

WYTYCZNE MONITORINGU ROZMYCIA DNA W OTOCZENIU PODPÓR MOSTOWYCH

Niniejsze wytyczne powstały w wyniku realizacji
Projektu nr INNOTECH-K2/IN2/63/182967/NCBR/13
„System monitoringu podpór mostowych i ich otoczenia”
współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju
w ramach II Konkursu Innotech, ścieżka In-tech

Zespół Autorski

Juliusz Cieśla
Andrzej Jarominiak
Zenon Markowski
Paweł Mikołajewski
Leszek Rafalski
Janusz Rymsza
Andrzej Zajbert

Kierownik Projektu

Łukasz Topczewski

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Przeznaczenie Wytycznych	5
2. Rodzaje monitoringu rozmyć	5
3. Ogólne zasady monitoringu rozmyć	6
4. Wybór dostępnych w kraju urządzeń monitoringu rozmyć	7
4.1. Rodzaje przyrządów i aparatury do monitorowania rozmyć	7
4.2. Sondy drążkowe (tyczki)	8
4.3. Sondy ciężarkowe	8
4.4. Urządzenia hydroakustyczne	8
5. Przygotowanie monitoringu dna cieku i obserwacje hydrologiczne	9
6. Prognozowanie maksymalnych rozmyć	11
7. Realizacja monitoringu	13
7.1. Wytyczne ogólne	13
7.2. Wytyczne szczegółowe monitoringu poziomów powierzchni wody	13
7.3. Wytyczne szczegółowe monitoringu stanu koryta cieku	14
8. Analiza wyników pomiarów	15
9. Ocena zagrożenia mostu podmyciami podpór	16
Bibliografia	16
Załączniki	16
Załącznik 1: Podstawowe koncepcje i definicje rozmycia	17
Załącznik 2: Zasady monitoringu rozmyć w rejonach mostów	50
Załącznik 3: Mosty z nieznanymi fundamentami	106
Załącznik 4: Zastosowanie hydroakustyki w inspekcji budowli wodnych	116

1. Przeznaczenie Wytycznych

Celem Wytycznych jest określenie zasad monitoringu przy przeprawach mostowych rozmyć koryt cieków, które mogą zagrozić bezpieczeństwu mostów, a w szczególności zasad:

- rozpoznania aktualnych głębokości dna cieku przy przeprawie mostowej,
- określenia miejsc maksymalnych rozmyć przy podporach mostu,
- uzyskiwania danych do oceny wpływu stwierdzonych rozmyć na stateczność podpór,
- prognozowania rozmyć koryta cieku w celu przeciwdziałania zagrożeniom bezpieczeństwa mostu, które mogą spowodować rozmycia.

Wytyczne określają zasady i metody monitorowania zmian koryta cieku, rodzaje sprzętu do monitorowania, wymagane kwalifikacje personelu monitorującego stan koryta i analizującego wyniki monitoringu. Wytyczne mają zastosowanie zarówno do mostów drogowych jak i kolejowych. W odniesieniu do mostów kolejowych, Wytyczne są uszczegółowieniem przepisów ogólnych zawartych w Instrukcji [1].

Wytyczne są przeznaczone dla pracowników administracji publicznej odpowiedzialnych za utrzymanie mostów, a także dla projektantów remontu lub przebudowy podpór mostów użytkowanych.

Podstawowe koncepcje i definicje rozmycia zawiera Załącznik 1, natomiast szczegółowe zasady monitoringu rozmyć koryt cieków są podane w Załączniku 2.

2. Rodzaje monitoringu rozmyć

Generalnie, rozróżnia się dwa rodzaje monitoringu: okresowy i ciągły.

Monitoring okresowy jest wykonywany w ramach wymaganego przepisami przeglądu mostu: rocznego i pięcioletniego oraz przeglądu specjalnego, przeprowadzanego po wystąpieniu okoliczności, które mogły zagrozić bezpieczeństwu mostu (np. po: powodzi, huraganie, zatorze lodowym przed mostem, katastrofie konstrukcji przęsła itp.). Monitoring okresowy powinien dać obraz:

- głębokości cieku wzdłuż przekroju mostowego,
- dna cieku wokół wszystkich filarów,
- dna cieku lub terenu przy obu przyczółkach.

W uzasadnionych przypadkach i nie rzadziej niż co pięć lat, należy przeprowadzić w ramach monitoringu okresowego oględziny podwodnych części podpór i pobrać próbki geomateriału z dna cieku przy podporach.

Monitoring ciągły jest realizowany przez dłuższy okres czasu – co najmniej przez pełen sezon hydrologiczny. Ten rodzaj monitoringu stosuje się przy podporach mostów przez duże rzeki, gdy stabilności podpór może zagrażać podmycie. W sposób ciągły są monitorowane zmiany poziomu dna cieku przy podporze, w miejscu występowania najgłębszego rozmycia. Miejsce to określa się na podstawie analizy danych uzyskanych metodą monitoringu okresowego.

3. Ogólne zasady monitoringu rozmyć

Ze względu na wymagany zakres monitoringu rozmyć jest celowy podział mostów na następujące kategorie:

1. Mosty wymagające najbardziej intensywnego monitoringu rozmyć.

Do tej kategorii należą mosty drogowe wzdłuż autostrad, dróg ekspresowych, dróg głównych ruchu przyspieszonego i dróg głównych, mosty kolejowe na głównych liniach oraz pozostałe mosty drogowe i kolejowe uznane za zagrożone podmyciem, w tym mosty z nieznanymi fundamentami oraz których awaria spowoduje duże utrudnienia transportu mające, nie tylko lokalne, negatywne konsekwencje gospodarcze i społeczne.

2. Mosty wymagające intensywnego monitoringu rozmyć.

Należą do nich mosty drogowe i kolejowe nie zaliczone do Kategorii 1:

- oparte na fundamentach bezpośrednich niezabezpieczonych głębokimi ściankami szczelnymi,
- oparte na krótkich palach,
- usytuowane w zakolach niestabilnych koryt cieków,
- przekraczające cieki górskie, w które powodują gwałtowne rozmycia, a także
- mosty, których zniszczenie spowoduje odcięcie okolicznych mieszkańców od źródeł zaopatrzenia, od pomocy medycznej, straży pożarnej i środków transportu publicznego.

3. Mosty wymagające umiarkowanego monitoringu rozmyć.

Mostami tej kategorii są mosty drogowe i kolejowe, nie zaliczone do Kategorii 1 i Kategorii 2, oparte na fundamentach zagłębionych w grunty spoiste o dużej odporności na erozję lub w grunty, których stwierdzone rozmycia są znacznie mniejsze niż prognozowane oraz mosty mające podpory skutecznie zabezpieczone przed podmyciem.

4. Mosty wymagające jedynie pobieżnego monitoringu rozmyć.

Do tej kategorii zalicza się mosty drogowe wzdłuż dróg lokalnych o małym znaczeniu, dróg zbiorczych i dojazdowych oraz mosty kolejowe na bocznicach.

Obserwacje i oględziny każdego mostu i jego otoczenia w czasie przepływu wody powodziowej należy dokumentować fotografiami. Inwentaryzację stanu koryta cieku należy przeprowadzać sprzętem zapewniającym dokładność pomiarów nie mniejszą niż ± 25 cm.

Najbardziej wiarygodną podstawą oceny zagrożeń podpór mostu rozmyciami są wyniki monitoringu odpowiednimi przyrządami zachowywania się dna cieku przy podporach w czasie przepływu wody powodziowej. Gdy nie można zapewnić takiego monitoringu, to należy na podstawie analizy hydraulicznej, konstrukcyjnej i geotechnicznej określić krytyczne parametry wody powodziowej (wielkość jej przepływu, poziom i prędkość), przy których może wystąpić podmycie podpór, powodujące zagrożenie wymagające zamknięcia mostu dla ruchu. Krytyczny poziom wody należy oznaczyć na przyczółku lub filarze, w sposób widoczny z dojazdu do mostu. Poziom ten powinien określić projektant mostu lub kompetentny rzeczoznawca.

4. Wybór dostępnych w kraju urządzeń monitoringu rozmyć

4.1. Rodzaje przyrządów i aparatury do monitorowania rozmyć

Rozmycia przy mostach monitoruje się przyrządami przenośnymi i/lub stacjonarnymi. Opis niektórych przyrządów pomiarowych i zakresy ich przydatności są omówione w artykule *A. Jaro-miniaka* [2] oraz w Załącznikach 2 i 4 niniejszych Wytycznych.

Przenośnymi przyrządami monitoringu rozmyć są różnego rodzaju sondy, np. tyczki (drażki), taśmy lub linki z obciążnikami, pręty stosowane przez nurków oraz pomiarowe urządzenia hydroakustyczne. Stosowanie przyrządów przenośnych zaleca się, gdy trzeba monitorować rozmycia:

- stosunkowo rzadko przy kilku mostach przez nieduże cieki (przyrządy przenośne łatwo przewozić z jednego mostu na drugi),
- przy kilku podporach jednego mostu oraz
- rozmycia dużego obszaru w rejonie jednego mostu.

Przyrządy przenośne można stosować z mostu lub z jednostki pływającej. Ograniczeniami przydatności tych przyrządów są:

- długotrwały program monitoringu – wtedy pomiary przyrządem przenośnym są uciążliwe i kosztowne,
- uzyskiwany nieciągły obraz dna – otrzymuje się dane punktowe, nie profil koryta cieku,
- przepływ głębokiej, szybkiej wody powodziowej,
- duża wysokość pomostu nad wodą oraz
- nagromadzone przy moście szczątki i/lub lód.

W niekorzystnych warunkach łatwiejsze w stosowaniu niż tyczki są linki z ciężkimi obciążnikami opuszczane z pomocą kołowrotek lub żurawi samochodowych. Do monitorowania poziomów dna cieków przy mostach, w warunkach przepływu wody powodziowej o dużej prędkości i głębokości, nadają się przenośne pomiarowe urządzenia hydroakustyczne.

Urządzeniami stacjonarnymi są różnego rodzaju zautomatyzowane sondy i stacjonarne systemy pomiarów hydroakustycznych. Są stosowane do ciągłego lub regularnego monitoringu rozmyć przy podporach mostów, np. raz dziennie, raz w tygodniu. Urządzenie stacjonarne instaluje się na lub przy podporze mostu, zwykle przy czole filara, albo w podłożu dna cieku blisko podpory, w miejscu przewidywanego największego rozmycia. Urządzenie współdziała z rejestratorem danych, które mogą być odczytywane na miejscu lub przekazywane telemetrycznie do odległego punktu odbioru.

Aby wybrać właściwe stałe oprzyrządowanie monitoringu rozmycia i miejsce jego zainstalowania trzeba prawidłowo ustalić:

1. miejsca i rodzaje rozmyć, które mogą doprowadzić do uszkodzenia mostu,
2. głębokość rozmyć przy podporach, które mogą uszkodzić most,
3. parametry hydrologiczne cieku w rejonie mostu oraz charakterystykę geotechniczną podłoża cieku,
4. sytuacje, w których może nastąpić uszkodzenie systemów monitoringu,

5. możliwe miejsca przymocowania czujników rozmycia i ich okablowania,
6. dostępność tych miejsc,
7. trudności i koszty instalacji oprzyrządowania monitorującego rozmycia oraz
8. ewentualne cele badawcze monitoringu.

4.2. Sondy drążkowe (tyczki)

Sondy drążkowe są sztywnymi prętami drewnianymi, metalowymi lub z tworzywa sztucznego o przekroju prostokątnym lub kołowym, z podziałką centymetrową. Na dolnym końcu sondy jest talerz ze szpikulcem, zapobiegający zagłębianiu się sondy pod ciężarem własnym w dno z luźnego lub miękkiego geomateriału (piasku, mułu) albo okucie – w przypadku dna twardego (kamienistego). Ten rodzaj sond stosuje się, gdy głębokość wody cieku nie przekracza 3 m i jej prędkość jest mniejsza niż 2 m/s. Sonda przymocowana do przegubowego wysięgnika żurawia samochodowego może być stosowana w warunkach nieco większych głębokości i prędkości przepływu wody. Sondy drążkowe umożliwiają punktowy pomiar głębokości rozmycia. Są przydatne do inwentaryzacji stanu dna cieków w ramach okresowych przeglądów mostów oraz ustalania przekroju koryt cieków wzdłuż przepraw mostowych w celu określenia rozmyć zagrażających stateczności podpór mostowych.

4.3. Sondy ciężarkowe

Zawierają ciężarek zawieszony na stalowej lince pomiarowej. Ciężarek jest zazwyczaj wykonany ze stali lub ołowiu, ma kształt kuli, soczewki lub torpedy. Jego masa może wynosić od kilku do kilkudziesięciu kilogramów. Sondę z ciężarkiem o masie do 3 kg opuszcza się ręcznie, a cięższą – przy użyciu specjalnego kołowrotu wyposażonego w licznik głębokości.

Stosując sondę ciężarkową w cieku płynącym z dużą prędkością należy uwzględnić, że napór hydrodynamiczny wody odchyli linkę sondę od pionu. Do takich warunków należy kołowrót wyposażyć w urządzenie mierzące odchylenia liny, które umożliwia korygowanie odczytów licznika głębokości. Sondy ciężarkowe mają podobne zastosowanie jak sondy drążkowe z tym, że mogą być używane również przy większych głębokościach wody, nawet około 5 m i prędkościach wody powyżej 2 m/s.

4.4. Urządzenia hydroakustyczne

Urządzenia hydroakustyczne umożliwiają inwentaryzację dna cieków i obiektów znajdujących się w wodzie, np. podwodnych części podpór mostowych, budowli hydrotechnicznych, umocnień dna, nabrzeży portowych itp. Urządzenia hydroakustyczne można stosować jako przenośne i jako stacjonarne. Zależnie od użytego w urządzeniu sposobu pomiarów są one dzielone na:

- echosondy jednowiązkowe,
- echosondy wielowiązkowe,
- echosondy parametryczne,
- sonary wielowiązkowe (kamery akustyczne),
- sonary boczne (holowane),
- sonary skanujące.

Generalnie, współczesne urządzenia hydroakustyczne przeznaczone do zastosowań cywilnych składają się z przetwornika ultradźwiękowego (przetwarzającego sygnały elektryczne na akustyczne), zespołu nadawczo-odbiorczego, sterującego nim procesora oraz monitora.

