

## ANALIZA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA DNA POLSKIEJ CZĘŚCI MORZA BAŁTYCKIEGO

### ENGINEERING-GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE POLISH BALTIC SEA BOTTOM

LESZEK JÓZEF KASZUBOWSKI<sup>1</sup>, RYSZARD COUFAL<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Autorzy przedstawiają analizę geologiczno-inżynierską dna polskiej części Morza Bałtyckiego opartą na szczegółowych studiach map geologicznych dna Bałtyku w skali 1:200 000, wynikach szczegółowych badań geologiczno-inżynierskich wybranych fragmentów dna morskiego i badań geologiczno-inżynierskich strefy brzegowej Pomorza Zachodniego. Na tej podstawie autorzy przedstawiają jednostki geologiczno-inżynierskie dna polskiej części Morza Bałtyckiego. W analizie pod uwagę wzięto określone kryteria geologiczne, takie jak rodzaj, geneza i wiek osadów, a w spośród kryteriów geotechnicznych następujące parametry: stopień zagęszczenia ( $I_D$ ), stopień plastyczności ( $I_L$ ), kąt tarcia wewnętrznego ( $\phi$ ), kohezja ( $c$ ), wytrzymałość na ściskanie ( $R_c$ ), wytrzymałość na ścinanie ( $\tau$ ) oraz edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej ( $M_o$ ). Przeanalizowano również ukształtowanie dna morskiego i wyszczególniono następujące typy morfologiczne dna wraz z określonymi sygnaturami liczbowymi: 1 – dno płaskie, 2 – dno mało pochylone, 3 – dno pochylone, 4 – dno bardzo pochylone, 5 – dno mało strome, 6 – dno strome i 7 – dno bardzo strome.

**Słowa kluczowe:** analiza geologiczno-inżynierska, jednostki geologiczno-inżynierskie dna polskiej części Morza Bałtyckiego, typy morfologiczne dna morskiego.

**Abstract.** The authors present the engineering-geological analysis of the Polish Baltic Sea bottom in the light of the detailed studies of geological maps of the Baltic Sea bottom in scale of 1:200 000, also based on the results of detailed engineering-geological research of some fragments of the sea bottom and engineering-geological research of the coastal zone in the area of Western Pomerania. On this base, the authors present the engineering-geological units of the Polish Baltic Sea bottom. The authors present the engineering-geological units of the Polish Baltic Sea bottom. Certain geological criteria such as index of density ( $I_D$ ), index of liquidity ( $I_L$ ), angle of internal friction ( $\phi$ ), cohesion ( $c$ ), resistance of compression ( $R_c$ ), resistance of shear ( $\tau$ ), primary edometric compressibility module ( $M_o$ ). The relief of the sea bottom was also analysed and the following morphological types were distinguished: flat bottom, little sloping bottom, sloping bottom, very sloping bottom, little steep bottom, steep bottom and very steep bottom.

**Key words:** engineering-geological analysis, engineering-geological units of the Polish Baltic Sea bottom, morphological types of the sea bottom.

### WSTĘP

Autorzy przedstawiają analizę geologiczno-inżynierską dna polskiej części Morza Bałtyckiego opartą na szczegółowej analizie map geologicznych dna Morza Bałtyckiego, geolo-

gicznej interpretacji materiałów sejsmoakustycznych, szczegółowych badaniach geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych wybranych fragmentów dna morskiego i strefy

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Geotechniki, al. Piastów 50, 70-310 Szczecin; kaszubowski@zut.edu.pl; coufal@zut.edu.pl

brzegowej. Dla obszaru polskiej części Bałtyku wszystkie arkusze geologicznej mapy dna w skali 1:200 000 wykonano w Oddziale Geologii Morza Państwowego Instytutu Geologicznego. Arkusze te zawierają dodatkowo kilka mapek specjalistycznych, takich jak mapa osadów na głębokości 1 m poniżej dna Bałtyku, mapa geomorfologiczna dna Bałtyku, mapa zasobów mineralnych i mapa litodynamiczna, które stanowią cenny materiał uzupełniający mapę główną.

W przeprowadzonych analizach geologiczno-inżynierskich wykorzystano także badania sejsmoakustyczne, które zostały zinterpretowane geologicznie. Badania sejsmoakustyczne dna Bałtyku były wykonywane przez różne ośrodki badawcze, m.in. przez dawny Zakład Geomorfologii i Geologii Morza IMGW w Gdyni czy też Oddział Geologii Morza Państwowego Instytutu Geologicznego w Gdańsku, i prze-

prowadzono je metodą ciągłego profilowania sejsmoakustycznego z użyciem aparatury firmy EG.G produkcji USA. Badania tego rodzaju są często wykonywane w ramach badań geologiczno-inżynierskich dna morskiego pod posadowienie platform wiertniczych (Kaszubowski, 1987) czy też do badań geologiczno-strukturalnych zmierzających do odzwierciedlenia bardzo złożonej budowy geologicznej określonych obszarów dna morskiego. Autorzy niniejszego artykułu tę cechę badań sejsmoakustycznych wykorzystali w swoim opracowaniu naukowym. Proponowany podział geologiczno-inżynierski dna polskiej części Morza Bałtyckiego oparto na określonych kryteriach geologicznych i geotechnicznych, które będą przedstawione w dalszej części publikacji.

