 m, czyli do wartości $T_{a1} = 16,77$ m.

Tabela 2. Minimalny sumaryczny wymagany zapas głębokości wody R_t^{\min} obliczony dla różnych typów statków dla akwenu spłyconego (ryny) na północnym torze podejściowym od pozycji gazociągu Nord Stream do portu Świnoujście (opracowanie własne)

Table 2. Minimum value of the total reserve of water depth R_t^{\min} established for the different type of ships in shallow water and guttery on the northern fairway to port of Swinoujście LNG Terminal from the position of Nord Stream gas pipeline (prepared by author)

Typ jednostki	Zanurzenie T_c [m]	Minimalny wymagany zapas głębokości R_t^{\min} [m]	Minimalna wymagana głębokość toru podejściowego H_t [m]
Masowiec ($L = 270$ m, $B = 42$ m, $T = 15$ m, $C_B = 0,85$)	15,00	1,50–2,25	16,5
Kontenerowiec ($L = 275$ m, $B = 32$ m, $T = 13,2$ m, $C_B = 0,70$)	13,20	1,32–1,98	14,52
Prom pasażerski ($L = 140$ m, $B = 16$ m, $T = 7,5$ m, $C_B = 0,65$)	7,50	0,75–1,13	8,25
LNG ($L = 280$ m, $B = 43$ m, $T = 12,3$ m, $C_B = 0,746$)	12,30	1,30–1,85	13,60

Wzrost zanurzenia statku wywołany przechyłem bocznym możemy obliczyć z zależności:

$$\Delta T_7^{II} = T_M [\cos(\theta) - 1] + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

gdzie:

- ΔT_7^{II} – zmiana zanurzenia wywołana przechyłem bocznym statku [m],
- T_M – średnie zanurzenie statku [m],
- θ – kąt bocznego przechyłu statku [$^\circ$],
- B – szerokość statku [m].

Wzrost zanurzenia statku wywołany oscylacjami wzdłużnymi możemy obliczyć z zależności:

$$\Delta T_7^I = \frac{1}{2} \cdot L_w \cdot \text{tg}(\Psi) \approx \frac{1}{2} \cdot L_{pp} \cdot \text{tg}(\Psi) \quad (7)$$

gdzie:

- ΔT_7^I – zmiana zanurzenia wywołana przechyłem wzdłużnym statku [m],
- L_w – długość statku w obrębie wodnicy pływania [m],

L_{pp} – długość statku pomiędzy pionami [m],
 Ψ – kąt przechyłu wzdłużnego statku [°].

Przy dużym oddziaływaniu fali na kadłub statku występują zarówno przechyły boczne, jak i wzdłużne. W praktyce jednak do określenia maksymalnego zanurzenia statku stosuje się jedynie większą wartość poprawek ΔT^I_7 lub ΔT^{II}_7 określonych ze wzorów (6) i (7).

Reasumując powyższe, na podstawie wzorów (4) i (5) można określić wzór uproszczony na największe dopuszczalne zanurzenie statku T_c , który mógłby bezpiecznie nawigować w akwenu o głębokości technicznej H_t :

$$T_c \leq \frac{H_t}{1 + \eta} \quad (8)$$

gdzie:

T_c – największe dopuszczalne zanurzenie kadłuba równomiernie załadowanego statku [m],
 η – współczynnik bezwymiarowy, zależny od rodzaju akwenu lub toru wodnego, określony w tabeli 1,
 H_t – głębokość techniczna [m].

Zgodnie z zależnością (8) największe dopuszczalne zanurzenie statku T_c , który mógłby bezpiecznie nawigować w obrębie badanego północnego toru wodnego prowadzącego od pozycji gazociągu Nord Stream do portu Świnoujście (akwen otwarty, $\eta = 0,15$), nie powinno przekroczyć wartości $T_{c1} = 12,43 \text{ m}$ dla $H_t = 14,3 \text{ m}$ (warunki przeciętne) oraz $T_{c2} = 12 \text{ m}$ dla $H_t = 13,8 \text{ m}$ (morze wzburzone falowaniem).

