



ANDRZEJ JAROMINIAK

## Zabezpieczenie przyczółków mostowych przed podmyciami

Do głównych czynników, które mogą zagrozić stabilności przyczółków należą (rys. 1):

- **agradacja (akumulacja, namulanie) i degradacja (ogólne obniżenie) koryta ciekłu;** są to długotrwałe zmiany poziomu dna ciekłu powodowane czynnikami naturalnymi lub wywołane przez człowieka,
- **rozmycie wskutek zwężenia przepływu;** podpory mostu i nasypy dojazdów zmniejszają przekrój przepływu ciekłu, co zwiększa jego prędkości; następstwem jest wzrost zabierania przez wodę gruntów z dna i brzegów z całej lub większej części szerokości koryta ciekłu w rejonie mostu,
- **rozmycia lokalne;** występują przy przeszkodach utrudniających przepływ: przy filarach, przyczółkach, nasypach dojazdów i budowach regulacyjnych; są powodowane przez przyspieszenie przepływu i wiry, które wywołują te przeszkody.

Rezultatem działania wymienionych czynników bywa uszkodzenie przeprawy mostowej w rejonie przyczółka a nawet katastrofa z ofiarami śmiertelnymi.

Degradacja koryta ciekłu występuje niezależnie od istnienia przeprawy mostowej. Obejmuje procesy ogólnego rozmycia krótkotrwałe i długotrwałe (występujące w ciągu wielu lat). Polega na stopniowym obniżaniu i bocznej erozji brzegów koryta ciekłu wskutek jego poszerzania lub migracji meandrów. Bywa też następstwem naturalnych ścięć meandrów, zmian klimatycznych, itp., albo działania ludzi (wyprostowania lub pogłębienia koryta, poboru z niego kruszywa budowlanego, rolnictwa, urbanizacji, zbudowania zapory). Krótkotrwałe

ogólne rozmycie występuje w czasie jednej lub kilku kolejnych powodzi w miejscach łączenia się ciekłów, przesunięcia zakola koryta i migracji kształtów dna (diun, progów).

Degradacji koryta ciekłu zwykle towarzyszy zwiększenie spadku jego dna. A to zwiększa prędkość przepływu i intensywność erozji, rozpoczynające się od dołu ciekłu. Doprowadza do utworzenia się w dnie progów – lokalnego, zbliżonego do pionowego obniżenia dna, które z czasem migruje w górę ciekłu. Przyczyną powstania progów bywa także pobór z ciekłu kruszywa budowlanego. Mechanizmem migracji progów jest wymywanie w dnie ciekłu wyboju, który tworzy w dnie uskok. Wybój jest pogłębiany do czasu obwałowania ściany uskoku. Powoduje to przesunięcie progów w górę ciekłu oraz powtórzenie procesu tworzenia i podmywania progów. Gdy dno jest z gruntów aluwialnych, to próg przemieszcza się stosunkowo szybko, gdy z gruntów spoistych lub miękkiej skały – ruch progów jest powolny. Migracja progów destabilizuje dno i brzegi koryta, zwiększa ich erozję i ilość gruntu unoszonego w dół ciekłu. Migracja progów może zdestabilizować przyczółki i odsłonić fundamenty filarów.

Poza wymienionymi czynnikami, awarię przyczółka może spowodować przelewanie się wody powodziowej nad przyczółkiem i nasypem dojazdu oraz erozja związana ze złym utrzymaniem rowów odprowadzających wzdłuż boków przyczółka wodę z nasypu i terenu zalewowego.

Awaria przyczółka jest często rezultatem jednoczesnego wystąpienia kilku powyższych czynników.

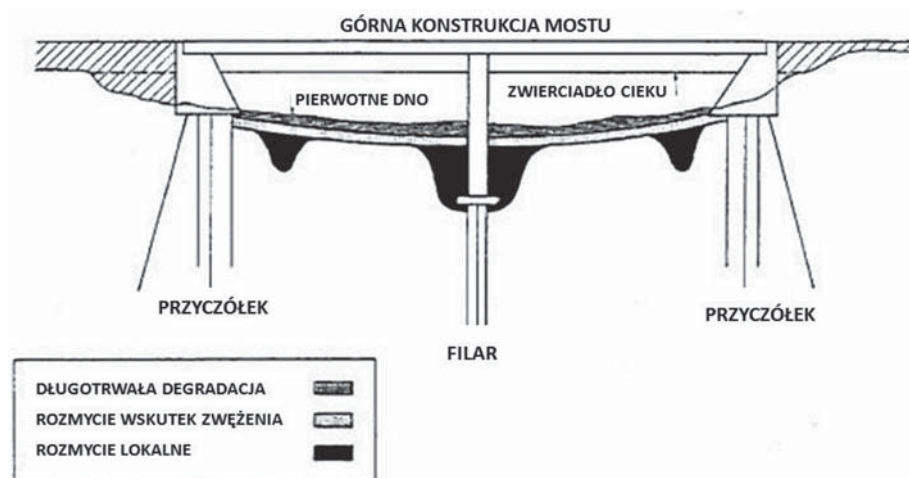
Niniejszy artykuł jest kontynuacją publikacji autora w „Drogownictwie” nr 10/2016 na temat zabezpieczania przed rozmyciem dna przy filarach mostów [3]. Informacji w nim podanych nie powtarzam. Odsyłam Czytelnika do tego artykułu.

### Zjawiska hydrauliczne mające wpływ na przyczółki

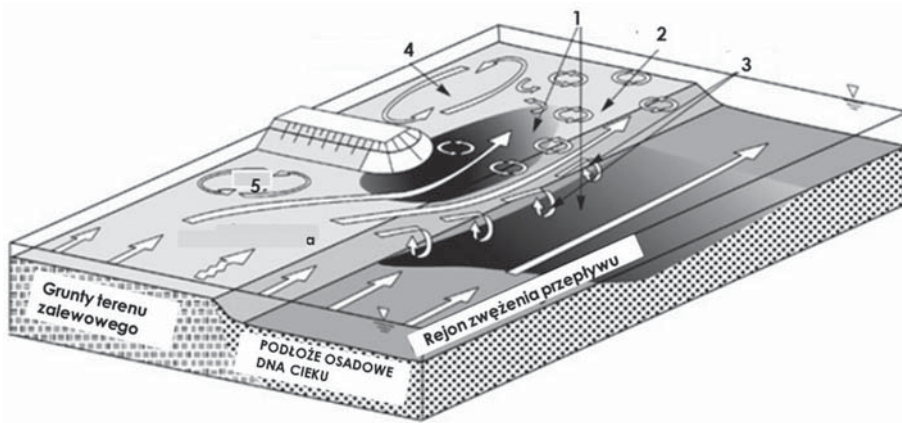
Utrudnienia przepływu wody przez przyczółek i nasyp dojazdu do mostu wywołują wiry:

- poziome, powstające z boku nasypu i przyczółka od strony góry ciekłu, przesuwające się przed przyczółkiem oraz
- pionowe, powstające za przyczółkiem i nasypem od strony dołu ciekłu (rys. 2).

Wiry poziome są podobne do wirów podkowiastych, które tworzą się przed fila-



Rys. 1. Rodzaje rozmycia występujące w rejonie mostu [4]



Rys. 2. Struktura przepływu: • makroturbulencje powodowane interakcją przepływu na terenie zalewowym i w głównym korycie cieką, • nurt opływający przyczółek • wiry toru wodnego (kilwateru) na terenie zalewowym; 1 – obszar rozmywania, 2 – obszar dużych turbulencji, 3 – wiry podkowiaste, 4 – rejon wirów kilwateru, 5 – rejon wirów oddzielonych [5]

