

Procesy litodynamiczne morskiej strefy brzegowej w Sopocie w rejonie odkładu urobku z pobliskich prac pogłębiarskich

**Dr inż. Piotr Szmytkiewicz, prof. dr hab. inż. Rafał Ostrowski
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku**

W kwietniu 2021 roku w rejonie mola w Sopocie prowadzone były prace pogłębiarskie. Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska (RDOŚ) w Gdańsku wezwała wykonawcę robót czerpально-refulacyjnych (Hydrobudowę Gdańsk Sp. z o.o.) między innymi do wskazania kierunków rozprzestrzeniania się osadów stanowiących urobek z prac czerpalnych w pierwotnie planowanym miejscu jego odkładu, to jest w Gdyni Orłowie. Po rozpatrzeniu przedłożonych przez wykonawcę odpowiedzi

i wyjaśnień RDOŚ w Gdańsku odniosła się negatywnie do planowanej lokalizacji odkładu urobku.

W związku z powyższym wykonawca robót w uzgodnieniu z inwestorem (Gminą Miasta Sopotu) i Urzędem Morskim w Gdyni zaproponował alternatywne miejsce odkładu urobku, mianowicie czterystumetrowy odcinek brzegu morskiego w Sopocie od slipu przy sopockim Wodnym Ochotniczym Pogotowiu Ratunkowym (WOPR), to jest od pozycji 54°25'59.2" N,

18°35'14.3" E, do południowej granicy miasta Sopotu na pozycji 54°25'48.8" N, 18°35'28.1" E. Powyższe współrzędne geograficzne opisują w przybliżeniu granice przedziału kilometrażu brzegowego od KM 74,65 do KM 75,05. Odkład urobku polegać miał na zasileniu osadami plaży w rejonie siedziby firmy ERGO Hestia S.A. w Sopocie.

Jednocześnie wykonawca robót zlecił IBW PAN sporządzenie opinii na temat procesów litodynamicznych zachodzących na przedmiotowym odcinku morskiej strefy brzegowej, ze szczególnym uwzględnieniem kierunków rozprzestrzeniania się rumowiska odkładanego na plaży i w przybrzeżnej strefie morza.

Zakres przeprowadzonych prac badawczych obejmował:

- analizę warunków realizacji przedsięwzięcia, z uwzględnieniem cech osadów stanowiących odkładany urobek oraz charakteru robót refulacyjnych,
- analizę ruchu osadów spowodowanego naturalnymi wymuszeniami hydrodynamicznymi w miejscu realizacji przedsięwzięcia, w tym predykcję procesów litodynamicznych w różnych skalach czasowych.

WARUNKI REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA

Roboty pogłębiarskie były prowadzone w rejonie moła w Sopocie, to jest głównie w rejonie kilometrażu brzegowego od (około) KM 76,7 do KM 76,85. W miejscu tym, podobnie jak na większości odcinków strefy brzegowej Zatoki Gdańskiej, nie występują w dnie morskim osady spoiste. Powierzchniowa warstwa dna o miąższości co najmniej kilku metrów zbudowana jest z piasków, których uziarnienie jest bardzo zróżnicowane, charakteryzujące się reprezentatywną średnicą ziaren d_{50} od 0,1 mm do 0,6 mm. Dominują jednak piaski drobne i średnie o wymiarach ziaren $d_{50} = 0,15 \div 0,20$ mm.

Brzeg morski w Sopocie jest fragmentem łagodnie zarysowanej kilkukilometrowej zatoki, ograniczonej od północy cypłem w Sopocie – Kamiennym Potoku i dalej Cypłem Redłowskim, od południa zaś – historycznym ujściem Wisły w Nowym Porcie, stanowiącym obecnie wejście do portu w Gdańsku. Obserwacje brzegu i nadbrzeża oraz analiza archiwalnych danych Urzędu Morskiego w Gdyni dowodzą istnienia w rejonie Sopotu niewielkiego długookresowego trendu akumulacyjnego linii brzegowej. W ostatnich latach powyższa tendencja jest częściowo zakłócona oddziaływaniem usytuowanej przy moła mariny (zob. Jakacki i in., 2016) [2] przejawiającym się wzmożoną akumulacją osadów w bezpośrednim sąsiedztwie moła. Akumulacja ta kompensowana jest niewielką erozją, skutkującą lokalnymi zwężeniami plaży w południowej części sopockiego wybrzeża.

