

Geosyntetyczne maty betonowe w ochronie dna nabrzeży i stanowisk postojowych statków

Inż. Martin G. Hawkswood – Proserve Ltd, Wielka Brytania

Dr inż. Janusz Sobolewski – HUESKER Synthetic GmbH, Niemcy

Mgr inż. Michał Pilch – Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA Sp. z o.o., Polska

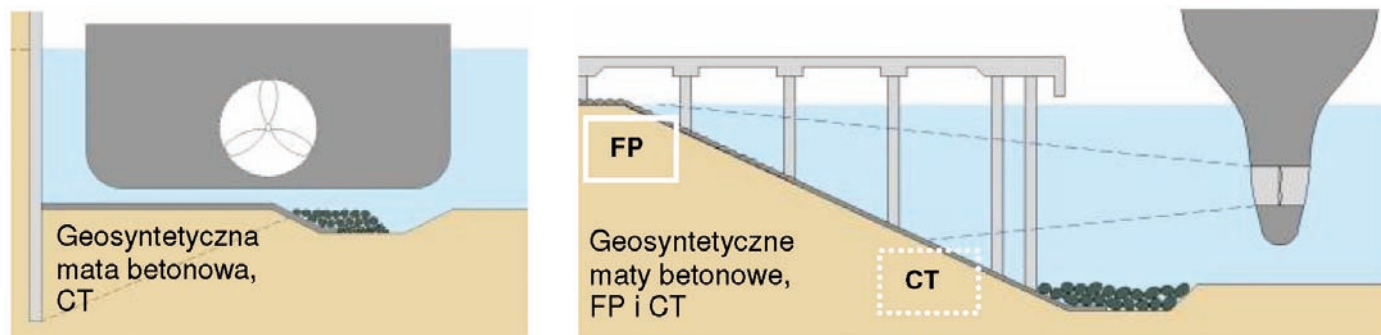
Geosyntetyczne maty betonowe są obecnie coraz częściej stosowane do ochrony dna nabrzeży i stanowisk postojowych statków. Wraz ze wzrostem tonażu statków, a tym samym i wzrostem ich mocy napędowej, nastąpił znaczny wzrost oddziaływań erozyjnych na dno i skarpy przy nabrzeżach portowych. Geosyntetyczne maty betonowe charakteryzują się zwiększoną odpornością na erozję ze względu na ich strukturalny układ (płyty lub tarcze betonowe połączone są przegubowo lub na łączach elastycznych) (rys. 1). Maty te mogą chronić skutecznie dno i skarpy nawet przy prędkości prądu wody w strumieniu zaśrubowym do 12,5 m/s. W artykule będą przedstawione metody projektowania tego rodzaju umocnień odnośnie następujących oddziaływań przy nabrzeżu:

- strumień zaśrubowy napędu głównego statku,
- prąd wodny od sterów strumieniowych,

- prąd wodny od strumieniowych sterów dziobowych,
- prąd przepływu wody w akwenie,
- falowanie w akwenie.

Geosyntetyczne maty betonowe są stosowane już od około 50 lat i do tej pory zdołano poznać ich zachowanie się pod wymienionymi oddziaływaniami i zgromadzić odpowiednie doświadczenia. W niniejszym artykule będą omówione technologie instalacji mat, jak i najważniejsze aspekty systemu ochrony antyerozyjnej na przykładach ich zastosowania w portach afrykańskich, takich jak: Cotonou w Beninie, Abidjan na Wybrzeżu Kości Słoniowej i Tanzanii.

Artykuł skierowany jest głównie do pracowników zarządów portowych, projektantów budowli morskich i portowych oraz specjalistycznych firm hydrotechnicznych.



Rys. 1. Przykład ochrony typowych nabrzeży portowych przed erozją dna i skarp nabrzeża

SYSTEMY GEOSYNTETYCZNYCH MAT BETONOWYCH

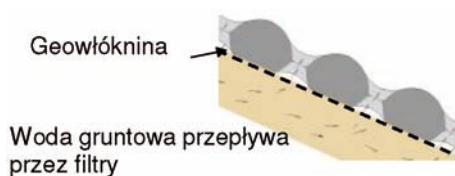
Geosyntetyczne maty są układane pod wodą przez nurków, którzy łączą je z sobą w większe panele, a następnie współpracują przy ich napełnianiu ultra-płynnym i drobnopłynnym betonem. Płynny beton pompowany do maty jest chroniony przed rozsegregowaniem się kruszywa i wymywaniem cementu poprzez odpowiednio dobraną strukturę geotkaniny stanowiącej zewnętrzne powłoki maty. Maty stanowią zatem dwie powłoki z tkanin połączonych ze sobą za pomocą dystanserów (pasemek lub taśm), które zapewniają odpowiednią ich formę (teksturę powierzchni) i ich grubość. Dystansery zapewniają także odpowiednią wytrzymałość na rozerwanie maty w trakcie pompowania betonu, co umożliwia ich napełnianie pod pewnym ciśnieniem roboczym lub ich instalację na skłonach lub stokach (rys. 2 i 3). Łąca pomiędzy panelami kształtuje się w formie przegubów pracujących na tarcie (rys. 2). W ten sposób tworzy się system płyt betonowych wzajemnie zazębionych przegubowo, co przyczynia się do dużej odporności na oddziaływanie strumieni wodnych wywołanych manewrami statków lub falowaniem [2]. Maty wypełnia się na ogół betonem składającym się z piasku i koloidowego zaczynu cementowego, który uzyskuje wytrzymałość na ściskanie 35 N/mm^2 i w warunkach wody morskiej ma trwałość około 50 lat.

MATY O STAŁEJ GRUBOŚCI (CT – Constant Thickness)

Maty CT stosuje się do typowych oddziaływań statków na dno nabrzeży ze ścianką szczelną i skarpy nabrzeży pomostowych. Maty te mają jednakową grubość, stąd można je nazywać również matami płytowymi. Wytrzymują one dobrze oddziaływanie strumieni zaśrubowych i oddziaływanie bocznych sterów strumieniowych, pomimo stosunkowo małej ich grubości w porównaniu z potrzebną grubością narzutów kamiennych dla tego rodzaju umocnień. Grubość mat wynosi od 100 do 600 mm, przy czym na ogół stosuje się maty o grubości w zakresie $150 \div 300 \text{ mm}$. Zaleca się jednak na dnie nabrzeży stosować maty o grubości minimum 200 mm, jeśli przewiduje się bagrowanie w akwenach portowych za pomocą większych pogłębiarek. Do ochrony przed wyporem wody stosuje się otwory upustowe, rozmieszczone w równomiernej siatce, którymi woda gruntowa może wypływać swobodnie spod maty.