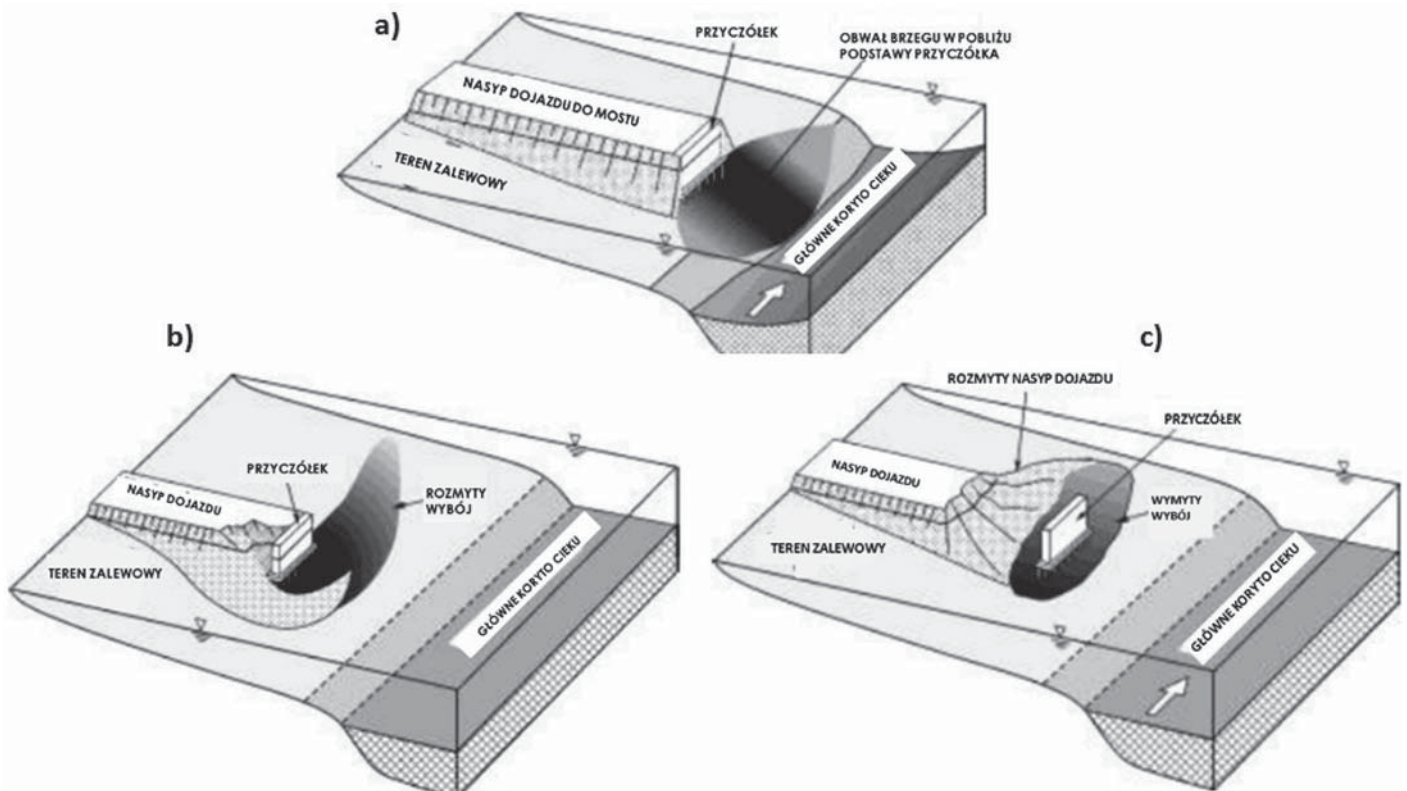
rem, a wiry pionowe – do wirów śladu wodnego (kilwateru) tworzących się za filarem [3].

Gdy przeprawa mostowa przekracza szeroki teren zalewowy, to rozszerzanie się przepływu za mostem powoduje intensywne lokalne rozmycia przy przyczółku. Z szerokością terenu zalewowego i długością na nim nasypu dojazdu zwiększa się prędkość przepływu, siła wirów i powodowane nimi naprężenia ścinające teren przy przyczółku. Gdy przyczółek jest na szerokim terenie zalewowym, z dala od brzegu koryta cieką, to w miejscu wpływania wody w otwór mostu wymywane są duże lokalne wyboje o głębokości dochodzącej do

czterokrotnej głębokości wody na terenie zalewowym. Ze zmniejszaniem się odległości przyczółka od brzegu koryta znacząco wzrastają naprężenia ścinające teren przy przyczółku od strony góry cieką. Im mniejsza jest odległość przyczółka od brzegu, tym większa składowa poprzeczna obciążenia hydraulicznego nasypu i przyczółka przez opływającą je wodę. Największa jest przy narożniku przyczółka od góry cieką. Przy małej odległości przyczółka od koryta cieką następuje erozja i destabilizacja jego brzegu. Dlatego najbardziej narażone na uszkodzenia są przyczółki zlokalizowane przy brzegu lub w jego pobliżu.

Ogólnie rozmycia w rejonie przyczółka można scharakteryzować następująco:

- największe rozmycia występują przy narożnikach przyczółka,
- im przyczółek i nasyp dojazdu bardziej zawężają przepływ z terenu zalewowego, tym przy narożniku przyczółka od góry cieką jest wymywany głębszy wybój,
- im stosunek prędkości przepływu na terenie zalewowym do prędkości w korycie cieką jest mniejszy, tym rozmywanie wyboju następuje bliżej przyczółka,
- wiry podkowiaste przy narożniku przyczółka od góry cieką są silniejsze niż wiry śladu wodnego przy narożniku od dołu cieką, ale rozmywanie wyboju przy narożniku od góry cieką ustaje szybciej niż wyboju od dołu cieką,



Rys. 3. Rozmycie przy przyczółku zagłębionym w nasypie usytuowanym: a – przy brzegu koryta cieką, b – z dala od brzegu, rozmycie przed przyczółkiem, c – z dala od brzegu, rozmycie przy przyczółku i nasypu dojazdu do mostu [9]

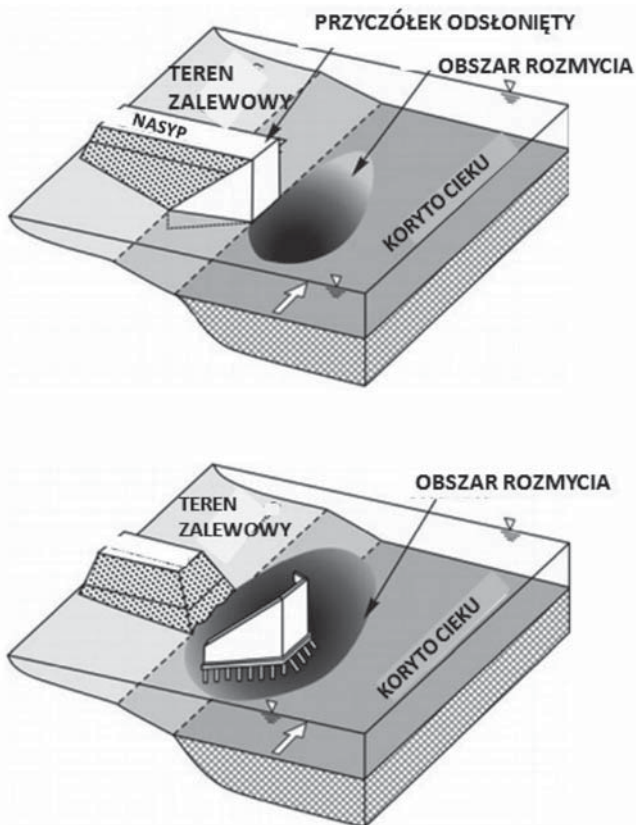
- głębokość wyboju rozmywanego na terenie zalewowym niedaleko brzegu koryta cieku jest tym większa, im wybój jest bliżej koryta.

Dlatego szczególnego zabezpieczenia przed rozmyciem wymagają miejsca w pobliżu przyczółka:

- od strony góry cieku, bezpośrednio przed przyczółkiem i teren od strony dołu cieku oraz
- skarpy nasypu przy przyczółku.

## Charakterystyczne przypadki awarii przyczółków powodowane przez rozmycia [9]

**Podmycie brzegu przy zlokalizowanym na nim przyczółku** (rys. 3a i 4). Rozmycie brzegu lub dna koryta cieku przy



Rys. 4. Etapy podmywania przyczółka odsłoniętego, zlokalizowanego na brzegu koryta cieku oraz nasypu dojazdu: 1 – rozmycie wyboju w brzegu przed przyczółkiem, 2 – zsuniecie się w wybój przyczółka i części nasypu [9]

brzegu może wywołać obwał nasypu i uszkodzić przyczółek. Nasyp osuwa się w wybój wmyty przy brzegu. Lokalne nurty mogą odsłonić pale, na których jest oparty przyczółek (rys. 5).