Działanie urządzeń i systemów hydroakustycznych wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fal dźwiękowych w wodzie. Fala jest generowana przez przetwornik ultradźwiękowy, przebiega w wodzie do dna (lub obiektu znajdującego się w wodzie), odbija się od niego i powraca do zespołu nadawczo-odbiorczego, który mierzy długość okresu czasu pomiędzy wysłaniem i powrotem fali. Na tej podstawie określa głębokość wody (odległość zespołu nadawczo-odbiorczego od poziomu odbicia fali). Urządzeniem hydroakustycznym można nie tylko określić stan rozmycia dna, ale również uzyskać obraz podwodnej części podpory z ewentualnymi jej uszkodzeniami.

Szczegółowe informacje o urządzeniach hydroakustycznych zawiera Załącznik 4.

5. Przygotowanie monitoringu dna cieku i obserwacje hydrologiczne

W ramach przygotowania monitoringu stanu dna cieku przy moście należy:

- ustalić rodzaje i rzędne stóp fundamentów podpór mostu, rzędne granicznego rozmycia przy podporach oraz charakterystykę geotechniczną podłoża cieku w rejonie mostu,
- zinwentaryzować przekrój cieku przy moście,
- zinwentaryzować dno cieku wokół filarów,
- rozpocząć codzienne notowanie przepływów i stanów wody w cieku w rejonie mostu.

Notowanie codziennych poziomów cieku w przekroju mostowym jest ułatwione, gdy w pobliżu mostu (tzn. w odległości nie przekraczającej kilku kilometrów) znajduje się wodowskaz objęty pomiarami Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Natomiast, gdy najbliższy wodowskaz jest w większej odległości tj. do kilkunastu kilometrów od mostu, to można notowania poziomów wody przy moście nawiązywać do tego wodowskazu, stosując odpowiednią korektę odczytów, transponującą jego dane do przekroju mostowego.

Wodowskazowe poziomy wody są podawane w portalu www.pogodynka.pl. Z podawanych tam codziennych, godzinowych notowań poziomów cieków należy wybrać notowania w określonych godzinach, np. o 7⁰⁰, 15⁰⁰ i 23⁰⁰.

W przypadku, gdy wodowskaz znajduje się powyżej mostu to:

$$Q_{most}^n = Q_{wod}^{n-t}, \quad (1)$$

gdzie:

Q_{most}^n – wielkość przepływu pod mostem o godzinie n [m^3/s],

Q_{wod}^{n-t} – wielkość przepływu na wodowskazu o godzinie $n - t$ [m^3/s],

t – czas przepływu pomiędzy wodomierzem i mostem przy określonej prędkości wody [godziny].

Natomiast w przypadku, gdy wodowskaz znajduje się poniżej mostu to:

$$Q_{most}^n = Q_{wod}^{n+t}. \quad (2)$$

Powyższe formuły określenia przepływu są miarodajne, gdy pomiędzy wodowskazem znajdującym się powyżej mostu a mostem nie występują znaczące dopływy. Można przyjąć, że przepływy określone formułami (1) i (2) wraz z pomierzonymi stanami wody i przekrojem poprzecznym, stanowią wystarczająco dokładną podstawę obliczeń zmiennych prędkości wody w korycie cieków w czasie prowadzenia obserwacji.

Rozpoznanie rodzajów fundamentów podpór mostu i rzędnych ich stóp jest niezbędne do określenia najważniejszego parametru monitoringu – granicznego rozmycia koryta cieków przy podporach. Rozpoznanie geotechniczne dna cieków w przekroju mostowym jest konieczne do oceny odporności dna na rozmycie, zaliczenia mostu do odpowiedniej kategorii (patrz rozdz. 3) oraz opracowania prognozy rozmyć (patrz rozdz. 6). Grunty niespoiste ulegają szybkiemu rozmyciu w miarę wzrostu prędkości wody powodowanego wezbraniem cieków, a następnie są osadzone przy zmniejszeniu się prędkości wody w czasie jej opadania. Źródłowe informacje geotechniczne zawiera dokumentacja przeprawy mostowej. W przypadku niedostępności tej dokumentacji należy wykonać badania geotechniczne w zakresie koniecznym do oceny potencjalnego zagrożenia podpór mostu utratą stateczności wskutek podmycia.

Dopuszczalne pogłębienie dna cieków, wyrażone stopniem rozmycia przekroju mostowego, podaje Załącznik nr 1 do Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. [3]. Zależnie od rodzaju fundamentu podpory stopień ten wynosi od 1,0 (dla fundamentu bezpośredniego opartego na gruncie) do 1,4 (dla fundamentu głębokiego z pali wielkośrednicowych i fundamentu bezpośrednio opartego na skale) – patrz Tabl. 2.1 ww. Załącznika 1.

Poza dopuszczalnymi pogłębieniami koryt cieków przy mostach, Rozporządzenie MTiGM z 30 maja 2000 r. [3] określa dopuszczalne głębokości rozmyć lokalnych (wybojów), zależnie od kształtu filara, prędkości przepływu cieków przed mostem, rodzaju gruntu dna cieków i kierunku napływu wody na filar (patrz rozdz. 2.3.2 ww. Załącznika 1). Należy mieć na względzie, że rozmycie dna jest tylko jednym z czynników wpływających na bezpieczeństwo podpory mostu. Inne specyficzne warunki mogą wymagać większego ograniczenia dopuszczalnej głębokości rozmycia przy podporze.

Przed zainstalowaniem stacjonarnego systemu monitoringu rozmyć należy, z odpowiednim wyprzedzeniem, sprawdzić wybrane miejsce instalowania prostym urządzeniem sondującym (np. sondą ciężarkową lub sonarem przenośnym) czy rzeczywiście w wybranym miejscu występuje najgłębsze rozmycie dna i czy nie ma tam przeszkód (np. szczątków naniesionych przez ciek), które uniemożliwią uzyskiwanie poprawnych danych monitoringu. Rzędność zainstalowania systemu należy ustalić na podstawie analiz hydrologicznych, występujących w rejonie mostu minimalnych i maksymalnych stanów wody w ciekach. Od rzędnej przetwornika sonaru zależy zakres możliwych pomiarów monitoringu. Dlatego należy ściśle określić przy jakich stanach wody system powinien monitorować dno. Liczbę stacjonarnych systemów monitoringu zainstalowanych przy podporach mostu określa się na podstawie analizy rozmyć ustalonych przenośnym urządzeniem monitoringu.

6. Prognozowanie maksymalnych rozmyć

Przy prognozowaniu rozmyć dna cieków przy moście należy w szczególności uwzględnić dwie główne ich przyczyny:

- zwężenie przekroju poprzecznego koryta i doliny cieków wskutek wybudowania przeprawy mostowej,
- zmiany morfologiczne w korycie i zlewni rzeki powyżej mostu.

Zasady obliczeń prognozowanego rozmycia dna cieków wskutek zwężenia przekroju poprzecznego jego koryta określa Załącznik nr 1 „Obliczanie światła mostów i przepustów” do Rozporządzenia MTiGM z dnia 30.05.2000 r. [3]. Natomiast prognoza rozmycia w przekroju mostowym wskutek zmian morfologicznych w korycie i w zlewni cieków powyżej mostu powinna również uwzględniać:

- historyczne oraz współczesne obserwacje i studia charakterystyki cieków, stabilności koryta, ruchu w nim rumowiska, zmian przebiegu nurtu itp.,
- wpływ regulacji rzeki i budowli hydrotechnicznych, w szczególności zapór i zbiorników retencyjnych zatrzymujących część niesionego przez ciek rumowiska, a także pobierania kruszywa z koryta cieków.

Zmiany na obszarze zlewni powyżej przeprawy mostowej mogą w jej rejonie powodować zwiększenie lub zmniejszenie rozmyć koryta cieków, albo zwiększenie osadzania gruntów przynoszonych z górnego biegu cieków. Intensywność tych zjawisk zależy od warunków geotechnicznych zlewni.

Znacząco mogą zwiększyć rozmycia przy moście: roboty hydrotechniczne (pogłębienie cieków w pobliżu przeprawy mostowej lub regulacja cieków budowlami hydrotechnicznymi zmieniającymi położenie i pogłębienie jego koryta), zmniejszenie budowłami naziemnymi powierzchniowego odpływu wód opadowych oraz pogorszenie stanu roślinności pokrywającej teren zlewni. Zmiany warunków hydrologicznych powoduje zbudowanie na obszarze zlewni obiektów inżynierskich, które utrudniają przepływ wielkiej wody, np. wałów przeciwpowodziowych, nasypów drogowych i kolejowych oraz przepraw mostowych. Poznanie hydrologii i geomorfologii zlewni cieków oraz zagospodarowania jej terenu ułatwia prognozowanie zakresu i rodzaju rozmyć przy przeprawie mostowej.

Rozmycia lokalne przy filarach

Są szczególnie groźne. Zależą od czynników przyrodniczych i budowlanych: od warunków hydrologicznych przepływu cieków i warunków geotechnicznych jego koryta w miejscu przeprawy mostowej, od szerokości, kształtu i położenia filara względem nurtu cieków, a także od wysokości górnej konstrukcji mostu nad ciekiem. W przypadku, gdy konstrukcja górna jest położona zbyt nisko, wtedy stanowi przeszkodę w swobodnym przepływie wody powodziowej i powoduje zwiększenie rozmyć pod mostem.

Układ nurtów i intensywność rozmyć lokalnych przy filarach zależą od geometrii oraz wymiarów korpusu i fundamentu filara oraz od położenia jego osi podłużnej względem głównego kierunku przepływu cieków. Na układ nurtów wpływa szerokość i długość filara, a w przypadku filara walcowego – jego średnica oraz gdy kilka filarów jest zlokalizowanych w jednej osi, także ich rozstaw. Kształt filara komplikujący układ nurtów zwiększa lokalne rozmycia.

Znaczące różnice morfologii podmycia filarów występują przy różnym stosunku głębokości cieku y do szerokości filara a . W przypadku filarów:

- wąskich ($y/a > 1,4$) – najgłębsze rozmycia dna są typowo przed czołem filara,
- o szerokości pośredniej ($0,2 < y/a < 1,4$),
- szerokich ($y/a < 0,2$) – najgłębsze rozmycia występują przed czołem i przy bokach filara.

Rozmycia lokalne przy przyczółkach

Występują, gdy przyczółki i nasypy dojazdów do mostu utrudniają przepływ wody powodziowej. Uszkodzenia przyczółków bywają powodowane przez:

- wodę powodziową płynącą na szerokim terenie zalewowym, którą nasypy dojazdów kierują pod most,
- boczne przemieszczenie lub proces poszerzania koryta cieku,
- rozmycie wskutek zwężenia przepływu cieku przez przeprawę mostową,
- przelewanie się wody powodziowej nad przyczółkiem i nasypem dojazdu lub
- kombinację wymieszanych czynników.

Rozmycia przy podporach mostów zabezpieczonych narzutem kamiennym

Mogą wystąpić wskutek zniszczenia narzutu przez płynącą wodę. Proces niszczenia bywa powodowany przez:

- ścinanie – ten rodzaj niszczenia występuje, gdy kamienie narzutu są zbyt lekkie, aby przeciwstawić się siłom hydrodynamicznym płynącej wody; ciężar kamieni musi być odpowiedni do energii przepływającej wody,
- porywanie przez wodę gruntu drobnoziarnistego z podłoża narzutu, które jest rezultatem zasysania pomiędzy kamieniami drobnego materiału z dna przez wodę przepływającą nad narzutem; powoduje to destabilizację kamieni – opadanie ich z obniżającym się dnem cieku i rozpraszanie przez wodę; narzut powinien być ułożony na warstwie geotkaniny filtracyjnej,
- podmywanie obrzeży narzutu – powoduje stopniowe staczanie się kamieni w wyboje rozmywane przy obrzeżach narzutu; ten mechanizm niszczenia występuje, gdy boczny zasięg warstwy ochronnej narzutu jest zbyt mały,
- rozmycie ogólne – narzut osiada z dnem cieku, co powoduje stopniowe rozpraszanie kamieni; ten rodzaj niszczenia dominuje w korytach cieków z dnem piaszczystym, w których występuje migracja mielizn.

7. Realizacja monitoringu

7.1. Wytyczne ogólne

1. Po przyjeździe do mostu Zespół Monitoringu powinien znaleźć na jego podporach lub w pobliżu przeprawy mostowej oznaczenie poziomu, którego osiągnięcie przez wodę stanowi sygnał obowiązku rozpoczęcia monitoringu poziomów zwierciadła wody i rozmyć przy moście oraz oznaczenie poziomu, którego osiągnięcie przez wodę w cieku wymaga zamknięcia mostu dla ruchu. Poziomy te powinny być zaznaczone na skrzydle przyczółka, albo w innym miejscu widocznym z mostu lub z pobocza drogi.
2. Zespół Monitoringu, oprócz pomiarów głębokości cieku, powinien nieustannie, zwłaszcza w czasie powodzi, zwracać uwagę na wszystkie objawy zagrożenia mostu awarią lub katastrofą.
3. Stan koryta cieku powinien być kontrolowany wizualnie:
 - w regularnych odstępach czasu (co najmniej raz na trzy miesiące),
 - przed przystąpieniem do każdego monitoringu rozmyć koryta cieku w rejonie mostu,
 - w czasie przepływu wody powodziowej oraz
 - po zakończeniu powodzi.

Wyniki każdej kontroli wizualnej należy zapisać w postaci protokołu.

4. Planując monitoring rozmyć koryta cieku przy moście należy przede wszystkim ocenić możliwość użycia do tego prostych urządzeń przenośnych, np. sondy drążkowej lub ciężarkowej. W wielu przypadkach sondowanie takim urządzeniem jest najbardziej efektywnym sposobem pomiaru głębokości wody, zwłaszcza w mniejszych ciekach.
5. Gdy warunki monitorowania rozmyć (szybki przepływ wody powodziowej, duża jej głębokość i/lub duża wysokość mostu nad zwierciadłem wody) uniemożliwiają stosowanie prostego, przenośnego sprzętu sondującego, wtedy należy użyć inny przyrząd do monitoringu, np. echo-sondę lub sonar.
6. Sondowanie prostymi urządzeniami można również stosować do wstępnego rozpoznania stanu dna cieku, poprzedzającego jego monitoring bardziej złożonymi urządzeniami, np. hydroakustycznymi.