Odkład urobku zaplanowano na odcinku plaży i przybrzeża w przedziale kilometrażu brzegowego od KM 74,65 do KM 75,05, to jest na odcinku o długości około 400 m. Brzeg morski w tym rejonie jest stabilny pod względem geomorfodynamicznym. Szerokość plaży waha się w granicach od około 35 m na KM 75,05 (zob. rys. 1) do około 50 m na KM 74,65 (zob. rys. 2).

Według Ustawy z dnia 25 września 2015 roku o zmianie ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz. U. z dn. 23 października 2015 r. poz. 1700) [7] brzeg morski na odcinku Nowy Port – Or-



Rys. 1. Brzeg morski w Sopocie na KM 74,9, widok na północ, stan wody 505 cm, 21.04.2021 roku (fot. R. Ostrowski)



Rys. 2. Brzeg morski w Sopocie na KM 74,9, widok na południe, stan wody 505 cm, 21.04.2021 roku (fot. R. Ostrowski)

łowo (KM 69,2 ÷ 81,1) podlega ochronie za pomocą sztucznego zasilania i umocnień brzegowych. Zaakceptowany przez inwestora i Urząd Morski w Gdyni zamiar odkładu urobku w formie sztucznego zasilania plaży na kilometrażu od KM 74,65 do KM 75,05 był zatem zgodny z zaleceniami ww. Ustawy. Odkład zaplanowano metodą refulacji piaszczystego rumowiska bezpośrednio na plażę. Dodatkowe prace obejmować miały uformowanie profilu poprzecznego brzegu przy użyciu spycharek. Spodziewano się, że podczas refulacji wystąpi typowe zjawisko spływu piaszczystych osadów do strefy przybrzeżnej przylegającej do plaży poddanej sztuczemu zasilaniu.

RUCH OSADÓW W REJONIE ODKŁADU RUMOWISKA

Procesy litodynamiczne w małej skali czasowej

Rozprzestrzenianiem się substancji bierniej w wodzie, w tym osadów, rządzą zjawiska dyfuzji i konwekcji. O ile proces dyfu-

zji jest z definicji samorzutny i wynika z chaotycznych zderzeń zawieszonych ziaren i cząsteczek otaczającej ich wody, o tyle proces konwekcji substancji zawieszonych w wodzie jest silnie zależny od parametrów procesów hydrodynamicznych zachodzących w wodzie. Z tej przyczyny zjawisko dyfuzji-konwekcji zawieszony cząstek stałych jest w warunkach morskich zdominowane przez proces konwekcji, czyli unoszenie tych cząstek wskutek ruchu wody. Na przepływ zawiesziny nakłada się swobodne (grawitacyjne) opadanie ziaren w kolumnie wody.

Osady zbudowane z gruntów niespoistych (piasków) – ze względu na dużą prędkość swobodnego opadania ziaren – tworzą zmaczenie wody (zawiesinę), którego czas utrzymywania się jest bardzo krótki, a zasięg rozprzestrzeniania się – niewielki.

Do wyznaczenia zasięgu rozprzestrzeniania się osadów piaszczystych i czasu ich zawieszenia w kolumnie wody w strefie przybrzeżnej morza zastosowano metodykę obliczeniową, w ramach której zakłada się, że ruch ziaren zawiesziny jest wypadkową wektora prędkości przepływu wody wraz z zawieszonymi w niej ziarnami (v_p) oraz wektora prędkości swobodnego opadania ziaren (w_s) w kolumnie wody o głębokości h .