## JEDNOSTKI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE DNA MORSKIEGO

Analiza geologiczno-inżynierska osadów współczesnego dna polskiego Bałtyku dotyczyła czynników geologicznych, takich jak litologia, geneza i wiek osadów, i geotechnicznych: stopnia zagęszczenia ( $I_D$ ), stopnia plastyczności ( $I_L$ ), kąta tarcia wewnętrznego ( $\phi$ ), spójności ( $c$ ), wytrzymałości na ściskanie ( $R_c$ ), wytrzymałości na ścinanie ( $\tau_f$ ) oraz edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej ( $M_o$ ). Formuły matematyczne wymienionych parametrów geotechnicznych zostały już wcześniej omówione przez autorów (Kaszubowski, Coufal, 2010). W przedstawianej analizie oprócz kryteriów geologicznych i geotechnicznych autorzy postanowili także wziąć pod uwagę różny stopień pochylenia powierzchni dna morskiego. Zaproponowano tutaj następujący podział klasyfikacyjny stopnia pochylenia, w którym wydzielono określone typy morfologiczne dna z przydzielonymi sygnaturami liczbowymi:

- 1 – dno płaskie (kąąt pochylenia powierzchni dna od 0 do 0,25°);
- 2 – dno mało pochylone (kąąt pochylenia powierzchni dna od 0,25 do 0,5°);
- 3 – dno pochylone (kąąt pochylenia powierzchni dna od 0,5 do 1,0°);
- 4 – dno bardzo pochylone (kąąt pochylenia powierzchni dna od 1,0 do 2,0°);
- 5 – dno mało strome (kąąt pochylenia powierzchni dna od 2,0 do 4,0°);
- 6 – dno strome (kąąt pochylenia powierzchni dna od 4,0 do 6,0°);
- 7 – dno bardzo strome (kąąt pochylenia powierzchni dna od 6,0 do 8,0°);
- 8 – dno urwiste (kąąt pochylenia powierzchni dna od 8,0 do 10,0°);
- 9 – dno bardzo urwiste (kąąt pochylenia powierzchni dna powyżej 10,0°).

Bardzo ważnym zagadnieniem jest najwyższa warstwa dna morskiego, w której panują odmiennie warunki geotechniczne, wynikające z bezpośredniego oddziaływania wody morskiej Bałtyku (Pieczka, 1981). W rejonie występowania gruntów spoistych bezpośrednio dno morskie jest w stanie miękkoplastycznym, a nawet płynnym, natomiast na obszarze występowania gruntów niespoistych jest ono w pełni nasycone wodą bałtycką. Stwierdza się, że ta nietypowa strefa bezpośredniego dna morskiego osiąga miąższość 1,5–2,0 m. Opierając się na szczegółowej analizie map geologicznych dna Bałtyku, analizie materiałów sejsmoakustycznych ważnych wycinków dna Morza Bałtyckiego, a także na wynikach licznych badań geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych obszaru Pomorza Zachodniego, w szczególności strefy brzegowej Bałtyku i wybranych fragmentów dna morskiego (Jegliński, Pruszkowski, 1981; Pieczka, 1981; Stucka, 1981), autorzy niniejszego opracowania przedstawili przybliżone przedziałowe wartości charakterystycznych wskaźników geotechnicznych i na ich podstawie wydzielili poszczególne jednostki geologiczno-inżynierskie dna polskiej części Morza Bałtyckiego.

### DNO BARDZO DOBRE DO CELÓW BUDOWNICTWA MORSKIEGO

Pod względem geologiczno-inżynierskim są to najlepsze części dna Morza Bałtyckiego rozpatrywane do budownictwa morskiego (jednostka nr 1), zbudowane z gruntów skalistych o bardzo dużych wartościach wytrzymałości na ściskanie (ponad 1000 kPa w dolnej granicy przedziału wskaźnika  $R_c$ ). Przykładowo, skały magmowe, które cechują się bardzo dużymi wartościami wytrzymałości na ściskanie, osiągają wartości 250 MPa. Grunty tej jednostki geologiczno-inżynierskiej nie występują bezpośrednio na dnie polskiej części

Bałtyku (fig. 1, 2), są za to często spotykane bezpośrednio na dnie w północnej i północno-wschodniej części Morza Bałtyckiego.