Przy określaniu głębokości nawigacyjnej akwenu posłużono się mapą morską Biura Hydrograficznego Marynarki Wojennej w Gdyni (Mapa Polska 154, INT1294) oraz wytycznymi związanymi z parametrami planowanych torów wodnych przedstawionych przez Zarząd Morskich Portów Szczecin i Świnoujście S.A na konferencji naukowej w Warszawie 4 kwietnia 2006 r. dotyczącej budowy terminalu LNG w porcie Świnoujście.

Minimalna głębokość akwenu odczytana z mapy nawigacyjnej w obrębie badanego toru wodnego północnego określona względem średniego poziomu morza wynosi 13,5 m. Parametry toru wodnego przyjęte na konferencji warszawskiej związanej z budową terminalu LNG w porcie Świnoujście określają minimalną głębokość toru jako 14,3 m. Zgodnie z zależnością (2) głębokości te powinny być traktowane jako głębokości dopuszczalne akwenu (H_{dop}) obciążone błędem na tzw. dopuszczalne przegłębienie dna.

Dla akwenów otwartych, takich jak badany tor wodny północny, w których dno nie jest trwale umocnione, w trakcie całego okresu użytkowania budowli morskiej głębokość dopuszczalną H_{dop} stanowi wyrażona w metrach suma:

$$H_{dop} = H_t + R_p \quad (9)$$

gdzie:

H_{dop} – głębokość dopuszczalna budowli morskich [m],

H_t – głębokość techniczna budowli morskiej, określona zgodnie z wyżej podanymi zasadami,

R_p – rezerwa na dopuszczalne przegłębienie dna w rejonie, w którym dno nie jest trwale umocnione, w trakcie całego okresu użytkowania budowli morskiej.

Zgodnie z Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 czerwca 1998 r. [10] wartość rezerwy na dopuszczalne przegłębienie dna nie może być w tym wypadku mniejsza niż $R_p = 1,0$ m. Przy czym dla budowli morskich, dla których zrezygnowano z wykonania trwałego umocnienia dna, oraz dla budowli morskich usytuowanych w rejonie:

- łuku wklęsłego ujść rzek lub cieśnin do morza,
- przewężeń koryta akwenu,
- występowania dużego falowania lub znacznych prądów wody przy dnie akwenu, wartość rezerwy R_p przyjmuje się nie mniejszą niż 1,5 m.

A zatem zgodnie z zależnościami (3), (4) i (6) do dalszych rozważań jako głębokość nawigacyjną akwenu przyjmujemy wartość $H_{n1} = 13,3$ m podczas normalnych warunków nawigacyjnych ($14,3$ m – $1,0$ m = $13,3$ m) oraz $H_{n2} = 12,8$ m ($14,3$ m – $1,5$ m = $12,8$ m) dla warunków ekstremalnych (duże falowanie, silne prądy wody przy dnie akwenu).

Powyższe rozważania dotyczące faktycznej wartości głębokości nawigacyjnej badanego akwenu potwierdziła opinia pracowników Urzędu Morskiego w Gdyni.

Kontrola głębokości akwenu wykonana przez pracowników Urzędu Morskiego w Szczecinie w latach 2006–2010 potwierdziła występowanie w bliskim sąsiedztwie lub w obrębie badanego akwenu odosobnionych niebezpieczeństw nawigacyjnych w postaci głazów, łańcuch piachu, wraków morskich i innych wypłaceń umiejscowionych na głębokościach od $14,3$ m od aktualnego poziomu morza podczas pomiarów ($\pm 0,5$ m).

Polskie obszary morskie traktuje się jako morze bezpływowe. Głębokość wody mierzy się na nich od poziomu zera mapy, który dla badanego obszaru morskiego określony jest względem średniego poziomu morza SW ($\pm 0,5$ m). Zgodnie z wieloletnimi obserwacjami prowadzonymi przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdyni w badanym akwenu można spodziewać się znacznych zmian poziomu morza względem poziomu wody średniej (SW = 500 mm) przekraczających wartość $\Delta H_n = R_p = 1$ m. Zmiany te są szczególnie widoczne w okresie jesienno-zimowym. Dla przykładu w roku 2001 różnice pomiędzy ekstremalnymi wartościami poziomów wody wysokiej (WW) i wody niskiej (NW) na wybrzeżu polskim wahały się od 146 cm w Ustce, 150 cm w Łebie do 206 cm w Świnoujściu [4]. W skali wielolecia (lata 1971–2000) obserwowano wodę wysoką (WW) wyższą od poziomu wody średniej (SW) o ponad 130 cm w Ustce i 140 cm w Łebie oraz wodę niską (NW) niższą od wody średniej (SW) o 54 cm w Łebie i 60 cm w Ustce.