**Rozmycie terenu zalewowego wokół przyczółka zagłębionego w nasypie dojazdu, znajdującego się z dala od koryta cieku.** Teren zalewowy bywa rozmywany w pobliżu i w dół cieku od przyczółka (rys. 3b). Destabilizuje to nasyp otaczający przyczółek, doprowadzając do osunięcia się nasypu w wmyty wybój (rys. 3c).

**Rozmycie nasypu dojazdu za przyczółkiem.** W rezultacie takiego rozmycia korpus przyczółka zostaje całkowicie odsłonięty.

**Rozmycie powodowane przelewaniem się wody powodziowej nad przyczółkiem i nasypem dojazdu.** Występuje, gdy dojazd jest stosunkowo niski, albo otwór mostu zostaje zatkany przez szczątki lub lód. Woda przelewając się nad przyczółkiem i nasypem uszkadza od strony dołu cieku skarpy nasypu i rozmywa wzdłuż niego teren zalewowy.

Wymienione przypadki rozmycia przy przyczółku mogą wystąpić jednocześnie lub po sobie. Gdy przyczółek zagłębiony w nasypie jest blisko koryta cieku, to podmycie brzegu może stosunkowo szybko doprowadzić do zniszczenia nasypu przed czołem przyczółka. Dlatego fundament takiego przyczółka powinien być zaprojektowany z uwzględnieniem zaniku podparcia bocznego i pionowego przez nasyp, co może zostać spowodowane:

- rozmyciem gruntu przy fundamencie,
- boczną niestabilnością koryta cieku,
- zwężeniem go przeprawą mostową oraz
- długotrwałą degradacją koryta.

Najgłębsze rozmycia są przy przyczółkach prostopadłych do koryta cieku. Zmniejszenie kąta pomiędzy przyczółkiem i kierunkiem przepływu cieku osłabia wiry poziome.

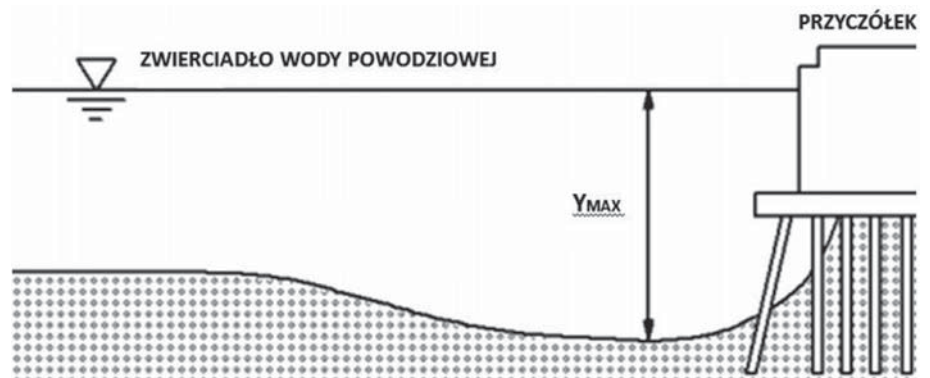
## Środki ochrony przed rozmyciami stosowane przy przyczółkach

Środki te można podzielić na dwie grupy:

- (1) zabezpieczające przed erozją powierzchnię terenu i skarpy nasypu przy przyczółku oraz
- (2) odsuwające nurt przepływu od rejonu przyczółka.

### Zabezpieczenie powierzchniowe

Teren i skarpy nasypu przy przyczółku chroni się narzutem kamiennym lub z geoworków oraz różnego rodzaju matami tak, jak zabezpiecza się filary mostów [3]. Oto niektóre cha-



Rys. 5. Możliwe podmycie przyczółka opartego na palach, usytuowanego w zakolu cieku [5]

rakterystyki zachowania się trzech najczęściej stosowanych zabezpieczeń powierzchniowych:

♦ *Narzuty kamienne*. Narzut oddala rozmycia od przyczółka. Kamienie przy zewnętrznej krawędzi narzutu opadają w rozmycia, które przy niej powstają i są przez wodę odsuwane od narzutu,

♦ *Geoworki*. Są wykonane z geowłókniny, wypełnione piaskiem lub z geotkanin, wypełnione zaprawą cementową. Stanowią alternatywę narzutu kamiennego. Skutecznie zabezpieczają przed podmyciem przyczółka odstonięte, gdy wielkość powierzchni pokrywanej workami spełnia warunek:  $r_a/L_a \geq 1$  ( $r_a$  – długość promienia lub szerokość zabezpieczonej powierzchni,  $L_a$  – długość przyczółka). Problemem jest erozja występująca przy krawędzi zabezpieczenia workami. Można ją zmniejszyć umieszczając wzdłuż zabezpieczenia małe worki lub narzut kamienny. Worki powinny być ułożone na zakład, aby następna ich warstwa przykrywała szczeliny pomiędzy workami w warstwie niższej. Worki można stosować pod narzutem kamiennym zamiast filtra z geotekstyliów – łatwiej je instalować niż geotekstylii, mimo że muszą być poniżej poziomu dna, aby nie utrudniały przepływu. Korzystnie wpływa na trwałość zabezpieczenia workami połączenie ich, np. liniami.

♦ *Bloki z betonu połączone linami*. Podmywane przy krawędzi fartucha tylko osiadają; wtedy rozmycia występują bliżej przyczółka niż w przypadku równowaznego narzutu kamiennego. Aby mata z bloków skutecznie zabezpieczała przyczółek przed podmyciem należy uniemożliwić:

- wymywanie spod bloków gruntu,
- erozję przy krawędziach maty oraz
- lokalne rozmycia wybojów przy macie.

Zwiększenie bloków nie zmniejsza głębokości rozmycia. Ważniejszy niż wielkość bloków jest zasięg w planie maty. Mniejsze bloki, ułożone ściśle obok siebie, są skuteczniejsze niż duże, gdyż spod mniejszych woda zabiera mniej gruntu.

Minimalną szerokość maty z bloków połączonych linami można określić równaniem:

$$W = 1,4 dsf \quad (3)$$

gdzie:

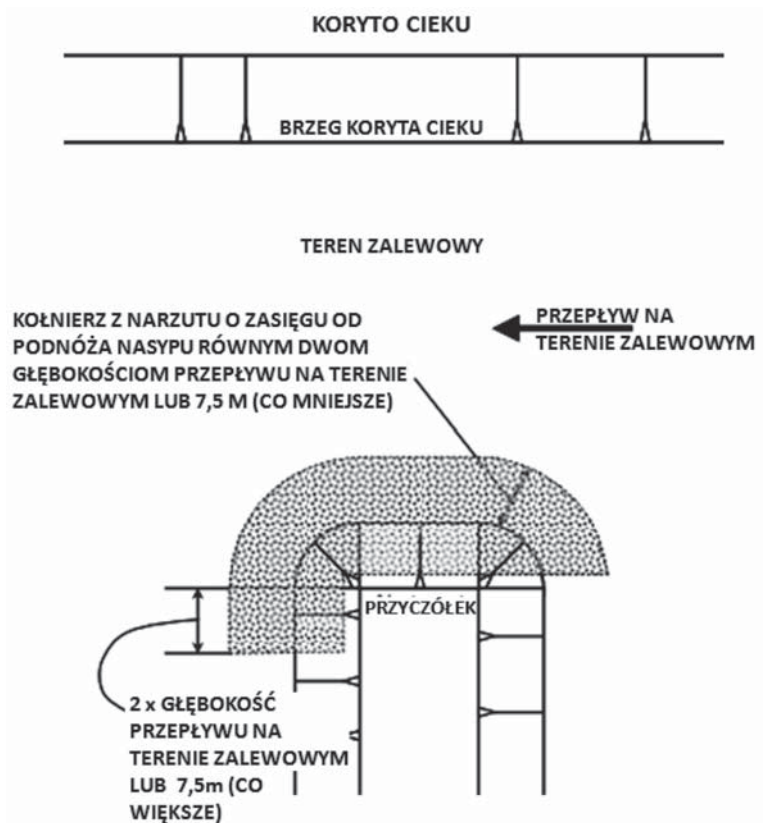
$W$  – szerokość maty z bloków,

$dsf$  – maksymalna głębokość rozmycia względem poziomu terenu zalewowego.

W przypadku maty z betonowych bloków połączonych linami wyboje są rozmywane bliżej przyczółka niż gdy jest z narzutu kamiennego, Dlatego maty z bloków powinny być szersze niż z narzutu.