Rys. 2. CT – mata o stałej grubości



Rys. 3. FP – mata z punktami filtracyjnymi

MATY Z PUNKTAMI FILTRACYJNYMI (FP – Filter Point)

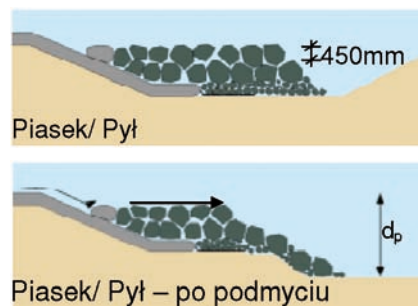
Duża porowatość i dobra wodoprzepuszczalność tkanin wszytych w punkty filtracyjne umożliwia stosowanie mat (FP) zarówno na skarpach, jak i w rejonach pływów przy falowaniu o średniej wysokości fali znacznej H_s , zwykle do 1,0 m, a maksymalnie 1,5 m. Żebra maty z punktami filtracyjnymi (FP) mają grubość $150 \div 250 \text{ mm}$, a zastępcza grubość mat wynosi odpowiednio $100 \div 166 \text{ mm}$. Wymaga się podścielenia maty FP geowłókniną, aby nawet w przypadku lokalnej destrukcji maty nie utraciła ona swojej zdolności filtracyjnej. Mat FP nie stosuje się na dnie płytkich akwenów, gdzie w wyniku abrazji pod wpływem działania sterów strumieniowych lub strumieni zaśrubowych punkty filtracyjne mogłyby ulec uszkodzeniu.

OSIADANIE I PODATNOŚĆ MAT

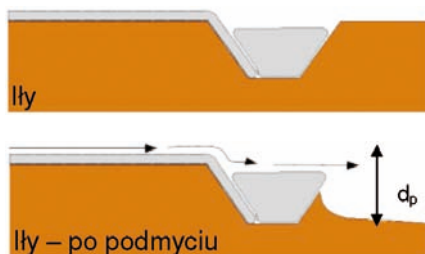
Na ogół dno nabrzeża kształtuje się poprzez bagrowanie w podłożu naturalnym, często już skonsolidowanym, stąd w takich przypadkach nie należy oczekiwać istotnych osiadań dna. Dlatego podatność mat w takich warunkach nie stanowi większego problemu i mogą być one instalowane w postaci jednego panelu o szerokości równej szerokości umocnienia bez dylatacji czy też przegubów. W przypadku nasypów lub świeżo odłożonych sedymentów rozmiary paneli należy zredukować tak, aby ich podatność odpowiadała oczekiwanym przemieszczeniom.

UKSZTAŁTOWANIE OBRZEŻY UMOCNIEŃ ZA POMOCĄ MAT

Umocnienie za pomocą mat wymaga starannego wyboru konstrukcji na jego obrzeżu, a więc na przejściu: umocnienie matą – nieumocnione dno akwenu. Najbardziej skuteczne są tu rowy kotwiące, wypełniane balastem w postaci narzutu kamiennego. Na ogół jednak matę zagłębia się w dno akwenu i balastuje narzutem kamiennym (rys. 4). W literaturze [10] zaleca się wykonanie narzutu kamiennego w trzech warstwach, co powinno stanowić skuteczną ochronę maty przed podmyciem na jej obrzeżu. W gruntach spoistych najbardziej skutecznym może być klin betonowy wykonany na obrzeżu maty, który skutecznie chroni ją przed podmyciem (rys. 5). Narzuty kamienne wymagają umocnienia na większą głębokość d_p , jednak mogą być one łatwo monitorowane i remontowane, o ile wystąpią większe przegłębienia wynikające na przykład z ruchu statków.



Rys. 4. Umocnienie narzutowe dna na obrzeżu maty



Rys. 5. Betonowy klin kotwiący matę na jej obrzeżu w dnie ilastym

WYMIAROWANIE GEOSYNTETYCZNYCH MAT BETONOWYCH

Do ochrony nabrzeży przed ich destrukcją i zapewnienia ich bezawaryjnej pracy, system ochronny powinien być odporny na następujące oddziaływania i ich skutki:

oddziaływania	skutki/objawy
– prąd zaśrubowy	– przegłębienie w dnie przy nabrzeżu
– stery strumieniowe (RoRo)	– utrata utwardzenia ścianki lub jej podmycie
– strumieniowy ster dziobowy	– utrata oporu gruntu przed ścianką
– prąd wodny	– erozja skarp i osuwiska
– falowanie	– niecka podmywu, zagłębienia w dnie

Geosyntetyczne maty betonowe można odpowiednio zaprojektować na te oddziaływania. W przeciwieństwie do narzutów kamiennych maty betonowe nie mogą ulegać przemieszczeniom typu obrotowego lub poślizgowego, stąd ich zniszczenie polega na wyłamaniu się betonu w panelach podlegających zbyt duże-

mu ssaniu na ich górnej powierzchni lub wyporowi wody od spodu. Strefy podlegające ssaniu lub wyporowi:

- pod śrubą napędową,
- w strefach działania steru strumieniowego,
- przy nabrzeżach pomostowych od wirów i strumieni wodnych,
- w miejscach nierówności dna pod działaniem prądów wodnych,
- w miejscach wyporu wywołanego powrotem fali.

W wyniku badań i monitoringu opracowano metody wyznaczania wielkości ssania lub naporu od manewrujących statków, co pozwala obliczać grubości mat przy uwzględnieniu ich ciężaru własnego i oporu wywołanego ich panelowym charakterem pracy.

ODDZIAŁYWANIA OD ŚRUBY NAPĘDOWEJ

Ssanie pod śrubą napędową

Oddziaływanie ssące strumienia zaśrubowego (rys. 7) można wyznaczyć w oparciu o metodę podaną w publikacji [13] przy uwzględnieniu uzupełnień według [2], które pozwalają również na określenie obciążeń wywołanych naporem wody (rys. 6 i 7).

Maksymalna prędkość strumienia przy dławieniu mocy napędu [8]:

$$U_o = c \cdot \left(\frac{P_B}{D_p^2} \right)^{1/3} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

gdzie:

D_p – średnica śruby napędowej,

P_B – Moc znamionowa przy nabrzeżu,

c – współczynnik określany według [9], dla śruby standardowej: $c = 1,48$, dla śruby dławionej: $c = 1,17$.