Porównanie ekstremalnych poziomów wody zanotowanych w 2001 r. wzdłuż polskiego wybrzeża Bałtyku z wartościami ekstremalnymi z wielolecia 1971–2000 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skrajne i średnie stany wody (cm) przy polskim wybrzeżu Bałtyku w 2001 roku (P.Z. wodowskazu = -508 cm, Kr.tj. -500 cm N.N.55) [4]

Table 3. Extreme and average sea level near Polish coast of the Baltic Sea in 2001, presented in centimetres. (P.Z. = -508 cm, Kr.tj. -500 cm N.N.55) [4]

Miejscowość		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Świnoujście	WW	545	566	582	555	540	552	536	552	570	527	599	588	599
	SW	493	499	495	493	497	513	504	510	521	499	530	510	505
	NW	443	431	439	455	475	494	478	477	492	446	421	393	393
Kołobrzeg	WW	560	566	546	558	531	560	527	554	588	522	610	590	610
	SW	492	500	491	491	496	512	502	507	520	497	537	511	505
	NW	436	434	440	453	475	492	475	484	486	462	456	427	427
Ustka	WW	547	550	527	552	526	553	523	542	565	527	606	582	606
	SW	494	496	489	488	492	511	500	508	519	500	540	511	504
	NW	440	440	445	456	471	494	477	484	488	468	478	453	440
Łeba	WW	548	554	531	556	527	548	527	533	562	530	596	574	596
	SW	498	502	494	491	496	515	505	513	522	502	543	516	508
	NW	446	451	449	460	480	498	485	483	489	473	508	488	446
Władysławowo	WW	552	563	525	555	531	547	526	536	558	536	608	581	608
	SW	498	502	492	491	497	514	505	513	521	504	543	515	508
	NW	439	452	446	463	475	498	479	485	483	474	512	476	439

2. METODA UPROSZCZONA 2 NA OKREŚLENIE MAKSYMALNEGO ZANURZENIA STATKU MOGĄCEGO BEZPIECZNIE NAWIGOWAĆ W AKWENIE SPŁYCONYM PRZY WYKORZYSTANIU PRZESTRZENNEGO MODELU DOMENY STATKU

Z definicji domeny [12] (z jej cechy wyłączności) wynika, że statek będzie bezpieczny, dopóki w obrębie swojej domeny będzie on jedynym obiektem ruchomym lub stałym, stanowiącym (z nawigacyjnego punktu widzenia) jedyne źródło mogące generować tam zagrożenie (w naszych rozważaniach pomija się możliwość zaistnienia innych wypadków morskich niż te, które związane są bezpośrednio z ruchem statku i jego nawigacją).

W odniesieniu do płaszczyzny pionowej lokalnego (statkowego) układu odniesienia, liczonej w dół od środka tego układu, można jednoznacznie stwierdzić, że statek pozostanie bezpieczny, dopóki wartość głębokości jego domeny G_D będzie mniejsza od rzeczywistej głębokości akwenu h . A zatem składową R_{NG} ryzyka nawigacyjnego R_N (nazwijmy ją składową pionową ryzyka nawigacyjnego od

zachowania rezerwy głębokości, lub krócej – ryzykiem od zachowania głębokości) można będzie przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$R_{NG} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } h > G_D \\ 0 \div 1 & \text{gdy } T_{\max} < h \leq G_D \\ 1 & \text{gdy } h \leq T_{\max} \end{cases} \quad [-] \quad (10)$$

