



ANDRZEJ JAROMINIAK

andrzejjarominiak@gmail.com

Zabezpieczenie przed rozmyciem dna cieków przy filarach mostów

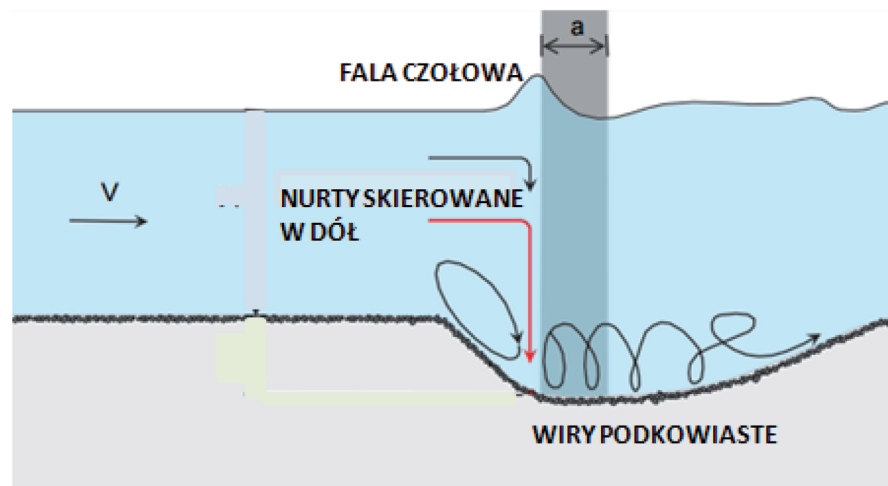
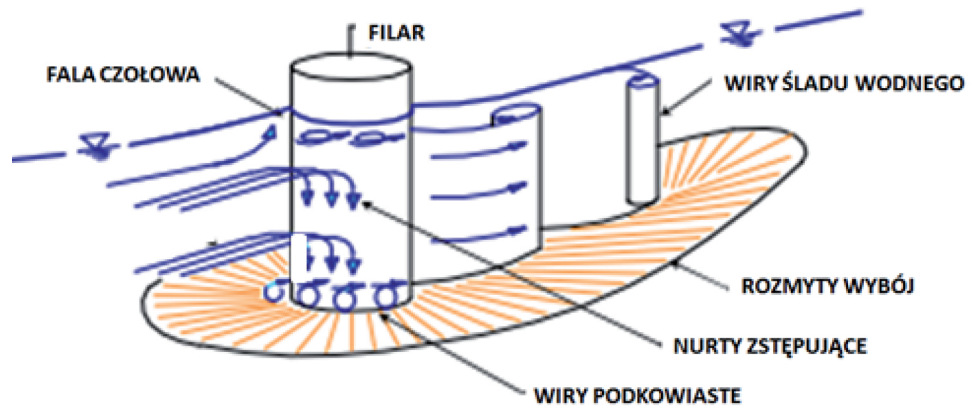
Od niepamiętnych czasów ludzie chronią filary mostów przed podmyciem obsypując je kamieniami. Ale badaniami skuteczności użycia w tym celu narzutu kamiennego zajęto się dopiero w ostatnim ćwierćwieczu. Przepisy stosowania narzutów przy podporach opracowane na podstawie badań ukazały się w pierwszej dekadzie XXI wieku.

W artykule przedstawiono zasady zabezpieczania przed podmyciem filarów mostowych narzutem kamiennym oraz krótkie informacje o innych, innowacyjnych sposobach ich ochrony. Źródłem artykułu są głównie publikacje oraz przepisy inspirowane oraz finansowane przez FHWA – Federalną Administrację Drogową USA (patrz bibliografia).

Czynniki wpływające na głębokość lokalnego rozmycia przy filarze [1], [2], [3]

Głównym mechanizmem powodującym lokalne rozmycia dna cieków przy filarze są wiry (rys. 1). Powstają w rezultacie utrudnienia przepływu wody przez filar i zwiększenia przez to jej prędkości. Przed czołem filara (od strony góry cieków) występuje fala czołowa i nurty cieków są kierowane do jego dna. Nurty uderzając w dno tworzą wiry nazwane podkowiastymi, które wynoszą grunt dna z otoczenia filara. Gdy ubytek gruntu jest większy niż ciek przynosi osadów w rejon filara, to rozmywa przy nim wybój. Zwiększaniu głębokości wyboju towarzyszy zmniejszenie siły wirów podkowiastych i przez to zmniejszenie wynoszenia gruntu z otoczenia filara. W warunkach «żywego dna»⁽¹⁾ następuje równowaga pomiędzy wynoszeniem i przynoszeniem gruntu, czyli zaprzestanie rozmycia.

⁽¹⁾ Warunki rozmycia „żywego dna/koryta” występują wtedy, gdy prędkość przepływu cieków jest większa niż prędkość powodująca rozmycia gruntów jego dna/koryta.



Rys. 1. Schemat układu wirów przy filarze mostu [Internet],[4]

Natomiast w warunkach «czystej wody»⁽²⁾, rozmycie zanika, gdy naprężenia ścinające grunt dna powodowane przez wiry podkowiaste stają się mniejsze niż krytyczne naprężenie ścinające grunt w wyboju.

Poza wirami podkowiastymi występują wokół filara także wiry pionowe przemieszczające się w dół cieków, nazwane wirami śladu wodnego (toru wodnego lub kilwateru), rys. 1. Również one rozmywają dno cieków. Intensywność wirów śladu wodnego gwałtownie maleje z oddalaniem się ich od filara. Dlatego za długimi filarami, od strony dołu cieków, często jest osadzany materiał gruntowy.

⁽²⁾ Warunki rozmycia „czystej wody” są wtedy, gdy prędkość przepływu cieków jest mniejsza niż prędkość powodująca rozmycia gruntów dna/koryta.

Wpływ na głębokość lokalnych rozmyć przy filarze mają: (1) prędkość przepływu cieku, (2) jego głębokość, (3) zwiększenie przepływu przez most, (4) szerokość i kształt filara, (5) długość filara, gdy jest położony ukośnie do kierunku przepływu, (6) wartość kąta natarcia cieku na filar, (7) ukształtowanie dna cieku, (8) cechy jego gruntów, (9) zatrzymywanie się przy filarze szczątków i lodu.

Zawsze należy liczyć się z możliwością zmian morfologii koryta cieku. W ich wyniku może wystąpić niestabilność poprzeczna lub/i pionowa koryta, znacząco zmieniająca miejscowe warunki hydrauliczne. Z upływem czasu woda dopływająca do mostu może działać na filar i jego zabezpieczenie pod zwiększonym kątem, co powiększa ich obciążenie hydrauliczne. Dlatego należy okresowo porównywać aktualną geometrię przekroju koryta cieku z tą, która była w czasie instalowania zabezpieczenia.

Podstawowe zasady zabezpieczania filarów narzutem kamiennym przed rozmyciem

Narzut bywa umieszczany na dnie cieku (rys. 2a) w wymytmym w nim wyboju lub w otworze wykopanym w dnie wokół filara (rys. 2b). Ostatnie badania wykazały, że korzystne bywa umieszczenie narzutu poniżej dna cieku (rys. 2c). Jednak wtedy trudno kontrolować stan narzutu.

Najlepszą skuteczność ochrony filara narzutem kamiennym uzyskuje się, gdy jest umieszczony w wykopie zrobionym wokół filara, wierzch narzutu znajduje się na poziomie dna przy filarze, narzut otacza filar i ma szerokość nie mniejszą niż 2-krotna szerokość filara (rys. 3). Wtedy narzut nie stanowi przeszkody dla przepływu cieku i jest możliwa kontrola stanu narzutu. Często stosowane obsypanie filara kamieniami jest sposobem niewłaściwym, gdyż wtedy narzut utrudnia przepływ i zatrzymuje szczątki niesione przez wodę, przez co zwiększa rozmycia dna przy filarze.