#### DNO DOBRE DO CELÓW BUDOWNICTWA MORSKIEGO

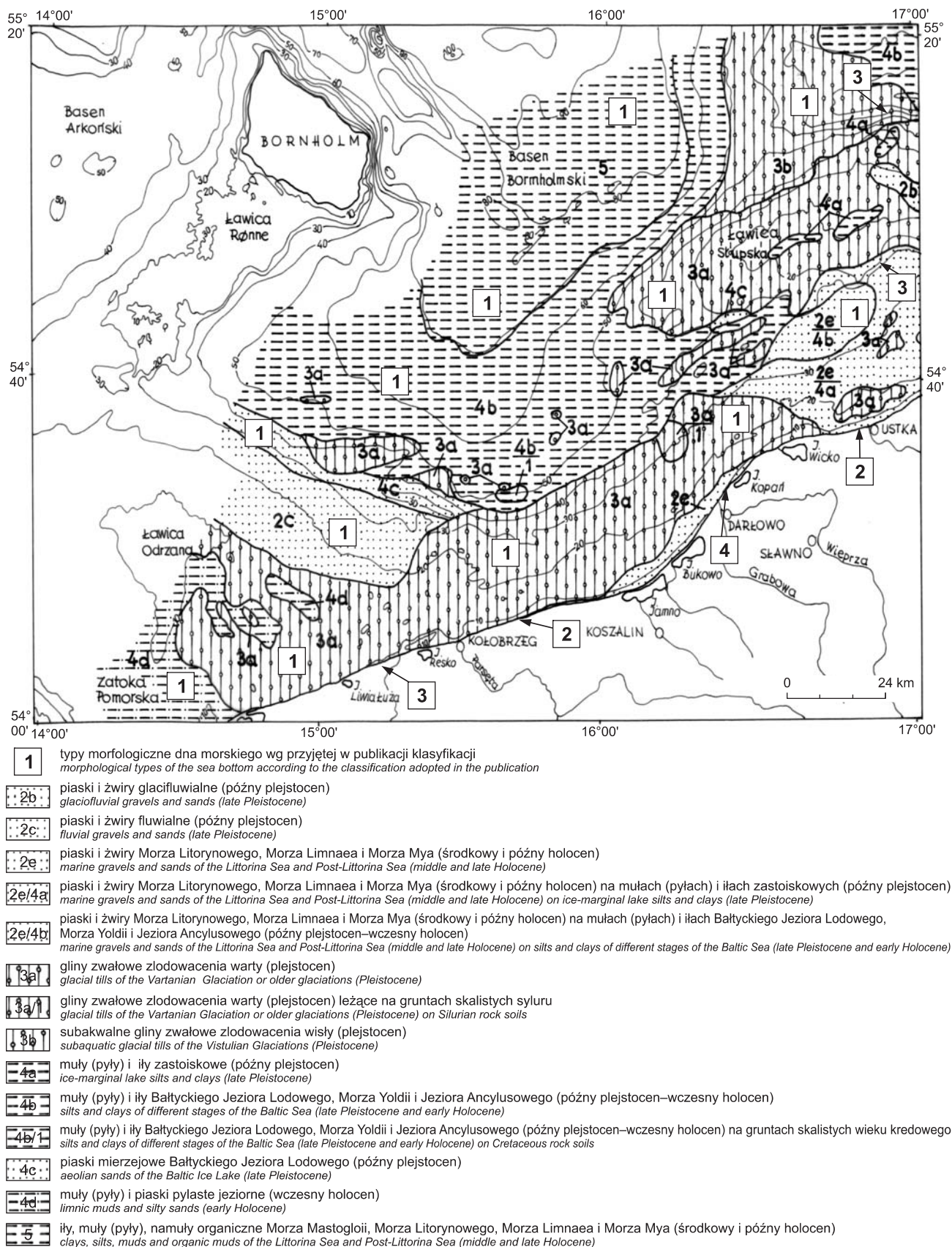
W tym przypadku wydzielono grunty dna morskiego (jednostka nr 2), które posiadają duże wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (300–500 kPa) (tab. 1). Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej  $M_o$  waha się w przedziale 80–200 MPa. Można tutaj wymienić grunty niespoiste o różnej genezie i wieku (fig. 1, 2). W zachodniej części dna polskiego Bałtyku są to piaski i żwiry glacyfluwialne (subjednostka 2b), które powstały w czasie deglacjacji lądolodu zlodowacenia wisły (Kaszubowski, Coufal, 2008). Grunty tego rodzaju o miąższości większej niż 5 m tworzą dno płaskie i występują w południowo-wschodniej części Ławicy Słupskiej (fig. 1). Subjednostkę 2c reprezentują piaski i żwiry fluwialne z przełomu późnego plejstocenu i wczesnego holocenu, położone na północny wschód od Ławicy Odrzanej. Grunty te tworzą tutaj również dno płaskie. Kolejną subjednostkę (2e) budują piaski i żwiry utworzone podczas transgresji Morza Litorynowego (środkowy holocen), Morza Limnaea i Morza Mya (późny holocen). Swoim zasięgiem obejmują obszar przybrzeżny położony na wysokości jeziora Bukowo (Kaszubowski, Coufal, 2008) aż do jeziora Kopań (fig. 1). Dno morskie w tych rejonach jest płaskie. W strefie brzegowej, na wysokości jeziora Bukowo, występuje dno mało pochylone, a na wysokości jeziora Kopań dno bardzo pochylone. Analizowane grunty posiadają dobre parametry geotechniczne (tab. 1). Na dużych obszarach dna osady morskie środkowego i późnego holocenu osiągają miąższość mniejszą niż 5 m i są podścielone przez utwory różnej genezy i zróżnicowanego wieku. Taka sytuacja występuje na dnie morskim na wysokości Ustki, gdzie piaski i żwiry morskie środkowego i późnego holocenu są podścielone przez muły (pyły) i ropy zastoiskowe późnego plejstocenu (subjednostka 2e/4a<sup>2</sup>) traktowane jako złe podłoże do budownictwa morskiego (fig. 1). Podobnie jest w pobliżu Ławicy Słupskiej, gdzie piaski i żwiry morskie o zbliżonej genezie i wieku są podścielone przez muły (pyły) i ropy Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego (subjednostka 2e/4b), które również traktowane są jako złe podłoże do budownictwa morskiego. Dno morskie jest płaskie na całej tej przestrzeni z wyjątkiem części północnej, gdzie dno jest pochylone, i strefy brzegowej na wysokości Ustki, gdzie występuje dno mało pochylone. Rozpatrując przebieg procesów geodynamicznych, należy stwierdzić, że w wielu miejscach przeważają procesy redepozycji piasków i żwirów, natomiast rzadziej zachodzi ich sedymentacja.

We wschodniej części dna polskiego Bałtyku dno dobre do budownictwa morskiego tworzą żwiry i piaski morskie z interglacjalu eemskiego (subjednostka 2a) od góry przykryte piaskami i żwirami Morza Litorynowego i Morza Politynowego. Subjednostka 2a (fig. 2) posiada bardzo dobre parametry wytrzymałościowe, ponieważ jej osady były komprimowane przez lądolód zlodowacenia wisły. Dno morskie, które tutaj występuje, jest pochylone. Wśród utworów tego obszaru należy również wymienić piaski i żwiry glacyfluwialne późnoplejstoceniowe (subjednostka 2b) położone w południowej części Południowej Ławicy Środkowej oraz we wschodniej części Ławicy Słupskiej. Osady tego typu spotykane są także na obszarze Zatoki Puckiej. Dno morskie, jakie tworzą wymienione grunty, jest płaskie, tylko w południowej części Południowej Ławicy Środkowej jest ono mało pochylone. Kolejne wydzielenie (subjednostka 2d) budują żwiry i piaski rzeczne paleodelty Wisły w rejonie Gdyni (fig. 2). Dno morskie jest w dużej części płaskie, ale na wysokości Gdańska jest pochylone. Podobnie jak w części zachodniej, dno dobre do budownictwa morskiego tworzą piaski i żwiry morskie środkowego i późnego holocenu (subjednostka 2e). Grunty tego typu występują w rejonie Płycizny Czołpińskiej, Ławicy Stilo oraz na wysokości Gdańska. W rejonie Jeziora Żarnowieckiego mają one miąższość mniejszą niż 5 m i są podścielone przez muły (pyły) i ropy zastoiskowe późnego plejstocenu (subjednostka 2e/4a) (fig. 2). Dno morskie jest tutaj płaskie, w strefie brzegowej rozciągającej się między jeziorami Łebsko i Żarnowieckim – mało pochylone, a na wysokości Władysławowa aż do środkowej części Półwyspu Helskiego występuje dno pochylone.