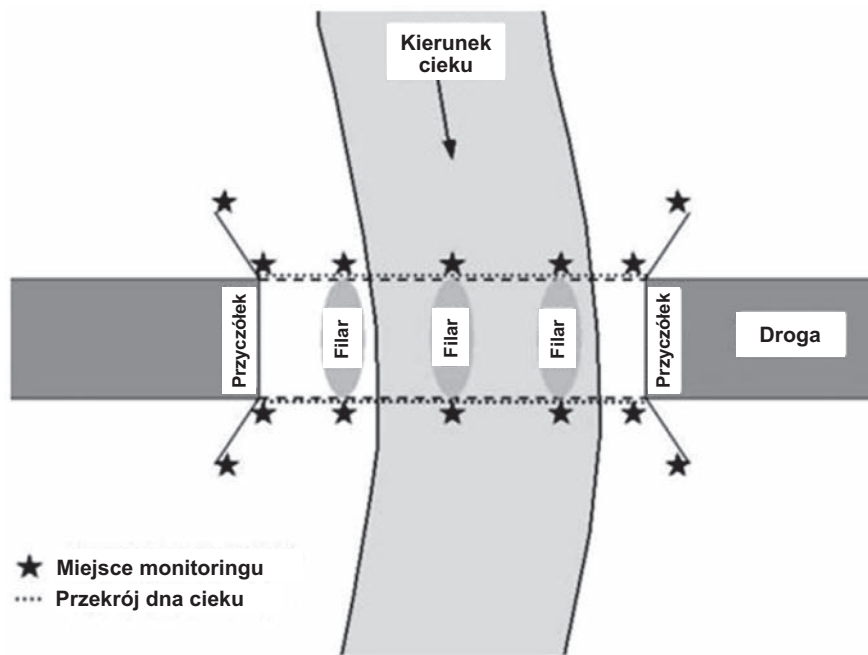
7.2. Wytyczne szczegółowe monitoringu poziomów powierzchni wody

1. Należy porównać wizualnie aktualny poziom powierzchni wody z oznaczeniami poziomów wymienionymi w ppkt. 7.1.1; pozwala to bezpośrednio porównać te poziomy. Poziom wody odczytuje się na łacie wodowskazowej, która może być zainstalowana na przyczółku, filarze lub na innym elemencie widocznym z mostu lub z pobocza drogi/podtorza, albo określa się względem znanego poziomu odniesienia (np. pochwyty poręczy na moście). Poziom wody można również określać urządzeniem monitorującym rozmycia dna.
2. Gdy przy moście nie ma oznaczeń poziomów alarmowych, to należy porównać aktualny poziom wody z rzędnymi alarmowymi podanymi w dokumentacji utrzymania mostu.

3. Jeżeli poziom wody osiągnął rzędną rozpoczynania monitoringu rozmyć, to należy bezzwłocznie do niego przystąpić, ciągle przy tym obserwując most i jego najbliższe otoczenie, czy nie ma oznak zagrożenia oraz regularnie monitorować aktualny poziom powierzchni wody – wizualnie lub pomiarami i dane zapisywać.
4. W czasie przepływu wody powodziowej należy zmierzyć rzędne jej zwierciadła wzdłuż mostu od strony dopływu i odpływu cieków oraz je zanotować. Różnice tych rzędnych charakteryzują warunki przepływu pod mostem. Znaczna różnica poziomów wody z obu stron mostu może oznaczać, że naniesione szczątki blokują pod nim przepływ cieków. Blokada zwiększa intensywności rozmyć dna i boczne obciążenie filarów parciem wody, co zwiększa zagrożenie mostu. W takiej sytuacji należy częściej mierzyć głębokości dna wzdłuż filarów i wyniki pomiarów porównywać z głębokościami krytycznymi. Gdy rozmycie dna osiągnęło poziom krytyczny lub zbliża się do niego, wtedy należy bezzwłocznie zawiadomić administratora mostu o konieczności jego zamknięcia. Każde niezwykle warunki zauważone w czasie przepływu wody powodziowej w korycie cieków i w pobliżu przeprawy mostowej należy opisać i naszkicować.
5. Gdy są widoczne oznaki zagrożenia stabilności mostu lub poziom wody przekroczył ustaloną rzędną powodziowego przepływu miarodajnego Q_m , określonego w Rozporządzeniu MTiGM z dnia 30 maja 2000 r. [3], most należy bezzwłocznie zamknąć dla ruchu.

7.3. Wytyczne szczegółowe monitoringu stanu koryta cieków

1. Przed rozpoczęciem pomiarów głębokości dna cieków należy upewnić się wizualnie, czy nie ma objawów zagrożenia bezpieczeństwa użytkowników mostu i Zespołu Monitorującego, które wymaga zamknięcia mostu dla ruchu.
2. Głębokości dna należy mierzyć przy podporach mostu, w miejscach potencjalnych dużych rozmyć. Jeżeli miejsca te nie zostały ustalone, to rozmycia należy mierzyć przede wszystkim w miejscach pokazanych na rys. 1. Zwykle największe rozmycia powstają od strony góry cieków:
 - przy czołach filarów,
 - przy narożnikach przyczółków kończących nasypy dojazdów,
 - u podnóża nasypów otaczających zagłębione w nich przyczółki.
3. Częstotliwość pomiarów rozmyć przy podporach mostu zagrożonych podmyciem należy dostosować do szybkości zmian zachodzących w korycie cieków; zmierzone koryta należy porównywać z rzędnymi krytycznego rozmycia w tych samych miejscach.
4. Gdy woda płynąca z dużą prędkością naciera na podporę pod dużym kątem do jej osi podłużnej lub przy podporze zebrało się dużo szczątków, to należy zwiększyć przy tej podporze częstotliwość monitorowania rozmyć.
5. Gdy rozmycie gwałtownie obniża dno cieków przy podporze i zbliża je do poziomu krytycznego, to należy zaproponować administratorowi mostu rozważenie awaryjnego zabezpieczenia tej podpory przed dalszym podmywaniem. Jednak w warunkach powodzi jest zwykle bardzo trudne. Podstawą propozycji wykonania zabezpieczenia awaryjnego powinien być bezpośredni pomiar rozmyć dna przy podporze.
6. Gdy rozmycie dna osiągnęło poziom krytyczny lub może to wkrótce nastąpić, to należy bezzwłocznie zawiadomić administratora mostu o konieczności jego zamknięcia.



Rys. 1. Typowe miejsca monitoringu rozmyć przy moście [4]

8. Analiza wyników pomiarów

Do rzetelnej oceny wpływu rozmyć koryta cieku na stateczność podpór mostu są konieczne odpowiednie dane hydrauliczne, w tym charakteryzujące transport gruntów przez wodę powodziową. Aby uzyskać te dane należy przeprowadzić: trójwymiarowe pomiary parametrów przepływu i batymetrii koryta cieku, badania obciążenia gruntów podłoża cieku i ich składu granulometrycznego, pomiary rzędnych i pochylenia zwierciadła wody oraz jej temperatury. Dane te powinny być określane przy moście, od strony góry i dołu cieku, w czasie przyboru wody, w szczycie powodzi i w czasie jej opadania.

Opracowane ostatnio technologie pomiarów i udoskonalone technologie badań hydroakustycznych umożliwiają uzyskiwanie odpowiednio dokładnych danych batymetrycznych i hydraulicznych oraz – na podstawie analizy obrazów uzyskiwanych urządzeniami hydroakustycznymi – pełniejszą ocenę stanu technicznego podpór i warunków ich posadowienia. W praktyce najbardziej wiarygodną metodą oceny rozmyć koryta cieku i bezpieczeństwa podpór mostowych jest systematyczny monitoring zmian stanu koryta. W wielu przypadkach najbardziej efektywnym sposobem monitoringu, zwłaszcza w korytach mniejszych cieków, przy mostach usytuowanych nisko nad wodą, jest pomiar głębokości wody sondą drążkową lub ciężarkową. W innych warunkach sondowanie prostymi urządzeniami jest zazwyczaj stosowane do wstępnego rozpoznania stanu koryta cieku, poprzedzającego instalowanie urządzeń hydroakustycznych oraz do weryfikacji wyników pomiarów tymi urządzeniami.

9. Ocena zagrożenia mostu podmyciami podpór

Właściwa ocena zagrożeń mostu wskutek podmycia podpór umożliwia zapobieżenie jego awarii lub katastrofie. Podstawą oceny zagrożeń są warunki zwane stanami alarmowymi. Stany te powinien określić projektant mostu, z udziałem hydrologa. Jako stany alarmowe bywa przyjmowane:

1. przekroczenie przez zwierciadło wody poziomu krytycznego – poziom ten powinien być oznaczony na podporze mostu lub w jego pobliżu, w sposób widoczny z mostu lub z dojazdu do niego,
2. przekroczenie przepływu alarmowego w cieku powyżej mostu – przepływy są ogłaszane w komunikatach i na stronach internetowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej,
3. stwierdzenie monitoringiem wystąpienia krytycznego podmycia podpory mostu,
4. istotne uszkodzenie podpory,
5. urzędowy komunikat o gwałtownej powodzi lub katastrofalnych opadach w dorzeczu cieku, powyżej mostu.

W przypadku stwierdzenia, że wystąpił stan alarmowy należy zamknąć ruch na moście.

Bibliografia

- [1] Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynierskich na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h Id-16. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2014
- [2] Jarominiak A.: Rozmycia przy mostach i ich monitorowanie. Drogownictwo, nr 12/2013, 355-361 i nr 1/2014, 3-11
- [3] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie
- [4] Field Manual - Scour Critical Bridges: High-Flow Monitoring and Emergency Procedures. Idaho Transportation Department, FHWA, 2004

Załączniki

Stosowanie załączników nie jest obligatoryjne; mogą być okresowo aktualizowane.

Załącznik 1: Podstawowe koncepcje i definicje rozmycia

Załącznik 2: Zasady monitoringu rozmyć w rejonach mostów

Załącznik 3: Mosty z nieznanymi fundamentami

Załącznik 4: Zastosowanie hydroakustyki w inspekcji budowli wodnych

Prof. inż. Andrzej Jarominiak

Załącznik 1

Podstawowe koncepcje i definicje rozmycia

1. Wstęp

Rozmycia koryt cieków (rzek, strumieni) przy mostach są najczęstszą przyczyną ich uszkodzeń i katastrof [5]. Koszty remontu przepraw uszkodzonych przez rozmycia są znaczne, ale ocenia się, że powodowane nimi koszty społeczne są pięciokrotnie wyższe niż koszty napraw i wymiany mostów.

Podpory mostu są podmywane wskutek erozyjnego działania płynącej wody, które polega na odpajaniu i zabieraniu gruntów z dna i brzegów cieków. Warunkiem właściwego monitorowania rozmyć jest rozumienie ich natury, wiedza o zjawiskach występujących w czasie przepływu wody powodziowej w rejonie przeprawy mostowej oraz świadomość na co należy zwracać uwagę będąc w rejonie przeprawy. Jest to konieczne do poprawnego prognozowania miejsc występowania największych rozmyć dna i brzegów koryta cieków w rejonie przeprawy oraz miejsc osadzania gruntów i szczątków przenoszonych przez ciek.

Rozmycia mogą być następstwem:

- zwężenia cieków (naturalnego, np. przez zator lodowy lub przez człowieka, w tym zbudowania przeprawy mostowej),
- bocznego przemieszczania się lub obniżenia koryta cieków,
- robót hydrotechnicznych skracających długość meandrującego odcinka cieków,
- zmian występujących na terenie zlewni cieków oraz
- innych zmian jego hydrologii.

Zbudowanie przeprawy mostowej zakłóca w jej rejonie naturalne warunki przepływu wody powodziowej i może zmienić warunki przepływu wody normalnej. Przeprawa zmniejsza przekrój przepływu, co powoduje wzrost prędkości cieków i intensywności erozji jego koryta. Ciek dąży do ustabilizowania swego koryta – przywrócenia naturalnego przekroju przepływu. Podpory mostu zmieniają także przepływ laminarny wody, w turbulentny (burzliwy). Wiry wywołane przez podpory mostu wymywają przy nich wyboje o głębokości mogącej znacznie przekroczyć głębokość ogólnego rozmycia koryta. Nasypy dojazdów uniemożliwiają przepływ wody powodziowej na terenach (terasach) zalewowych i kierują z nich wodę w przęsła mostu. Wywołuje to przy przeprawie zmianę układu nurtów w ciekach oraz rozmycia jego dna i brzegów.

Koryta cieków mogą zmieniać położenie i kształt w rezultacie przepływu wód powodziowych oraz ciągłego rozmywania lub/i odkładania osadów. Koryta migrują i oscylują pomiędzy obniżeniem (degradacją) i podniesieniem (agradacją) na relatywnie długich odcinkach, dopóki nie osiągną krótkotrwałej równowagi. Wzrost rozmyć może także zostać spowodowany przez zmianę użytkowania terenu w rejonie mostu, np. zbudowanie wałów przeciwpowodziowych lub nawet niewysokich nasypów drogowych, które zmieniają kierunek przepływu wody powodziowej. Droga technologiczna na terenie zalewowym wykonana dla budowy mostu autostradowego przez Wisłę koło Grudziądza spowodowała katastrofalne podmycie filara znajdującego się z dala od koryta rzeki (rys. 1).

Dążenie cieków do ustabilizowania swych koryt jest naturalnym procesem przyrody. Dlatego ciek zmienia trasę swego koryta od prostego do meandrującego i następnie do splecionego (anastomozującego) oraz reaguje na zmiany koryta powodowane przez czynniki naturalne lub przez człowieka. Zachowywanie się cieków zależy od jego wielkości i kształtu trasy, od geologii podłoża koryta cieków oraz od ilości w nim osadów. Te czynniki wpływają na podatność koryta cieków na rozmycia dna i/lub brzegów.

Koryta cieków przemieszczają się w kierunku bocznym i pionowym – są pogłębiane przez rozmycia lub podwyższane nanoszonymi osadami. Przeprowadzenie mostowa ogranicza w swoim rejonie boczne przemieszczenia cieków. Powoduje to zwiększenie energii wody działającej na dno i brzegi koryta, a w czasie powodzi erozję nasypów dojazdów do mostu. Rozmycie przy moście może następować stopniowo w ciągu kilku powodzi lub być rezultatem jednej, dużej powodzi.

Rozmycie jest procesem dynamicznym, w zasadzie ustawicznym. Występuje, gdy ilość gruntu zabieranego przez ciek jest większa niż ilość gruntu, który osadza. Gdy ilość jest mniejsza, to następuje podwyższanie koryta. Koryto jest stabilne, gdy ilość gruntu zabieranego jest równa ilości przynieszonego. Rozmyciu towarzyszą dwa zjawiska:

- przemieszczanie przez wodę tuż nad dnem gruntów gruboziarnistych, warstwą o miąższości zwykle rzędu dwóch średnic ziaren gruntu,
- unoszenie drobnych cząstek gruntów, zawieszonych w przepływającej wodzie.