Prędkość przy śrubie:

$$U_p = \frac{U_o}{2} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

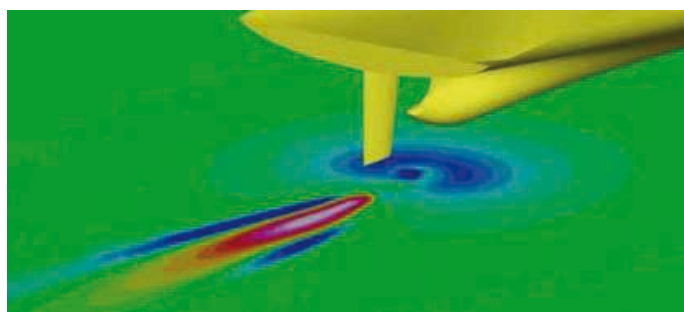
Napór prądu zaśrubowego:

$$t = 2 \cdot \rho_w \cdot U_p^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (3)$$

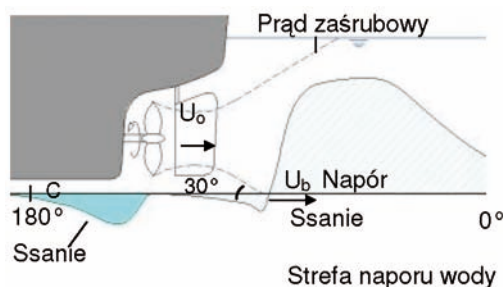
gdzie:

$\rho_w = 1030 \text{ kg/m}^3$ – gęstość wody (woda morska)

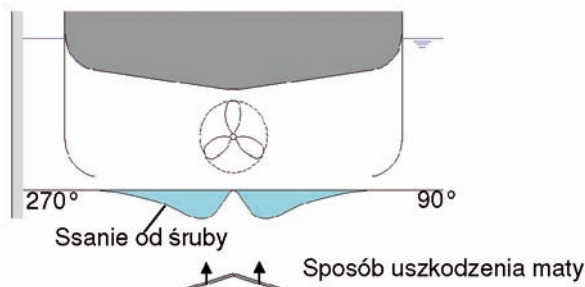
Wartość maksymalną ssania pod śrubą S_p ustala się w oparciu o rys. 8, (nomogram ten został opracowany przez Wellicome

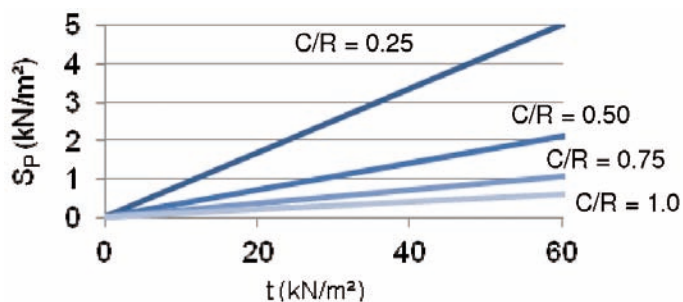


Rys. 6. Obciążenie dna wywołane prądem zaśrubowym statku

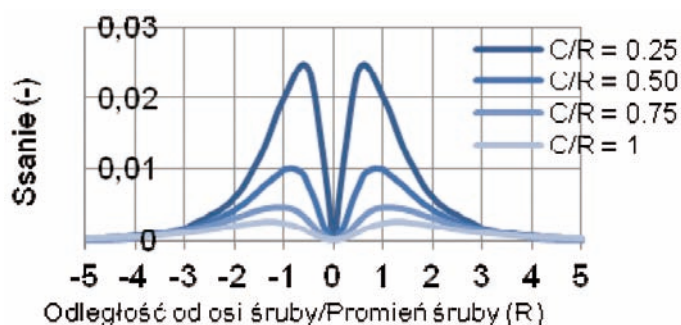


Rys. 7. Oddziaływania od napędu śrubowego, obciążenie dna i sposób uszkodzenia maty





Rys. 8. Maksymalna wartość ssania S_p wody w zależności od naporu t według Wellicome [13]



Rys. 9. Rozkład ssania według Wellicome [13]

[13]) dla płytkiego dna pod śrubą: $C/R = 0,25 \div 1,00$. Wartość obliczeniową ssania wyznacza się wzorem (4):

$$S_D = S_p \cdot I_Q \quad (4)$$

gdzie:

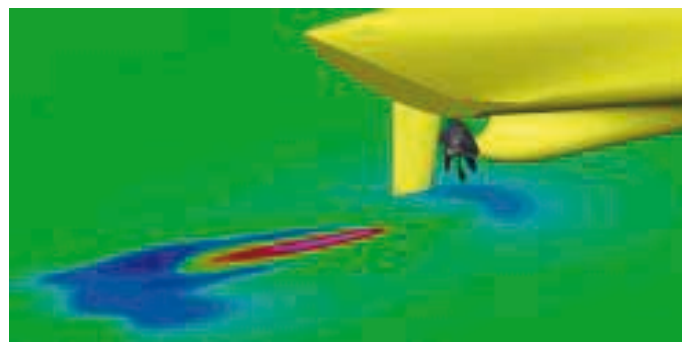
C – głębokość wody pod śrubą [m],

R – promień śruby [m],

I_Q – współczynnik uwzględniający nierówność powierzchni górnej maty po jej napelnieniu [13]. Parametrem określającym nierówność jest stosunek zagłębienia do długości, na jakiej ono występuje. Nierówności dna nie mają większego wpływu na wielkość ssania, o ile minimalna głębokość wody pod śrubą C jest zachowana [11].

Ssanie wywołane prądem zaśrubowym ma charakter przestrzenny i jego oddziaływanie przyjmuje się jako radialne w zakresie kąta rozwarcia strumienia od 45° do 315° (rys. 9). Geosyntetyczne maty betonowe powinny być projektowane ze współczynnikiem bezpieczeństwa $SF \geq 2,0$ w celu obniżenia prawdopodobieństwa wystąpienia lokalnych uszkodzeń. Należy przy tym przyjąć najbardziej niekorzystną kombinację: C/R (stosunek głębokości dna pod śrubą do promienia śruby napędowej) i P_B (moc znamionowa statku manewrującego przy nabrzeżu). Takie zwymiarowanie grubości maty jest szczególnie istotne w miejscach oddziaływania sterów strumieniowych na skarpach podwodnych i stanowiskach z dużą intensywnością ruchu statków. W prostych projektach można przyjmować taką grubość maty, aby jej powierzchniowy ciężar pod wodą był co najmniej równy wartości obliczeniowej ssania.