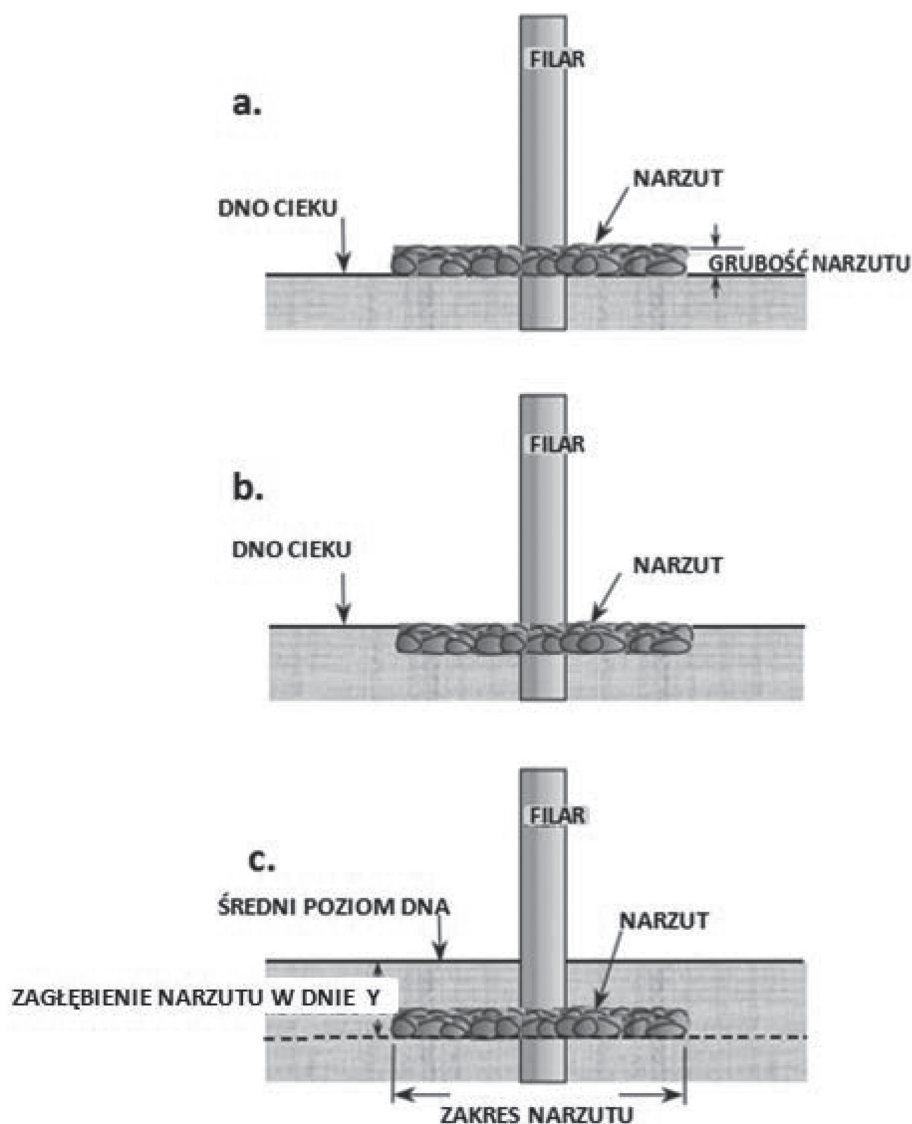
Warstwa narzutu powinna mieć grubość odpowiadającą co najmniej 3-krotnej wartości d_{50} – mediana⁽³⁾ wielkości kamieni użytych w narzucie. Jednak, gdy rozmycie wskutek przewężenia przepływu przez most przekracza $3d_{50}$, to grubość narzutu musi być zwiększona do pełnej głębokości tego rozmycia, plus wszystkie długotrwałe obniżenia dna cieku. W rzekach, w których w czasie przepływów powodziowych powstają

⁽³⁾ Mediana = wartość w połowie szeregu wartości zapisanych w kolejności rosnącej; w przypadku parzystej ich liczby – średnia arytmetyczna dwóch wartości środkowych.

na dnie diuny (rys. 4), narzut powinien być zagłębiony poniżej poziomu „dolin” pomiędzy diunami (górną granicą wysokości grzbietu diuny jest $\Delta < 0,4y$, przy czym y to głębokość przepływu). Dodatkowa grubość narzutu ze względu na któryś z tych warunków może wymagać zwiększenia jego zasięgu wokół filara. Wtedy pochylenie zboczy narzutu przyjmuje się 1:2. Narzut umieszczony pod wodą powinien mieć grubość zwiększoną o 50%.

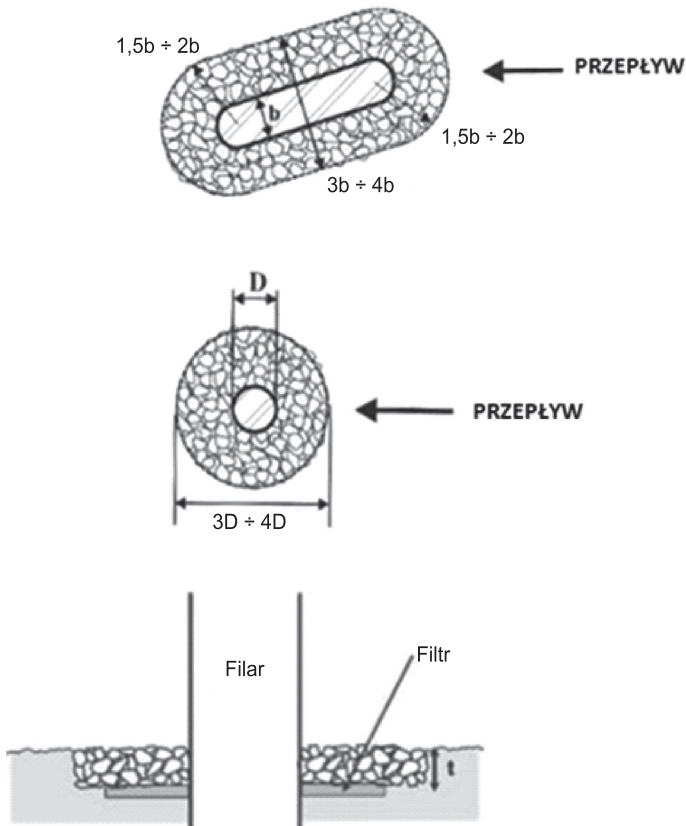
Gdy narzut będzie atakowany przez przepływające szczątki, lód lub fale wzbudzone wiatrem i jednostkami pływającymi, albo są spodziewane zmiany dna cieku, to należy zwiększyć grubość narzutu o 15–30 cm i odpowiednio zwiększyć wielkości kamieni.

Obserwacje pokazały, że z upływem czasu grube warstwy narzutu kamiennego w warunkach żywego koryta zawsze stają się przy krawędziach cienkie, gdyż zapadają się w dno. Ustalono również, że grube warstwy narzutu naprawiają się samodzielnie. Okazuje się, że gdy na dnie cieku przemieszczają się duże diuny, to grubość warstwy narzutu nie ma wpływu na jego stabilność.



Rys. 2. Sposoby umieszczania narzutu kamiennego zabezpieczającego filar przed rozmyciem: a – na powierzchni dna cieku, b – w otworze wykopanym wokół filara lub w wymytmym wyboju, c – poniżej średniego poziomu dna cieku [7], [8]

Aby zapewnić maksymalną odporność na erozję, wszystkie kamienie narzutu powinny mieścić się w grubości jego warstwy. Kamienie znacząco wystające ponad narzut, nawet tylko w odosobnionych miejscach, mogą doprowadzić do rozproszenia narzutu. Powodują bowiem lokalne turbulencje przepływu



Rys. 3. Narzut kamienny chroniący filar przed podmyciem: widok z góry oraz przekrój; minimalna grubość narzutu „t” powinna być równa: $3d_{50}$, głębokości rozmycia wskutek przewężenia cieku przez most lub głębokości nierówności dna (decyduje większa wartość); filtr powinien być rozmieszczony wokół filara w zakresie $3/4$ zasięgu narzutu [3], [7]

wody, wymywającego wtedy grunt dna. Ułatwiają to zwiększone przestrzenie między kamieniami, które są w miejscach kontaktu kamieni znacznie różniących się wielkościami. Następstwem są przemieszczania mniejszych kamieni. Dlatego nie należy w narzutach stosować nadmiernie dużych kamieni.