Z definicji ryzyka nawigacyjnego [14] wiemy, że jeżeli wartość ryzyka pochodzącego od czynników A_i (obiektów) wynosi 0, oznacza to pełne bezpieczeństwo nawigacyjne względem tych czynników (obiektów). Zatem zgodnie z zależnością (10) warunek $h > G_D$ może być definiowany jako gwarancja bezpiecznej żeglugi statku względem obiektów podwodnych umieszczonych na głębokościach mniejszej od h . Jeżeli głębokość akwenu h okazałaby się jednak mniejsza lub równa zanurzeniu statku ($h \leq T_{\max}$), wówczas zgodnie z zależnością (10) realizacja podróży morskiej może okazać się niemożliwa² lub wysoce niebezpieczna (ryzykowna). Zaistnienie powyższej sytuacji sprawi zatem, że wartość ryzyka nawigacyjnego R_{NG} wzrośnie do jedności, a to można interpretować jako pewne (stuprocentowe) prawdopodobieństwo zaistnienia awarii morskiej (wypadku) wskutek uderzenia (kontaktu) z podwodną przeszkodą nawigacyjną umieszczoną na głębokości mniejszej lub równej h .

Po przeprowadzeniu dalszej analizy logicznej dla przedstawionej powyżej sytuacji można wysunąć wniosek, że dla głębokości h ograniczonych przedziałem: $T_{\max} < h \leq G_D$ ryzyko nawigacyjne R_{NG} będzie przybierać wartości pośrednie z przedziału $R_{NG} \in \langle 0,1 \rangle$, co jasno wyraża część środkowa zależności (10). Wzór ogólny na wartość ryzyka R_{NG} dla argumentów h z tak opisanego przedziału ($T_{\max} < h \leq G_D$) można wyrazić wzorem:

$$R_{NG} = \frac{G_D - h}{G_D - T_{\max}} \quad [-] \quad (11)$$

Wyznaczenie głębokości G_D domeny statku w praktyce sprowadza się do określenia pionowej rezerwy nawigacyjnej statku R_G . Mając jednak na względzie informacje zawarte w pracy [12], wzór uproszczony na głębokość domeny statku przybierze następującą postać:

$$G_D = T_{\max} + R_G = T_{\max} + \sum_{i=1}^{35} R_i \quad [\text{m}] \quad (12)$$

gdzie:

G_D – głębokość domeny statku [m],

T_{\max} – maksymalne zanurzenie statku [m],

R_i – składowe pionowej rezerwy nawigacyjnej statku według opisu zamieszczonego w pracy [12] [m],

² W rozważaniach pomija się możliwość zmniejszenia zanurzenia statku np. przez jego odbalastowanie.

lub w wersji bardziej rozbudowanej:

$$G_D = \left(T + \sum_{i=1}^{11} R_i + \sum_{i=12}^{18} R_i + \sum_{i=19}^{24} R_i \right) + \sum_{i=25}^{26} R_i + \sum_{i=27}^{35} R_i = \quad [m] \quad (13)$$

$$= R_{ThH}(T, TA, RD) + R_{FW}(v, L, B, h_f, q) + R_{z,t_d}(v, B, L, T, C_B, b, h)$$

gdzie:

R_{ThH} – funkcja określająca części składowe $R_1 \div R_{24}$ nawigacyjnej rezerwy głębokości (składowe statyczne dotyczące określenia zanurzenia statku T , głębokości akwenu h oraz pochodzące od działania czynników hydrometeorologicznych H (R_H)) zależna od zanurzenia statku T [m], typu akwenu pływania TA oraz rodzaju dna RD [m],

R_{FW} – funkcja określająca części składowe $R_{25} \div R_{26}$ nawigacyjnej rezerwy głębokości, określająca zmianę pionowej rezerwy nawigacyjnej statku na skutek dynamicznego działania fali F i wiatru W , zależna od parametrów statku: v, B, L, C_B oraz parametrów fali: λ, h_f i q [m],

R_{z,t_d} – funkcja określająca części składowe $R_{27} \div R_{35}$ nawigacyjnej rezerwy głębokości określająca osiadanie statku z oraz dynamiczne przegłębienie t_d , zależna głównie od parametrów statku: v, B, L, T, C_B oraz parametrów akwenu: b, h [m],

$|t|$ – wartość bezwzględna przegłębienia statku (trymu): $|t| = |T_R - T_D| \approx |T_{\max} - T_{\min}|$ [m].