Bardziej dokładne analizy stateczności polegają na uwzględnieniu w obliczeniach wytrzymałości na rozciąganie betonu przy zginaniu i wytrzymałości na rozciąganie geotkanin, jakimi charakteryzują się panele z geosyntetycznych mat betonowych. Poza tym można uwzględnić bardziej dokładnie rozkład ssania w poszczególnych strefach dna. Do niezbrojonych paneli betonowych można skorzystać przy ich wymiarowaniu z BS 5628



Rys. 10. Oddziaływanie na dno $C/R = 1,0$

Tabl. 1. Współczynnik oddziaływania powierzchniowego

	Nierówność powierzchni	I_Q
Maty CT	0,16	1,15
Maty FP i inne	0,33	1,30

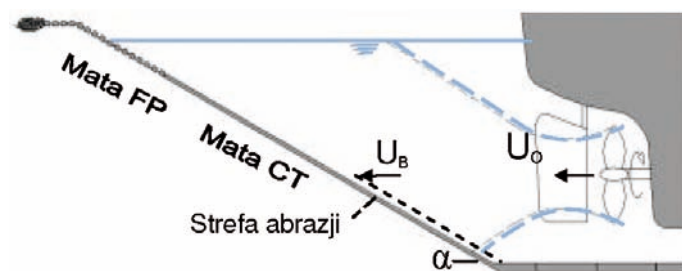
lub też zastosować metodę przegubów plastycznych. Przy zastosowaniu współczynnika bezpieczeństwa $SF > 2$ naprężenie rozciągające przy zginaniu betonu jest nieistotnie małe w porównaniu do jego wartości dopuszczalnej. Tak wymiarowane maty sprawdziły się wielokrotnie i nie zarejestrowano, jak do tej pory, większych uszkodzeń czy też awarii umocnionego dna.

Oddziaływania prądu zaśrubowego na dno

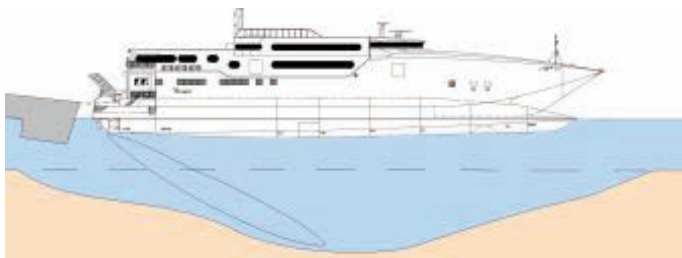
Oddziaływanie strumienia od śruby za sterem (rys. 10) wywołuje duży napór wody na dno oraz lokalne ssanie o dużo mniejszej wielkości. Przy małej odległości śruby od dna (mała wielkość C/R , rys. 7), ssanie pod śrubą stanowi jednak najniekorzystniejszy przypadek. Sposób wyznaczania wielkości ssania i rozległości stref ssania podano w publikacji [11].

Oddziaływania prądu zaśrubowego na skarpy nabrzeża

W tym przypadku wyznacza się maksymalne prędkości prądu zaśrubowego na skarpie U_B według [1], a następnie oblicza się wielkości naporu wody i ssania oraz odpowiadające im grubości maty dla skarp o nachyleniu nie większym niż 30° . Ciężar własny maty jest przyjmowany jako składowa normalna do skarpy (tzn. ciężar jednostkowy maty jest mnożony poprzez $\cos \alpha$, rys. 11)



Rys. 11. Oddziaływanie śruby napędowej



Rys. 12. Stanowisko promowe, praca napędu strumieniowego

STATKI RO-RO I PROMY ODDZIAŁYWANIE NAPĘDÓW STRUMIENIOWYCH

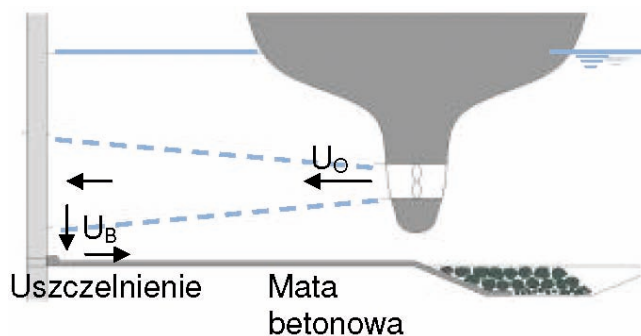
Napędy strumieniowe mogą powodować przegłębienia w dnie nawet do 9 m (rys. 12). Geosyntetyczne maty betonowe były stosowane na wielu nabrzeżach, nawet przy prędkości prądu wody w strumieniu aż do 12,5 m/s. W publikacji [2] można znaleźć wiele szczegółów z tych zastosowań i metody projektowania geosyntetycznych mat betonowych dla takich przypadków.

ODDZIAŁYWANIE BOCZNYCH STERÓW STRUMIENIOWYCH

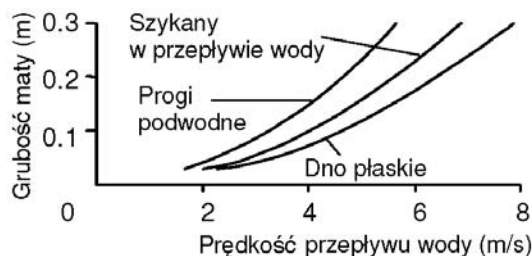
Boczne stery strumieniowe mogą powodować znaczne szkody erozyjne w dnie z powodu odbijania się strumienia od ściany nabrzeża i skierowania prądu wody w kierunku dna (rys. 13). W przypadku dna umocnionego matami betonowymi odbity strumień wywołuje głównie napór od prądu wodnego, zatem maty nie podlegają obciążeniom większym niż od napędu głównego. Stąd też największą uwagę należy skupić na poprawnym rozwiązaniu konstrukcji styku maty ze ścianką, to znaczy uszczelnieniu tego styku. Boczne stery strumieniowe oddziałują na skarpy nabrzeży na znacznie mniejszej powierzchni niż napęd główny. Prędkość prądu wody w takim strumieniu można obliczyć w oparciu o publikacje [1, 9], a projektowanie umocnienia jest podobne do zasad stosowanych przy śrubach napędowych.

ODDZIAŁYWANIE PRĄDÓW MORSKICH

W przypadku prądów morskich skierowanych równoległe do nabrzeża wzdłuż skarpy lub osi podłużnej toru podwodnego można stosować maty betonowe o stałej grubości typu CT (rys. 14) i [10]. Oddziaływanie ssące prądu wody jest w tym