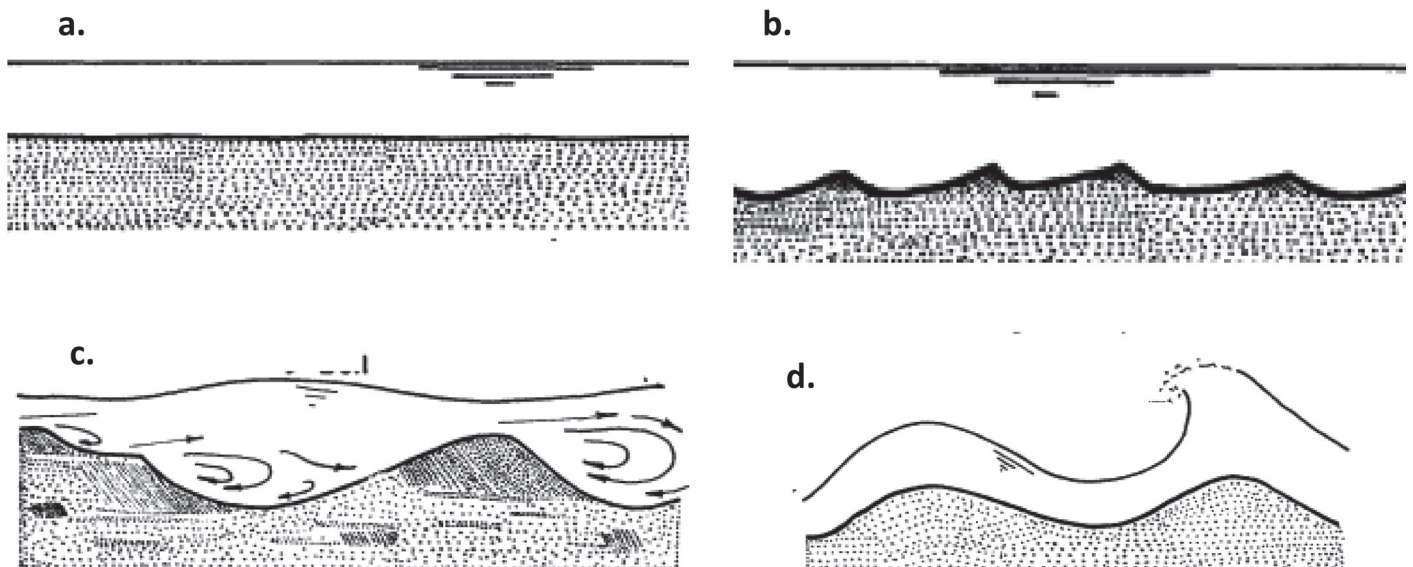
Narzut kamienny powinien być umieszczony na warstwie filtracyjnej: ziarnistej lub geotekstylnej, aby woda nie erodowała dna pod narzutem. Erozja występuje nie tylko, gdy pomiędzy kamieniami są duże przestrzenie umożliwiające przepływy w narzucie. Badania przeprowadzone przez Japończyków w związku z budową mostu Akashi Kaykio wykazały, że nawet gdy są małe przestrzenie, w których nie występuje ruch wody, to woda przepływająca nad narzutem wywołuje między kamieniami podciśnienie porywające z dna ziarna gruntu, co doprowadza do niszczenia narzutu. Dlatego narzut powinien być umieszczony na warstwie filtracyjnej, która zapobiega wypłukiwaniu ziaren gruntu z podłoża narzutu. Zwiększa to jego stabilność, gdyż przeciwdziała rozpraszaniu kamieni niszczącemu narzut.

Nie wymagają warstwy filtracyjnej narzuty dużej grubości. Zachowują się podobnie, jak mające normalną grubość, umieszczone na warstwie filtracyjnej, tzn. nie jest unoszony grunt dna spod narzutu i nie staczają się z niego kamienie, gdyż woda przepływająca nad grubym narzutem nie przenika przez niego do dna. Zawsze jednak kamienie każdego narzutu mogą osuwać się w zagłębienia między diunami przemieszczającymi się na dnie cieku w czasie powodzi i mogą być porywane przez wodę płynącą wtedy z dużą prędkością.

Filtr nie powinien być pod całą powierzchnią narzutu kamiennego – należy go zakończyć w odległości $1/4$ szerokości narzutu od jego zewnętrznych krawędzi.

Gdy stosuje się filtr z materiału ziarnistego to jego warstwa powinna mieć grubość co najmniej równą 4-krotnej wartości d_{50} (mediana średnicy) ziaren filtra lub 15 cm (przyjmuje się wartość większą). Warstwa filtracyjna umieszczana pod wodą powinna mieć grubość zwiększoną o 50%. Dogodnym sposobem wykonania filtra w wodzie jest zrobienie go z worków wypełnionych piaskiem o odpowiednim uziarnieniu.

Gdy na dnie cieku mogą występować diuny, wtedy zdecydowanie zaleca się stosowanie filtra z geotekstyliów.



Rys. 4. Postacie dna cieku: a – płaskie, b – typowo zmarszczone, c – pokryte diunami, d – pokryte antydiunami [Internet]

Podłoże narzutu powinno być bez szczątków, gruzu i innych elementów uniemożliwiających prawidłowe ułożenie filtra. Nie powinno być błotniste lub zamrożone, z materiałami organicznymi i szkodliwymi substancjami. W podłożu nie powinno być dziur i innych zagłębień, które będzie przesklepiał materiał filtra. Zaleca się zbadanie zagęszczenia gruntu w podłożu narzutu i wymianę nieodpowiedniego. Różnice cech podłoża należy uwzględnić w projekcie narzutu.

Aby ułatwić instalowanie narzutów kamiennych przy filarach mostów, został opracowany specjalny sprzęt i procedury instalowania narzutów.

Stan narzutu należy regularnie kontrolować. Zwykle jest to robione po powodzi. Stwierdzone nieprawidłowości narzutu należy jak najszybciej skorygować, aby zapobiec rozwojowi uszkodzeń przez kolejne powodzie.

Przyczyny niszczenia narzutów kamiennych przy filarach

Właściwe zaprojektowanie, wykonanie i utrzymanie narzutów ułatwia poznanie przyczyn ich niszczenia. Generalnie, przyczyny niepowodzeń bywają następujące:

- Wykonanie narzutu ze zbyt małych kamieni wskutek przyjęcia w jego projekcie:
 - mniejszej niż rzeczywista prędkości przepływu cieku,
 - zbyt małego przepływu,
 - zbyt małych naprężeń ścinających powodowanych przez obciążenia hydrauliczne,
 - nieodpowiedniego kąta natarcia cieku na filar (np. niewłaściwego uwzględnienia krzywizny koryta cieku lub zmiany kierunku jego przepływu w czasie powodzi),
 - zbyt małej pojemności koryta cieku,
 - niewłaściwej oceny sił ścierających kamienie narzutu,
 - nieodpowiedniej rezerwy ze względu na utrudnienia przepływu cieku przez szczątki, konary drzew, lód itp. zatrzymane przez filar.
- Zmiany koryta cieku wskutek:
 - zwiększenia się kąta natarcia cieku na brzegi lub filary,
 - zmniejszenia się pojemności koryta lub zwiększenia głębokości cieku,
 - rozmyć koryta.
- Przyjęcie niewłaściwej gradacji kamieni narzutu.
- Nieprawidłowe umieszczenie kamieni narzutu.
- Zbyt duże pochylenie brzegu w pobliżu filara chronionego narzutem.
- Brak, niewystarczająca lub uszkodzona warstwa filtracyjna pod narzutem.

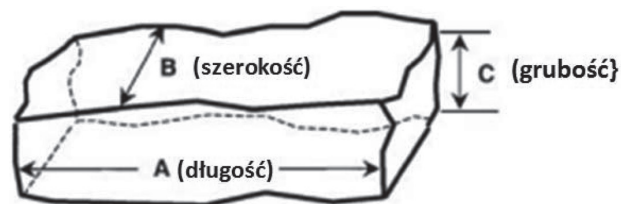
Wymienione przyczyny mogą występować indywidualnie lub jednocześnie.

Materiały do zabezpieczania podpór mostowych narzutem kamiennym

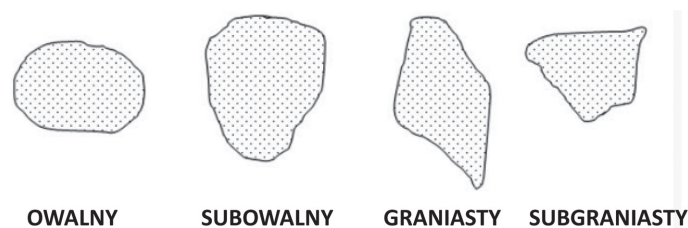
Materiały stosowane do wykonania narzutu nie powinny zawierać mułu i innych drobnych cząstek, które mogą zostać wymyte i zanieczyścić środowisko wodne. Zawartość w narzucie żwiru i piasku nie powinna przekraczać 20% objętości przestrzeni między kamieniami narzutu.

Kamienie

Kształt kamieni narzutu (rys. 5). Kamień charakteryzuje trzy wymiary: długość (A), szerokość (B) i grubość (C). Do narzutów powinny być stosowane kamienie o $A/C \leq 3,0$. Jakościowo opisuje się kształt kamienia używając określenia «graniasty» lub «owalny» (rys. 6). Kamienie graniaste mają ostre krawędzie i narożniki, co zwiększa opory tarcia przy przemieszczaniu takich kamieni. Kamienie owalne są zaokrąglone – obrobione i zeszlifowane w czasie ubiegłych epok geologicznych, gdy były przemieszczane przez wodę. Pośrednimi kształtami są „sub-graniasty» lub «sub-owalny». Do wykonania narzutów preferowane są kamienie o kształcie pomiędzy graniastym i sub-graniastym, gdyż najlepiej blokują się wzajemnie, przez co ich warstwy są bardziej stabilne niż z kamieni owalnych o takim samym ciężarze.



Rys. 5. Kształt kamienia stosowanego do wykonania narzutu opisany trzema osiami [7]



Rys. 6. Kształty kamieni [Internet]

Ciężar właściwy kamieni. Wpływa na stosowaną ich wielkość. Zwykle wymaga się, aby minimalny ciężar właściwy kamieni do wykonania narzutu wynosił 25000 N/m^3 . Gdy są dostępne kamienie o większym ciężarze właściwym, to stosuje się je odpowiednio mniejsze.