#### DNO DOSTATECZNE DO CELÓW BUDOWNICTWA MORSKIEGO

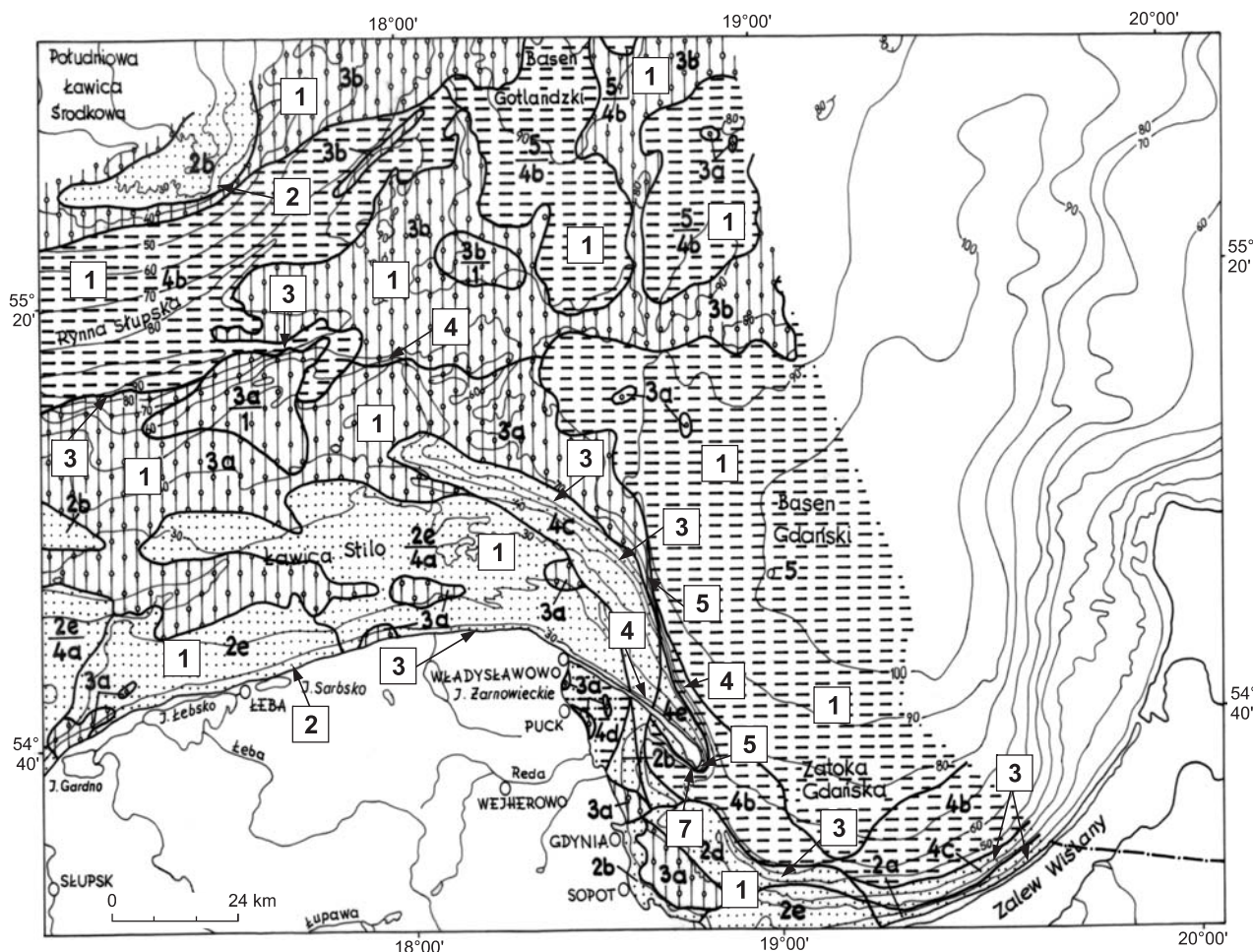
W tym przypadku wydzielono grunty (jednostka nr 3), które posiadają średnie wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (100–300 kPa) (tab. 1). Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej  $M_o$  waha się w przedziale 40–80 MPa. Do tej grupy zaliczono grunty spoiste, które są reprezentowane przez gliny zwałowe zlodowacenia wisły i zlodowacenia warty. W niektórych rejonach mogą to być gliny zwałowe starszych zlodowaceń. W zachodniej części polskiego Bałtyku w pierwszej kolejności (Kaszubowski, Coufal, 2008) należy wymienić gliny zwałowe zlodowacenia warty (subjednostka 3a). Utwory te występują na obszarze Ławicy Słupskiej (Kramarska i in., 2002) i w południowo-zachodniej części analizowanego dna morskiego, pomiędzy izobatami 10–40 m na wysokości wybrzeża od Dziwnowa do jeziora Wicko (fig. 1). Ocenia się, że miąższość tych osadów dochodzi do 20–30 m. Badania sejsmoakustyczne (Kaszubowski, Coufal, 2008) wykazały, że w tym rejonie występują duże zmiany w strukturze dna, które mogą być związane z procesami sedymentacji i erozji.