Rozmycia są szczególnie intensywne w czasie powodzi, gdyż wtedy głębokości i prędkości przepływu wody są największe, przez co woda ma dużą energię, silnie eroduje koryto cieków i zabiera grunty jego podłoża. Rozkład prędkości przepływu wody powodziowej w jej przekroju poprzecznym jest pokazany na rys. 2. Z największą prędkością woda płynie w strefie przypowierzchniowej, z najmniejszą – wskutek tarcia o dno i brzegi koryta – nad nimi. Rozmycia są największe w czasie bliskim szczytowi powodzi, a gdy woda powodziowa opada wtedy wypełnia wymyte wyboje osadami; dlatego po powodzi rozmycia mogą być niewidoczne.

Rozmycia koryta cieków w rejonie przeprawy mostowej mogą również występować poza okresami powodzi. Wtedy są zwykle nieduże, jednak ich kumulacja w okresie użytkowego życia mostu może doprowadzić do zagrożenia jego bezpieczeństwem. Natomiast znaczny wzrost rozmyć w okresach wody normalnej bywa spowodowany wykopywaniem gruntów z dna i brzegów cieków dla potrzeb budowlanych.

Płynąca woda wywiera na cząstki/ziarna gruntu koryta cieków siłę unoszącą i przenoszącą. Krytyczne naprężenie ścinające grunt zależy od jego cech – w przypadku piasku jest bardzo małe. Gdy wypadkowa sił wywieranych przez wodę na podłoże koryta osiąga krytyczną wartość naprężenia ścinającego, wtedy zaczyna przemieszczać cząstki/ziarna gruntu i rozpoczyna się proces rozmywania koryta cieków. Natomiast, gdy prędkość przepływu wody zmniejsza się, to osadza przemieszczany grunt – występuje proces sedymentacji. Zmienia się geometria koryta cieków i napotyka opory przepływu.

Każde podłoże koryta cieków jest rozmywane, nawet skalne z tym, że z różną prędkością. Przy takich samych cechach przepływu i w podobnych warunkach miejscowych maksymalne rozmycia gruntów niespoistych i spoistych osiągają, po upływie różnego czasu, zbliżoną głębokość. Stąd ostateczna głębokość rozmycia koryt w gruntach piaszczystych oraz w odpornych na rozmycie gruntach spoistych i scementowanych pyłach bywa taka sama. W gruntach ziarnistych: piaskach, żwirach i pospółkach woda powodziowa doprowadza do maksymalnego rozmycia w ciągu godzin lub dni, natomiast w łąkach, scementowanych pyłach i w glinach zwałowych (lodowcowych) – po

kilku lub kilkunastu powodziach, w piaskowcach, łupkach i wapieniach po kilkudziesięciu powodziach, natomiast w skałach wylewnych osiągnięcie maksymalnego rozmycia trwa dłużej niż użytkowe życie mostu. Przy moście przez ciek nizinny, gdy nie występują anomalie przepływu wody powodziowej, ostateczna głębokość rozmycia jest zwykle stwierdzana po kilku powodziach.

W czasie powodzi ciek przenosi nie tylko grunt, ale także rozmaite szczątki: od krzaków i snopów zboża, po drzewa, a nawet fragmenty budynków. Część szczątków zatrzymuje się na podporach mostu, zmniejszając przekrój przepływu (rys. 3). Te wyjątkowe utrudnienia przepływu muszą być uwzględnione w planowaniu monitoringu rozmyć. Opadaniu wielkiej wody towarzyszy zmniejszenie prędkości przepływu i osadzanie niesionego przez ciek gruntu. Zapełnia nim wyboje wymyte w czasie powodzi, kamuflując skutki erozji. Dlatego niewłaściwie przeprowadzona inwentaryzacja koryta cieku po opadnięciu wody może dać błędny obraz stanu koryta i w rezultacie błędną ocenę bezpieczeństwa mostu. Następne powodzie łatwo wymywają osad z wybojów i powiększają ich głębokość. Może to doprowadzić do awarii lub katastrofy mostu.

Warunki hydrauliczne cieku i geotechniczne jego koryta mogą znacznie zmieniać się na krótkim odcinku cieku. Należy mieć to na uwadze analizując rozmycia występujące w rejonie przeprawy mostowej.

Podstawą współczesnych metod prognozowania rozmyć są głównie laboratoryjne badania idealizowanych modeli fizycznych w małej skali, które uwzględniają ograniczoną liczbę znanych parametrów wpływających na proces rozmycia. W warunkach polowych tylko niewiele tych metod zweryfikowano. Dlatego większość stosowanych w praktyce metod prognozowania rozmyć jest nastawiona na dawanie wyników ostrożnych.

Badania rozmyć przy mostach trwają około 150 lat, jednak prognozowanie rozmyć stale pozostaje problematyczne. Poważnymi przeszkodami opracowania dokładnych metod są: konieczność projektowania mostów ze względu na skrajne zjawiska powodziowe, brak podstawowej wiedzy o zmianach systemów cieków i występujących w nich procesach ewolucyjnych, bardzo zróżnicowane warunki powstawania systemów cieków oraz skomplikowane zakłócenia przepływów przy mostach.

Równania umożliwiające obliczenie krytycznej prędkości przepływu cieku, która rozpoczyna rozmywanie dna oraz prognozowanych maksymalnych głębokości rozmyć przy przeprawach mostowych można znaleźć w publikacjach [12], [13] i [14], dostępnych w Internecie. Podstawą podanych w nich wzorów są laboratoryjne badania modelowe, zweryfikowane jedynie ograniczonymi badaniami polowymi. Choć dają niepewne wyniki, to są powszechnie stosowane.

2. Rodzaje i miejsca rozmycia przy przeprawach mostowych

Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje rozmycia (rys. 4):

- 1) „czystej wody” – gdy ciek nie przynosi w rejon przeprawy mostowej gruntów wymytych w swoim górnym biegu; wybój rozmycia powstały w takich warunkach można zinventaryzować w czasie inwentaryzacji koryta cieku przeprowadzanej po powodzi.
- 2) „żywego koryta” – gdy ciek przynosi w rejon przeprawy grunty wymyte w górnym biegu; wybój wymyty w warunkach 'żywego koryta' osiąga największą głębokość w czasie najwyższego poziomu wody powodziowej, a w czasie jej opadania zostaje częściowo lub całkowicie wypełniony osadami; dlatego może być nierozpoznany w czasie inwentaryzacji koryta cieku po powodzi.

Równania umożliwiające oszacowanie wartości obu rodzajów rozmyć oraz krytycznych wartości parametrów przepływu są podane w dostępnym w Internecie opracowaniu Federalnej Administracji Drogowej USA: Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition. Hydraulic Engineering Circ. No. 18. FHWA-HIF-12-003, 2012.

Rozmycie „czystej wody” występuje, gdy prędkość przepływu cieku V jest mniejsza niż krytyczna prędkość rozmycia gruntów jego koryta V_c , tzn $V/V_c < 1$. W takich warunkach rozmycie osiąga maksymalną głębokość, gdy przepływająca woda przestaje zabierać grunt z rozmywanego obszaru.

Prędkość krytyczna [13]: $V_c = 6,19 y_{ms}^{1/6} D_{50}^{1/3}$

gdzie: $y_{ms} = \left[\frac{0,025 Q^2}{D_m^{2/3} W^2} \right]^{3/7}$

$D_m = 1,25 D_{50}$

D_{50} = średnica ziaren gruntu w dnie cieku, których wraz z mniejszymi jest w gruncie 50% (masy);
grunty o większych ziarnach bywają charakteryzowane wartością D_{90} .

Q = objętość wody przepływającej ciekiem [m^3/s],

W = szerokość dna cieku zmniejszona o szerokości filarów [m].

Powyższe wzory opracowano na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach rozmycia 'czystej wody', w korytach z gruntów piaszczystych (niespoistych).

Rozmycie „żywego koryta” występuje, gdy prędkość przepływu cieku jest większa niż prędkość krytyczna rozmycia gruntów jego koryta ($V/V_c > 1$). Głębokości rozmycia „żywego koryta” ograniczają duże ziarna znajdujące się w jego podłożu. Rozmycie „żywego koryta” spowodowane zwężeniem go przez przeprawę mostową oblicza się równaniem dla „czystej wody” i dla „żywego koryta”, a następnie przyjmuje mniejszą z obliczonych wartości.

Rozmycie całkowite (rys. 5) jest rezultatem:

- długotrwałego rozmywania (degradacji) dna i brzegów koryta cieku,
- rozmycia ogólnego,
- rozmycia wskutek zwężenia koryta cieku przez przeprawę mostową,
- lokalnego rozmycia przy filarze, przyczółku lub nasypie dojazdu do mostu.

Przy przeprawach mostowych, w większości przypadków, występują wszystkie wyżej wymienione rodzaje rozmycia. Wtedy całkowite rozmycie przy filarze/przyczółku jest sumą rozmycia długotrwałego, ogólnego i lokalnego. W szczególnych warunkach może jeszcze wystąpić rozmycie spowodowane:

- bocznym przemieszczaniem się koryta cieku,
- wzrostem ciśnienia wody działającego na dno cieku wskutek pionowego ograniczenia jej przepływu, gdy elementy górnej konstrukcji mostu zostaną zalane wodą powodziową lub przy filarze utworzy się nad dnem zbiornisko szczątków przyniesionych przez ciek,
- przepływem wody powodziowej nad nasypami dojazdów oraz
- obniżeniem koryta wskutek pogłębienia go na odcinku cieku poniżej przeprawy mostowej.

Długotrwała degradacja koryta cieku. Jej rezultatem jest obniżenie poziomu dna na długim odcinku cieku. Zazwyczaj nie jest powodowana przez przeprawę mostową. Przyczyną długotrwałej degradacji koryta może być zbudowanie powyżej przeprawy zapory, zmiana warunków na terenie zlewni w górze cieku (np. zmiana jej użytkowania, usunięcie lub zmiana roślinności), wykopywanie kruszywa w korycie cieku itp.

Degradacja czasami powoduje wzmocnienie koryta – staje się ono bardziej szorstkie wskutek powolnego przemieszczania przez ciek dużych ziaren/kamieni. A to zwiększa odporność koryta na erozję w czasie wysokich przepływów.

Długotrwała degradacja koryta cieku może doprowadzić do katastrofy mostu. Jednak, gdy most i nasypy dojazdów nie zmieniają znacząco naturalnych warunków przepływu cieku, to ryzyko uszkodzeń mostu przez rozmycia występujące w długim okresie czasu, jest stosunkowo małe.

Rozmycie ogólne (rys. 6). Jest efektem unoszenia przez wodę gruntu z całej szerokości dna ciek, powoduje dość równomierne jego obniżenie. Występuje w długim okresie czasu, może spowodować wyerodowanie w przekroju mostowym dużej ilości gruntów dna, zanika gdy przekrój przepływu pod mostem, zmniejszony jego podporami, zostaje zwiększony do przekroju ciek po-wyżej mostu.

Rozmycia spowodowane zwężeniem przekroju przepływu ciek (rys. 7-9). Przyczyną tych rozmyć jest zmniejszenie szerokości koryta ciek przez podpory mostu i terenów zalewowych przez nasypy drogowe. Rozmycia wskutek zwężenia występują zarówno w warunkach „czystej wody”, jak i „żywego koryta”, gdy przekrój otworu przepływu pod mostem jest mniejszy niż naturalny przekrój przepływu ciek przed przeprawą mostową. Typowo występują na całej szerokości otworu mostowego. Głębokość rozmyć zwężenia bywa lub nie bywa jednakowa na całej szerokości otworu mostowego. Różnią się od długotrwałego obniżania koryta tym, że występują w miejscu mostu i mogą występować okresowo, zwłaszcza w czasie powodzi.

Rozmycia zwężenia „czystej wody” występują także przy nasypie dojazdu do mostu, zatrzymującym przepływ wody powodziowej na terenie zalewowym i przy przyczółku. Grunt przy nasypie jest stopniowo zabierany i nie zastępowany osadzonym. To stwarza na terenie zalewowym warunki rozmyć „czystej wody”. Woda powracająca z terenu zalewowego do głównego koryta ciek może znacznie zwiększyć lokalne rozmycie przy narożach przyczółka i przy sąsiednim filarze, jeżeli jest na łądzie. Rozmycia w warunkach „czystej wody” zwiększają przekrój odcinka zwężenia koryta ciek do wartości, przy której prędkość przepływu zmniejsza się poniżej wartości krytycznej V_c , wywołującej erozję gruntu w korycie.

Rozmycia zwężenia „żywego koryta” typowo występują cyklicznie. Przekrój zwężonego odcinka ciek jest zwiększany do czasu, gdy ilość wynoszonych z niego gruntów zrównuje się z ilością przynoszonych. Koryto w czasie przyboru i przepływu wody powodziowej jest rozmywane, a w czasie jej opadania wymyte wyboje są wypełnianie osadzonym w nich gruntem. Cykliczna natura rozmyć zwężenia utrudnia określenie ich głębokości. Dlatego inwentaryzacja głębokości tych rozmyć po powodzi powinna być bardzo staranna. W wodzie płynącej w warunkach 'żywego koryta' jest zawieszona duża ilość gruntu, co zwiększa ściernie działanie wody na dno i brzegi ciek, intensyfikując rozmycia.

Gdy grunt koryta zawiera duże ziarna ograniczające głębokości rozmyć „żywego koryta”, wtedy głębokość rozmyć zwężenia oblicza się wzorem dla przypadku „czystej wody” i przypadku „żywego koryta” oraz przyjmuje mniejszą z tych głębokości.

Rozmycie lokalne. Występuje zarówno w warunkach „czystej wody”, jak i „żywego koryta” przy przeszkodach napotykanym przez płynącą wodę: przy filarach i przyczółkach, nasypach dojazdów do mostu, hydrotechnicznych budowach regulacyjnych (np. ostrogach – tamach poprzecznych i wałach kierujących wodę w otwór mostowy, (rys.10). Przeszkoda powoduje zwiększenie prędkości wody i zmianę przepływu laminarnego w burzliwy – powstawanie wirów (rys. 11-13). Wiry porywają i unoszą grunt dna przy przeszkodzie, wymywając w nim wybój. W warunkach „żywego koryta” lokalne rozmycia osiągają największe głębokości w czasie bliskim występowania szczytu powodzi, a gdy woda powodziowa opada – zostają zamulone, co najmniej częściowo. Zasięg poziomy rozmycia lokalnego jest stosunkowo mały w porównaniu z innymi rodzajami rozmyć, ale jego głębokość jest zazwyczaj znacznie większa.