Trwałość. Stan kamieni narzutu może ulec pogorszeniu wskutek procesów fizycznych i/lub chemicznych. Kamienie są ścierane przez rumosze niesiony przez ciek, mogą rozpaść się wskutek cykli zamrażania/rozmarzania oraz być niszczone przez lód i czynniki chemiczne. Aby pogorszenie stanu kamieni nie nastąpiło zbyt wcześnie, bada się odporność ich próbek na:

- ścieranie (w obracającym bębnie),
- nawadnianie i osuszanie,
- zamrażanie i rozmarzanie oraz
- na działanie czynników chemicznych, takich jak roztwór wodorotlenku sodu lub siarczanu magnezu.

 Po badaniach próbka trwałego kamienia zachowuje określony wysoki procent swojego pierwotnego ciężaru.

Gradacja kamieni narzutu. Zalecane przez FHWA gradacje dziesięciu standardowych klas narzutu kamiennego, których podstawą jest mediana d_{50} wielkości kamieni mierzonych w osi (B) podano w tabeli 1. Odpowiadające im minimalne i maksymalne ciężary kamieni podano w tabeli 2. Przyjęte kryteria gradacji zapewniają wskaźnik jednorodności narzutu

$d_{85}/d_{15}^{(4)} = 2,0$. Narzut z kamieni jednakowej wielkości ma ten wskaźnik mniejszy niż 1,4, natomiast z kamieni o dobrej gradacji – w zakresie od 2 do 3. W większości wytycznych projektowania narzutów kamiennych wymagane jest, aby $d_{85}/d_{15} < 3,0$. Materiały niesortowane dostarczane z kamieniołomów zwykle charakteryzują się nieciągłością wielkości kamieni i ich wskaźnik d_{85}/d_{15} miewa wartość do 7. Takie materiały nie nadają się do wykonania narzutu.

Tabela 1. Minimalne i maksymalne wielkości kamieni narzutu w cm [7]

Nominalna klasa narzutu według wartości mediany wielkości kamieni		d_{15}		d_{50}		d_{85}		d_{100}
mediana	KLASA	min	max	min	max	min	max	max
15	I	9,5	13	14	17,5	20	23	30
23	II	14	20	22	27	29	35,5	46
30	III	18,5	27	29	35,5	39	47	61
38	IV	23	33	37	44	49,5	58	76
46	V	28	39	43	52	60	70	91
53	VI	33	47	51	61	70	82,5	107
61	VII	37	53	58	70	79	94	122
76	VIII	47	66	72	88	99	117	152
91	IX	56	80	86	105	119	141	183
107	X	65	93	102	123	138	164	213

Uwaga: Wymiar kamienia d mierzony w osi (B).

Tabela 2. Minimalne i maksymalne dopuszczalne ciężary kamieni narzutu w jednostkach 0,1N [7]

Nominalna klasa narzutu przez medianę ciężaru kamienia		W_{15}		W_{50}		W_{85}		W_{100}
KLASA	ciężar	min	max	min	max	min	max	max
I	9	2	5	7	12	18	29	64
II	27	6	18	23	40	60	100	213
III	68	15	42	55	95	140	230	500
IV	136	30	82	110	190	270	450	1000
V	250	50	140	190	330	480	795	1700
VI	375	80	230	295	520	750	1300	2700
VII	500	120	340	430	770	1135	1900	4100
VIII	1000	230	660	860	1500	2180	3630	8000
IX	2000	390	1140	1500	2650	3800	6300	13800
X	3000	600	1800	2400	4200	6000	10000	22000

Uwaga: Ciężary kamieni określono na podstawie ich wielkości ze wzoru $W = 0,85 \gamma d^3$; γ = ciężar właściwy kamienia (26500 N/m³), wymiar d mierzony w osi (B) kamienia [m].

Filtry

Filtry ziarniste są wykonywane z warstwy piasku lub żwiru. Przepuszczalność przez nie wody powinna być większa niż przepuszczalność dna cieku pod narzutem. Generalnie, ziarnista warstwa filtracyjna powinna mieć uziarnienie i grubość wystarczające do powstrzymania unoszenia przez płynącą wodę gruntu z podłoża narzutu. Umieszczenie warstwy filtracyjnej przy filarze w rzece może być trudne. Filtrów ziarnistych nie sto-

⁽⁴⁾ d_{85} i d_{15} wymiar kamienia wzdłuż osi B[m], od którego 85% i 15% kamieni jest lżejszych.

suje się, gdy w czasie instalowania materiał filtra może być częściowo lub całkowicie zmywany przez ciek oraz, gdy w czasie przepływu wód powodziowych na dnie cieku przemieszczają się diuny. Wtedy zaleca się stosowanie filtrów geotekstylnych.

Geotekstyli stosowane jako filtry narzutów kamiennych muszą być przepuszczalne. Powinny być z materiału syntetycznego, nie biodegradalnego. Mogą być tkaninami, włókninami lub dzianinami. Trwałość geotekstyliów zależy od rodzaju włókna użytego do ich wykonania, od jego cech mechanicznych, chemicznych i przepuszczalności. Z filtrem geotekstelnym osadzonym w wodzie bywają stosowane maty faszynowe. Mata jest umieszczana nad arkuszem geotekstyliów, z nim dostarczana do miejsca wbudowania i tam jest zatapiająca przez narzucenie na nią kamieni.

Geotekstyli powinny mieć pory wystarczająco małe, aby zatrzymywały ziarna/cząstki gruntów dna oraz przepuszczalność zapobiegającą powstawaniu sił wyporu i gradientom ciśnienia w dnie cieku. Niewystarczająca przepuszczalność prowadzi do powstawania pod geotekstyliami sił, które je podnoszą i wyrzuszają, powodując spychanie kamieni z narzutu. W rezultacie badań i obserwacji stwierdzono, że:

- umieszczenie geotekstyliów pod całą powierzchnią narzutu zmniejsza jego trwałość; wtedy bowiem w warunkach «żywego dna», krawędzie geotekstyliów są podmywane i kamienie na nimi mają tendencję do staczania się/zsuwania i są porywane przez wodę, odstawiając znajdujące się pod narzutem geotekstyli; powoduje to ich odgięcia, co dodatkowo zmniejsza stabilność narzutu; proces ten prowadzi stopniowo do rozproszenia kamieni narzutu,
- geotekstyli powinny być szczelnie połączone z powierzchnią filara; gdy nie są połączone, to woda wypłukuje wokół filara zagłębienie, w które opadają geotekstyli i kamienie.

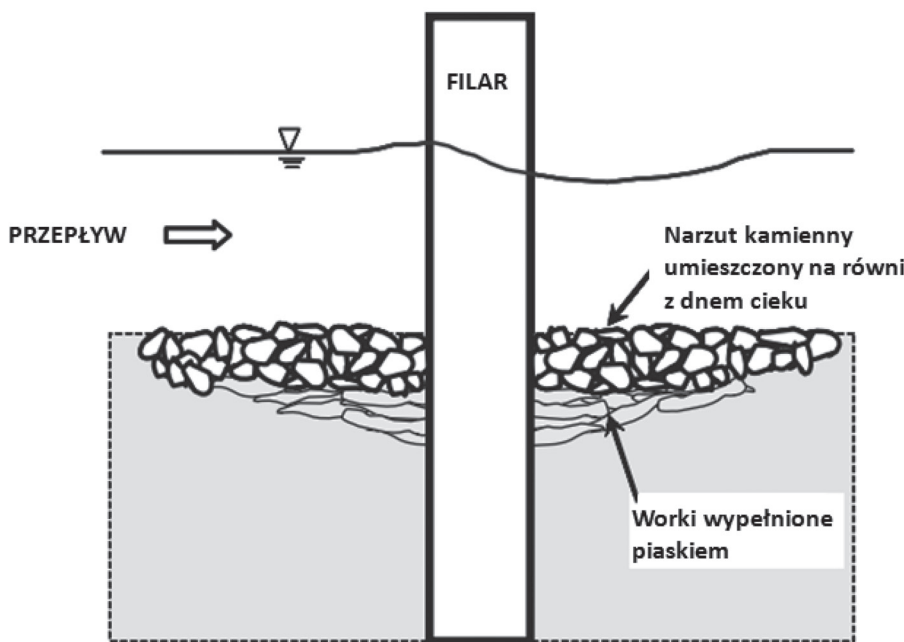
Dlatego korzystnie wpływa na stabilność narzutu, gdy geotekstyli: (1) mają właściwą przepuszczalność (2) nie są doprowadzone do krawędzi narzutu oraz (3) są szczelnie połączone z powierzchnią filara.