<sup>2</sup> W przypadku subjednostek zapisanych w postaci ułamkowej w liczniku podano symbol gruntów występujących bezpośrednio na dnie morskim, a w mianowniku gruntów, które je podścielają



**Fig. 1. Typy morfologiczne i jednostki geologiczno-inżynierskie dna zachodniej części polskiego Bałtyku (wg Kaszubowski, Coufal, 2010)**

Morphological types of the sea bottom and engineering-geological units of the western part of the Polish Baltic Sea bottom (after Kaszubowski, Coufal, 2010)



- 1** typy morfologiczne dna morskiego wg przyjętej w publikacji klasyfikacji  
*morphological types of the sea bottom according to the classification adopted in the publication*
- 2a** piaski i żwiry morskie interglacialu eemskiego (plejstocen) przykryte od góry osadami piaszczysto-żwirowymi Morza Litorynowego i Morza Politorynowego (środkowy i późny holocen) / *marine gravels and sands of the Eemian Sea (Pleistocene)*
- 2b** piaski i żwiry glacialfluwalne (późny plejstocen)  
*glaciofluvial gravels and sands (late Pleistocene)*
- 2c** piaski i żwiry rzeczne paleodelty Wisły (późny plejstocen i wczesny holocen)  
*fluvial gravels and sands (late Pleistocene and early Holocene)*
- 2e** piaski i żwiry Morza Litorynowego, Morza Limnaea i Morza Mya (środkowy i późny holocen)  
*marine gravels and sands of the Littorina Sea and Post-Littorina Sea (middle and late Holocene)*
- 2e/4a** piaski i żwiry Morza Litorynowego, Morza Limnaea i Morza Mya (środkowy i późny holocen) leżące na mulach (pyłach) i iłach zastoiszkowych (późny plejstocen)  
*marine gravels and sands of the Littorina Sea and Post-Littorina Sea (middle and late Holocene) on ice-marginal lake silts and clays (late Pleistocene)*
- 3a** gliny zwałowe zlodowacenia warty (plejstocen)  
*glacial tills of the Vartanian Glaciation or older glaciations (Pleistocene)*
- 3a/1** gliny zwałowe zlodowacenia warty (plejstocen) leżące na gruntach skalistych syluru  
*glacial tills of the Vartanian Glaciation or older glaciations (Pleistocene) on Silurian rock soils*
- 3b** subakwalne gliny zwałowe zlodowacenia wisły (plejstocen)  
*subaquatic glacial tills of the Vistulian Glaciations (Pleistocene)*
- 3b/1** subakwalne gliny zwałowe zlodowacenia wisły (plejstocen) leżące na gruntach skalistych syluru  
*subaquatic glacial tills of the Vistulian Glaciations (Pleistocene) on Silurian rock soils*
- 4b** muły (pyły) i ily Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego (późny plejstocen–wczesny holocen)  
*silts and clays of different stages of the Baltic Sea (late Pleistocene and early Holocene)*
- 4c** piaski mierzejowe Bałtyckiego Jeziora Lodowego (późny plejstocen)  
*aeolian sands of the Baltic Ice Lake (late Pleistocene)*
- 4d** muły (pyły) i piaski pylaste jeziorne (wczesny holocen)  
*limnic muds and silty sands (early Holocene)*
- 4e** piaski morskie i eoliczne (późny holocen)  
*marine and aeolian sands (late Holocene)*
- 5** ily, muły (pyły), namuły organiczne Morza Mastogloii, Morza Litorynowego, Morza Limnaea i Morza Mya (środkowy i późny holocen)  
*clays, silts, muds and organic muds of the Littorina Sea and Post-Littorina Sea (middle and late Holocene)*
- 5/4b** ily, muły (pyły), namuły organiczne Morza Mastogloii, Morza Litorynowego, Morza Limnaea i Morza Mya (środkowy i późny holocen) leżące na mulach (pyłach) i iłach Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego (późny plejstocen–wczesny holocen)  
*clays, silts, muds and organic muds of the Littorina Sea and Post-Littorina Sea (middle and late Holocene) on silts and clays of different stages of the*

**Fig. 2. Typy morfologiczne i jednostki geologiczno-inżynierskie dna wschodniej części polskiego Bałtyku (wg Kaszubowski, Coufal, 2010)**

Morphological types of the sea bottom and engineering-geological units of the eastern part of the Polish Baltic Sea bottom (after Kaszubowski, Coufal, 2010)

Tabela 1

**Parametry jednostek geologiczno-inżynierskich dna polskiej części Bałtyku**  
Parameters of the engineering-geological units of the Polish Baltic Sea bottom

Jednostki geologiczno-inżynierskie	Typy litologiczne	Geneza	Wiek	Parametry geotechniczne (wartości przybliżone)					
				Stopień zagęszczenia $I_D$	Stopień plastyczności $I_L$	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi$ [°]	Kohezja $C$ [kPa]	Wytrzymałość na ścinanie $\tau_f$ [kPa]	Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej $M_o$ [MPa]
2 Dno dobre do budownictwa morskiego	2a piaski i żwiry (Pr, Ps, Pd, Ż)	morskie	interglacjał eemski plejstocen	0,5–0,7	–	30–35	–	300–500	130–200
	2b piaski i żwiry (Pr, Ps, Pd, Ż)	glacifluwialne	późny plejstocen	0,5–0,7	–	32–35	–	350–500	150–200
	2c piaski i żwiry (Pr, Ps, Pd, Ż)	fluwialne	późny plejstocen	0,4–0,6	–	30–33	–	300–400	80–120
	2e piaski i żwiry (Pr, Ps, Pd, Ż)	morskie	środkowy holocen	0,4–0,5	–	30–32	–	300–350	80–100
3 Dno dostateczne do budownictwa morskiego	3a gliny zwałowe (Gp, G, Gπ)	glacialne	plejstocen zlodowacenie warty	–	0,1–0,3	20–15	45–35	200–300	60–80
	3b gliny zwałowe (Gp, G, Gπ)	glacialne	plejstocen zlodowacenie wisły	–	0,2–0,4	15–12	31–25	100–200	40–50
4 Dno złe do budownictwa morskiego	4a pyły (muły) i iły	zastoiskowe	późny plejstocen	–	0,2–0,5	15–10	18–10	80–100	8–15
	4b pyły (muły) i iły	glacialno-limniczne, glacialno-morskie i limniczne	późny plejstocen i wczesny holocen	–	0,2–0,5	15–10	18–10	80–100	8–15
	4c piaski (Ps, Pd)	eoliczne	późny plejstocen	0,1–0,3	–	15–20	–	90–130	40–50
	4d pyły	limniczne	wczesny holocen	–	0,2–0,6	10–5	50–30	50–100	5–10
5 Dno bardzo złe do budownictwa morskiego	5 iły, pyły (muły) i namuły organiczne	morskie	środkowy i późny holocen	–	0,5–1,0	5–0	35–0	0–50	< 5