Rys. 13. Ster boczny



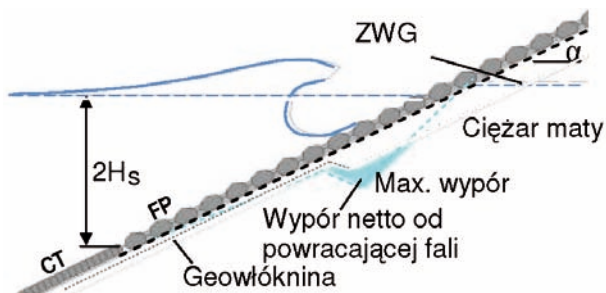
Rys. 14. Grubość maty / Prędkość przepływu wody

przypadku najbardziej niekorzystnym czynnikiem i zależy od prędkości przepływu wody, nierówności dna i tekstury maty (rzeźby jej górnej powierzchni). W projekcie przewidującym zastosowanie maty typu FP może być również wykorzystany rys. 14, jednak tak wyznaczoną grubość maty należy powiększyć o co najmniej 15% z powodu większych nierówności na jej górnej powierzchni. W przypadku zastosowania maty FP należy podścielić ją odpowiednio dobraną geowłókniną, która w przypadku zniszczenia punktów filtracyjnych nadal będzie stanowić ochronną warstwę separacyjno-filtracyjną przed podmyciem maty. Włóknina powinna być dobrana na podstawie ściśle zdefiniowanych wartości parametrów technicznych, takich jak opór na przebicie, wytrzymałość na rozciąganie, wielkość miarodajna porów i wodoprzepuszczalność, a nie na podstawie parametru zaopatrzeniowego, jakim jest gramatura – co jest bardzo często popełnianym błędem. Maty FP mogą być stosowane głównie w miejscach o słabym prądzie morskim lub do zabezpieczeń krótkoterminowych.

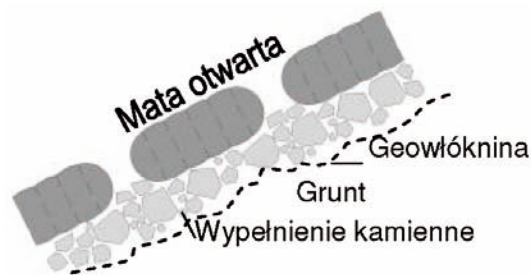
W przypadku spodziewanych większych osiadań dna wielkość paneli należy zredukować tak, aby uzyskać odpowiednią podatność maty na oczekiwane deformacje. Jednak w celu zachowania podobnego „efektu panelowania”, należy odpowiednio powiększyć grubość maty. Przy stosunkowo niewielkich przeszkodach (pale nabrzeży pomostowych i pirsów, szykany o szerokości $< 7 \times$ grubość maty) czy też zawężeniach przekrojów w przepływie wody (do 20%) zaleca się, między innymi w publikacji [11], przyjmować na podstawie rys. 14 prędkość przepływu powiększoną o miarę względną zawężenia przekroju i tak otrzymaną grubość powiększyć także o tenże wskaźnik. W miejscach działania silniejszych prądów morskich oszacowanie działającego tam ssania należy oprzeć na badaniach modelowych lub stosować rozwiązania konserwatywne oparte na doświadczeniu.

ODDZIAŁYWANIA OD FALOWANIA NA SKARPY NABRZEŻY

Wodoprzepuszczalne maty typu FP (*filter point*) są stosowane generalnie na skarpach w miejscach pływów i strefach falowania, ponieważ umożliwiają one swobodny odpływ wody spod siebie. Grubość maty zależy od stosunku wodoprzewodności jej punktów filtracyjnych (zastępczy wskaźnik wodoprzepuszczalności k_m do wodoprzepuszczalności gruntu w jej podłożu k_s) oraz wysokości fali znacznej H_s . W przypadku $k_m > k_s$ praktycznie nie może nastąpić wypór maty, gdyż woda może odpływać szybciej punktami filtracyjnymi niż woda wypływająca z gruntu skarpy. Gdy $k_m < k_s$, woda gruntowa powoduje wypór w strefie



Rys. 15. Wypór od powracającej fali



Rys. 16. Mata „otwarta”

powrotu fali, jak to pokazano na rys. 15. W takim przypadku należy zastosować większą grubość maty w celu kompensacji wyporu wody. Grubość maty można obliczyć według [8, 11] lub następującym wzorem:

$$D = f \cdot H_s \quad (5)$$

gdzie:

f – wskaźnik stateczności według tabl. 2,

H_s – wysokość fali znacznej.

Powyższy wzór zachowuje swoją ważność w zakresie: $H_s < 1,5$ m i skarp o kącie nachylenia do 30° . Początkowa wodoprzepuszczalność maty FP jest rzędu 10^{-3} m/s, ale z upływem czasu i postępującą kolmatacją redukuje się do rzędu 10^{-4} m/s w ilach i pyłach, a do 5×10^{-4} m/s w piaskach. Porowate umocnienie skarpy matą FP powinno sięgać na głębokość ($2 \times H_s$) poniżej wody niskiej; głębiej można zastosować już mniej wodoprzepuszczalne umocnienie. Analizy wykazały, że kąt nachylenia skarpy ma mały wpływ na potrzebną grubość maty, ponieważ wraz ze wzrostem α skraca się odcinek podlegający wyporowi.

W matach betonowych na skarpie ważne jest odpowiednie ich podparcie u podnóża skarpy w celu zapobieżenia poślizgowi i podmyciu. Jeśli rezygnuje się z takiego podparcia lub jest ono niemożliwe, należy przewidzieć odpowiednie kotwienie górą, aby uniknąć poślizgu maty. W matach FP można przyjąć, że współczynnik nabiegu fali wynosi $r = 0,95$ [8].

Jeżeli umocnienie skarpy matą FP ma być wzmocnieniem długotrwałym, należy podścielić matę geowłókniną w celu zabezpieczenia przed podmyciem w wyniku ewentualnego uszkodzenia punktów filtracyjnych. Przy oddziaływaniach o charakterze dynamicznym (pulsujących, wirowych itp.) i przy dnie piaszczystym zaleca się, aby miarodajna średnica porów w geowłókninie nie była większa niż $0,7 \times O_{90,w}$ [8], – gdzie $O_{90,w}$ jest

wymaganą średnicą porów w geowłókninie przy stabilnej filtracji wyznaczaną dla danego składu ziarnowego gruntu w podłożu skarpy lub podsypce. Mata FP powinna wykazywać się większą wodoprzepuszczalnością niż grunt w skarpie; zaleca się przy tym $k_m / k_s > 10$. W przypadku podłoża o wysokiej wodoprzepuszczalności zaleca się zastosowanie tzw. mat „otwartych”, a więc mat bez punktów filtracyjnych z odkrytymi otworami. Wodoprzepuszczalność maty „otwartej” powinna być równa co najmniej $10 \times$ wodoprzepuszczalność podkładu, a wskaźnik stateczności powinien wynosić $1/6$ przy wysokości fali znacznej H_s nie większej od 1,5 m.

Dodatkowe zabezpieczenie maty na obrzeżach jej fartucha i u podnóża ścianek lub skarpy jest bardzo ważnym elementem całego systemu. W gruntach piaszczystych o małej zawartości frakcji pylastej i ilastej i ($d_{15} > 0,15$ mm) drobne cząstki mogą być łatwo wypłukane pod wpływem falowania, co zachodzi w szczególności, gdy $k_m < k_s$ przy dłuższych sztormach. W takich przypadkach można zastosować maty „otwarte”, przy czym narzut kamienny w oknach mat służy jako tymczasowe zabezpieczenie (rys. 16).