Zabezpieczenie powierzchni terenu i skarp nasypu nie eliminuje rozmyć lokalnych przy przyczółku i nie zmniejsza znacząco głębokości rozmyć. Odsuwa jedynie od przyczółka rejon rozmyć – poza krawędzie zabezpieczenia. Dlatego należy upewnić się, czy przesunięcie rozmycia nie zagrazi pobliskiemu filarowi lub brzegowi cieku. Jeżeli może zagrazić, to należy zabezpieczyć przyczółek i filar w taki sposób, aby oba były chronione lub/i zabezpieczyć brzeg.

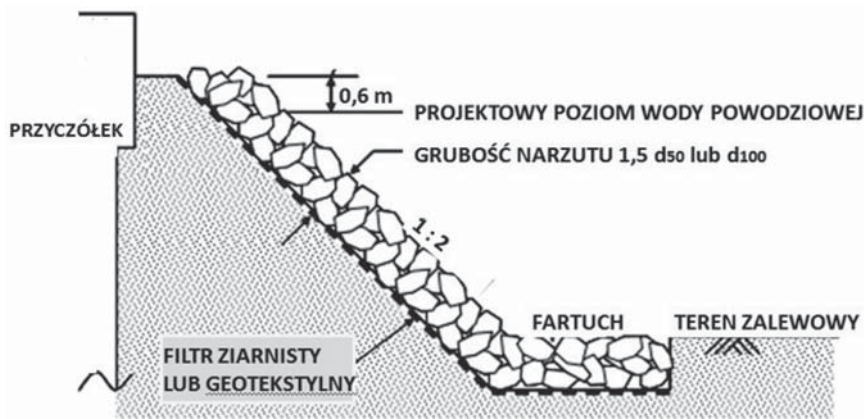
Przepisy FHWA [7] podają następujące zasady powierzchniowego zabezpieczania przed rozmyciem rejonu przyczółka:



Rys. 6. Widok w planie zasięgu narzutu kamiennego [7]

- należy zabezpieczyć teren wokół przyczółka oraz skarpy nasypu dojazdu przy przyczółku,
- teren przy przyczółku należy zabezpieczyć narzutem kamiennym lub w inny sposób, umieszczonym przed czołem przyczółka, wzdłuż obu jego boków i wzdłuż odcinków obu skarp nasypu, jak pokazano na rysunku 6; zabezpieczenie powinno sięgać od podnóża przyczółka lub nasypu, który go otacza, w kierunku cieku, na odległość równą podwójnej głębokości przepływu na brzegu przy przyczółku, ale nie przekraczać 7,5 m; górna powierzchnia zabezpieczenia powinna być w poziomie terenu, aby zabezpieczenie nie utrudniało na nim przepływu wody powodziowej i nie powodowało znaczących rozmyć,
- narzut powinien być doprowadzony na nasypie 0,6 m nad poziom wody powodziowej (rys. 7),
- grubość narzutu kamiennego nie powinna być mniejsza niż  $1,5 \times d_{50}$  lub  $d_{100}$  (przyjmuje się wartość większą); należy uwzględnić, że gruba warstwa narzutu utrudnia przepływ na terenie zalewowym, co może powodować znaczne rozmycia przy przyczółku,
- pod narzutem kamiennym należy umieścić warstwę filtracyjną,
- przy zabezpieczaniu przyczółka znajdującego się obok krawędzi koryta cieku lub umieszczonego w korycie należy stosować narzut zakończony na dole wałem kamieni zagłębionym w dnie cieku; przy podmywaniu krawędzi narzutu kamienie opadają w wyboję ograniczając podmywanie narzutu; maksymalne zagłębienie poniżej dna nie przekracza 0,2 głębokości przepływu.

Grubość warstwy narzutu kamiennego wpływa na jego stabilność i trwałość. W warunkach dużych turbulencji przepływu



Rys. 7. Przekrój narzutu kamiennego zabezpieczającego skarpę nasypu przy przyczółku [7]

cieku zaleca się grubość narzutu  $1,5 \times d_{100}$ . W Nowej Zelandii zalecana grubość warstwy narzutu kamiennego wynosi  $2 \times d_{50}$  [4]. Zwiększenie grubości powyżej minimalnej na ogół zwiększa stabilność narzutu.

♦ **Warstwa filtracyjna.** Poprawnie zaprojektowany filtr pod narzutem kamiennym eliminuje wymywanie z jego z podłoża drobnych cząstek (erozję wewnętrzną) i umożliwia przepuszczalność styku filtra z narzutem. Zasady stosowania warstwy filtracyjnej pod narzutem kamiennym przy przyczółku na terenie zalewowym, z dala od koryta cieku są generalnie takie, jak pod narzutami zabezpieczającymi filar (filtr może być z warstwy ziarnistej lub geotekstylnej) [3]. Natomiast przy przyczółku zlokalizowanym na brzegu koryta, w którego dnie w czasie powodzi występują diuny z rynnami głębszymi niż grubość narzutu, ulega on stopniowo destrukcji, poczynając od obrzeży, w kierunku przyczółka. Pod narzutem zabezpieczającym taki przyczółek stosuje się wyłącznie filtr geotekstylny. Umieszcza się go pod 2/3 szerokości narzutu – pozostawiając bez filtra 1/3 szerokości wzdłuż zewnętrznej krawędzi narzutu. Ułatwia to zsuwanie się kamieni w rozmy-

cia przy krawędzi narzutu utrudniające rozwój jego podmywania.

Ważna jest kompatybilności warstwy filtracyjnej (ziarnistej lub geotekstylnej) oraz gruntu podłoża narzutu.

Więcej informacji na temat sposobów zabezpieczenia przed rozmyciem powierzchni terenu zawiera artykuł [3].

### Sposoby odsuwania nurtu od przyczółka

**Podłużna tama kierująca** (rys. 8). Odsuwa przepływającą wodę od przyczółka, zmniejsza przy nim turbulencje przepływu (wiry i nurty poprzeczne) oraz lokalne rozmycia przy przyczółku i pobliskim filarze, oddala od przyczółka rozmycia terenu, chroni nasyp dojazdu i przesuną lokalne rozmycie do końca

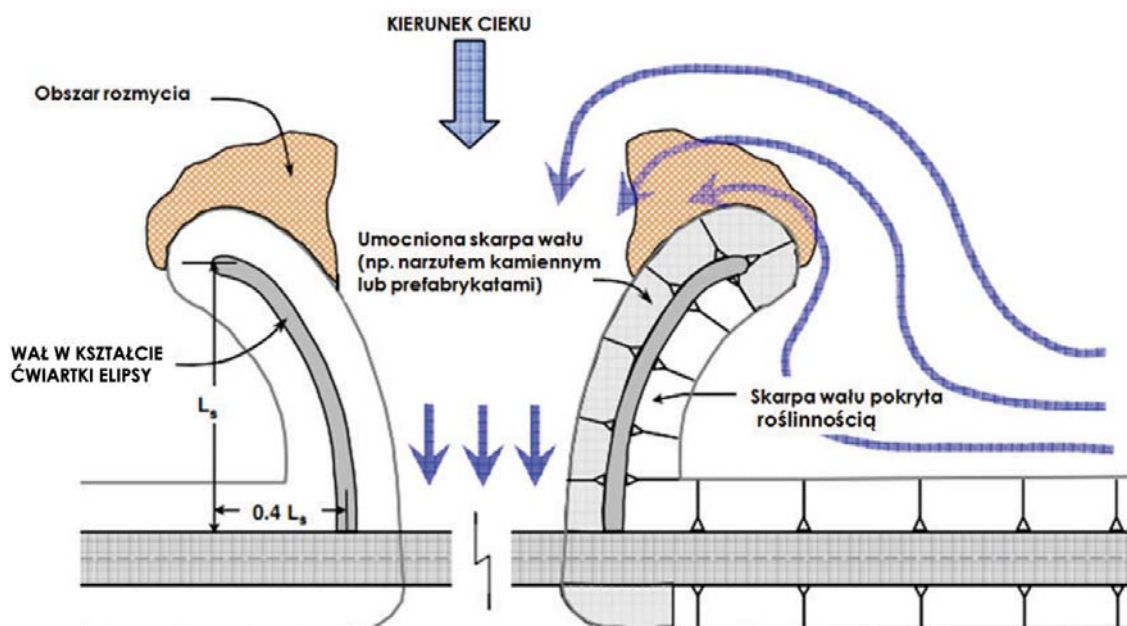
tamy od góry cieku. Skuteczność podłużnej tamy kierującej zależy od geometrii cieku, przepływu na terenie zalewowym i wielkości otworu mostowego.