Gdy geotekstyli nie dochodzą do granic narzutu, to w przypadku wymycia wyboju w dnie przy narzucie, skrajne kamienie zsuwają się w wybój i chronią geotekstyli przed podmyciem, co zapobiega rozwojowi niszczenia narzutu.

Geotekstyli należy chronić przed bezpośrednim działaniem światła słonecznego (uszkadza je promieniowanie UV). Po rozłożeniu na dnie cieku nie powinny mieć zmarszczeń, fałd lub pęknięć. W czasie wykonania narzutu kamiennego geotekstyli utrzymuje się na miejscu obciążając workami z piaskiem, blokami betonowymi lub kotwiąc w dnie zszywkami w kształcie «U». Narzut powinien być wykonany w ciągu 48 godzin po rozłożeniu geotekstyliów, chyba że okoliczności to uniemożliwiają.

Warunkami zapewnienia przez geotekstyli stabilności pokrywającego je narzutu są: • brak uszkodzeń, • odpowiednia wytrzymałość na rozerwanie i rozprucie oraz • brak przemieszczeń w czasie instalowania narzutu.

Worki wypełnione piaskiem (rys. 7). Jest to innowacyjne rozwiązanie filtrów opracowane w Niemczech. Jest szczególnie przydatne przy likwidacji pod wodą bardzo dużych wymytych wybojów, gdy w cieku występują silne nurty. Worki są z geowłókniny (geotekstyliów nietkanych) grubości 4,6–6 mm lub grubszej. Mają objętość do 1,25 m³. Są w 80% wypełnione piaskiem lub żwirem. Geowłóknina charakteryzuje się znaczną wytrzymałością i wyjątkową rozciągliwością,



Rys. 7. Warstwa filtracyjna z geoworków wypełnionych piaskiem; geoworki są rozmieszczone wokół filara w zakresie 3/4 zasięgu narzutu [7]

zanim rozrywana zaczyna pękać. Worek jest z trzech stron zszyty w wytwórni, na budowie wypełniany piaskiem/żwirami i zszywany z czwartej strony. Elastyczność geowłókniny i częściowe wypełnienie worka umożliwiają mu dostosowanie się do nierówności podłoża. Zwykle stosuje się co najmniej dwie warstwy worków z piaskiem. Na nich wykonuje się narzut kamienny. Aby worki dobrze spełniały rolę filtrów, nie może być pomiędzy nimi przerw. Mimo przeprowadzonych badań wytrzymałości, odporności na ścieranie i na przebicie, dotychczas nie jest znana trwałość worków z geowłókniny, zwłaszcza w warunkach występowania dużego ruchu rumowiska przenoszonego przez ciek.

Wymiarowanie narzutu kamiennego [7]

FHWA zaleca, aby określać wymagane wielkości kamieni narzutów przy filarach mostów stosując równanie Lagassego i innych z 2000 r. [6]:

$$d_{50} = \frac{0,692 (V_{lp})^2}{(S_g - 1) 2g} \quad (1)$$

w którym:

d_{50} = wymiar kamienia wzdłuż osi B [m], od którego 50% kamieni jest lżejszych,

V_{lp} = lokalna projektowa prędkość przepływu cieku przy filarze [m/s],

S_g = ciężar właściwy narzutu [zwykle 2,65 – przyjmowany bezwymiarowo],

g = przyspieszenie ziemskie [9,81 m/s²].

Gdy jest znana średnia prędkość przepływu w przekroju mostowym, V_{sr} [m/s], to prędkość lokalną przy filarze można określić mnożąc prędkość średnią przez współczynnik kształtu filara i jego położenia w korycie:

$$V_{lp} = V_{sr} K_1 K_2 \quad (2)$$

przy czym:

K_1 = współczynnik kształtu filara wynoszący 1,5 w przypadku filara z czołem zaokrąglonym i 1,7 – z czołem płaskim,

K_2 = współczynnik uwzględniający położenie filara w korycie cieku: od 0,9 – w przypadku filara w pobliżu prostego odcinka brzegu, do 1,7 – w przypadku filara znajdującego się w głównym nurcie ostrego zakola cieku.

Gdy koryto cieku może przesuwac się, to lokalną projektową prędkość przepływu przy filarze określa się w zależności od maksymalnej prędkości przepływu V_{max} w korycie, ponieważ wtedy może ona wystąpić przy każdym filarze:

$$V_{lp} = V_{max} K_1 \quad (3)$$

Po ustaleniu d_{50} kamieni narzutu wybiera się z tabeli 1 klasę ich gradacji. Stosując standardową klasę uzyskuje się odpowiednią gradację, a przy przyjęciu następczej, wyższej klasy, narzut jest z nieco

większych kamieni, ale ekonomiczny, mniej kosztowny.

Przykład wg [7]. Narzut kamienny ma być zastosowany przy filarze szerokości 0,61 m, z płaskim czołem. Maksymalna prędkość przepływu w korycie jest 2,01 m/s, ale wskutek jego przesunięcia może wystąpić także przy filarze. Ciężar właściwy narzutu 2,5. Prognozowane rozmycie wskutek przewężenia cieku mostem wynosi 1,37 m.

Krok 1: Wybranie współczynnika kształtu filara, $K_1 = 1,7$.

Krok 2: Określenie z równania (1) wartości d_{50} :

$$d_{50} = \frac{0,692 (V_{lp})^2}{(S_g - 1) 2g} = \frac{0,692 (1,7 \times 2,01)^2}{(2,5 - 1) 2 \times 9,81} = 0,27 \text{ m}$$

Krok 3: Przyjęcie z tabeli 1 do wartości mediana wielkości 30 cm narzutu III klasy.

Krok 4: Określenie zagłębienia narzutu w dnie cieku przy filarze – powinno być większe niż $3d_{50}$ i niż głębokość rozmycia wskutek przewężenia; dlatego zagłębienie narzutu należy zwiększyć do 1,37 m.

Krok 5: Określenie zasięgu narzutu: zalecany wynosi co najmniej dwie szerokości filara z każdej jego strony; stąd minimalny zasięg $2 \times 0,61 = 1,22$ m; uwzględniając jednak głębokość rozmycia wskutek przewężenia, zasięg 1,22 m jest niewystarczający; przy prognozowanym rozmyciu wskutek przewężenia 1,37 m odpowiednim będzie narzut o zasięgu 1,8 m, ze skarpą o nachyleniu 1:2 (będzie wykonana pod wodą).

Umieszczanie narzutu kamiennego pod wodą

W celu uzyskania pod wodą jednolitej, ciągłej, o wymaganej grubości warstwy narzutu, z dobrze rozmieszczonymi kamieniami różnej wielkości, należy sumiennie obserwować i kontrolować proces wykonania narzutu. Ważne jest stałe monitorowanie umieszczania kamieni, w celu weryfikacji

wbudowanej ich ilości i uzyskanej grubości narzutu. Zależnie od głębokości i prędkości przepływu cieku, informacje o rozmieszczeniu kamieni można uzyskać stosując sondowanie (najlepiej tyczką z sonarem), sonar profilujący dno lub zatrudniając nurka. W głębokiej wodzie monitoring bywa prowadzony podwodnymi pływakami (ROV) [2].

W przypadku instalowania narzutu w niewielkim cieku, można to zrobić w okresie małego przepływu, odsuwając ciek od obszaru robót.

W głębokiej wodzie obszar robót bywa otaczany tymczasową grodzą i odwadniany. Zanieczyszczenia cieku przy wykonaniu wykopu w dnie oraz narzutu minimalizuje się, zawieszając na pławach wokół miejsca robót kurtyny przeciw mułowe.

Podsumowanie wymagań dotyczących narzutów kamiennych [7]:

- kamienie narzutu powinny być graniaste, blokujące się wzajemnie (nieodpowiednie są kuliste i płaskie); powinny być dobrze wysortowane (o szerokim zakresie wielkości); maksymalny wymiar kamienia nie powinien być większy niż około dwukrotna wartość d_{50} ;
- wielkość kamieni do wykonania narzutu można określić z równania (1);
- grubość warstwy narzutu kamiennego powinna wynosić od $2d_{50}$ do $3d_{50}$;
- narzut powinien pokrywać dno z każdej strony filara w zakresie równym $1 \div 1,5$ jego szerokości;
- spód narzutu powinien być poniżej najniższego poziomu dna przy filarze i poniżej rynien pomiędzy diunami;
- gradacja kamieni narzutu powinna być w zakresie $0,5d_{max} < d_{50} < 2d_{15}$;
- podłoże narzutu powinno być odpowiednio przygotowane;
- pomiędzy narzutem kamiennym i podłożem gruntowym powinna być warstwa filtracyjna z geomateriału ziarnistego lub z geotekstyliów;
- warstwa filtracyjna z geomateriału ziarnistego powinna spełniać kryterium odwrotnej filtracji Terzagiego;
- zasięg warstwy filtracyjnej geotekstylnej wokół filara powinien wynosić około 75% zasięgu narzutu;
- jest wskazane, aby wierzch narzutu był dostępny dla inspektora sprawdzającego stan narzutu w czasie powodzi i po powodziach;
- sygnałami pogorszenia stanu narzutu jest stwierdzenie w czasie inspekcji, że nastąpiło:
 - obniżenie narzutu,
 - osunięcie kamieni ze stoku narzutu,
 - zaokrąglenie graniastych kamieni spowodowane rumoszem niesionym przez rzekę,
 - fizyczne pogorszenie, rozkład lub starcie kamieni narzutu,
 - odsłonięcie warstwy filtracyjnej wskutek powstania w narzucie otworów.