Dokładna znajomość wyszczególnionych powyżej czynników R_i pionowej rezerwy nawigacyjnej statku R_G umożliwi dokładne oszacowanie pionowych parametrów domeny. Ponieważ obecnie nie wszystkie dane są osiągalne (dostępne) podczas normalnej eksploatacji statku, wyrażenie (12) zredukujemy więc do postaci wzorów uproszczonych zawierających najbardziej istotne parametry funkcji G_D . Mając jednak na względzie aspekty natury bezpieczeństwa, przyjęto, że oszacowane wzory uproszczone powinny zawyżać nieco wartości parametrów G_D względem ich wartości rzeczywistych. W toku prowadzonych badań [12] postanowiono również wyodrębnić statyczną rezerwę głębokości ($n \cdot T_{\max}$), osiadanie statku ($k \cdot z_{\max}$) oraz dynamiczne działanie wiatru i fali ($0,66 \cdot m \cdot h_f$).

Przyjmując ponadto zalecaną przez konstruktorów kadłuba i armatorów statków metodę Barrassa na osiadanie statku w ruchu oraz uwzględniając aktualne wartości zakłóceń zewnętrznych, ostrzeżenia nawigacyjne oraz inne dane dostępne na statku podczas normalnej jego eksploatacji, wzory uproszczone na głębokość G_D domeny statku przybiorą następującą postać:

- uwzględniając metodę dokładną Barrassa na osiadanie statku w ruchu (z ograniczeniem metody: $0,5 \leq C_B \leq 0,9$; $0 \leq t/L \leq 0,005$; $1,1 \leq h/T \leq 1,4$):

$$G_D = n \cdot T_{\max} + 0,66 \cdot m \cdot h_f + k \cdot \left(\frac{1}{30} \cdot C_B \cdot \left(\frac{BT}{bh - BT} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot v_d^{2,08} \right) \quad [m] \quad (14)$$

- uwzględniając metodę uproszczoną Barrassa na osiadanie statku w ruchu w akwenu płytkim (z ograniczeniem metody: $1,1 \leq h/T \leq 1,2$):

$$G_D = n \cdot T_{\max} + 0,66 \cdot m \cdot h_f + k \cdot (0,01 \cdot C_B \cdot v^2) \quad [m] \quad (15)$$

gdzie:

- G_D – głębokość domeny liczona od linii zanurzenia statku w dół [m],
 v_d – prędkość statku nad dnem obliczona ze wzoru, „odczytana z mapy” lub uzyskana ze wskazań takich przyrządów nawigacyjnych jak log dopplerowski lub systemy nawigacyjne dużej dokładności np. DARPS, DGPS [w],
 B, L, T, C_B – parametry statku: szerokość B [m], długość L [m], zanurzenie T [m], współczynnik pełnotliwości kadłuba C_B ,
 b, h, h_f – parametry akwenu: głębokość h [m], szerokość b [m], wysokość fali [m];
 n – współczynnik liczbowy ($1,1 \leq n \leq 1,3$) zależny od typu akwenu i rodzaju dna morskiego decydujący o wartości składowej statycznej pionowej rezerwy nawigacyjnej statku,
 m – współczynnik liczbowy ($0,5 \leq m \leq 1,5$) zależny od parametrów statku: v , B, L, C_B oraz fali: λ, h_f i q ,
 k – współczynnik liczbowy ($1,0 \leq k \leq 2,0$) zależny od parametrów statku i typu akwenu oraz sytuacji nawigacyjnej w jakiej znalazł się statek podczas żeglugi (np. wyprzedzanie, mijanie, żegluga nad nierównościami dennymi, żegluga w lodach, mule). Współczynnik ten wynika z rozbieżności, jakie mogą powstać na skutek błędnie ocenionego osiadania statku (przyjętej metody obliczeń).