Podłużną tamę kierującą należy zwłaszcza stosować do wprowadzenia w otwór mostu wody z szerokiego terenu zalewowego, przegrodzonego nasypem dojazdu. Brak tamy może powodować poważne rozmycia terenu i nasypu dojazdu przy przyczółku.

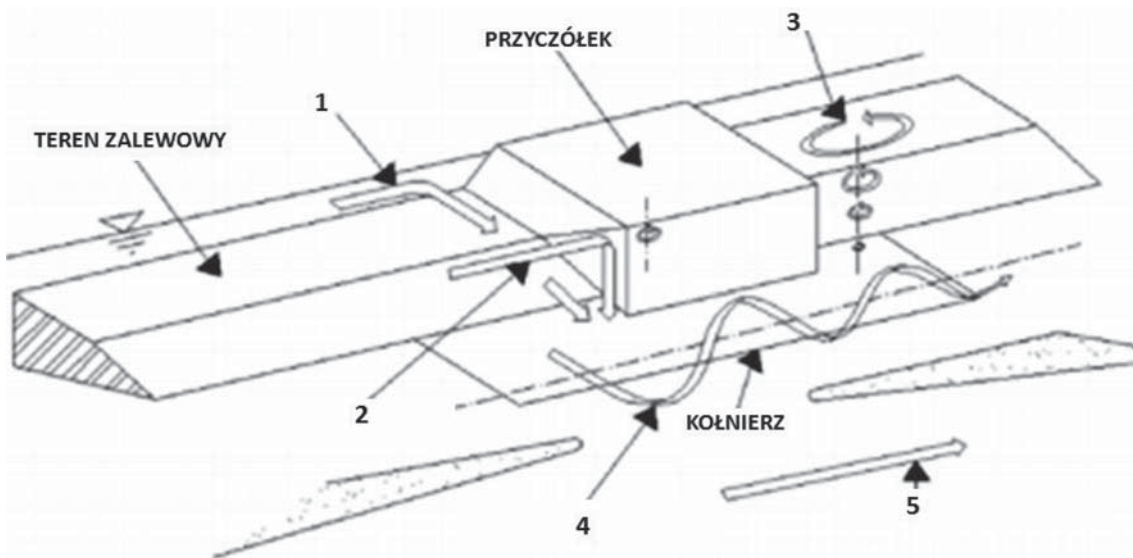
Podłużne tamy kierujące są wałami ziemnymi lub z kamieni. Zwykle mają w planie kształt odcinka elipsy, aby wyrównywały przepływ, bez jego rozdzielania. Dlatego krzywizny tamy są o dużych promieniach. Ważnymi czynnikami w projektowaniu tamy są:

- usytuowanie względem otworu mostu,
- kształt tamy w planie i jej przekroju poprzecznego,
- długość tamy,
- poziom wierzchu tamy i
- zabezpieczenie przed rozmyciem.

Długość tamy nie przekracza 15 m, z tym że w przypadku krótkich mostów stosuje się tamy dłuższe niż światło pozi-



Rys. 8. Rozmycia przy podłużnych tamach kierujących [6]



Rys. 9. Układ nurtów po zastosowaniu przy przyczółku kołnierza: 1 – przepływ z terenu zalewowego do koryta ciek, 2 – nurt skierowany w dół, 3 – wir śladu wodnego, 4 – wiry podkowiaste, 5 – rozmycie wskutek zwężenia przepływu przez most [9]

me otworu mostowego. Od strony dopływu wody tama jest zwykle zabezpieczona narzutem kamiennym.

W przypadku przyczółka na szerokim terenie zalewowym lokalne rozmycia powodowane rozszerzaniem się przepływu za mostem można odsunąć od przyczółka budując przy nim od dołu ciek, krótką tamę podłużną.

W [9] są opisane badania modelowe przeprowadzone w korycie hydraulicznym kilku interesujących sposobów regulacji przepływu w rejonie przyczółka odstoniętego, zlokalizowanego przy brzegu koryta ciek. Oto trzy z nich:

**Kołnierz poziomy** (rys. 9). Jest to pozioma płyta stykająca się z korpusem przyczółka. Oslania teren/dno przed nurtami, które spływają w dół przed korpusem przyczółka, redukując powodowane nimi lokalne rozmycia. Szerokość kołnierza (prostopadła do przepływu) powinna wynosić co najmniej  $0,23 L$  – wymiaru przyczółka prostopadłego do kierunku przepływu. Minimalną długością kołnierza jest  $0,8 L$ . Stwierdzono, że

- im dalej kołnierz sięga za przyczółek w dół ciek, tym bardziej oddala w tym kierunku miejsce rozmywania wyboju,
- gdy kołnierz jest doprowadzony poza obszar lokalnych rozmyć, które występują, gdy nie są stosowane środki zabezpieczające, to rozmycia stają się nieistotne,

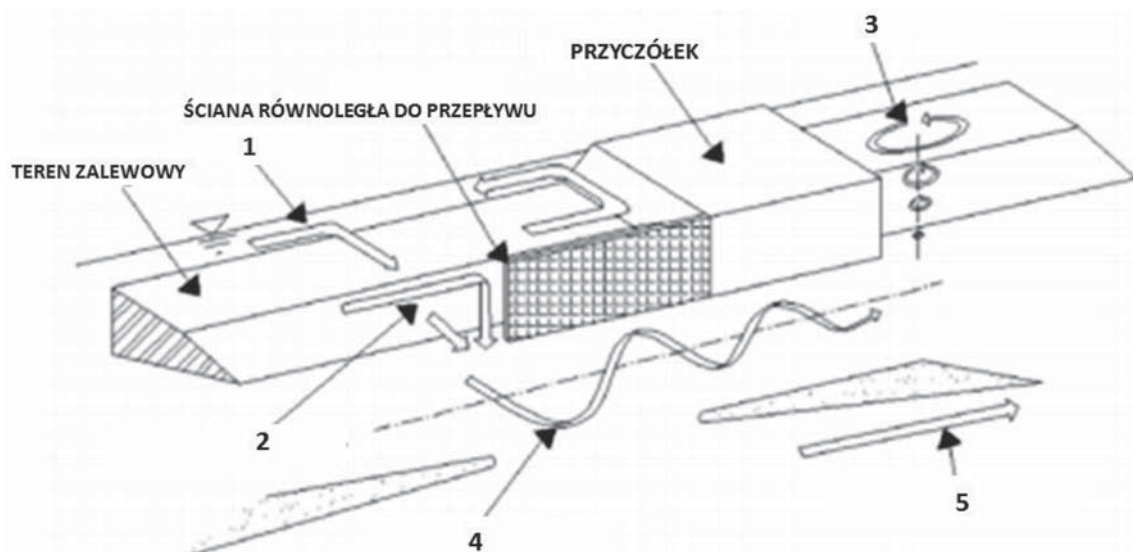
- najskuteczniej zmniejsza rozmycia umieszczenie kołnierza poniżej poziomu dna przy przyczółku, na głębokości równej  $0,08$  głębokości przepływu przy nim w korycie ciek.

**Ściana równoległa do przepływu w korycie ciek** (rys. 10). Umieszczona przy przyczółku od góry ciek odsuwa wymywanie wyboju od narożnika z tej strony przyczółka i skutecznie zabezpiecza go przed podmyciem. Z wydłużeniem ściany maleje rozmycie przy przyczółku. Stwierdzono, że ściana długości  $1,6 L$  ( $L$  – długość przyczółka prostopadła do kierunku przepływu) eliminuje rozmycie przy przyczółku, gdy stosunek prędkości  $V/V_c = 0,9$  ( $V$  – prędkość średnia przepływu,  $V_c$  – prędkość krytyczna, przy której rozpoczyna się unoszenie przez wodę cząstek gruntu). Ściana o długości  $1,6 L$  może całkowicie wyeliminować rozmycia przy przyczółku, gdy  $V/V_c = 1,5$  i w 70%, gdy  $V/V_c = 2,3$ .