Innowacyjne systemy zabezpieczenia przed rozmyciem dna przy filarach

Oprócz narzutów kamiennych, filary bywają zabezpieczane przed rozmyciem metodami innowacyjnymi (niektóre są opatentowane). Dalej przedstawiono informacje o najpopular-

niejszych z tych metod. Szczegółowe zasady ich stosowania podano w [3], [6], [7] i [8].

Worki z zaprawą cementową. Używa się ich, gdy narzuty z odpowiednich kamieni są zbyt drogie. Workami z zaprawą wypełnia się wyboje wymyte przy filarach mostów oraz zabezpiecza przed podmyciem głównie podpory małych mostów. Worki łatwo instalować. Przed związaniem zaprawy dostosowują się do kształtu dna cieku, co zwiększa ich skuteczność. Pojedyncza warstwa poprawnie zwymiarowanych i ułożonych worków, mająca odpowiedni boczny zasięg, skuteczniej chroni dno przed rozmyciem niż sterta worków chaotycznie narzucona przy filarze.

Worki są zrobione z geotkaniny o znacznej wytrzymałości, przepuszczającej wodę. Mają wymiary nie większe niż: 90 cm × 120 cm × 30 cm. Połączenia materiału worka są na zakład, podwójnym szwem. Worek ma zawór do przewodu zaprawy cementowej.

Worki wypełnia się suchą zaprawą w 80%. Jej minimalna wytrzymałość po 28 dniach wynosi około 24 MPa.

Podłoże, na którym mają być umieszczone worki, należy starannie przygotować. Gdy jest nierówne, jak w wymytm wyboju, to worki umieszcza się w sposób zapewniający każdemu skuteczne podparcie innymi workami. Stabilność worków z zaprawą w płynącej wodzie poprawia zwiększenie ich ciężaru i ułożenie z zachodzeniem na siebie.

Obserwacje pokazały, że worki z zaprawą nie ułożone na filtrze z geotkaniny zapadają się w dno, które jest rozmywane pod workami i przed czołem filara. Skuteczność ochrony filara workami z zaprawą zależy od ich wielkości, rozmieszczenia oraz cech użytego filtra geotekstylnego i szczelności połączenia go z powierzchnią filara.

Filar otacza się workami z zaprawą w zakresie 1,5–2,0 jego szerokości. Pomiędzy workami i czołową powierzchnią korpusu/fundamentu filara nie powinno być szczeliny.

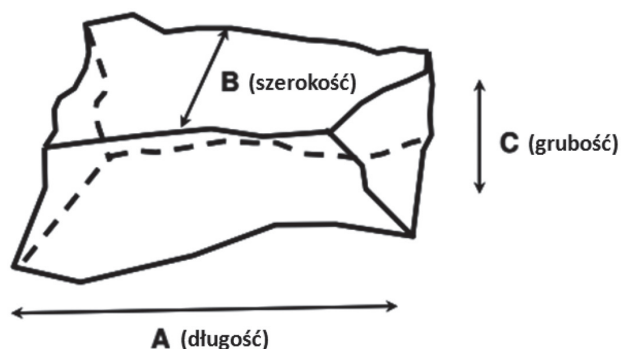
W celu stabilizacji worków można je połączyć przez zszyście, linami lub prętami. Jednak połączenie zmniejsza elastyczność zabezpieczenia workami i dlatego nie powinno być stosowane, gdy dno może się obniżyć.

Chociaż ogólną zasadą jest stosowanie jednego rodzaju zabezpieczenia przed rozmyciem, to bywają przypadki, w których do uzyskania trwałego zabezpieczenia worki z zaprawą pokrywa się narzutem kamiennym.

Przyczynami uszkodzeń zabezpieczeń workami z zaprawą bywają: • zbyt mały ciężar worków, • wystawanie worków z zabezpieczenia, • lokalne rozmycia przy ich krawędzi oraz • przemieszczanie i podmycia geotekstyliów filtracyjnych pod workami. Zbyt lekkie worki są porywane przez nurty. Wystające z zabezpieczenia wywołują lokalne rozmycia prowadzące do podmyć geotekstyliów. Rozmycia przy krawędziach zabezpieczenia powodują przemieszczenia worków odsłaniające geotekstylia filtracyjne, co umożliwia ich podmywanie prowadzące do destabilizacji zabezpieczenia.

Narzut kamienny częściowo połączony iniekcją (rys. 8 i 9). Celem częściowej iniekcji narzutu jest „sklejenie” kamieni, aby tworzyły konglomerat brył. Zaczyn iniekcyjny zawiera około 60 kg/m³ cementu portlandzkiego. Narzut częściowo zainiektowany cechuje przepuszczalność, ponieważ zaprawa wypełnia mniej niż 50% przestrzeni pomiędzy kamieniami. Dostosowuje się do zmian dna pękając, ale na duże bryły odpor-

ne na działanie obciążeń hydraulicznych. Powierzchnie brył są bardzo szorstkie i nieregularne, dlatego po spękaniu narzutu bryły zachowują wzajemne szczerzenia. Bryły są znacznie większe niż d_{50} wielkości kamieni narzutu, a nawet większe niż d_{100} .



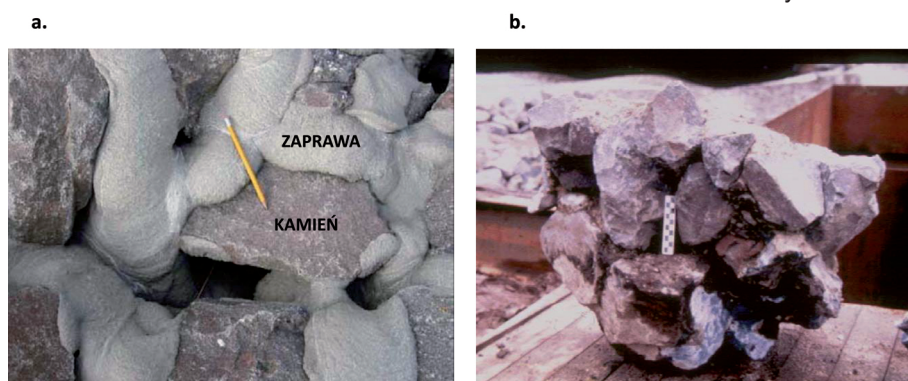
Rys. 8. Optymalny kształt kamienia do wykonania narzutu częściowo zainiektowanego [6]

Do wykonania narzutu częściowo zainiektowanego nadają się tylko trzy klasy kamieni: II, III i IV (tabela 1). Narzut z kamieni klasy I zawiera zbyt małe przestrzenie do uzyskania wymaganej penetracji zaprawy; natomiast pomiędzy kamieniami klas większych niż IV przestrzenie są zbyt duże, aby zatrzymała się w nich zaprawa i skutecznie «skleiła» kamienie.

Ponieważ częściowa iniekcja łączy kamienie tworząc z nich bryły, dlatego zmniejsza zależność narzutu od jakości kamieni dostarczanych z kamieniołomu (np. spękanych, o nieoptymalnych kształtach).

Warstwa narzutu powinna mieć grubość co najmniej $2d_{50}$ kamieni. Gdy narzut ma być robiony pod wodą, to jego grubość należy zwiększyć o 50%, ze względu na niepewności wykonawcze, ale nie zwiększa się ilości iniektowanej zaprawy. Gdy rozmycie wskutek zwężenia cieku przez most przekracza $2d_{50}$, to grubość narzutu należy powiększyć do głębokości tego rozmycia plus wszystkie długotrwałe obniżenia dna. W ciekach, na których dnie występują w czasie powodzi diuny można graniczną różnicę poziomów grani i rynny diuny przyjąć jako $\Delta < 0,4y$; przy czym y jest głębokością przepływu (maksymalna głębokość rynny poniżej dna nie przekracza 0,2 głębokości przepływu). Zwiększając grubość narzutu częściowo iniektowanego należy także zwiększyć jego zasięg wokół filara.