STATECZNOŚĆ ZBOCZA PODWODNEGO UMOCNIONEGO POWIERZCHNIOWO MATĄ

Poza dowodem stateczności przy płaskim poślizgu geosyntetycznych mat betonowych po skarpie należy również przeanalizować stateczność umocnionych skarp nabrzeży ze względu na głębszy poślizg w warunkach falowania, uwzględniając przy tym odpowiednio ciśnienie wody w porach. Można posłużyć się metodą Bishopa dotyczącą kołowych powierzchni poślizgu lub metodą Janbu, która pozwala zbadać stateczność dowolnej ale statycznie dopuszczalnej powierzchni poślizgu. Stosując metodę stanów granicznych, zgodnie z EC 7, należy odpowiednio w danym przypadku stanu obciążenia budowli i sytuacji obliczeniowej przyjąć wartości cząstkowych współczynników bezpieczeństwa, a analizę prowadzić dla podejścia geotechnicznego GEO.

INSTALACJA MAT

Technologia szalunków tekstylnych

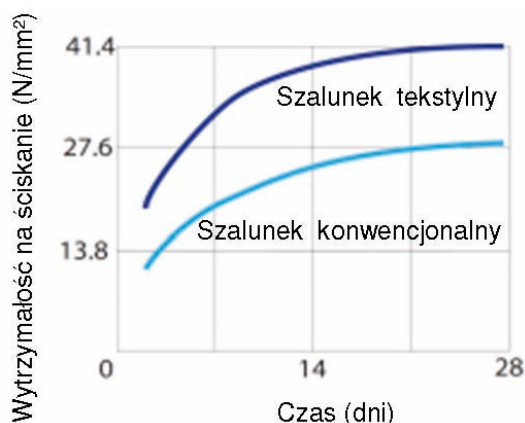
Geosyntetyczne maty mają stosunkowo mały ciężar, dlatego też można je łatwo transportować i zastosować praktycznie wszędzie. Maty łączy się na miejscu ich przeznaczenia w odpowiednie panele, które są instalowane przez nurków pod wodą

Tabl. 2. Wskaźnik stateczności f , maty typu FP

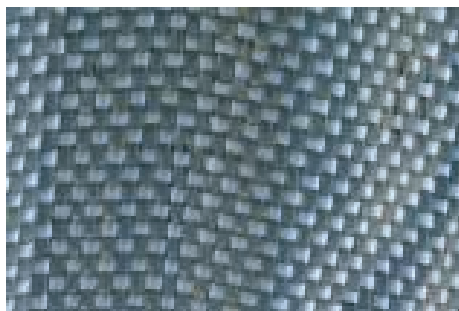
Rodzaj gruntu	Uziarnienie [mm]	Rząd wodoprzepuszczalności k_s [m/s]	Wskaźnik stateczności f [–]
Piasek gruby	$2 \div 0,5$	10^{-3}	$1/4$
Piasek średni	$0,5 \div 0,25$	10^{-3}	$1/5$
Pospółka	$10 \div 0,05$	10^{-4}	$1/6$
Piasek drobny	$0,25 \div 0,05$	10^{-5}	$1/10$
Piasek pylasty	$2 \div 0,005$	10^{-6}	$1/10$
Gлина piaszczysta	$1 \div 0,001$	10^{-7}	$1/10$



Rys. 17. Instalacja i napęnianie mat betonem



Rys. 18. Wytrzymałość betonu w zależności od rodzaju szalunku



Rys. 19. Porowata tkanina

i łączone ze sobą na różne sposoby (rys. 17). Maty wypełniane są płynnym betonem, w którym wagowy stosunek piasku do zaczynu cementowego wynosi: 2:1.

Maty są formowane z porowatych tkanin, które mogą zatrzymać zaczyn cementowy, jednak pozwalają na odpływ nadmiaru wody zarobowej (zdjęcie takiej tkaniny przedstawiono na rys. 19). Zjawisko to polegające na obniżeniu się wskaźnika w/c w przypowierzchniowej strefie betonu bywa nazywane jako zagęszczenie ciasta cementowego. Zjawisko to powoduje wyraźny wzrost wytrzymałości betonu i podnosi odporność jego powierzchni na ścieranie (rys. 18) [3].

Projekt instalacji maty powinien zawierać również obliczenia statyczne szalunku geosyntetycznego, który musi mieć odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie na szwach oraz złączach i powinien zapewniać odpowiedni poziom bezpieczeństwa w trakcie pompowania betonu do maty. Do stosowanych betonów drobnoziarnistych średnica porów w tkaninie $O_{90,w}$ powinna

być mniejsza od d_{50} piasku zastosowanego w mieszance betonowej, co chroni przed wymywaniem cementu z zaczynu. Tkaniny są wykonywane najczęściej z poliestru i poliamidu, są zatem samozatapialne ze względu na większą gęstość tych polimerów od gęstości wody. Maty są produkowane (konfekcjonowane) w formie paneli o szerokości od 3,0 m do 5,0 m i pakowane odpowiednio do transportu na budowę. Poza omówionymi wcześniej zastosowaniami, maty są wykorzystywane do umocnień brzegów i dna kanałów wodnych, rzek i podpór mostowych. Jednym z bardzo ciekawych zastosowań może być również instalacja geosyntetycznej maty betonowej na palach w celu wzmocnienia ich skorodowanych trzonów [5] i jako płyty fundamentowe pod prefabrykowane elementy budowli morskich [6].

Osiadania i podatność mat

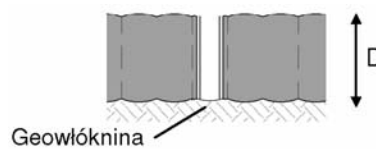
Wymiary paneli muszą być odpowiednio dopasowane, aby mogły mieć odpowiednią podatność w przypadku wystąpienia nierównomiernych osiadań, które występują najczęściej w narefulewanych piaskach. Podane w tabl. 3 zalecane szerokości paneli i wartości różnic dopuszczalnego osiadania odnoszą się do całej szerokości umocnienia. Przykładowo, na nabrzeżu Baławan zastosowano maty o szerokości 1,0 m, aby odpowiednio dopasować fartuch umocnienia do dużych i nierównomiernych osiadań [7].