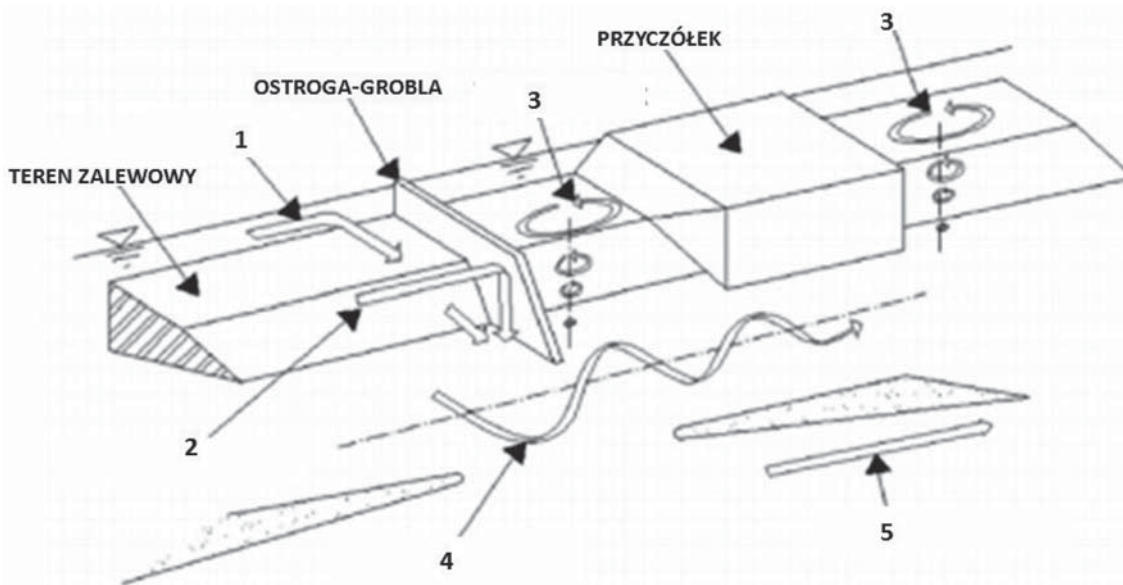
Wydaje się warta zainteresowania koncepcja ściany równoległej wykonana w postaci ściany szczelinowej.

Badania modeli równoległych ścian o różnej długości i różnym wysunięciu w koryto ciek nasunęły m.in. następujące spostrzeżenia:

- ściana równoległa do przepływu, solidna (np. z betonu),



Rys. 10. Układ nurtów po zastosowaniu przy przyczółku ściany równoległej do przepływu w korycie ciek: 1 – przepływ z terenu zalewowego do koryta ciek, 2 – nurt skierowany w dół, 3 – wir śladu wodnego, 4 – wiry podkowiaste, 5 – rozmycie spowodowane zwężeniem przepływu przez most [9]



Rys. 11. Układ nurtów po zastosowaniu przy przyczółku ostrogi-grobli: 1 – przepływ z terenu zalewowego do koryta ciek, 2 – nurt skierowany w dół, 3 – wir śladu wodnego, 4 – wiry podkowiaste, 5 – rozmycie spowodowane zwężeniem przepływu przez most [9]

doprowadzona do narożnika przyczółka od góry ciek, może skutecznie zabezpieczyć przyczółek przed podmyciem,

- przy końcu ściany od góry ciek mogą występować znaczne rozmycia, dlatego w tym rejonie nie powinno być żadnych budowli,
- równoległa grobla z kamieni jest lepsza niż solidna ściana pod względem skuteczności, stabilności i kosztu; stopa grobli nie powinna wystawać przed przyczółek; przy długości 0,5 L grobla wystarczająco zabezpiecza przyczółek przed podmyciem; nachylenie skarp grobli powinno być rzędu 30° i nie większe niż 70% kąta stoku naturalnego kamieni.

♦ *Ostrogi-grobli* (rys. 11). Są prostopadłe do kierunku nurtu. Wnioski z ich badań modelowych są następujące:

- pojedyncza ostroga-grobli w postaci solidnej ściany, umieszczonej od góry ciek przed przyczółkiem i wysuniętej, jak on lub mniej w koryto ciek, nie chroni przyczółka; przy końcu ostrogi-grobli od strony ciek powstają wiry i bardzo silne nurty skierowane w dół i wiry; zawsze rozmywają ogromny wybój, który zagraża zarówno ostrodze-grobli jak i stabilności brzegu koryta ciek,
- najlepiej chronią przyczółek trzy ostrogi-grobli wykonane z kamieni, jedna przed przyczółkiem od strony góry ciek i dwie od narożników przyczółka,
- ostrogi-grobli wykonane z kamieni mają szereg zalet w stosunku do solidnych, sztywnych ostróg-grobli.

Przedstawiłem powyższe przykłady, gdyż mogą być inspiracją poszukiwania niekonwencjonalnych sposobów przeciwdziałania podmyciom przyczółków.

## Lód i szczątki

Wywołują dodatkowe obciążenia narzutu wskutek uderzeń i koncentracji przepływu. Przymarznienie lodu do kamieni narzutu może powodować ich przemieszczanie. Główne uszkodzenia narzutu przez lód występują przy jego spiętrzaniu.

Gdy dopływające kry są dociskane do narzutu, to dostają się pomiędzy kamienie i wcześniej spiętrzony lód. Powłoka lodowa unosi kamienie ku powierzchni zwał lodowego. Aby temu zapobiec zaleca się w przypadku zabezpieczania narzutu zboczy/skarp łagodniejszych niż 1:3 stosowanie kamieni o  $d_{100}$  co najmniej dwukrotnie większym niż grubość lodu, a zboczy bardziej stromych – o  $d_{100}$  około trzykrotnie większym niż grubość lodu.

Rozpraszanie kamieni narzutu na zboczach powodowane obciążeniem przez szczątki polega głównie na odłączaniu kamieni wskutek bezpośrednich uderzeń szczątkami. Zaleca się, aby zbocze/skarpa pokrywane narzutem, na który mogą działać ciężkie szczątki, miało pochylenie nie większe niż 1 : 2.

Należy uwzględnić możliwość przemieszczenia kamieni narzutu wskutek zmiany kierunku lub zwężenia przepływu spowodowanego nagromadzeniem się szczątków. Zwłaszcza zwężenie koryta przez szczątki może w czasie powodzi skierować przepływ wody z dużą prędkością na narzut kamienny zabezpieczający podpory mostu.

## Wymiarowanie narzutów kamiennych przy przyczółkach

FHWA [8] podaje następującą metodologię projektowania narzutu zabezpieczającego przyczółek:

- ♦ Oblicza się wartość liczby Froude'a:  $V/(gy)^{1/2}$  i na jej podstawie wybiera równanie mediany wielkości kamienia narzutu

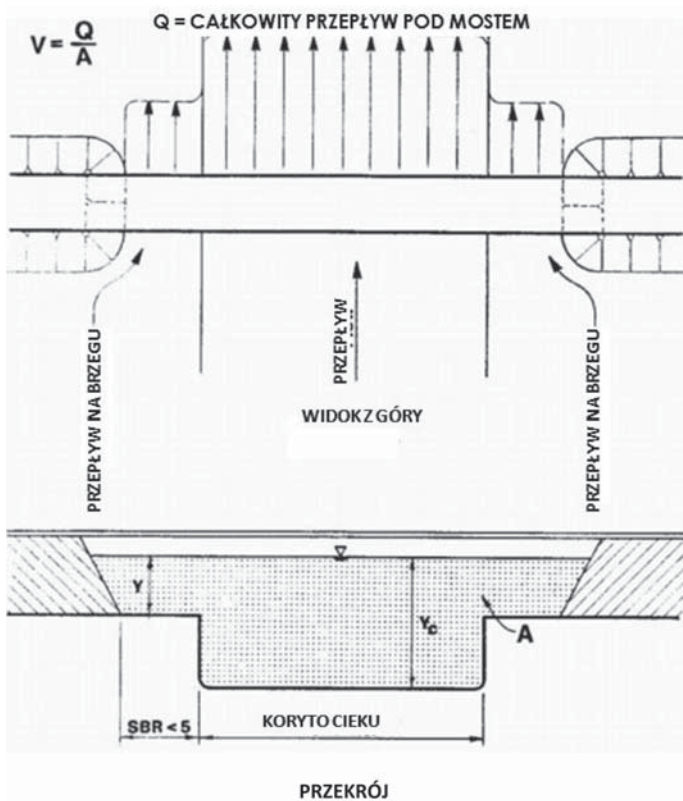
- gdy liczba Froude'a  $\leq 0,80$ , to narzut kamienny przy przyczółku odsoniętym i zagłębionym w nasypie powinien być projektowany z użyciem równania:

$$\frac{d_{50}}{y} = \frac{K}{(S_g - 1)} \left[ \frac{V^2}{gy} \right] \quad (1)$$