Przepływ burzliwy, ze zwiększoną prędkością, zwiększa wypadkowe naprężenie ścinające grunty dna i brzegów cieku. Gdy naprężenie ścinające wywierane przez płynącą wodę przewyższa krytyczne naprężenie ścinające gruntu, to jest on rozmywany. Wymyty wybój zwiększa przekrój przepływu, a przez to zmniejsza wypadkowe naprężenie ścinające grunt koryta cieku – do czasu osiągnięcia stanu równowagi – do odtworzenia przez wodę naturalnego przekroju przepływu, jakim płynęła przed zbudowaniem przeprawy mostowej. W przypadku rozmycia „żywego koryta” po opadnięciu wody, wybój zostaje wypełniony (całkowicie lub częściowo) osadzonym w nim gruntem.

Rozmycia lokalne przy filarach i przyczółkach mostu zależą głównie od:

- kształtu korpusu i fundamentu filara/przyczółka,
- cech gruntu koryta cieku,
- kształtu koryta,
- charakterystyki przepływu wody powodziowej (prędkości i głębokości przed filarem/przyczółkiem (rys. 14),
- kąta natarcia na filar/przyczółek oraz
- od warunków przepływu pod ciśnieniem (w przypadku, gdy one występują).

Dodatkowo może komplikować warunki przepływu nieduża odległość filara/przyczółka od brzegu cieku. Duże rozmycie lokalne przy filarze/przyczółku jest najczęstszą przyczyną katastrofy mostu.

3. Szczegółowa charakterystyka rozmyć przy mostach

3.1. Wpływ zlewni cieku

Zmiany na obszarze zlewni powyżej miejsca przeprawy mostowej mogą w jej rejonie powodować zwiększenie lub zmniejszenie rozmyć koryta cieku, albo zwiększenie osadzania gruntów przynoszonych z górnego biegu cieku. Intensywność tych zjawisk zależy od geologii zlewni. Katastrofalne następstwa dla mostu może mieć:

- wykonanie na obszarze zlewni budowli hydrotechnicznych zaprojektowanych bez uwzględnienia ich następstw dla przeprawy mostowej,
- zmiana użytkowania terenu zlewni,
- usunięcie lub zmiana na nim roślinności.

Znacząco mogą zwiększyć rozmycia przy moście roboty hydrotechniczne (pogłębienie cieku w pobliżu przeprawy lub regulacja cieku budowlami hydrotechnicznymi zmieniającymi położenie jego koryta), zmniejszenie budowlami naziemnymi odpływu wód opadowych w grunt oraz pogorszenie roślinności pokrywającej teren zlewni. Zmiany powoduje zbudowanie na obszarze zlewni obiektów inżynierskich, które utrudniają przepływ wielkiej wody, np., wałów przeciwpowodziowych, nasypów drogowych i kolejowych oraz przepraw mostowych. Poznanie hydrologii i geomorfologii zlewni cieku oraz zagospodarowania jej terenu ułatwia prognozowanie zakresu i rodzaju rozmyć przy przeprawie mostowej.

3.2. Rozmycia spowodowane zwężeniem cieku

Zmniejszenie szerokości przekroju przepływu cieku przez przeprawę mostową zwiększa prędkość przepływu wody. Prędkość jest tym większa, im przekrój przepływu pod mostem jest mniejszy niż przekrój naturalny koryta cieku. Szybko płynąca woda unosi grunt z podłoża cieku przy moście. Rozmycia zwiększają się drastycznie, gdy przed filarami zgromadzą się szczątki przynieszone przez wodę, które dodatkowo ograniczają przekrój przepływu. Duże rozmycia wskutek zwężenia cieku przeprawą mostową występują, gdy woda powodziowa płynąca poza korytem cieku, na terenie zalewowym, jest zatrzymywana przez nasyp dojazdu do mostu i kierowana w jego przęsła.

Zwiększeniu prędkości przepływu towarzyszy zwiększenie sił erozyjnych w zwężeniu cieku spowodowanym przeprawą mostową i zabieranie przy niej większej objętości gruntu niż jest tam przynoszona. W rezultacie, następuje przy moście stopniowe obniżanie koryta cieku i zwiększanie przekroju przepływu. A to zmniejsza prędkość przepływu i naprężenia ścinające grunt koryta. Trwa to do czasu osiągnięcia równowagi – zmniejszenia naprężeń ścinających do wartości, przy której woda przestaje zabierać gruntu ze zwężenia cieku przeprawą mostową.

Czynnikami powodującymi w rejonie przeprawy mostowej rozmycia zwężenia są:

- podpory mostu,
- nasypy dojazdów do mostu na terenach zalewowych,
- szczątki osadzone przez ciek na podporach mostu,
- łód zatrzymany przez podpory mostu,
- naturalne groble wzdłuż brzegów powstałe z osadów,
- roślinność w korycie cieku lub na terenach zalewowych,
- przepływ wody pod ciśnieniem wywołanym przez zanurzone w niej elementy konstrukcji mostu (powodują zwężenie pionowe przepływu) oraz
- naturalne zwężenia cieku.

W szczególnym przypadku nagromadzone przy moście przeszkody mogą spiętrzyć ciek, powodując zmniejszenie: prędkości przepływu, naprężeń ścinających dno i przynoszenie osadów z koryta w górnym biegu cieku. Przerwanie przez ciek spiętrzającej go przeszkody powoduje gwałtowny przepływ zwiększonej objętości wody, co może katastrofalnie zwiększyć rozmycia na odcinku zwężenia. Obserwacje rozmyć spowodowanych zwężeniem przekroju przepływu i badania modelowe wykazały następujące prawidłowości:

- ♦ przepływ wody powodziowej pod mostami odciążającymi w nasypach dojazdów do mostu głównego lub jej przepływ nad tymi nasypami zmniejsza przepływ pod głównym mostem i może zmniejszyć pod nim rozmycie ogólne,
- ♦ przy mostach odciążających są możliwe głębokie rozmycia spowodowane zbyt dużym zwężeniem głównego koryta cieku przez przeprawę mostową,
- ♦ gdy woda powodziowa mieści się w korycie cieku (nie płynie poza korytem), wtedy zwężenie jej przepływu przeprawą mostową wywołuje „żywe” rozmywanie koryta,
- ♦ duże elementy dolnej konstrukcji mostu (grupy pali, zwieńczenia pali i korpusy filarów) mogą znacznie zwiększać rozmycia zwężenia,

- ♦ zanurzone w wodzie poziome elementy konstrukcji mostu (konstrukcja przęsła, zwieńczenie pali), nad którymi przepływa woda powodziowa mogą wywołać w niej ciśnienie dramatycznie zwiększające rozmycia dna ciekłu,
- ♦ dodatkowo zmniejszają przekrój przepływu szczątki osadzone przez ciek na filarach mostu; szczątki gromadzą się zwłaszcza na rusztach palowych (fundamentach z grup pali wystających ponad dno ciekłu); mniej szczątków zatrzymuje się na filarach mających kształt opływowy.

3.3. Rozmycia lokalne przy filarach (rys. 15-16)

Przyczyną rozmyć lokalnych przy filarach mostu jest zwężenie przez filary przekroju przepływu ciekłu. Rozmycia lokalne zależą od czynników przyrodniczych oraz budowlanych: od warunków hydrologicznych przepływu ciekłu i warunków geotechnicznych jego koryta w miejscu przeprawy mostowej oraz od szerokości, kształtu i położenia filara względem nurtu ciekłu, a w szczególnym przypadku także od wysokości górnej konstrukcji mostu nad ciekłem.

Przepływ wody przy filarze jest burzliwy i skomplikowany wskutek występowania w wodzie przestrzennego układu wielu rodzajów wirów. Dynamiczność burzliwego przepływu przyspiesza rozmywanie dna. W wodzie przepływającej przy filarze można wyróżnić układ nurtów i wirów o spójnej strukturze. Są to (rys.17, 18):

- nurty pionowe wzdłuż czoła filara: skierowany w górę ku powierzchni wody i skierowany w dół, do dna ciekłu; ten drugi nurt wzbudza przy dnie wiry podkowiaste rozmywające wybój przed filarem,
- walcową falę czołową na powierzchni wody, wywołaną przed filarem (tzn. od góry ciekłu) przez nurt pionowy skierowany w górę; fala czołowa jest zbliżona do fali dziobowej przed płynącą łodzią,
- zespół wirów podkowiastych tworzących się wokół filara, wywołanych interakcją nurtu pionowego i dna ciekłu; wiry te obracają się tuż nad dnem i to one głównie rozmywają dno przy filarze; w płytkiej wodzie wiry podkowiaste osłabia fala powierzchniowa; wirów przesuwają się prawie równolegle do kierunku przepływu ciekłu; po minięciu filara wiry podkowiaste łamią się i zanikają,
- małe, ale bardzo energetyczne wiry podłużne (rurowe, o osi głównej w przybliżeniu pionowej) występujące w poszczególnych warstwach ścinania wody,
- występujące przy bokach filara w przepływającej wodzie pionowe warstwy ścinania przechodzące w dużej wielkości wiry śladu wodnego (torowe, kilwateru), przesuwające się w dół ciekłu, za filar; są spowodowane rozdzielaniem przez filar płynącej wody; w miarę oddalania od filara średnice wirów zwiększają się i wiry szybko zanikają; oś wiru torowego jest prawie pionowa; wir zasysa w płynącą wodę grunt z dna, tworząc zawieszinę, której cząstki osiadają, gdy wir zanika oraz
- poziomy wir powstający przy przepływie wody przez nieruchomy pagórek na wyjściowym zboczu wymytego wyboju; położenie i wielkość pagórka zależą od mocy wirów śladu wodnego (słabsze tworzą pagórek bliżej filara).

Wzajemne oddziaływanie nurtów przepływu występujących przy filarze i ich niestabilność zwiększają lokalne rozmycia dna.

Układ nurtów i intensywność rozmyć lokalnych przy filarze, zależą od geometrii oraz wymiarów korpusu i fundamentu filara oraz od położenia jego osi podłużnej względem głównego kierunku przepływu cieku (rys. 19-22). Na układ nurtów wpływa szerokość i długość filara (w przypadku filara walcowego – jego średnica), a gdy kilka filarów jest zlokalizowanych w jednej osi, to także ich rozstaw. Kształt filara komplikujący układ nurtów zwiększa lokalne rozmycia.

Przy danej głębokości wody większa szerokość filara bardziej utrudnia przepływ cieku i powoduje większe rozmycia przed czołem filara niż wzdłuż jego boków. Ze zwiększeniem szerokości filara oddala się od jego czoła, w górę cieku, miejsce w którym rozpoczyna się zmiana nurtów powodowana przez filar. Układ nurtów przy bokach szerokich filarów jest zbliżony do występującego w wodzie powodziowej przy niektórych rodzajach przyczółków.

Znaczące różnice morfologii podmycia filarów występują przy różnym stosunku głębokości cieku y , do szerokości filara a . W przypadku filarów:

- wąskich ($y/a > 1,4$) – najgłębsze rozmycia dna są typowo przed czołem filara,
- o szerokości pośredniej ($0,2 < y/a < 1,4$) oraz
- szerokich ($y/a < 0,2$) – najgłębsze rozmycia występują przed czołem i przy bokach filara.

Filary wąskie ($y/a > 1,4$). Podstawowe warunki przepływu przy wąskim filarze są podobne do występujących przy filarze jednosłupowym, walcowym w stosunkowo głębokim i szerokim cieku. W płynącej wodzie, która napotyka w takim cieku na wąski filar powstaje układ wirów podobny do występującego przy filarze jednosłupowym.

Filary o pośredniej szerokości ($0,2 < y/a < 1,4$). Zjawiska w cieku przepływającym przy tych filarach są podobne do występujących przy filarach wąskich z tym, że w większym stopniu słabnie intensywność erozji ze zmniejszeniem stosunku y/a . W płytkiej wodzie nurt skierowany w dół wzdłuż czoła filara jest wolniejszy, gdyż rozwija się na krótszej drodze. Wtedy nurt jest słaby i są spowolnione obroty wirów podkowiatych, zaś tarcie płytkiej wody o dno koryta osłabia pionowe wiry śladu wodnego.

Filary szerokie ($y/a < 0,2$). Płynąca woda natrafiając na szeroki filar znacząco zmienia kierunek – rozplywa się na boki filara i płynie wzdłuż nich w warunkach zwężonego przekroju przepływu. Nurt skierowany w dół przy czołe filara jest słabo rozwinięty i nieznacznie eroduje przed nim dno koryta, natomiast najgłębsze rozmycia występują wzdłuż boków filara.