Maty wypełnione zaprawą cementową (rys. 10). Są wykonane z dwóch warstw mocnej tkaniny nylonowej lub poli-



Rys. 9. Narzut kamienny częściowo połączony iniekcją zaprawy cementowej: a – połączenie kamieni zaprawą, b – bryła powstająca po spękaniu narzutu [6]

estrowej, przeszytych w sposób tworzący pomiędzy nimi komory w kształcie poduszek i łączący komory wewnętrznymi kanałami. Po rozłożeniu na dnie, matę wypełnia się zaprawą cementową, która przepływa przez wewnętrzne kanały. Kilka wypełnionych mat łączy się stalowymi linami. Linie przeszyć dzielących komory są przepuszczalne i nadają macie wiotkość – działają jak przeguby. Wiotkość i przepuszczalność są ważne ze względu na niestabilność dna cieku i ochronę filara przed rozmyciem. Wiotkość umożliwia dostosowanie się maty do zmian dna, przepuszczalność redukuje ciśnienie pod matą. Optymalną ochronę filara matami z zaprawą uzyskuje się wtedy, gdy pokrywają dno ze wszystkich stron filara w zakresie co najmniej półtorej jego szerokości.

Maty z zaprawą mają zazwyczaj grubość 100, 150 i 200 mm. Bywają o grubości 300 mm. Można je stosunkowo łatwo instalować pod wodą i stosować w miejscach o ograniczonej dostępności dla maszyn budowlanych.

Oś podłużna maty powinna być równoległa do kierunku przepływu cieku. Gdy występują tylko lokalne rozmycia dna cieku, to maty umieszcza się poziomo tak, aby ich górna powierzchnia była na wysokości dna. Natomiast w przypadku innych rodzajów rozmycia, maty układa się ze wszystkich stron filara z nachyleniem, żeby na obwodzie były zagłębione poniżej maksymalnego rozmycia wskutek zwężenia cieku przez most i długotrwałej degradacji dna, jednak nie większym niż 1:2. Może to wymagać umieszczenia mat w zakresie większym niż dwie szerokości filara.

Zazwyczaj pod matami z zaprawą przy filarze mostu stosuje się ziarnistą warstwę filtracyjną.

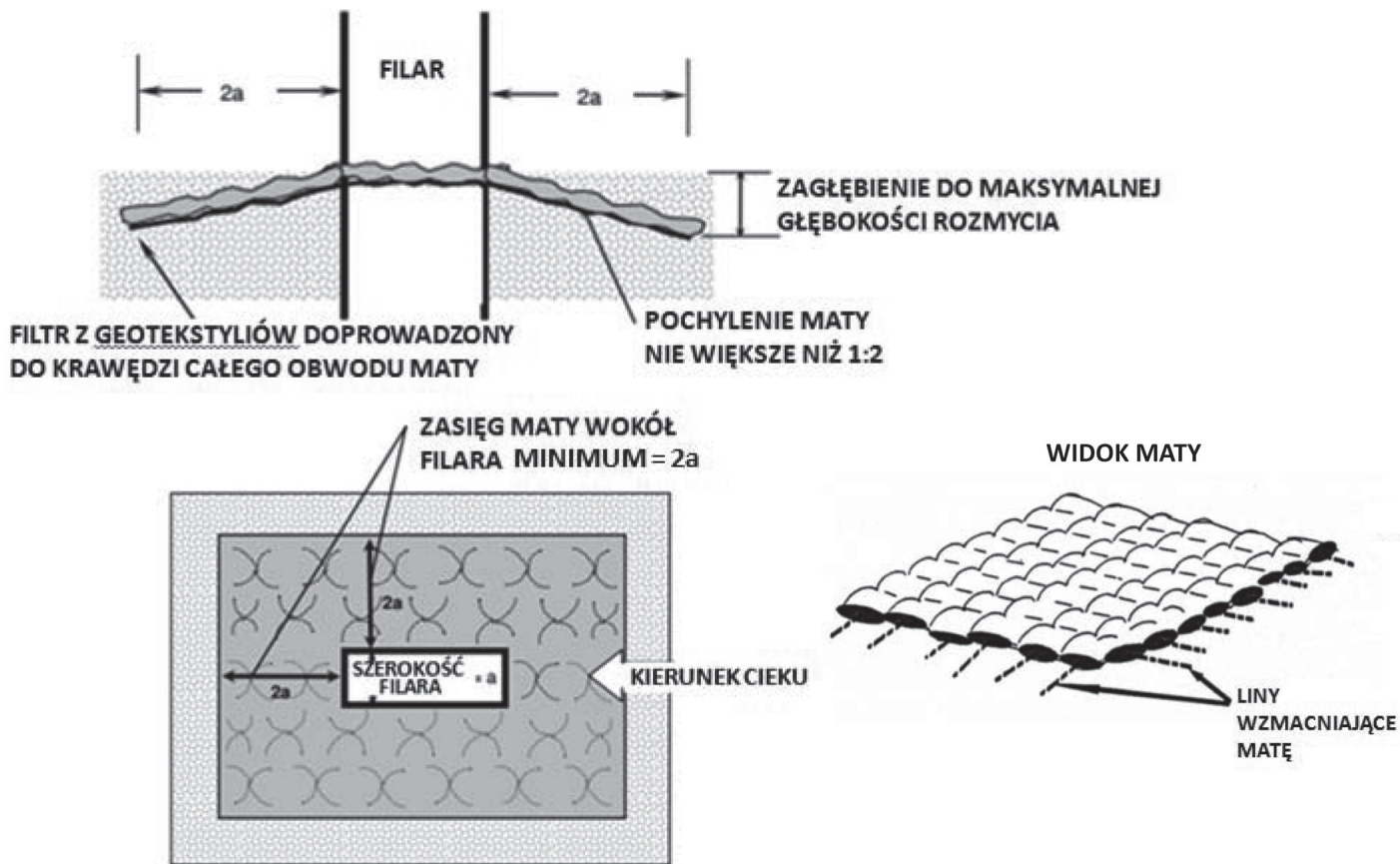
Badania wykazały, że maty z zaprawą mogą skutecznie zabezpieczać filary przed rozmyciem w warunkach «czystej wody». Natomiast, gdy na dnie cieku występują diuny, to maty bywają przez wodę unoszone, nawet jeżeli na obwodzie były poniżej głębokości rynien pomiędzy diunami. Dlatego mat z zaprawą nie zaleca się w warunkach «żywego koryta», gdy na dnie mogą powstawać diuny.

Maty z zaprawą były stosunkowo szeroko stosowane do ochrony brzegów akwenów, koryt cieków, skarp wykopów podwodnych rurociągów, skarp nasypów przy przyczółkach itp. Natomiast doświadczenie z ochrony tymi matami filarów w rzekach jest nieduże.

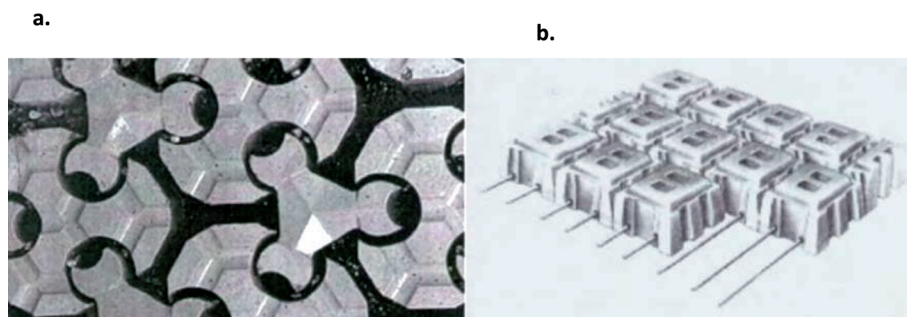
Systemy przegubowych mat z bloków betonowych (rys. 11). Stanowią elastyczną, przepuszczalną ochronę przed rozmyciem dna i brzegów. Są zrobione z prefabrykatów be-

tonowych wzajemnie pozaczepianych lub połączonych linami, albo zaczepami i linami. Po zainstalowaniu maty stanowi ona ciągle przykrycie podłoża, przystosowujące się do zmian jego kształtu. Najczęściej matami z bloków umacnia się brzegi i koryta niedużych cieków, umieszczając maty poprzecznie na całej szerokości cieku i łączy je z przyczółkami lub z zabezpieczeniem brzegów. Natomiast praktyczne doświadczenie z zabezpieczeniem matami przegubowymi filarów przed podmyciem jest nieduże. Próby wykazały, że jest możliwe.