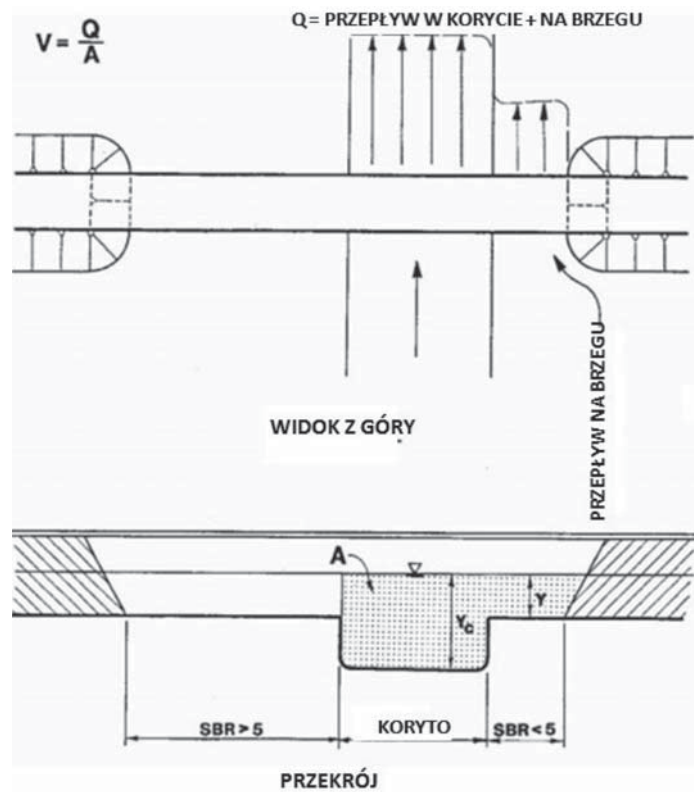
w którym:

$d_{50}$  = mediana wielkości kamienia [m]

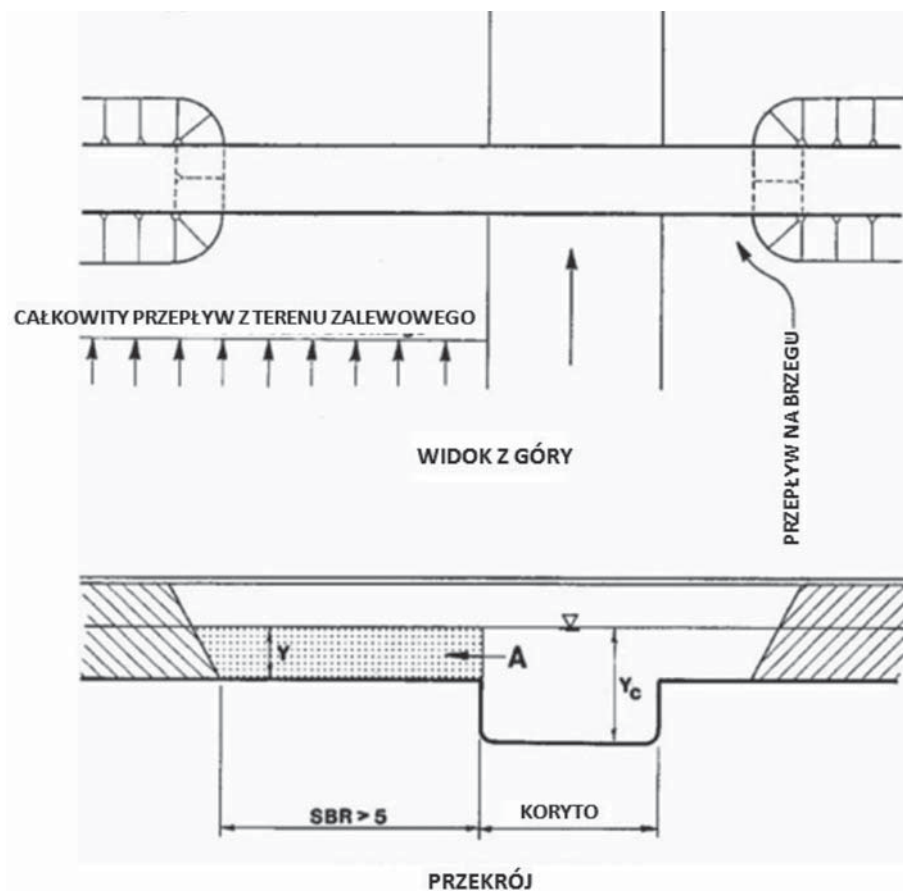
$V$  = charakterystyczna średnia prędkość przepływu w odcinku ciek zwężonym przez most [m/s]



Rys. 12. Rozkład przepływów w przypadku  $SBR < 5$  [8]



Rys. 14. Rozkład przepływów, gdy na jednym brzegu  $SBR > 5$ , a na drugim  $SBR < 5$  [8]



Rys. 13. Rozkład przepływów w przypadku  $SBR > 5$  [8]

- $S_g$  = ciężar właściwy narzutu kamiennego (zwykle przyjmowany 2,65)
- $g$  = przyspieszenie ziemskie [9,81  $m/s^2$ ]
- $y$  = średnia głębokość przepływu u podnóża przyczółka lub nasypu, w którym jest zagłębiony [m]
- $K$  = 0,89 w przypadku przyczółka zagłębionego w nasypie
- = 1,02 w przypadku przyczółka odsoniętego

- gdy liczba Froude'a  $> 0,80$ , to zalecanym równaniem jest:

$$\frac{d_{50}}{y} = \frac{K}{(S_g - 1)} \left[ \frac{V^2}{gy} \right]^{0,14} \quad (2)$$

w którym:

- $K$  = 0,61 w przypadku przyczółka zagłębionego w nasypie
- = 0,69 w przypadku przyczółka odsoniętego;

pozostałe oznaczenia jak w równaniu (1).

W obu równaniach współczynnik  $K$  jest mnożnikiem uwzględniającym lokalne przyspieszenie przepływu w chwili awarii narzutu. Oba równania stanowią obwiednię ponad 90% wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych.



- ♦ Oblicza się charakterystyczną średnią prędkość przepływu « $V$ » stosując ogólne równanie  $V = Q/A$  ( $Q$  – przepływ ciekłu przed mostem zmniejszony o objętość przelewającą się nad dojazdami,  $A$  – przekrój poprzeczny przepływu w otworze mostowym). Równanie to modyfikuje się w zależności od współczynnika cofnięcia przyczółka  $SBR$ . Jest to stosunek odległości przyczółka od najbliższej krawędzi koryta ciekłu, do średniej głębokości przepływu w korycie.
  - Gdy dla obu przyczółków  $SBR \leq 5$  (rys. 12), to oblicza się prędkość „ $V$ ” przyjmując jako  $Q$  całkowity przepływ pod mostem (z pominięciem przelewającego się przez dojazdy) i jako  $A$  – przekrój przepływu zwężony mostem.
  - Gdy dla obu przyczółków  $SBR > 5$ , to do obliczenia „ $V$ ” dzieli się całkowity przepływ na terenie zalewowym przez odległość pomiędzy korytem i przyczółkiem. Zakłada się cały przepływ z danego terenu zalewowego pozostaje na odpowiednim brzegu w otworze mostu (rys. 13) i oblicza się „ $V$ ” przepływu tylko na tym brzegu. Prędkość „ $V$ ” obliczaną dla  $SBR > 5$  porównuje się z maksymalną prędkością w korycie ciekłu pod mostem i przyjmuje w równaniu (1) lub (2) mniejszą z tych wartości.
  - Gdy dla jednego przyczółka  $SBR > 5$ , a dla drugiego  $SBR < 5$  (rys. 14), to w przypadku przyczółka z  $SBR > 5$  oblicza się „ $V$ ” jak w poprzednim akapicie, natomiast w przypadku przyczółka z  $SBR < 5$  oblicza się „ $V$ ” przyjmując przekrój przepływu ograniczony tym przyczółkiem i fikcyjną ścianą przy przeciwnym brzegu ciekłu; pozostały przepływ jest poza tym obszarem.