Obserwacje lokalnych rozmyć koryt cieków przy filarach oraz badania modelowe wskazują, że istnieją następujące prawidłowości rozmyć:

- ♦ maksymalne głębokości rozmyć przy filarach zazwyczaj występują w czasie szczytu powodzi (wtedy wykonanie pomiarów jest trudne i niebezpieczne lub nawet niemożliwe; stan dna cieku rozmytego w warunkach „żywego koryta” bywa szybko odtwarzany po szczycie powodzi; przed jej zakończeniem wymyte wyboje zostają wypełnione osadami; stąd głębokości dna zmierzone po ustąpieniu powodzi taśmą z obciążnikiem lub żerdzią pomiarową mogą nie być maksymalnymi głębokościami rozmyć,
- ♦ bezpośredni wpływ na głębokość rozmycia ma szerokość filara; w tych samych warunkach hydrologicznych i geotechnicznych, generalnie, szerokie filary wywołują głębsze rozmycia niż filary wąskie,
- ♦ można oczekiwać, że maksymalna głębokość rozmycia będzie w zakresie od 2,4- do 3-krotnej szerokości filara z czołem cylindrycznym lub zaokrąglonym,

- ♦ kształt opływowy filara od góry cieku (dziób, powierzchnia walcowa, zaokrąglona itp.) zmniejsza siłę wirów podkowiatych i przez to głębokość rozmycia lokalnego; natomiast kształt opływowy filara od dołu cieku zmniejsza siłę wirów śladu torowego (kółwateru) i wpływa korzystnie na stabilność dna przy filarze,
- ♦ płaskie czoło filara zwiększa maksymalną głębokość rozmycia o rzędu 20%, w stosunku do rozmycia przy filarze z czołem dziobowym oraz o 10% – z czołem cylindrycznym i zaokrąglonym,
- ♦ kształt czoła filara nie ma wpływu na wielkość rozmycia, gdy kąt natarcia nurtu na filar jest większy niż około 5%,
- ♦ gdy filar jest równoległy do nurtu, to długość filara nie ma znaczącego wpływu na głębokość lokalnego rozmycia; natomiast duży wpływ na rozmycie lokalne ma kąt natarcia na filar przepływającej wody,
- ♦ głębokości rozmyć przy filarach zależą od prędkości wody dopływającej do mostu – im jest większa, tym są większe głębokości rozmyć,
- ♦ łód i szczątki zatrzymane przez filary zmniejszają przekrój przepływu cieku, zmieniają kształty przeszkód napotykanych przez wodę w miejscu przeprawy mostowej oraz mogą wywoływać nurty skierowane do dna cieku, co zwiększa podmycie filarów,
- ♦ zaletą walcowego kształtu filara jest niezwiększanie rozmyć, gdy przy przeprawie mostowej następuje zmiana kierunku przepływu cieku (np. w czasie powodzi),
- ♦ gdy filar zawiera kilka walcowych słupów w rozstawach większych niż pięciokrotna ich średnica, wtedy maksymalne rozmycie lokalne przy filarze nie przekracza 1,2 rozmycia przy filarze jednosłupowym i zwykle nie stanowi przeszkody dla szczątków niesionych przez wodę; przy mniejszych rozstawach słupów rozmycia są większe i filar zatrzymuje zwiększoną ilość szczątków,
- ♦ w przypadku filarów mających fundamenty z rusztów palowych wystających powyżej dna cieku, mniejsze lokalne rozmycia występują, gdy ruszt zawiera mniej pali,
- ♦ zwiększone rozmycie lokalne występuje przy filarach, których fundamenty zawierają poziomą płytę (np. zwieńczającą pale), zaprojektowaną powyżej dna cieku, jak ruszty palowe lub która znalazła się nad dnem wskutek obniżenia go przez rozmycie; powodem zwiększonego rozmycia lokalnego jest wtedy podwyższone ciśnienie wody towarzyszące jej przepływowi pod płytą.

3.4. Rozmycia lokalne przy przyczółkach

Ten rodzaj rozmyć występuje, gdy przyczółki i nasypy dojazdów do mostu utrudniają przepływ wody powodziowej. Uszkodzenia przyczółków bywają spowodowane przez:

- wodę powodziową płynącą na szerokim terenie zalewowym, którą nasypy dojazdów kierują pod most,
- boczne przemieszczenie lub proces poszerzania koryta cieku,
- rozmycie wskutek zwężenia przepływu cieku przez przeprawę mostową,
- rozmycie lokalne przy przyczółku,
- przepływ wody powodziowej nad przyczółkiem i nasypem dojazdu,
- kombinację wymienionych czynników.

Układ nurtów występujących przy przyczółku stanowiącym przeszkodę przepływu cieków jest pokazany na rys. 23, a możliwe rozmycia przy przyczółkach – na rys. 24-26. Zwężenie przepływu wody powodziowej przez nasypy dojazdów do mostu i przyczółki powoduje wzrost prędkości wody i rozmaite jej zawirowania. Turbulentny przepływ jest w wielu przeprawach mostowych komplikowany kształtem koryta cieków.

Gdy nasypy dojazdów do mostu są wykonane z odpowiednich gruntów i właściwie zagęszczone, aby bezpiecznie przenosiły obciążenia ruchem oraz mają odpowiednio umocnione powierzchnie skarp, to są odporne na erodowanie przez wodę powodziową. Natomiast, gdy nasypy zostały zbudowane bez przestrzegania zasad technologii, wtedy są podatne na uszkodzenia erozyjne i w czasie powodzi wymagają stałej obserwacji, aby nie dopuścić do zagrożenia bezpieczeństwa użytkowników przeprawy mostowej.

Najbardziej narażone na podmycia są przyczółki zlokalizowane przy brzegu cieków lub w jego pobliżu. Jednak, gdy przyczółek znajduje się na szerokim terenie zalewowym, to pomimo odsunięcia od brzegu również mogą zdarzyć się przy nim duże lokalne rozmycia o głębokości nawet czterokrotnie większej niż głębokość wody dopływającej do dojazdów. Wirów spowodowane utrudnieniem przepływu przez nasyp dojazdu zakończony przyczółkiem występują przy narożniku przyczółka od strony góry cieków i przebiegają wzdłuż jego podstawy. Natomiast przy narożniku od dołu cieków tworzą się wiry toru wodnego.

Zwykle koryta cieków są w gruntach aluwialnych, w niespoistych osadach (piaskach i żwirach). Natomiast podłożem terenów zalewowych bywają znacznie drobniejsze pyły i ropy, co powoduje, że grunty terenu zalewowego są bardziej spoiste niż grunty w głównym korycie cieków. Dlatego na terenach zalewowych utrzymują się dość strome pochylenia zboczy, które są często podmywane przez wodę powodziową.

Podmycie przyczółka w czasie powodzi jest zwykle skutkiem interakcji wody skierowanej przez nasyp dojazdu i przyczółek z terenu zalewowego do głównego koryta cieków oraz wody płynącej w tym korycie. Głębokości i obszary rozmyć przy przyczółku zależą nie tylko od długości nasypu i kształtu przyczółka, ale także od wielu innych czynników:

- prędkości i głębokości wody spływającej z terenu zalewowego do koryta głównego,
- kształtu jego przekroju poprzecznego (zwłaszcza głębokości wody),
- cech gruntów terenu zalewowego,
- od kąta pomiędzy nasypem i kierunkiem przepływu wody powodziowej.

Ponadto rozmycia przy nasypach dojazdów i przyczółkach zależą od ukształtowania terenu zalewowego oraz stopnia jego zadrzewienia i pokrycia niską roślinnością; te czynniki mogą zmniejszać prędkość przepływu wody powodziowej przez teren zalewowy i powodowaną przez nią erozję przy nasypie dojazdu i przyczółku.

Obserwacje rozmyć przy przyczółkach i badania modelowe wskazują na następujące prawidłowości:

- ♦ najczęstszymi przyczynami rozmyć przy przyczółku są: boczne przemieszczenie koryta cieków, zwężenie terenu zalewowego przez nasyp dojazdu i długotrwałe obniżanie się koryta cieków,
- ♦ podmycie przyczółka jest największe, gdy nasyp dojazdu doprowadza do przyczółka dużą ilość wody powodziowej płynącej poza korytem cieków,

- ♦ rozmycie może wystąpić wzdłuż boku przyczółka od strony góry cieku (spowodowane przez wiry poziome) oraz przy narożniku przyczółka od dołu cieku (spowodowane rozszerzaniem się przepływu wody powodziowej po przepłynięciu pod mostem),
- ♦ ukośne położenie przyczółka do kierunku przepływu cieku zwiększa przy przyczółku rozmycia, gdy kąt pomiędzy tym kierunkiem i osią nasypu dojazdu przewyższa 90° ,
- ♦ przy przyczółku wysuniętym z nasypu, mającym zewnętrzne ściany pionowe, rozmycia lokalne są większe niż przy przyczółku zagłębionym w nasypie z pochyloną skarpą czołową – mogą być nawet większe dwukrotnie.

3.5. Rozmycia przy podporach mostów zabezpieczonych narzutem kamiennym

Rozmycia zagrażające bezpieczeństwu mostu mogą wystąpić również przy podporach zabezpieczonych narzutem kamiennym. Przyczyną jest zniszczenie go przez wodę. Proces niszczenia bywa powodowany przez następujące mechanizmy:

- 1) ścinanie – ten rodzaj niszczenia występuje, gdy kamienie narzutu są zbyt lekkie, aby przeciwstawić się siłom hydrodynamicznym płynącej wody; ciężar kamieni musi być odpowiedni do energii przepływającej wody,
- 2) porywanie przez wodę gruntu drobnoziarnistego z podłoża narzutu – powoduje destabilizację kamieni: opadanie z obniżającym się dnem cieku i rozpraszanie przez wodę; jest to rezultatem zasysania pomiędzy kamieniami drobnego piasku z dna przez wodę przepływającą nad narzutem; aby temu zapobiec narzut powinien być ułożony na warstwie geotkaniny filtracyjnej,
- 3) podmywanie obrzeży narzutu – powoduje stopniowe staczanie się kamieni w wyboje rozmywane przy obrzeżach narzutu; ten mechanizm niszczenia występuje, gdy narzut jest niewystarczająco zabezpieczony na obwodzie dużymi kamieniami,
- 4) rozmycie ogólne – narzut osiada z dnem cieku, co powoduje stopniowe rozpraszanie kamieni; ten rodzaj niszczenia dominuje w korytach cieków z dnem piaszczystym, w których występuje migracja mielizn.

Trzy pierwsze mechanizmy niszczenia narzutu kamiennego występują we wszystkich warunkach przepływu, natomiast czwarty tylko w warunkach „żywego koryta”.

Mechanizmy niszczenia oraz strefy stabilnego i niestabilnego narzutu ilustruje rys. 27. Na tym rysunku u jest prędkością wody ścinającej grunt dna, u_{cs} – krytyczną prędkością wody ścinającej grunt dna z ziaren wielkości d , zaś u_{cr} – krytyczną prędkością wody ścinającej narzut z kamieni o wielkości d_r . Na rys. 28 pokazano schematy zniszczenia narzutu kamiennego umieszczonego na dnie cieku oraz poniżej dna. Prawdopodobieństwo niszczenia narzutu wskutek porywania gruntu dna zwiększa się z wartością stosunku u/u_{cs} , zaś niszczenia krawędzi – ze zwiększeniem wartości u/u_{cr} . Typowo, niszczenie powodowane ścinaniem występuje przy $u/u_{cr} > 0,35$. Rysunek pokazuje również, że porywanie gruntu dna jest bardziej prawdopodobne przy większej wartości stosunku d_r/d .

3.6. Kąt natarcia płynącej wody na filary mostu (rys. 29-31)

Jest to kąt pomiędzy podłużną osią filara i kierunkiem dopływającej do niego wody. Najlepiej, gdy kąt ten wynosi 0° – tzn. gdy nurt dopływającej wody i oś filara są w jednej linii. Wtedy największa głębokość rozmycia występuje przed czołem filara. W przypadku dużego kąta natarcia znacznie zwiększa się efektywna szerokość filara i najgłębsze rozmycia mogą wystąpić wzdłuż jego boku. Gdy kąt natarcia jest większy niż 10° , to miejsce najgłębszego rozmycia zależy od gruntu podłoża cieku i kształtu filara. Miejsca występowania najgłębszych wybojów należy zlokalizować przed zainstalowaniem instrumentów stałego monitorowania rozmyć, inwentaryzując koryto cieku przy moście.

3.7. Rozmycie powodowane przez ciśnienie przepływu

Ten rodzaj rozmycia występuje, gdy woda opływa znajdujące się w niej poziome elementy konstrukcyjne mostu. Mogą to być zanurzone w wodzie zwieńczenia grup pali podpierających filary, a w czasie powodzi – górna konstrukcja mostu lub jego pomost, nad którymi przepływa woda. Część wody jest wtedy wtłaczana pod zanurzony w niej element, który kieruje wodę w dół, do dna cieku. Woda jest wtedy pod ciśnieniem, przez co intensywniej rozmywa dno.

Zanurzona w wodzie konstrukcja stanowi ciągłą przeszkodę, która znacząco tarasuje przepływ i komplikuje układ nurtów rozmywających dno. Dlatego w takich warunkach należy przed zainstalowaniem instrumentów stałego monitorowania rozmyć zmierzyć głębokości cieku przy podporach mostu, aby określić położenia najgłębszych wybojów.

Charakterystykę przepływu przy zanurzonej w wodzie konstrukcji mostu ilustruje rys. 32. Można założyć, na korzyść bezpieczeństwa, że cała dopływająca do mostu woda przepływa pod zanurzoną w niej konstrukcją, przekrojem o wysokości $(h_b + T)$, gdzie h_b jest wysokością otworu mostowego przed rozmyciem, T – wysokością przeszkody (belek, pomostu i poręczy). Wtedy wysokość przekroju przepływu wody w miejscu maksymalnego rozmycia poniżej zanurzonej w wodzie konstrukcji można podzielić na: y_s – głębokość rozmycia, h_c – zmniejszoną wysokość przekroju przepływu (poniżej linii nurtu, która ogranicza oddzieloną strefę pod konstrukcją) oraz t – maksymalną wysokość strefy przepływu powyżej linii nurtu. Głębokość rozmycia wodą pod ciśnieniem y_s określa się stosując równanie rozmycia dla przypadku poziomego zwężenia; oblicza się wysokość $(y_s + h_c)$, przy której występuje krytyczna prędkość przepływu przez otwór mostowy.

Rozmywanie dna pod ciśnieniem mogą także powodować szczątki, które zostały zatrzymane przez filarem nad dnem cieku. Schemat tego zjawiska jest pokazany na rys. 33.

3.8. Dopływ w górze cieku, w pobliżu przeprawy mostowej

Energia wody takiego dopływu może znacząco oddziaływać na przepływ cieku w rejonie mostu. Dopływem może być ciek lub kanał odwadniający zlewnię. Generalnie, dopływ spycha wodę w korycie głównego cieku w stronę przeciwnego brzegu. A to zwiększa jego rozmycia i lokalną prędkość wody w korycie głównym. Ponadto, gdy dopływ jest w odległości od mostu nie przekraczającej pięciu szerokości koryta głównego cieku, wtedy zmiana jego kierunku przez dopływ może spowodować, że ciek będzie płynął pod kątem do podpór. A kąt natarcia może znacząco zwiększyć intensywność wirów erodujących koryto przy moście.

Dopływ cieków poniżej przeprawy mostowej zwykle mało oddziałuje na wodę przepływającą pod mostem. Jednak, gdy taki dopływ jest blisko mostu, to w czasie powodzi może powodować wzrost erozji koryta cieków przy moście. W miejscach łączenia się koryt cieków często występują duże rozmycia – mogą być do dwóch razy większe niż średnie rozmycie obu cieków. W przypadku instalowania instrumentów stałego monitoringu rozmyć przy moście znajdującym się w pobliżu dopływów należy pomiarami koryta cieków określić miejsca występowania rozmyć najgłębszych.