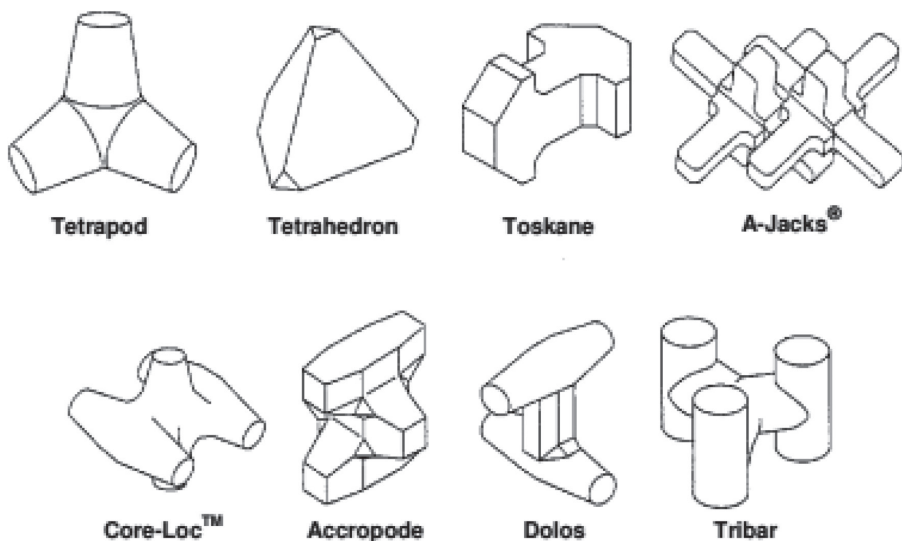
Pod matą jest zwykle stosowany filtr



Rys. 10. Zabezpieczenie dna przy filarze matami wypełnionymi zaprawą cementową; podany zasięg „2a” jest minimalny, zaleca się stosować raczej „3a” [7], [8]



Rys. 11. Przykłady mat z bloków betonowych: a – wzajemnie zazębiających się, „American Excelsior” oraz b – połączonych liniami, „Ar-mortec” [6]



Rys. 12. Betonowe prefabrykаты do umacniania dna i brzegów cieków [8]

z geotekstyliów. Gdy ma być użyty filtr ziarnisty, to grubość jego warstwy powinna być co najmniej $4 \times d_{50}$ materiału filtra lub 15 cm (która większa), przy czym d_{50} powinna być większa niż połowa najmniejszego otworu w systemie maty. Grubość warstwy filtra ziarnistego umieszczanej pod wodą należy zwiększyć o 50%.

Betonowe prefabrykaty umacniające. Są przestrzennymi elementami używanymi do stabilizowania dna i brzegów oraz minimalizacji ich erozji. Przykłady prefabrykatów pokazano na rysunku 12. Są stosowane, gdy trudno uzyskać kamienie nadające się do wykonania narzutów lub gdy działanie ekstremalnych sił hydraulicznych wymaga użycia bardzo dużych kamieni. Prefabrykaty przestrzenne były stosowane do umocnienia brzegów morskich, rzek i kanałów oraz do zabezpieczenia podpór mostów przed rozmyciem.

Główną zaletą prefabrykatów przestrzennych jest większa ich stabilność niż kamieni, wynikająca z przestrzennego zazębienia się prefabrykatów. Zwiększona stabilność umożliwia ochronę nimi stromych zboczy oraz stosowanie prefabrykatów lżejszych niż kamienie konieczne w danych warunkach hydraulicznych.

Maty z koszy siatkowych (gabionów). Są zrobione z połączonych pojemników wykonanych z siatki drucianej (rys. 13), wypełnionych kamieniami. Długość maty gabionowej jest większa niż jej szerokość, a szerokość większa niż grubość maty. Druty w węzłach siatki są skręcone, co zapobiega rozprzestrzenieniu się uszkodzenia pojemnika w przypadku lokalnego pęknięcia drutu oraz zazwyczaj są chronione przed korozją powłoką z chlorku winylu lub cynku. Kamienie stosowane w pojemnikach mogą być graniaste lub owalne; graniaste są lepsze, gdyż wzajemnie się blokują. W czasie instalowania poszczególne maty łączy się ze sobą w ciągłą strukturę drutem lub złączkami. Siatkowa konstrukcja umożliwia kosztom odkształcanie i dostosowanie się do zmian podłoża. W porównaniu z narzutem kamiennym, maty gabionowe wymagają mniejszych wykopów w dnie cieku. Inną zaletą tych mat jest możliwość stosowania w nich mniejszych, tańszych kamieni niż w narzutach, z których byłyby zabierane przez przepływającą wodę. Dotychczasowe doświadczenie ze stosowaniem

materacy gabionowych do ochrony przed rozmyciem filarów jest niewielkie. W szczególności niepewność dotyczy trwałości siatki w warunkach przepływu przy filarach.

Metodologia wyboru sposobu zabezpieczenia filara przed rozmyciem

Wybór zabezpieczenia powinien uwzględniać: środowisko cieku, czynniki wykonawcze i utrzymania, charakterystykę działania zabezpieczenia i koszty w czasie jego życia użytkowego. W Internecie są dostępne zautomatyzowane procedury ułatwiające proces podejmowania decyzji z pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel Microsoftu®. Najbardziej odpowiednim zabezpieczeniem w danym miejscu jest mające najwyższy «indeks wyboru»:

$$SI = (S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4) / LCC$$

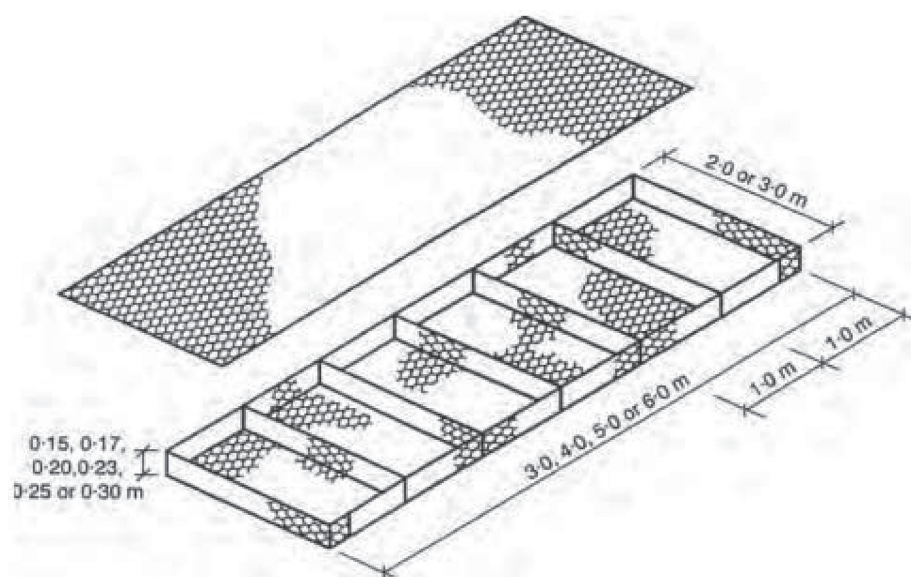
przy czym:

- S_1 – wielkość materiału dna przeniesionego przez ciek,
- S_2 – obciążenie zabezpieczenia przez szczątki lub lód,
- S_3 – ograniczenia wykonalności zabezpieczenia,
- S_4 – wymagania inspekcji i utrzymania zabezpieczenia,
- LCC – koszty ponoszone w czasie użytkowego życia zabezpieczenia.

Szczegółową charakterystykę tych czynników podano w [5].

Zakończenie

Racjonalne zabezpieczenie filara mostowego przed rozmyciem jest skomplikowanym przedsięwzięciem hydrotechnicznym. Powinno bowiem odpowiadać miejscowym warunkom hydrologicznym i geotechnicznym, a niekiedy wymaga przeprowadzenia kosztownych badań modelowych i polowych. Stąd bardzo często projektowanie i realizacja zabezpieczeń nie spełnia wymagań. Podstawową zasadą bezpiecznego użytkowania mostów jest kontrola stanu dna przy filarach po każdej powodzi oraz ich zabezpieczeń przed rozmyciem, a w przypadku stwierdzenia uszkodzeń – możliwie bezwzględna naprawa.



Rys. 13. Typowe wymiary kosza siatkowego (szańcowego, gabionu) stosowanego do wykonania mat zabezpieczających filary mostów przed rozmyciem [8]

Bibliografia

- [1] Jarominiak A.: *Rozmycia przy mostach i ich monitorowanie*. „Drogownictwo” nr 12/2013 i 1/2014.
- [2] Jarominiak A.: *Wytyczne monitoringu rozmycia dna w otoczeniu podpór mostowych*, Załącznik 1. *Podstawowe koncepcje i definicje rozmycia*. IBDM, 2015 (Internet: IBDM MOPMO).
- [3] Melville B.W., Coleman S.E.: *Bridge Scour*. Water Resources Publication. LLC, Highlands Ranch, 2000.
- [4] HEC 18: *Evaluating Scour at Bridges* Fifth Edition, 2012, FHWA.
- [5] HEC 23, Vol. 1: *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures Experience, Selection, and Design Guidance*, 2009. NHI, FHWA.
- [6] HEC 23, Vol. 2: *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures Experience, Selection, and Design Guidance*, 2009. NHI, FHWA.
- [7] NCHRP Report 568: *Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control*, 2006. TRB. FHWA.
- [8] NCHRP Report 593: *Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour*, 2007. TRB, FHWA.

Uwaga: pozycje [2] i [4]–[8] są dostępne w Internecie.