Metoda stosująca  $SBR$  daje prędkość u podnóża przyczółka, a nie na całym obszarze pomiędzy przyczółkiem i brzegiem ciekłu.

Gdy przyczółek jest na terenie zalewowym w odległości od brzegu koryta ciekłu, przy której nie oddziałuje na przepływ w korycie, to w projektowaniu narzutu kamiennego stosuje się średnią głębokość i średnią prędkość na zalewanym brzegu pod mostem.

Po określeniu mediany wielkości kamieni wybiera się klasę ich gradacji, z uwzględnieniem kryteriów projektowych i ekonomicznych. Stosując następną, wyższą klasę gradacji uzyskuje się strukturę narzutu nieco pewniejszą niż projektowa i mniej kosztowną.

Tabela 1. Gradacja kamieni narzutu [9]

Zakres wielkości kamienia	Procent gradacji mniejszej niż wielkość kamienia
1,5 $d_{50}$ do 1,70 $d_{50}$	100
1,2 $d_{50}$ do 1,40 $d_{50}$	85
1,0 $d_{50}$ do 1,15 $d_{50}$	50
0,4 $d_{50}$ do 0,60 $d_{50}$	15

Gradacja kamieni narzutu bywa określana dwoma krzywymi granicznymi, pomiędzy którymi wszystkie gradacje są odpowiednie. Im węższy jest obszar pomiędzy krzywymi

granicznymi, tym wyższe są koszty produkcji kamieni. Kryterium prawidłowej gradacji kamieni narzutu do zabezpieczenia przyczółków zawiera tabela 1. Przy odpowiedniej gradacji kamieni i właściwej grubości ich warstwy oraz dnie trudno rozmywalnym można pod narzutem nie stosować warstwy filtracyjnej.

## Przykład wymiarowania narzutu kamiennego przy przyczółku [8]

Należy określić wielkość kamieni narzutu zabezpieczającego przyczółek mostu zagłębiony w nasypie, zlokalizowany na terenie zalewowym. Podnóże nasypu jest w odległości 6,1 m od koryta ciekłu. Dane charakteryzujące warunki miejscowe zawiera tabela 2. Ciężar właściwy kamieni 2,65.

Tabela 2. Dane do przykładu przyczółka i wytyczne zastosowania na brzegu

Zmienna	Jednostka	Wartość
Średnia głębokość w głównym korycie pod mostem	m	2,53
Głębokość przepływu u podnóża nasypu	m	0,85
Przepływ całkowity w ciekłu	m <sup>3</sup> /s	113,30
Dopływ z terenu zalewowego	m <sup>3</sup> /s	11,30
Pole całkowitego przekroju mostowego	m <sup>2</sup>	48,30
Pole przekroju nad obszarem cofnięcia przyczółka	m <sup>2</sup>	5,20
Średnia prędkość przepływu przez przekrój mostowy	m/s	2,35
Maksymalna prędkość przepływu w korycie ciekłu	m/s	2,77

**Krok 1:** Oblicza się stosunek odległości przyczółka od krawędzi koryta ciekłu do średniej głębokości przepływu w korycie:  $SBR = 6,1/2,53 = 2,41$ .

**Krok 2:** Oblicza się charakterystyczną prędkość przepływu; ponieważ  $SBR < 5$ , dlatego prędkość przy przyczółku oblicza się jako średnią prędkość przepływu w otworze mostu:  $V = 113,3/48,3 = 2,35$  m/s (gdy  $SBR > 5$ , to prędkość u podnóża nasypu otaczającego przyczółek oblicza się dzieląc dopływ z terenu zalewowego przez obszar pomiędzy nasypem i krawędzią koryta ciekłu).

**Krok 3:** Oblicza się liczbę Froude’a u podnóża nasypu otaczającego przyczółek:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{2,35}{\sqrt{9,81 \times 0,85}} = 0,81 > 0,80$$

**Krok 4:** Oblicza się medianę wymaganych wielkości kamieni narzutu; ponieważ liczba Froude’a jest większa niż 0,80, dlatego stosuje się równanie (2) oraz przyjmuje dla przyczółka zagłębionego w nasypie współczynnik  $K = 0,61$ .

$$d_{50} = \frac{Ky}{(S_g - 1)} \left[ \frac{V^2}{gy} \right]^{0,14} = \frac{0,61 \times 0,85}{(2,65 - 1)} \left[ \frac{2,35^2}{9,81 \times 0,85} \right]^{0,14} = 0,29 \text{ m}$$

**Krok 5:** Wybiera się z tabeli 3 klasę III narzutu kamiennego o nominalnej wartości mediany kamieni  $d_{50} = 0,30 \text{ m}$ .

**Krok 6:** Projektuje się wymiary i rozmieszczenie warstwy narzutu kamiennego.

Tabela 3. Minimalne i maksymalne wielkości kamieni w narzutu w cm [7]

Klasa narzutu według nominalnej 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: d = szerokość kamienia

Tabela 4. Minimalne i maksymalne dopuszczalne ciężary kamieni narzutu w kg [7]

Nominalna klasa narzutu według mediany 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 zostały określone na podstawie ich wielkości, wzorem  $W = 0,85 \gamma d^3$ ;  $\gamma$  = ciężar właściwy kamienia (2650 kg/m<sup>3</sup>), d – szerokość kamienia.

## Specyfika zabezpieczenia przyczółków mostów przez wąskie ciek

W przypadku wąskich koryt zabezpieczenie przyczółków przed rozmyciem polega na umocnieniu brzegów i dna koryta ciek. Mała szerokość koryta uniemożliwia użycie budowli hydrotechnicznych do regulacji przepływu pod mostem. Mogą być stosowane jedynie do kierowania przepływu z terenów zalewowych do koryta ciek pod mostem. Ponadto, budowla hydrotechniczna w wąskim korycie ułatwia blokowanie przepływu przez szczątki.

Do zabezpieczenia przed podmyciem małych mostów zwykle stosuje się narzut kamienny, ewentualnie bloki betonowe powiązane linami.

Często przy wąskich ciekach nie ma terenów zalewowych. Płyną w głęboko wyerodowanych korytach ze stosunkowo stromymi brzegami. Przeciwdziałanie w takich warunkach podmyciu przyczółka wymaga zabezpieczenia terenu przy jego narożniku od góry i dołu ciek w sposób, który nie utrudnia znacząco przepływu pod mostem. Dno wąskich cieków w rejonie mostów zabezpiecza się matami z prefabrykatów połączonych linami, układanymi w poprzek całej szerokości koryta.

## Podsumowanie

Podstawowym wymaganiem dotyczącym wszystkich rodzajów zabezpieczeń podpór mostowych przed podmyciem jest sumienne utrzymanie. Stan zabezpieczeń powinien być regularnie kontrolowany, zwłaszcza po powodzi, a przy podporach zagrożonych podmyciem także w czasie jej trwania. Uszkodzenia zabezpieczeń należy usuwać: bezzwłocznie, tymczasowo w czasie powodzi, a po jej zakończeniu w sposób trwały. Im dłużej zabezpieczenie nie jest naprawione, tym koszty jego naprawy są większe. Bez dbałości o dobry stan zabezpieczeń ich skuteczność bywa wątpliwa i może doprowadzić do awarii, a nawet katastrofy mostu.

## 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] Jarominiak A.: *Zabezpieczenie przed rozmyciem dna cieków przy filarach mostów*. „Drogownictwo” nr 10/2016
- [4] Melville B.W., Coleman S.E.: *Bridge Scour*. Water Resources Publication. LLC, Highlands Ranch, 2000.
- [5] HEC 18: *Evaluating Scour at Bridges Fifth Edition*, 2012, FHWA.
- [6] HEC 23, Vol. 1: *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures Experience, Selection, and Design Guidance*, 2009. NHI, FHWA.
- [7] HEC 23, Vol. 2: *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures Experience, Selection, and Design Guidance*, 2009. NHI, FHWA.
- [8] NCHRP Report 568: *Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control*, 2006. TRB, FHWA.
- [9] NCHRP Report 587: *Countermeasures to Protect Bridge Abutments from Scour*, 2007. TRB, FHWA.
- [10] NCHRP Report 593: *Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour*, 2007. TRB, FHWA.