Otwory upustowe w matach CT

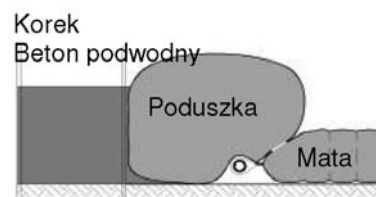
W strefach pływów morskich należy liczyć się z ruchem wody gruntowej pod umocnieniem dna czy też skarp, co może wywołać nadmierny wypór mat. Można zapobiegać temu,

Tabl. 3. Osiadania i wymiary paneli

Osiadania	Wymiar panelu
0 ÷ 70 mm	Szerokość umocnienia
75 mm	10 m
125 mm	3 m
500 mm	1 m



Rys. 20. Otwory upustowe w macie CT



Rys. 21. Poduszka przyścienna i korek z betonu podwodnego

stosując w matach rodzaju CT otwory upustowe, które dadzą umocnieniu potrzebną wodoprzepuszczalność (rys. 20). Dno tych otworów powinno być zabezpieczone geowłókniną w celu zapewnienia stabilnej filtracji wody spod dna. Sposób projektowania takich otworów i ich rozstawu podano w [11].

Uszczelnienia przysięenne

W celu uszczelnienia styku maty ze ścianką wykonuje się poduszki przysięenne z georękawów wypełnionych betonem, a następnie uszczelnia się wnęki w profilach ścianek za pomocą korków z betonu podwodnego. Poduszki przysięenne mogą być również wykorzystane do ścian płaskich i gładkich, ale i w tym przypadku zaleca się betonowanie korków w celu wypełnienia ewentualnych pustek (rys. 21).

OCENA PORÓWNAWCZA

Geosyntetyczne maty betonowe mają w porównaniu do innych rodzajów umocnień (narzuty kamienne, bloki betonowe itp.) stosunkowo małą grubość (rys. 22). Można zatem oczekiwać oszczędności wynikających z mniejszej głębokości wykopów przy nabrzeżach i mniejszej wymaganej długości ścianek szczelnych.

W instalacjach geosyntetycznych mat betonowych na ogół nie wymaga się stosowania specjalistycznego i ciężkiego sprzętu do robót na morzu. Najczęściej instaluje się je przy pomocy nurków z nabrzeża lub skarpy nabrzeża. Szczególnie korzystne i proste jest umocnienie skarp nabrzeża, gdzie maty można rozwinąć pod wodą, wypełnić je i wykonać rów kotwiący u podnó-

ża, bez użycia ciężkiego sprzętu. Ten sposób umocnienia można zastosować w przypadku większych nierówności w dnie i skarpach bez konieczności dokładnego ich wyrównania i małych tolerancji wyrównania. Maty w trakcie ich instalacji i pozycjonowania mają stosunkowo mały ciężar, co zmniejsza ryzyko dla nurków, czyniąc tę pracę bezpieczniejszą w porównaniu do zaptaniania ciężkich prefabrykatów. Biorąc pod uwagę aspekty środowiska naturalnego, zastosowanie mat zmniejsza kubaturę bagrowania i objętości materiałów masowych, przy zapobieganiu wymywania cementu w trakcie napełniania betonem. Przykładowe koszty jednostkowe umocnień narzutowych i umocnień za pomocą mat podano na rys. 23. Z zestawienia wynika, że maty betonowe są zdecydowanie bardziej efektywne finansowo wraz ze wzrostem prędkości prądu wody.

SPECYFIKACJE NA ROBOTY BUDOWLANE

Podobnie jak w innych rodzajach budowli morskich maty betonowe znajdują się pod wodą i nie mogą być bezpośrednio kontrolowane lub monitorowane, stąd też wykonawstwo tych robót powinno podlegać ścisłemu, profesjonalnemu nadzorowi, pracującemu według morskiego systemu kontroli jakości. Projekt umocnienia wraz z rysunkami technicznymi i obliczeniami stateczności powinien być przedłożony do weryfikacji przed uzyskaniem zezwolenia budowlanego. Standardowo projekt przedkładany do zezwolenia powinien zawierać:

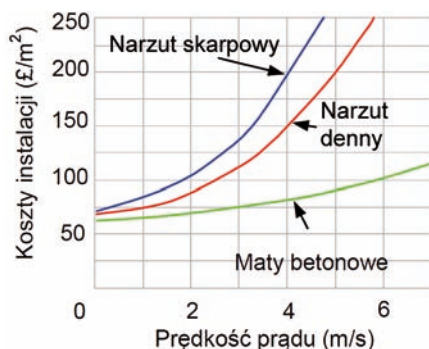
- plan nadzoru i plan marynistycznej kontroli dotrzymywania jakości robót,
- plany instalacji mat wraz z detalami połączeń,
- instrukcje instalacji mat wydane przez dostawców lub nadzór techniczny,
- plan robót nurkowych.

Dokumentacja techniczna większych i ważniejszych projektów powinna zawierać, poza tym, następujące załączniki:

- bezpieczeństwo robót podwodnych,
- sposób przygotowania dna (podłoża) i dopuszczalne tolerancje,
- projekty robót (zabezpieczeń) tymczasowych lub pomocniczych,



Rys. 22. Grubość umocnionego dna



Rys. 23. Koszty jednostkowe



Rys. 24. Podmycie wywołane śrubą napędową

- sposób przygotowania mieszanki betonowej i jej receptury, metody badań jej jakości, sposób dokumentowania wyników badań i testów,
- harmonogram robót, wymagania dotyczące dokumentacji powykonawczej, warunki utrzymania obiektu (monitoring, prace naprawcze, konserwacja itp.).

Podana w specyfikacji technicznej grubość maty betonowej powinna mieć tolerancję od 0% do +10%. Mieszanka betonowa powinna osiągnąć po 28 dniach wytrzymałość na ściskanie co najmniej 35 N/mm², przy czym należy wyspecyfikować liczbę i procedurę tych badań. Należy zadbać o prawidłowe kierowanie budową, właściwy nadzór techniczny i dokumentację powykonawczą, aby z dostateczną pewnością można uznać, że projektowane rozmiary umocnienia, grubości maty, jej kotwienia na obrzeżu i przy ściankach szczelnych lub palach wykonano poprawnie, że wszystkie połączenia są prawidłowe i wszystkie tolerancje dotrzymane [11].

PRZYKŁADY REALIZACJI UMOCNIENÍ DNA I SKARP W PORTACH

Cotonou, Benin

Dwa nowe nabrzeża o głębokości 15 m dla statków kontenerowych były wybudowane przez firmę Bachy Soletanche w porcie Cotonou w Beninie w 2011 roku. Biuro inżynierskie Proserve zaprojektowało fartuch zabezpieczający dno (rys. 24), dostarczyło odpowiednio przygotowane panele mat geosyntetycznych i prowadziło nadzór autorski nad robotami instalacyjnymi. Maty wyprodukowała firma Huesker Synthetic GmbH w Gescher. Fartuch umocnienia zaprojektowano na ssanie wywołane napędem śrubowym, przy czym grubość mat rodzaju CT w zależności od ich lokalizacji wynosiła 240 mm i 150 mm. Mała grubość takiego umocnienia pozwoliła na mniejszą głębokość wbicia ścianki szczelnej nabrzeża.