bowski, 1989) wykonane na obszarze dna Zatoki Koszalińskiej wykazały, że obecne są tutaj złożone struktury glacialne. W rejonie dna w pobliżu Darłowa (subjednostka 3a/1) gliny zwałowe zlodowacenia warty osiągają miąższość mniejszą niż 5 m i są podścielone gruntami skalistymi wieku kredowego traktowanymi jako bardzo dobre podłoże do budownictwa morskiego (Kaszubowski, Coufal, 2008). Dno morskie zbudowane z tych gruntów jest płaskie, w strefie brzegowej od Kołobrzegu do Sarbinowa – mało pochylone, a w rejonie Mrzeżyna – pochylone. Do jednostki 3 należą także subakwalne gliny zwałowe zlodowacenia wisły (subjednostka 3b), które występują na północ i północny-zachód od Ławicy Słupskiej (fig. 1). Poziom ten osiąga miąższość 20–30 m. Na obszarze zalegania glin zwałowych zlodowacenia wisły nie stwierdzono płytkiego występowania gruntów

skalistych. Dno morskie jest tutaj głównie płaskie, ale w rejonie południowego skłonu Rynny Słupskiej na wysokości Ustki jest ono pochylone.

We wschodniej części Morza Bałtyckiego, analogicznie do zachodniej części, dno dostateczne do budownictwa morskiego tworzą gliny zwałowe zlodowacenia warty i zlodowacenia wisły (fig. 2). Poziom glin zwałowych zlodowacenia warty znajduje się w południowej części analizowanego akwenu, na wysokości Łeby i Jeziora Żarnowieckiego. Ocenia się, że miąższość dochodzi do 20 m. W południowych rejonach Rynny Słupskiej gliny zwałowe zlodowacenia warty osiągają nieduże miąższości i zalegają wprost na gruntach skalistych – łupkach sylurskich (subjednostka 3a/1) – traktowanych jako podłoże bardzo dobre do budownictwa morskiego. Grunty te tworzą dno płaskie, a w rejonie południo-

wego skłonu Rynny Słupskiej na wysokości jezior Gardno i Sarbsko oraz w rejonie zachodniego skłonu Basenu Gdańskiego na wysokości Władysławowa dno jest pochylone. Gliny zwałowe zlodowacenia wisły (subjednostka 3b) występują w północnej części analizowanego obszaru, na obrzeżeniach Basenu Gotlandzkiego i Basenu Gdańskiego, i osiągają miąższość 5–10 m, a w miejscach, gdzie grunty tego typu zalegają na podłożu skalistym zbudowanym ze skał sylurskich, nie większą niż 5 m (subjednostka 3b/1). Dno morskie jest tutaj płaskie, a w rejonie południowego skłonu Rynny Słupskiej na wysokości Jeziora Żarnowieckiego występuje dno bardzo pochylone.

#### DNO ZŁE DO CELÓW BUDOWNICTWA MORSKIEGO

W tej grupie wyszczególniono grunty dna morskiego (jednostka nr 4), które charakteryzują się małymi wartościami wytrzymałości na ścinanie  $\tau_r$  (50–130 kPa) (tab. 1). Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej  $M_o$  waha się w przedziale 5–50 MPa. Można tutaj wyróżnić grunty spoiste i niespoiste o genezie zastoiskowej, eolicznej, glacialno-morskiej i limnicznej, wieku późnoplejstocenskigo i wczesnoholocenińskiego. W zachodniej części dna polskiego Bałtyku (Kaszubowski, Coufal, 2008) należy wymienić muły (pyły) i ily zastoiskowe (subjednostka 4a) utworzone w późnym plejstocenie. Grunty tego rodzaju występują w niektórych miejscach na obszarze Ławicy Słupskiej (fig. 1). Duże powierzchnie dna morskiego budują muły (pyły) i ily Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego (subjednostka 4b) z późnego plejstocenu i wczesnego holocenu. Grunty tego typu występują w rejonie Basenu Bornholmskiego i na południe od niego (fig. 1) oraz w zachodniej części Rynny Słupskiej. Ich miąższość w wielu miejscach oceniana jest na 10 m. Na wysokości Kołobrzegu, powyżej izobaty 40 m, omawiane grunty mają miąższość mniejszą niż 5 m i są podścielone przez grunty skaliste wieku kredowego (subjednostka 4b/1) (fig. 1). Osady tego typu posiadają złe parametry geotechniczne (tab. 1). Dno morskie jest tutaj płaskie.

Dno złe do budownictwa morskiego budują także osady mierzejowe (subjednostka 4c), które utworzyły się w czasie istnienia Bałtyckiego Jeziora Lodowego (Uścińowicz, 1995). Występują one na północny wschód od Ławicy Odzanej (fig. 1). Wspomniane grunty posiadają nieco lepsze parametry geotechniczne w porównaniu z wcześniej opisanymi osadami (tab. 1). Na tym obszarze dno morskie jest płaskie. Do jednostki 4 należy również zaliczyć muły (pyły) i miejscami piaski pylaste (subjednostka 4d), które utworzyły się w warunkach jeziornych na przełomie późnego plejstocenu i wczesnego holocenu (Kramarska i in., 2002) i które są złym podłożem do budownictwa morskiego. Osady te (Kaszubowski, Coufal, 2008) występują na obszarze Zatoki Pomorskiej i tworzą płaskie dno morskie (fig. 1).