Prędkość swobodnego opadania ziaren wyznaczono następującą formułą (Pruszek, 1998) [4]:

$$w_s = 10 \frac{v}{d} \left\{ \left[1 + \frac{0,01(s-1)gd^3}{v^2} \right]^{0,5} - 1 \right\}$$

gdzie:

- g – przyspieszenie ziemskie (9,806 m/s²),
- v – współczynnik kinematycznej lepkości molekularnej wody (wynoszący około 10⁻⁶ m²/s),
- $s = \rho_s/\rho$ – gęstość ziaren osadów ρ_s względem gęstości wody ρ (przyjęto $\rho_s = 2650$ kg/m³ i $\rho = 1000$ kg/m³).

Parametry gruntów przyjęte w modelowaniu ruchu zawieszonych osadów i rozprzestrzeniania się zawiesziny przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Parametry ziaren osadów przyjęte w modelowaniu

Rodzaj gruntu	Reprezentatywna średnica d_{50} [mm]	Prędkość swobodnego opadania w_s [cm/s]
Piasek drobny	0,15	1,50
Piasek średni	0,20	2,41

W strefie przybrzeżnej przylegającej do plaży poddanej sztucznemu zasilaniu dominującym czynnikiem wywołującym ruch osadów są prądy pochodzenia falowego (zob. np. Ostrowski, 2019) [3]. W strefie przyboju (czyli w obszarze pomiędzy linią brzegową a linią załamania fal) największą rolę odgrywają prądy wzdłużbrzegowe. Sztuczne zasilanie plaż realizowane jest z reguły podczas występowania słabego lub umiarkowanego falowania. W takich warunkach prędkości prądu wzdłużbrzegowego nie przekraczają wartości $v_p = 0,5$ m/s, zaś maksymalne prędkości występują w okolicy grzbietów rew – na głębokościach rzędu 1 ÷ 3 m (zob. Szmytkiewicz, 2002) [6]. Przyjęto, że przy sztucznym zasilaniu plaży obecność zawiesziny ziaren piasku wystąpić może do głębokości $h = 1$ m. Przyjęto ponadto jednorodny pionowy profil prędkości prądu wzdłużbrzegowego.

Założenie to jest w pełni zgodne z rzeczywistą charakterystyką tych prądów (Szmytkiewicz, 2002) [6]. Prądy pochodzenia falowego cechują się znaczną turbulencją, wskutek czego na opadające ziarna oddziałuje nie tylko lepkość molekularna wody, ale również lepkość turbulentna. W związku z powyższym w obliczeniach czasu zawieszenia ziaren przenoszonych prądem wzdłużbrzegowym przyjęto zwiększający współczynnik korekcyjny równy 5.

Wyniki obliczeń maksymalnego przewidywanego zasięgu rozprzestrzeniania się zawiesziny osadów oraz czasu zawieszenia tych osadów w wodzie przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Zasięg rozprzestrzeniania się osadów i czas ich zawieszenia w wodzie

Rodzaj gruntu	Prędkość prądu v_p [m/s]	Średnia głębokość wody h [m]	Zasięg rozprzestrzeniania się [m]	Czas zawieszenia w wodzie [min]
Piasek drobny	0,5	1,0	170	5,0
Piasek średni	0,5	1,0	100	3,5

Wyniki obliczeń pokazały, że odkład piaszczystego urobku z prac czerpalnych w formie sztucznego zasilania plaży w Sopotcie skutkować może krótkotrwałym zmaczeniem wody i rozprzestrzenieniem się zawiesziny osadów wzdłuż linii brzegowej na odległość nie większą niż 170 m od miejsca zasilania. Kierunek ruchu zawiesziny wynika z kierunku wzdłużbrzegowego prądu pochodzenia falowego i może być północny lub południowy, w zależności od chwilowych warunków hydrodynamicznych (falowych).