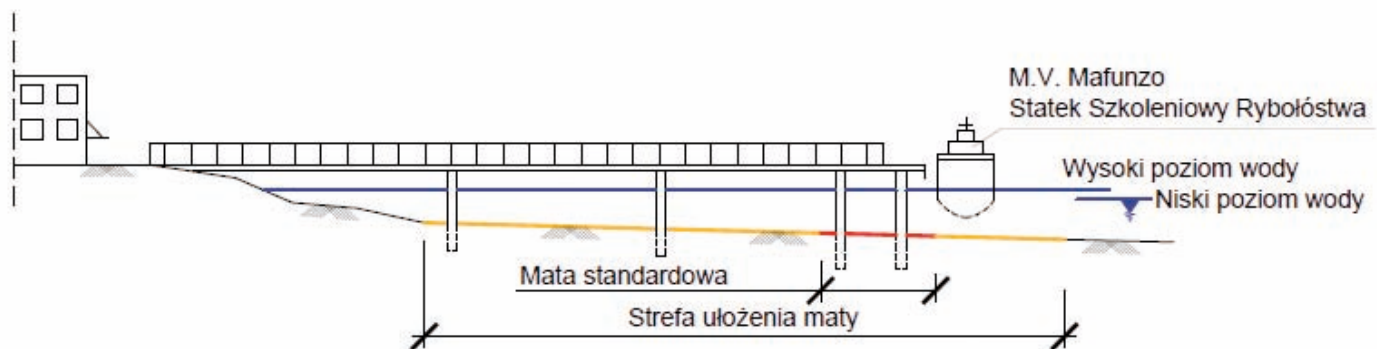
Rys. 25. Zatapianie maty w rolce; dalsza instalacja przez nurków



Rys. 26. Próbné napelnianie maty betonem na budowie



Rys. 27. Nabrzeże, Wybrzeże Kości Słoniowej



Rys. 28. Nabrzeże pomostowe w Tanzanii

Po kilku próbach napełniania mat dobrano odpowiednią recepturę betonu opartą na lokalnym cemente. Maty były rozwijane pod wodą przez nurków, a następnie wypełniane betonem za pomocą wcześniej zainstalowanych węży parciających (płaskich). Całkowita powierzchnia umocnienia wynosiła 15 000 m². Dwa zespoły nurków wykonały to umocnienie w ciągu 6 tygodni. Na obrzeżu fartucha umocnienia zastosowano narzut kamienny (zatapiający) w celu zapobieżenia podmyciu maty od strony nieumocnionego akwenu. Na rys. 25 i 26 pokazano realizację tego przedsięwzięcia.

Abidjan, Wybrzeże Kości Słoniowej

To zadanie zrealizowano około 40 lat temu, gdy skarpy porcie Abidjan zabezpieczono za pomocą mat rodzaju FP z punktami filtracyjnymi. Do produkcji betonu zastosowano lokalny piasek i cement, a do instalacji i napełniania mat wykorzystano lokalny personel, przy czym nadzór był sprawowany przez zagranicznych specjalistów (rys. 27).

Tanzania, Umocnienie dna

Równie ciekawym zadaniem była realizacja w Tanzanii, gdzie standardową matę (pływową) zainstalowano przy nabrzeżu pomostowym posadowionym na palach. W strefie oddziaływania śruby napędowej zastosowano odpowiednio grubszą matę. Natomiast w strefie porostów podwodnych - matę cieńszą z dużymi punktami filtracyjnymi (rys. 28).

WNIOSKI

Geosyntetyczne maty betonowe zapewniają dobrą ochronę antyerozyjną przy oddziaływaniu statków i sterów strumieniowych, nawet przy prędkości prądu wody do 12,5 m/s. Zdaniem autorów jest to bardziej efektywne zabezpieczenie dna niż narzuty kamienne. W artykule przedstawiono skrótowo sposób projektowania takich mat, podając źródła do dalszych bardziej szczegółowych zagadnień, w tym specyfikacji na roboty podwodne. Bardzo ważne jest odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie obrzeży fartucha umocnienia, aby zapobiec podmyciu

dna na styku: fartuch – dno nieumocnione – ścianka szczelna. Najczęściej na obrzeżach fartucha stosuje się rowy kotwiące, wypełniane narzutem kamiennym lub kliny kotwiące z betonu. Oba te sposoby są łatwe w monitorowaniu i w utrzymaniu. Tak jak w innych robotach podwodnych, zastosowanie planu kontroli i dotrzymania jakości robót i materiałów jest kluczowym elementem projektu. Bez doświadczonego personelu wykonawcy i inspektorów nadzoru ryzyko tych robót może niewspółmiernie wzrosnąć ponad ewentualne oszczędności spowodowane wyborem najtańszej oferty.

LITERATURA

1. BAW: Principals for the design of bank and bottom protection for inland waterways. Karlsruhe 2005.
2. Hawkswood M. G., Evans G., Hawkswood G. M.: Berth Protection for Fast Ferry Jets. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013, ICE, Edinburgh, UK.
3. Hawkswood M. G.: Fabric Formwork Systems Used in Marine Construction, 2nd ICFF, ISFF, Bath, UK, 2012.
4. Hawkswood M. G.: Marine Pile Repairs by Concrete Encasement, Innovative Coastal Zone Management, ICE, Belfast UK, 2011.
5. Hawkswood M. G., Allsop W.: Foundations to Precast Marine Structures. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, ICE, Edinburgh, UK.
6. Loewy E., Burdall A. C., Prentice A. G., Sir William Halcrow and Partners: Revetment Construction at Port of Belawan, Indonesia. I.C.E. London 1984.
7. McConnel, K.: Revetment Systems Against Wave Attack. HR Wallingford, Thomas Telford, London 1998.
8. PIANC Report of Working Group 22, Bulletin no 96 (1997). Guidelines for design of armored slopes under open piled quay walls.
9. Pilarczyk, K. W.: Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. Taylor and Francis, New York, USA, 2000.
10. Proserve Technical Note: Berth Scour Protection Using Concrete Mattress, 2013.
11. Proserve Ltd, Marin, 26869: Seabed Suction Force Computations, Preliminary Results, Version 2, 2013-06-04, Lafeber, F. H.
12. Wellicome J. F.: Bottom Suction Loads due to Propeller Scour Action and Ship Movements, 1981.