We wschodniej części polskiego dna Bałtyku dno złe do budownictwa tworzą muły (pyły) i ily Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego późnego

plejstocenu i wczesnego holocenu (subjednostka 4b), które występują na obszarach Rynny Słupskiej i Zatoki Gdańskiej (fig. 2). Dno morskie jest płaskie, a na wysokości Półwyspu Helskiego – bardzo pochylone. Kolejną subjednostkę tworzą piaski mierzejowe Bałtyckiego Jeziora Lodowego (subjednostka 4c), które zalegają na wysokości Jeziora Żarnowieckiego i Mierzei Helskiej. Grunty tego typu posiadają nieco lepsze parametry wytrzymałościowe (tab. 1) niż utwory wcześniej omówione. Tworzą one płaskie dno morskie, w rejonie południowo-wschodniego skłonu wału mierzejowego dno mało strome, natomiast na północnych zboczach dno pochylone. Dno złe do budownictwa morskiego na obszarze Zatoki Puckiej budują muły (pyły) i miejscami piaski pylaste jeziorne wczesnego holocenu (subjednostka 4d). Do gruntów złych należy również zaliczyć piaski mierzejowe środkowego i późnego holocenu (subjednostka 4e), które występują na północ od Półwyspu Helskiego (fig. 2). Pod względem ukształtowania dno morskie jest tutaj najbardziej zróżnicowane – u samej nasady Półwyspu Helskiego jest ono bardzo strome lub mało strome, a w pozostałych częściach tego obszaru dno jest płaskie.

#### DNO BARDZO ZŁE DO CELÓW BUDOWNICTWA MORSKIEGO

Do tego wydzielenia geologiczno-inżynierskiego zaliczono grunty dna morskiego (jednostka nr 5), które posiadają bardzo małe wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_r$  (poniżej 50 kPa) (tab. 1). Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej  $M_o$  osiąga wartości mniejsze niż 5 Mpa. Ta jednostka jest reprezentowana przez grunty spoiste o genezie morskiej powstałe w środkowym i późnym holocenie. Można tutaj wymienić muły (pyły), ily oraz namuły organiczne utworzone w czasie istnienia Morza Mastogloii, Morza Litorynowego, Morza Limnaea i Morza Mya. Grunty tego typu w zachodniej części polskiego dna Bałtyku (Kaszubowski, Coufal, 2008) występują w głębszych partiach Basenu Bornholmskiego (fig. 1). Ocenia się, że miąższość tych osadów przekracza 5 m. Dno morskie jest płaskie.

We wschodniej części polskiego Morza Bałtyckiego grunty jednostki 5 obejmują przez muły (pyły), ily oraz namuły organiczne morskie środkowego i późnego holocenu zalegające na obszarze Basenu Gdańskiego, gdzie ich miąższość wynosi ponad 5 m (fig. 2). Z kolei na terenie Basenu Gotlandzkiego grunty te osiągają miąższość mniejszą od 5 m (fig. 2) i podścielone są mułami (pyłami) i ilyami Bałtyckiego Jeziora Lodowego, Morza Yoldii i Jeziora Ancylusowego (subjednostka 5/4b). Dno morskie jest również płaskie.

#### WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz geologiczno-inżynierskich dotyczących gruntów dna polskiej części Morza Bałtyckiego autorzy wydziliili następujące jednostki geologiczno-inżynierskie:

- Dno dobre do celów budownictwa morskiego (wydzielenie nr 2) reprezentowane przez grunty niespoiste plejstocenu i holocenu o genezie glacyfluwialnej, fluwialnej i morskiej, które posiadają duże wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (300–500 kPa) i duże wartości edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_o$  (80–200 MPa). W przeważającej części tworzą one dno płaskie, ale w strefie brzegowej na wysokości jeziora Bukowo, Ustki oraz między jeziorami Łebsko i Żarnowieckim dno jest mało pochylone. Takie dno występuje również w południowej części Południowej Ławicy Środkowej. Z kolei od Jeziora Żarnowieckiego aż do połowy Półwyspu Helskiego dno morskie jest pochylone, a w strefie brzegowej okolic jeziora Kopań – bardzo pochylone.
- Dno dostateczne do celów budownictwa morskiego (wydzielenie nr 3) budują grunty spoiste wieku plejstoceniowego o genezie glacialnej, które posiadają dość duże wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (100–300 kPa) i stosunkowo duże wartości edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_o$  (40–80 MPa). Utworzone z nich dno morskie jest głównie płaskie, ale w strefie brzegowej od Kołobrzegu do Sarbinowa jest ono mało pochylone, a w rejonie Mrzeżyna pochylone. Pochylone dno morskie występuje również w strefach południo-
- wego skłonu Rynny Słupskiej, a na wysokości Jeziora Żarnowieckiego dno morskie południowego skłonu Rynny Słupskiej jest nawet bardzo pochylone. Dno mało strome występuje natomiast w rejonie zachodniego skłonu Basenu Gdańskiego.
- Dno złe do celów budownictwa morskiego (wydzielenie nr 4) obejmuje grunty spoiste i niespoiste wieku plejstoceniowego i holoceniowego o genezie zastoiskowej, eolicznej, glacialno-morskiej i jeziornej, które posiadają małe wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (50–130 kPa) i edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_o$  (5–50 MPa). Na dużej przestrzeni omawiane dno morskie jest płaskie. Północno-wschodnie obrzeżenie wału mierzejowego z okresu Bałtyckiego Jeziora Lodowego na wysokości Półwyspu Helskiego jest dnem pochylonym. Zachodni skłon Basenu Gdańskiego w pobliżu Półwyspu Helskiego tworzy dno bardzo pochylone. U nasady Półwyspu Helskiego dno morskie jest albo mało albo bardzo strome.
- Dno bardzo złe do celów budownictwa morskiego (wydzielenie nr 5) budują grunty spoiste środkowo- i późnoholoceniowe, które posiadają bardzo małe wartości wytrzymałości na ścinanie  $\tau_f$  (< 50 kPa) i edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_o$  (< 5 MPa). Na obszarze, który zajmują, występuje płaskie dno morskie.