Długoterminowe procesy litodynamiczne

O ewolucji brzegu morskiego decyduje przestrzenna zmienność wypadkowego natężenia transportu osadów. W granicach wybrzeża od Gdyni do Gdańska średnioroczne wypadkowe natężenie wzdłużbrzegowego ruchu osadów charakteryzuje się bardzo niewielką zmiennością. Pruszek i Skąja (2014) [5] na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że wypadkowy wzdłużbrzegowy transport osadów w wieloletnim jest skierowany na południe i ma natężenie około 20 000 m³/rok. Odnośne badania opierały się na obliczeniach natężenia wzdłużbrzegowego ruchu osadów piaszczystych w przekroju poprzecznym brzegu rozciągającym się od linii brzegowej do głębokości 8 m, według modeli teoretycznych Bijkera (1971) [1] oraz Van Rijna (1993) [8], przy założeniu oddziaływania warunków falowych średniego roku statystycznego.

W ramach średniookresowej skali czasowej (dni i tygodni), przy oddziaływaniu wiatrów i falowania z sektora południowego i południowo-wschodniego, ma miejsce krótkookresowy wzdłużbrzegowy ruch osadów w kierunku północnym, to jest w stronę Gdyni. Obserwacje meteorologiczne wskazują jednak, że sytuacje takie w średnim roku statystycznym należą do rzadkości. Efekt transportu osadów w kierunku północnym jest ze znacznym nadmiarem kompensowany transportem w kierunku południowym i pozostaje bez większego znaczenia w wieloletnim.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej oraz w wyniku modelowania matematycznego stwierdzono, co następuje:

- a) Odkład piaszczystego urobku z prac czerpalnych w formie sztucznego zasilania plaży w Sopocie na odcinku od KM 74,65 do KM 75,05 skutkować może krótkotrwałym zmąceniem wody i rozprzestrzenianiem się zawiesziny osadów wzdłuż linii brzegowej na odległość nie większą niż 170 m od miejsca zasilania (zob. tabl. 2).
- b) Zawiesina będzie rozprzestrzeniać się w kierunku północnym (w stronę Gdyni) lub południowym (w stronę Gdańska), zgodnym z kierunkiem wzdłużbrzegowego prądu pochodzenia falowego, zależnym od chwilowych warunków hydrodynamicznych (falowych).

W toku długookresowych procesów litodynamicznych (w skali miesięcy i lat) spodziewać się można powolnego rozmywania materiału narefulowanego na plażę i w strefie przybrzeżnej morza oraz wypadkowego transportu tego materiału w kierunku południowym, to jest w stronę Gdańska.

LITERATURA

1. Bijker E. W.: Longshore Transport Computations. *Journal of Waterways, Harbour and Coastal Engineering*, 99, WW4, 1971, 687-701.

2. Jakacki J., Beldowski J., Kosecki S., Malenga A., Massel S., Pazdro K., Przyborska A., Siedlewicz G., Szubska M., Walkusz-Miotk J.: Wykonanie badań i prac modelowych dna i brzegu morskiego w okolicy mola w Sopocie. Instytut Oceanologii PAN, Sopot 2016, s. 26.

3. Ostrowski R.: Problemy dynamiki i ochrony piaszczystych brzegów południowego Bałtyku. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2019.

4. Pruszek Z.: Dynamika brzegu i dna morskiego. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1998.

5. Pruszek Z., Skaja M.: Problemy dynamiki i ochrony brzegu morskiego. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2014.

6. Szymkiewicz M.: Prądy pochodzenia falowego w morskiej strefie brzegowej, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2002.

7. Ustawa z dnia 25 września 2015 r. o zmianie ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz. U. z dn. 23 października 2015 r. poz. 1700).

8. Van Rijn L. C.: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, the Netherlands, 1993.

PODZIĘKOWANIA: Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule uzyskano dzięki środkom finansowym udzielonym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na rzecz działalności statutowej IBW PAN (grupa tematyczna 2) oraz w ramach realizacji badań wykonanych przez IBW PAN na zlecenie Hydrobudowy Gdańsk Sp. z o.o. Autorzy dziękują Zleceniodawcy za udostępnienie materiałów na potrzeby publikacji.