Tabela 4. Wartości liczbowe współczynnika n funkcji zależnej od typu akwenu i rodzaju dna (oprac. własne)

Table 4. Numeral coefficient (factor n) which is dependent on the type of sea areas and sea bottoms, and determines ship's static vertical navigational reserve (prepared by author)

n	Typ akwenu (TA)	Rodzaj dna (RD)
1,1	akwenu portowe	dno muliste
1,15	redy, podejścia do portów	dno piaszczyste
>1,2	akwenu odslonięte	dno skaliste

Tabela 5. Wartości liczbowe współczynnika m w funkcji $R_{FW} = f(m, L, B, \lambda, h_f, q)$ zależnej od parametrów statku i fali (oprac. własne)

Table 5. Numeral coefficient (factor m) of function $R_{FW} = f(m, v, L, B, \lambda, h_f, q)$ dependent on the ship's particulars: v, L, B and waves characteristics: λ, h_f and q (prepared by author)

m	Dla fali z dziobu lub rufy ($q \approx 000^\circ$ lub 180°)	Dla fali z burty ($q \approx 090^\circ$)
0,500	gdy: $v = 0$ a $L > \lambda$	gdy: $v = 0$, a $B > 0,5 \cdot \lambda$
1,000	gdy: $v \geq 10 w$, a $L > \lambda$	gdy: $v \geq 10 w$, a $B > 0,5 \cdot \lambda$
1,125	gdy: $v < 10 w$, a $L < 0,5 \cdot \lambda$	gdy: $v < 10 w$, a $B < 0,5 \cdot \lambda$
$\geq 1,250$	gdy: $v \geq 10 w$, a $L < 0,5 \cdot \lambda$	gdy: $v \geq 10 w$, a $B < 0,5 \cdot \lambda$

Tabela 6. Wartości liczbowe współczynnika k funkcji $R_{z,td} = f(k, v, B, L, T, C_B, h, b)$ zależnej od parametrów statku i akwenu (oprac. własne)

Table 6. Numeral coefficient (factor k) of function $R_{z,tdW} = f(k, v, B, L, T, C_B, h, b)$ dependent on the ship's particulars: v, B, L, T, C_B and sea area characteristics: b and h (prepared by author)

k	Parametry statku	Parametry akwenu
1,0	zgodne z przyjętą metodą obliczeń, lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. statki smuklejsze i wolniejsze od statków przyjętych w metodzie obliczeń	zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. parametry akwenu większe od polecanych w metodzie (b, h, S)
1,5	niezgodne z przyjętą metodą obliczeń np. statki bardziej pełnotliwe od zalecanych w metodzie	zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. parametry akwenu większe od polecanych w metodzie (b, h, S)
	zgodne z przyjętą metodą obliczeń, lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. statki smuklejsze i wolniejsze od statków przyjętych w metodzie obliczeń	niezgodne z przyjętą metodą obliczeń (parametry akwenu mniejsze od zalecanych), żegluga poza osią kanału, wyprzedzanie lub mijanie w kanale
2,0	niezgodne z przyjętą metodą obliczeń, np. statki bardziej pełnotliwe od zalecanych w metodzie	niezgodne z przyjętą metodą obliczeń (parametry akwenu mniejsze od zalecanych), żegluga poza osią kanału, wyprzedzanie lub mijanie w kanale

Zakładając, że ryzyko nawigacyjne określone względem głębokości R_{NG} przyjmować będzie nadal graniczną wartość zero, gdy głębokość domeny statku G_D równa będzie głębokości nawigacyjnej akwenu H_N , wówczas przekształcając wzory (14) i (15) względem niewiadomej T , otrzymamy wzory ogólne na pożądaną wartość maksymalnego zanurzenia statku T_{max} , który mógłby jeszcze bezpiecznie nawigować w akwenu.