## LITERATURA

- JEGLIŃSKI B., PRUSZKOWSKI J., 1981 — Metodyka badań geologiczno-inżynierskich dla inwestycji portowych na przykładzie Portu Północnego. Mat. Konf. Nauk. Geologiczno-inżynierskie badania wybrzeża i dna Bałtyku Południowego. Gdańsk.
- KASZUBOWSKI L.J., 1987 — System EG.G przeznaczony do ciągłego profilowania sejsmoakustycznego dna morskiego. *Inż. Morska*, **1**: 12–13.
- KASZUBOWSKI L.J., 1989 — Czwartorzęd Zatoki Koszalińskiej w świetle badań sejsmoakustycznych. *Stud. Mater. Ocean.*, **56**, 4: 115–122.
- KASZUBOWSKI L.J., COUFAL R., 2008 — Preliminary engineering-geological division of the Baltic Sea bottom (Polish part) in the light of geological maps of the Baltic and seismoacoustic research. 11th Baltic Sea Geotech. Conf. Geotechnics In Maritime Engineering. Gdańsk.
- KASZUBOWSKI L.J., COUFAL R., 2010 — Wstępny podział geologiczno-inżynierski dna polskiej części Morza Bałtyckiego. *Inż. Morska i Geotech.*, **3**: 392–401.
- KRAMARSKA R., UŚCINOWICZ S., ZACHOWICZ J., 2002 — Kenozoik południowego Bałtyku – wybrane problemy. *Prz. Geol.*, **50**: 709–716.
- PIECZKA F.B., 1981 — Charakterystyka geologiczno-inżynierska osadów dennych Bałtyku. Mat. Konf. Nauk. Geologiczno-inżynierskie badania wybrzeża i dna Bałtyku Południowego. Gdańsk.
- STUCKA B., 1981 — Badania geologiczno-inżynierskie dla posadowienia obiektów hydrotechnicznych w porcie Kołobrzeg. Mat. Konf. Nauk. Geologiczno-inżynierskie badania wybrzeża i dna Bałtyku Południowego. Gdańsk.
- UŚCINOWICZ S., 1995 — Quaternary of the Gdańsk Basin. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **149**: 67–70.

## SUMMARY

The authors presents the engineering-geological division of the Polish Baltic Sea bottom in the light of geological maps of the Baltic Sea and seismoacoustic research, also based on the results of detailed engineering-geological research of some areas of the sea bottom and engineering-geological research of the coastal zone in Western Pomerania. Engineering-geological units of the Baltic Sea bottom were

identified based on the following factors: geological criteria such as lithological type, origin and age of deposits, and geotechnical criteria such as index of density ( $I_D$ ), index of liquidity ( $I_L$ ), angle of internal friction ( $\phi$ ), cohesion ( $c$ ), resistance of compression ( $R_c$ ), resistance of shear ( $\tau_f$ ) and primary edometric compressibility module ( $M_o$ ). The relief of the sea bottom was also analysed and the following



morphological types were distinguished: flat bottom, little sloping bottom, sloping bottom, very sloping bottom, little steep bottom, steep bottom and very steep bottom.

The following engineering-geological units were identified in this way:

Unit 1 – as a very good sea-bottom for marine constructions, where the rock soils creating the present sea bottom show high compression resistance values (more than 1000 kPa). The rock soils do not directly occur on the present-day Polish Baltic Sea bottom.

Unit 2 – as a good sea-bottom for marine constructions, where the non-cohesive soils show high shear resistance values  $\tau_f$  (300–500 kPa) and high (tab.1) primary edometric compressibility module values  $M_o$  (80–200 MPa). Most of the sea bottom is flat, but in the coastal zone at the parallel of Lake Bukowo and Ustka, and from Lake Łebsko to Lake Żarnowiec, the bottom is little sloping. However, from Żarnowiec Lake to mid-Hel Peninsula, the sea bottom is sloping. In the coastal zone near Lake Kopań, the sea bottom is very sloping.

Unit 3 – as a sea bottom sufficiently good for marine constructions, where the cohesive soils are represented by glacial tills of moderate values of the resistance of shear  $\tau_f$  (100–300 kPa) and moderate values (tab.1) of the primary edometric compressibility module  $M_o$  (40–80 MPa). Most of the

sea bottom is flat, but in the coastal zone from Kolobrzeg to Sarbinowo, the sea bottom is little sloping and in the Mrzeżyno region the sea bottom is sloping. In the southern escarp of the Słupsk Furrow, the sea bottom is also sloping. In the western slope of the Gdańsk Basin, the sea bottom is little steep.

Unit 4 – as a bad sea-bottom for marine constructions, where the cohesive and non-cohesive soils are represented by silts, clays, silty-sands and aeolian sands, shows low values of the resistance of shear  $\tau_f$  (50–130 kPa) and low values (tab.1) of the primary edometric compressibility module  $M_o$  (5–50 MPa). Over a large area, the sea bottom is flat. North-eastern margin of the spit ridge from the Baltic Ice Lake period at the parallel of the Hel Peninsula is a sloping sea bottom. The western slope of the Gdansk Basin near the Hel Peninsula forms a very sloping sea bottom. At the end of the Hel Peninsula, the sea bottom is either little steep or very steep.

Unit 5 – as a very bad sea-bottom for marine constructions, where the cohesive soils are represented by clays, silts, muds and organic muds, shows low values of the resistance of shear  $\tau_f$  (less than 50 kPa) and low values (tab.1) of the primary edometric compressibility module  $M_o$  (less than 5 MPa). The sea bottom is flat in his area.