3.9. Główny ciek płynie powyżej mostu wieloma korytami

Gdy pomiędzy odcinkami cieków, na których płynie on jednym korytem jest odcinek z kilkoma korytami anastomozującymi i nad tym odcinkiem znajduje się most, wtedy mogą przy moście powstawać turbulencje przepływu zwiększające rozmycia. Wpływ takich warunków na rozmycia jest wprawdzie mniejszy niż dopływu do koryta powyżej przeprawy, jednak może stwarzać trudne do przewidzenia zagrożenia filarów. Położenie najgłębszego rozmycia zależy od warunków w miejscu mostu i powinno być określane przez pomiary koryta cieków, przed instalowaniem stałego instrumentu monitorującego.

3.10. Rozmycia powodowane bocznym przemieszczeniem koryta cieków

Boczne przemieszczenia koryt są zjawiskiem naturalnym, ale bywają także wywołane lub pogębowane działalnością człowieka. Boczne przemieszczenie koryta może:

- niekorzystnie wpłynąć na stabilność filarów znajdujących się na brzegu,
- spowodować erozję przy przyczółku,
- uszkodzić nasypy dojazdów i/lub zwiększyć całkowite rozmycie wskutek zmiany kierunku przepływu cieków przy filarach i przyczółkach.

Rys. 34 pokazuje rozmycia spowodowane bocznym przemieszczeniem koryta cieków.

Czynnikami wpływającymi na boczne przemieszczenia koryta są:

- geomorfologia koryta (od niej zależy tendencja przemieszczeń),
- położenie przeprawy mostowej w kolanie koryta cieków lub w jego pobliżu,
- warunki przepływu wody powodziowej,
- cechy gruntów w dnie i brzegach cieków.

Boczny ruch meandrującego cieków ma wpływ na wielkość rozmyć zewnętrznego brzegu w kolanie koryta (rys. 35). Ruch boczny bywa następstwem regulacji cieków. Jeżeli projekt hydrotechnicznych robót regulacyjnych ignoruje istnienie przeprawy mostowej, to regulacja może doprowadzić do zagrożenia stabilności mostu. Przykładem jest sześcioprzęsłowy most drogowo-kolejowy przez Wisłę koło Nagnajowa, zbudowany w latach 1957-58. Roboty hydrotechniczne przeprowadzone w latach 1970-tych zupełnie zmieniły w rejonie tego mostu trasę Wisły i przekrój jej koryta. Zachodnie przęsła mostu: 1-3, Wisła całkowicie zasypała gruntami osadowymi, a wschodnie: 4-5 i częściowo 6, w których znalazło się kolano rzeki, znacznie pogłębiła. Dno rzeki przy podporach 4-7, mających fundamenty kesonowe zagłębione w iles, powszechnie uważanym za trudno rozmywalny, zostało rozmyte w zakresie od 5,5 m do 9,0 m (2004 r.). Projektant fundamentów mostu prognozował rozmycie iles do 3 m!

Budowle hydrotechniczne powodują duże zagrożenie podpór mostowych podmyciami, gdy znacznie zmniejszają naturalny przekrój przepływu cieką i mogą zagrażać bezpieczeństwu przeprawy mostowej, gdy znacznie zmieniają trasę koryta cieką. Powodowane budowlami hydrotechnicznymi ryzyko rozmyć znacznie się zwiększa w czasie powodzi i może doprowadzić do katastrofy mostu.

Niedocenie znaczenia migracji koryta rzeki doprowadziło w 1986 r. do nagłego zawalenia się 26-metrowego odcinka mostu drogowego przez rzekę Hatchie w stanie Tennessee, USA. Zginęło 8 ludzi. Powodem było rozmycie dna, które doprowadziło do katastrofalnego osiadania jednej z podpór mostu. Podpora była oparta na palach drewnianych, zaprojektowanych jako tarcie. Obniżenie dna zredukowało nośność pobocznic pali. Konstrukcje dwóch przęseł zwały się do rzeki. Pojazdy spadające z mostu uderzyły w sąsiednią podporę powodując jej zniszczenie. Od czasu zbudowania mostu w 1936 r., koryto rzeki Hatchie przesunęło się w kierunku bocznym 25 m. Po między 1975 i 1981 r. koryto przesunęło się około 1,5 m/rok. Ponieważ w czasie okresowych przeglądów mostu, mimo zauważania wzrostu długości odcinków pali odsłoniętych przez rozmycia, nie stwierdzano żadnych osiadań lub pochyień podpór; dlatego uznawano, że bezpieczeństwo mostu nie jest zagrożone.

W zakolu koryta ciek zmienia kierunek przepływu – występuje tam nurt kołowy, który eroduje brzeg zewnętrzny, wklęsły; przy brzegu wewnętrznym woda płynie wolniej i przy nim ciek osadza niesiony materiał (rys. 35). Następstwem jest boczne przemieszczenie koryta w kierunku brzegu zewnętrznego. Przy dużym promieniu zakola rozmycie brzegu bywa nieznaczne. Im promień jest mniejszy, tym rozmycie w zakolu groźniejsze. Duża boczna migracja meandrującego koryta może doprowadzić do awarii podpory mostowej znajdującej się na podmywanym brzegu.

O niestabilności koryta ciek świadczą ślady dawnych erozji brzegów i znacznych bocznych przemieszczeń koryta. Następstwa geotechniczne rozmycia brzegu przy przeprawie mostowej są pokazane na rys. 36 i 37.

Małe prawdopodobieństwo podmywania brzegów przy moście występuje, gdy most jest nad prostym odcinkiem cieką, z brzegami łagodnie pochylonym, pomiędzy którymi przepływ jest dość laminarny. Ale na prostym odcinku cieką najgłębsze rozmycie może wystąpić w różnych miejscach pomiędzy brzegami. Stąd potencjalnie są zagrożone podmyciem wszystkie filary. Natomiast problemy w moście nad cieką meandrującym często powoduje zmiana trasy koryta. Najmniej zagrożone podmyciem są podpory mostu zlokalizowanego nad zakolem cieką (z wyjątkiem podpory na wklęsłym brzegu zakola), a także podpory mostu nad miejscem zmiany kierunku cieką. W zakolu zazwyczaj koryto jest węższe i głębsze niż poza nim; w miejscu zmiany kierunku cieką koryto jest szersze i może być stabilne bocznie.

3.11. Obwał brzegu cieką

Na stabilność brzegu mają wpływ cechy jego gruntu. Brzegi z gruntów niespoistych są zwykle rozmywane stopniowo. Brzegi z gruntów spoistych są odporniejsze na rozmycia, ale zwykle tracą gwałtownie stabilność wskutek podmycia, które często powoduje znaczny obwał brzegu. Postęp erozji brzegów z gruntów niespoistych zależy od:

- wielkości ich ziaren (tarcia wewnętrznego),
- sił przesączania wody (przepuszczalności gruntu),
- pochylenia brzegu,

- kierunku i prędkości burzliwego przepływu wody przy brzegu,
- naprężenia ścinającego wywieranego przez wodę na brzeg,
- siłę przebiecia hydraulicznego,
- siły fal w cieku.

Zagrożenie obwałem brzegów cieku ustala się wykonując analizę geotechniczną. Typowe powierzchnie zsuwu w gruntach spoistych i niespoistych pokazuje rys. 38.

3.12. Rozmycie wsteczne

Rozmycie wsteczne jest rezultatem obniżenia na jakimś odcinku cieku dna jego koryta wskutek rozmycia lub bagrowania. Aby odtworzyć jednolite nachylenie dna, ciek rozmywa koryto wstecz, w kierunku górnego biegu; rozmycie postępuje z poziomu dna obniżonego rozmyciem lub bagrowaniem. Gdy most jest w zasięgu rozmycia wstecznego, wtedy następuje obniżenie dna przy filarach. Konsekwencje rozmycia wstecznego dla bezpieczeństwa mostu zależą od wielkości obniżenia i zagłębienia fundamentów mostu w dnie cieku.

3.13. Zależność miejsca najgłębszego rozmycia koryta cieku od gruntu jego podłoża

Rozmycia przy mostach koryt cieków w piaskach lub żwirach różnią się od rozmyć koryt w gruntach ilastych. Najgłębsze rozmycia dna z gruntu ziarnistego występują typowo przed filarami (od góry cieku). Natomiast w dnie ilastym stwierdzano zwiększanie się głębokości wymytych wybojów wzdłuż filara, w kierunku dołu cieku. Oczywiście, w obu przypadkach dotyczy to rozmyć przy filarze równoległym do kierunku przepływu cieku. Gdy woda płynie pod kątem do filara, wtedy rozmycia w każdym gruncie są takie, jak opisano w p. 3.7.

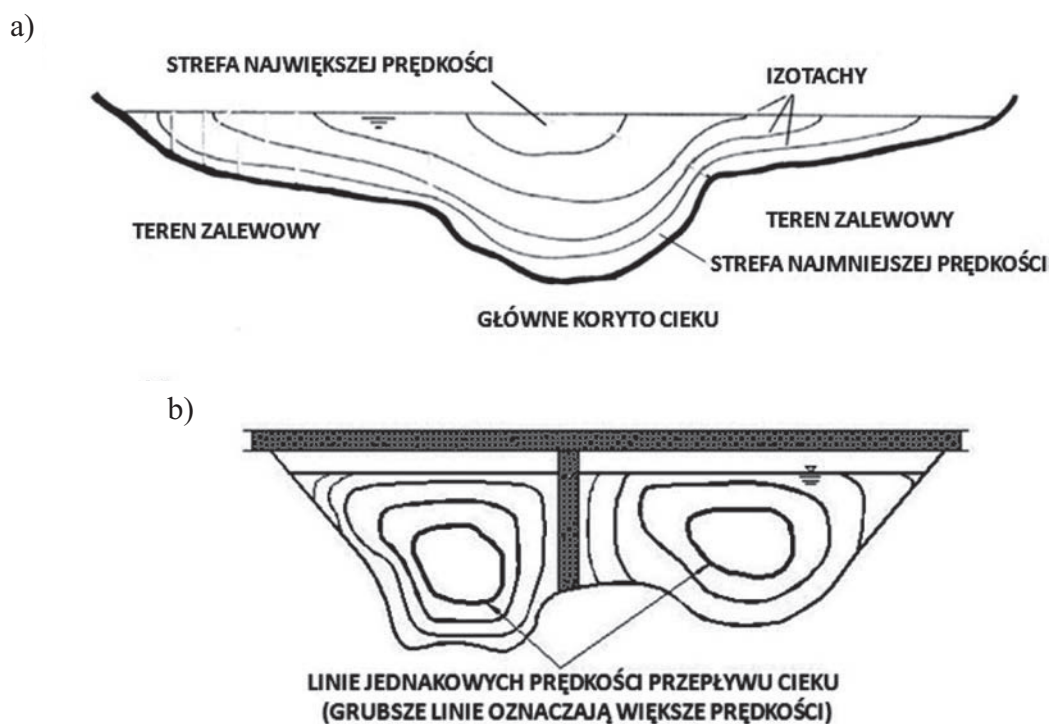
Piśmiennictwo

1. *Ansari F.*: Simple Cost-Effective Scour Sensor. Research Report. Illinois Center for Transportation, Illinois, 2010
2. *Dong Y., Song R., Liu H.*: Bridge Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology. Final Report. Fairbanks, 2010
3. *Garret K.*: Solve sensing challenges with optical sensor. Electrical Design News, Nov. 2012
4. *Gerwick B.C. Jr.*: Construction of Marine and Offshore Structures. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, 2007
5. *Jarominiak A., Rosset A.*: Katastrofy i awarie mostów. WKŁ, Warszawa 1986
6. *Jarominiak A.*: Rozmycia przy mostach i ich monitorowanie. Drogownictwo nr 12/2013 i 13/2014
7. *Kosnik D.E.*: Internet-Enabled Remote Monitoring of Civil Infrastructure with TDR. Purdue University, West Lafayette, 2006
8. *Laursen E.M., Toch A.*: Scour Around Bridge Piers and Abutments. Iowa Highway Research Board Bulletin No 4. 1956

9. *Marr J.*: Bridge Scour Monitoring Technologies: Development of Evaluation and Selection Protocols for Application on River Bridges in Minnesota. Minnesota Department of Transportation, 2010
10. *Melville B.W., Coleman S.E.*: Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, US, 2000
11. *Yu Xiong, Yu Xinbao*: Field Monitoring of Scour Critical Bridges: Pilot Study of Time Domain Reflectometry Real Time Automatic Bridge Scour Monitoring System. Case Western Reserve University. Cleveland, 2010
12. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection and Design Guidance. Third Edition. Hydraulic Engineering Circular No 23. National Highway Institute. 2009
13. Bridge Scour Manual. Department of Transport and Main Roads Queensland, 2013
14. Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition. Hydraulic Engineering Circular No 18. FHWA-HIF-12-003, 2012
15. Stream Stability at Highway Structures. Fourth Edition. Hydraulic Engineering Circular No 20. FHWA-HIF-12-004, 2012
16. Idaho Transportation Department Office Manual Plans of Action for Scour Critical Bridges. 2004
17. Riprap Design Criteria, Recommended Specifications and Quality Control. NCHRP Report 568. Transportation Research Board, 2006
18. Effects of Debris on Bridge Pier Scour, NCHRP Report 653. Transportation Research Board, 2006
19. Countermeasures to Protect Bridge Abutments from Scour. NCHRP Report 587. Transportation Research Board, 2007
20. Scour at Wide Piers and Long Skewed Piers. NCHRP Report 682. Transportation Research Board, 2011
21. Reference Guide for Applying Risk Reliability-Based Approaches for Bridge Scour Prediction. NCHRP Report 761. Transportation Research Board, 2013
22. Field Manual - Scour Critical Bridge - High - Flow Monitoring and Emergency Procedures Idaho Transportation Department. FHWA, 2004
23. *Tian Q., Lowe K.T., Simpson R.*: A Laser-Based Optical Approach for Measuring Scour Depth around Hydraulic Structures. Proceedings of the Fifth International Conference on Scour and Erosion. San Francisco, 2010
24. *Marek M.A.*: Hydraulic Design Manual. Texas Department of Transportation, 2009



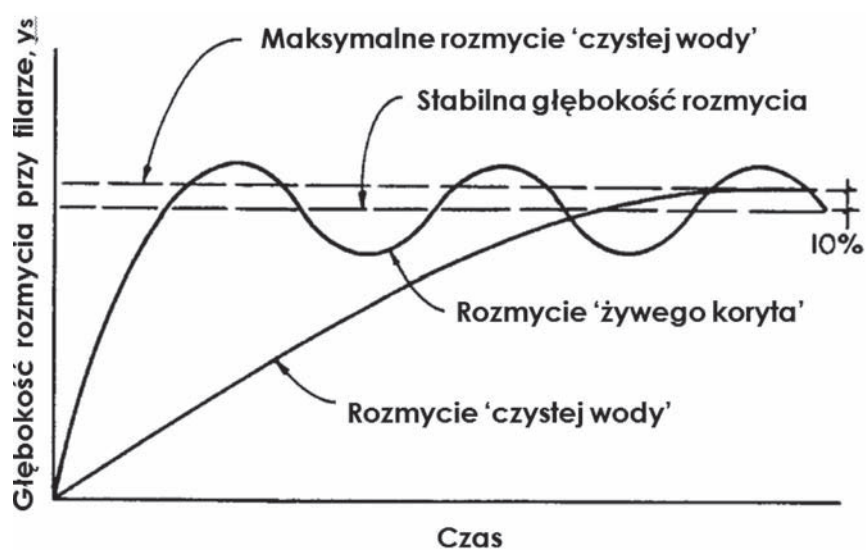
Rys. 1. Podmycie filarów wiaduktu dojazdowego do mostu przez Wisłę koło Grudziądza autostrady A1; wiadukt jest na terenie zalewowym, podmycie nastąpiło w czasie jego budowy w 2010 r.