Dla przykładu wykorzystując wzór uproszczony (15) słuszny dla płytkowozia (z ograniczeniem metody: $1,1 \leq h/T \leq 1,2$), maksymalne dopuszczalne zanurzenie statku w akwenu spłyconym można obliczyć z zależności:

$$T_{max} = \frac{H_N - 0,66 \cdot m \cdot h_f - k \cdot (0,01 \cdot C_B \cdot v^2)}{n} \quad [\text{m}] \quad (16)$$

gdzie:

- T_{max} – maksymalne zanurzenie statku [m],
- H_N – głębokość nawigacyjna akwenu [m],
- h_f – wysokość fali [m],
- C_B – współczynnik pełnotliwości kadłuba [-],
- v_d – prędkość statku nad dnem [w],
- n – współczynnik liczbowy ($1,1 \leq n \leq 1,3$) zależny od typu akwenu i rodzaju dna morskiego decydujący o wartości składowej statycznej pionowej rezerwy nawigacyjnej statku (tab. 4),
- m – współczynnik liczbowy ($0,5 \leq m \leq 1,5$) zależny od parametrów statku: v, B, L, C_B oraz parametrów fali: λ, h_f i q określany z tabeli 5,
- k – współczynnik liczbowy ($1,0 \leq k \leq 2,0$) zależny od parametrów statku i typu akwenu oraz sytuacji nawigacyjnej w jakiej znalazł się statek podczas żeglugi (np. wyprzedzanie, mijanie, żegluga nad nierównościami dennymi, żegluga w lodach, mule). Współczynnik ten wynika z rozbieżności, jakie mogą powstać na skutek błędnie ocenionego osiadania statku (przyjętej metody obliczeń).

Tabela 7. Przykładowe wartości maksymalnego zanurzenia statku obliczone według zależności (16) z ograniczeniem metody $1,1 \leq h/T \leq 1,2$ dla warunków przeciętnych ($h_f = 1$ m, $\lambda = 4$ m, $\Delta h = \pm 0,3$ m, $H_{N1} = 14$ m) i ekstremalnych ($h_f = 3$ m, $\lambda = 80$ m, $\Delta h = \pm 0,6$ m, $H_{N2} = 13,7$ m) oraz różnych typów statków (współczynnik pełnotliwości kadłuba) i prędkości przejścia. W obliczeniach przyjęto następujące wartości współczynników: $n = 1,2$ (tab. 4), $m = 1$ (tab. 5) oraz $k = 1$ (tab. 6) (oprac. własne)

Table 7. Maximum ship's draught in shallow water estimated by the means of formulae (16) with limitation: $1,1 \leq h/T \leq 1,2$, accounted for the average ($h_f = 1$ m, $\lambda = 40$ m, $\Delta h = \pm 0,30$ m, $H_{N1} = 14,00$ m) and extreme ($h_f = 3$ m, $\lambda = 80$ m, $\Delta h = \pm 0,60$ m, $H_{N2} = 13,70$ m) weather conditions, for different types of ship (her block coefficient C_B) and different ship's speed v . Numeral coefficients (factors): $n = 1,20$ (see table 4), $m = 1$ (see table 5) and $k = 1,0$ (see table 6) (prepared by author)

Współczynnik pełnotliwości kadłuba C_B	Prędkość statku w węzłach [w]											
	4 w		6 w		8 w		10 w		12 w		14 w	
	średnie	ekstrem.	średnie	ekstrem.	średnie	ekstrem.	średnie	ekstrem.	średnie	ekstrem.	średnie	ekstrem.
0,5	11,05	9,70	10,97	9,62	10,85	9,50	10,70	9,35	10,52	9,17	10,30	8,95
0,6	11,03	9,69	10,94	9,59	10,80	9,45	10,62	9,27	10,40	9,05	10,14	8,79
0,7	11,02	9,67	10,91	9,56	10,74	9,39	10,53	9,18	10,28	8,93	9,97	8,62
0,8	11,01	9,66	10,88	9,53	10,69	9,34	10,45	9,10	10,16	8,81	9,81	8,46
0,9	11,00	9,65	10,85	9,50	10,64	9,29	10,37	9,02	10,04	8,69	9,65	8,30
1,0	10,98	9,63	10,82	9,47	10,58	9,23	10,28	8,93	9,92	8,57	9,48	8,13

Wyniki obliczeń dokonane dla północnego toru wodnego prowadzącego od pozycji gazociągu Nord Stream do portu Świnoujście w funkcji prędkości statku oraz współczynnika pełnotliwości jego kadłuba przedstawiono w tabeli 7. W obliczeniach przyjęto głębokość domeny G_D równoznaczną z nawigacyjną bezpieczną głębokością akwenu H_N . Dla warunków przeciętnych przyjęto $H_{N1} = 14$ m, co wynika z poprawienia głębokości wody odczytanej z mapy $H_1 = 14,3$ m określonej względem poziomu wody średniej (SW) o możliwe średnie oscylacje lustra wody $\Delta h = \pm 0,3$ m ($14,3$ m $-$ $0,3$ m $=$ 14 m). Dla warunków ekstremalnych przyjęto oscylacje $\Delta h = \pm 0,6$ m oraz głębokość nawigacyjną akwenu $H_{N2} = 13,7$ m.

Dla uproszczenia w obliczeniach przyjęto falę nadchodzącą z dziobu lub rufy statku o wysokości do 1 m i długości fali do 150 m dla warunków przeciętnych oraz falę o wysokości do 3 m i długości około 160 m dla warunków ekstremalnych. Bezwymiarowe współczynniki odczytane z tabel 5 i 6 przyjęto według zasady: $m = 1$ i $k = 1$; współczynnik zaś n określony z tabeli 4 dla akwenu odsłoniętego z twardym dnem piaszczysto-skalistym charakterystycznym dla badanego akwenu przyjęto jako 1,2. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 7.

LITERATURA

1. Blomgren S., Larson M., Hanson H., *Numerical Modeling of the Wave Climate in the Southern Baltic Sea*, Journal of Coastal Research, CERF, Spring 2001.
2. *Dynamics of Coastal Waters and their modelling*, J. Sundermann (ed.), Institut für Meereskunde, Hamburg 2005.

3. Gućma S., Jagniszczak I., *Nawigacja morska dla kapitanów*, Foka, Szczecin 1997.
4. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, *Warunki środowiskowe Polskiej Strefy Południowego Bałtyku w 2001 roku*, Gdynia 2004.
5. *Intersea I, Intrasea II*, materiały Urzędu Morskiego w Gdyni, Gdynia 2008.
6. Joseph M., *Assesing the Precision of Depth Data*, International Hydrographic Review, LXVII Monaco, July 1991.
7. Jurdziński M., *Planowanie nawigacji w żegludze przybrzeżnej*, Fundacja Rozwoju WSM w Gdyni, Gdynia 1998.
8. Nowicki A., *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi*, Trademar, Gdynia 1999.
9. Paszkiewicz C., *Falowanie wiatrowe Morza Bałtyckiego*, rozprawa habilitacyjna, Polska Akademia Nauk, Komitet Badań Morza, PAN, Warszawa 1989.
10. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 czerwca 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie.
11. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 r. w sprawie dróg wodnych.
12. Rutkowski G., *Modelowanie domeny statku w procesie manewrowania w ograniczonych akwenach*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2000.
13. Rutkowski G., *Zastosowanie modelu domeny do oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego statków poruszających się w akwenach ograniczonych*, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe „T”, Warszawa 2001.
14. Rutkowski G., Królikowski A., *Ocena głębokości toru podejściowego na południe od Ławicy Słupskiej w aspekcie obsługi jednostek o maksymalnych gabarytach – metoda rozbudowana*, Zeszyty Naukowe AMW, 2010, nr 1 (180).

SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING MAXIMUM SHIP'S DRAUGHT WHEN NAVIGATING IN SHALLOW WATER ON THE NORTHERN FAIRWAY TO PORT OF ŚWINOUJŚCIE FROM THE POSITION OF NORD STREAM PIPELINE TO LNG TERMINAL IN THE ASPECT OF THE VESSELS WITH MAXIMUM DIMENSIONS AND DRAUGHT

Summary

This paper considers analysis of maximum draught of a merchant vessel, which can maintain safety of navigation in different exterior condition (average and extreme) on shallow water on the northern fairway to port of Świnoujście from the position of NORD STREAM pipeline to LNG Terminal and keep required under keel clearance, i.e. navigational reserve of depth. To depict maximum draught of a vessel we use practical method which incorporates the risk of navigational and three-dimensional model of ship's domain. Results are compared with the guidelines published by the Decree of Minister of Transport and Maritime Economy from 01.06.1998 about technical conditions, which should be met by hydro mechanical sea structures, which operate vessels with the given particulars.