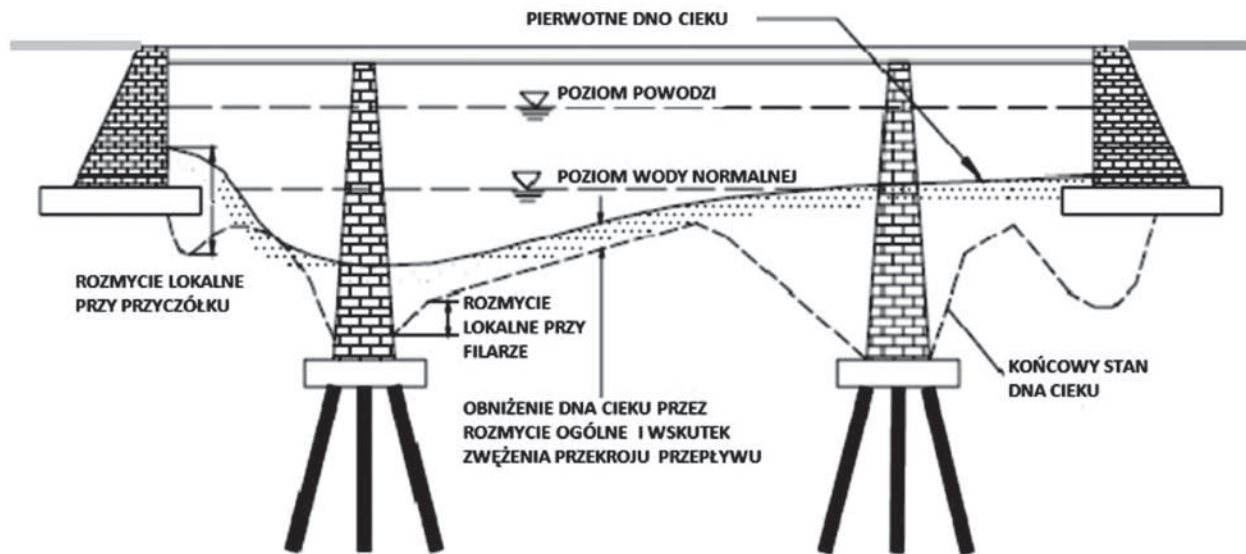
Rys. 2. Typowy rozkład w przekroju przepływu prędkości wody powodziowej:
a) poza mostem [14], b) pod mostem dwuprzęsłowym [24]



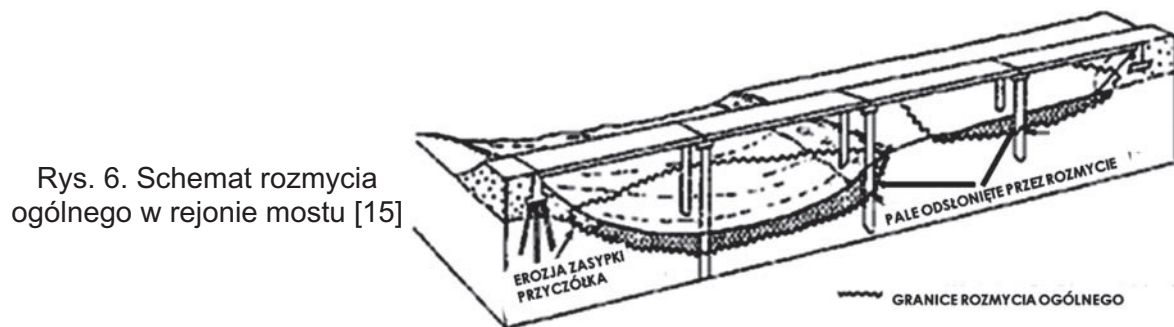
Rys. 3. Szczątki zatrzymane przez filar w czasie powodzi (a) i awaria mostu (b) wskutek wzrostu prędkości przepływu spowodowanego przez szczątki [15]



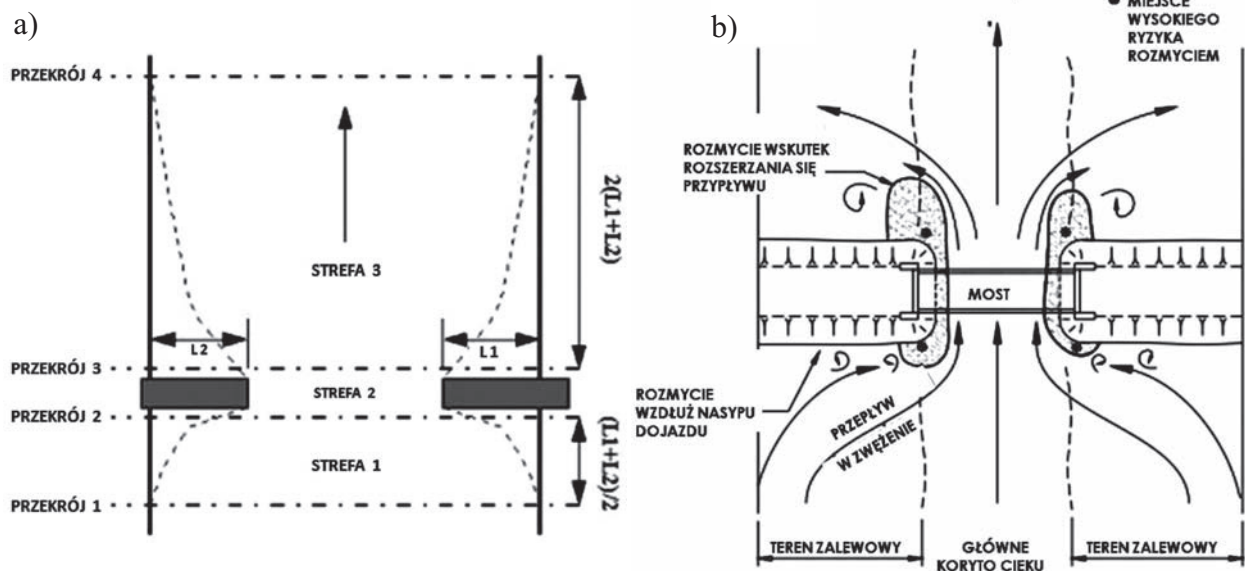
Rys. 4. Głębokość rozmyć w funkcji czasu piaszczystego dna cieku przy filarze [9]



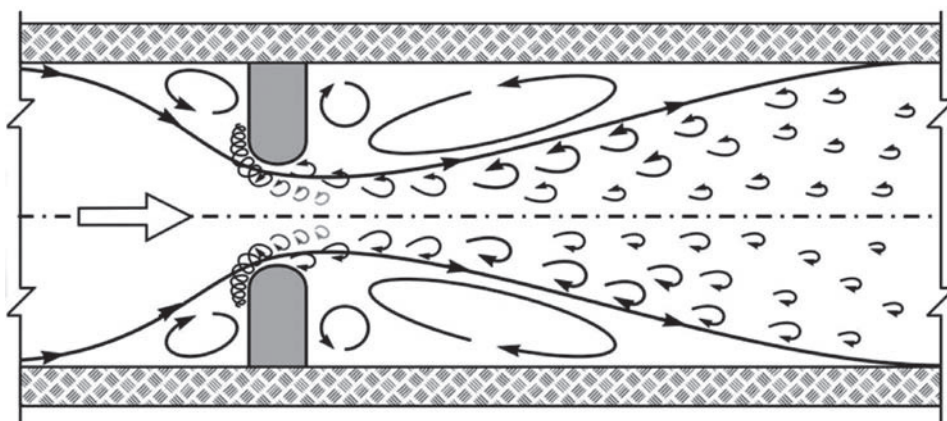
Rys. 5. Schemat układu rozmyć koryta cieku w przekroju przeprawy mostowej [11]



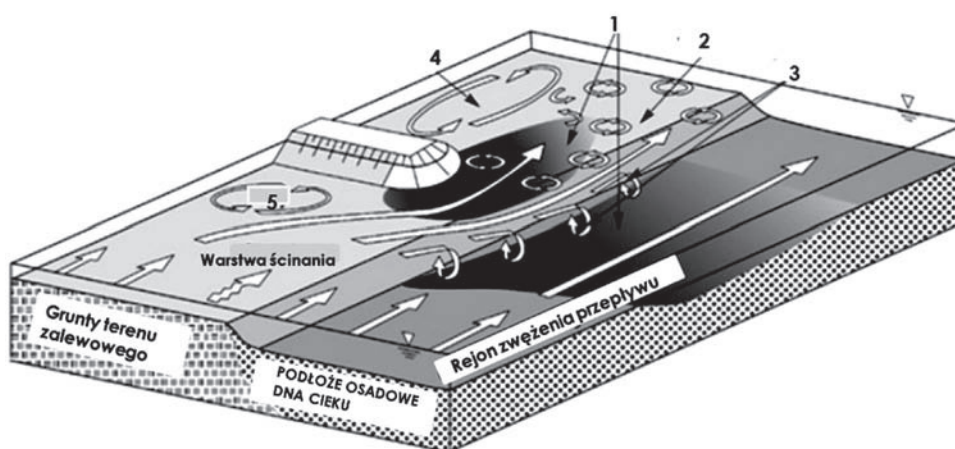
Rys. 6. Schemat rozmycia ogólnego w rejonie mostu [15]



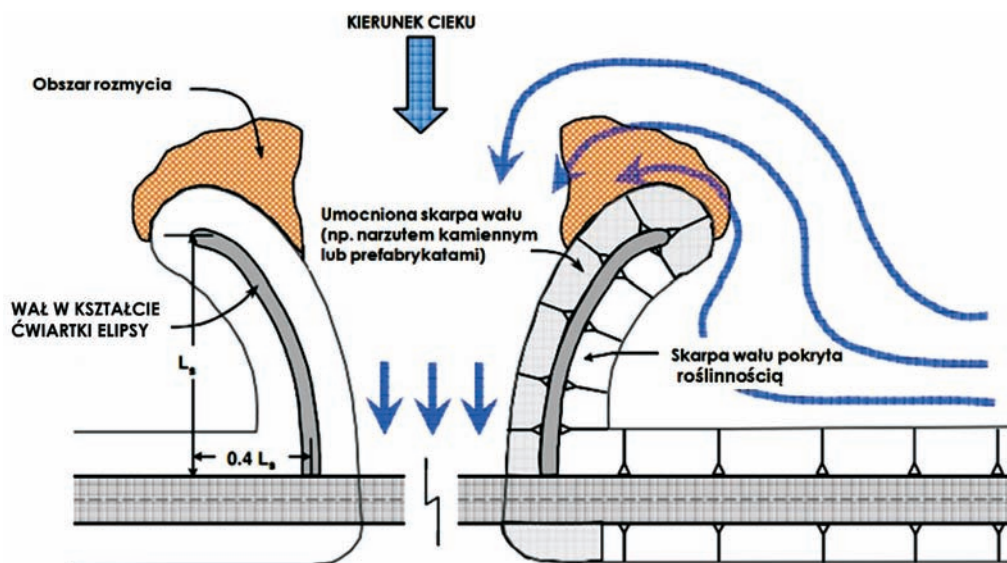
Rys. 7. Rozmycie wskutek zwężenia przepływu wody powodziowej przez rejon przeprawy mostowej: a) strefy przepływu przy moście, b) nurty i miejsca wysokiego ryzyka rozmyciem; w strefie 1 (pomiędzy przekrojami 1-2) następuje zwężenie przepływu, w strefie 2 (pomiędzy przekrojami 2-3) – występują wzmożone turbulencje przepływu i pogłębianie cieku, w strefie 3 (pomiędzy przekrojami 3-4) – przepływ cieku powraca do warunków naturalnych [24]



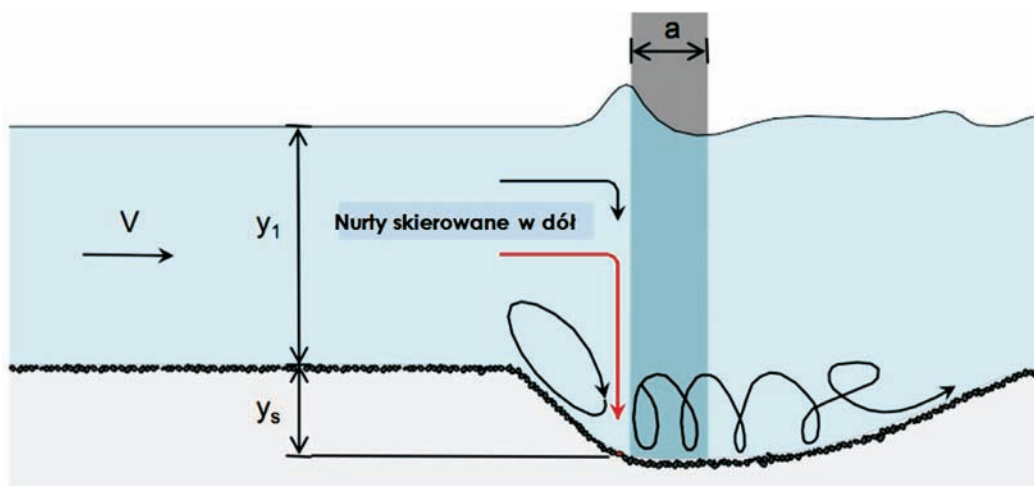
Rys. 8. Struktura przepływu cieku w wąskim korycie zawierająca wiry makroturbulencji generowane przez opływanie przyczółków [14]



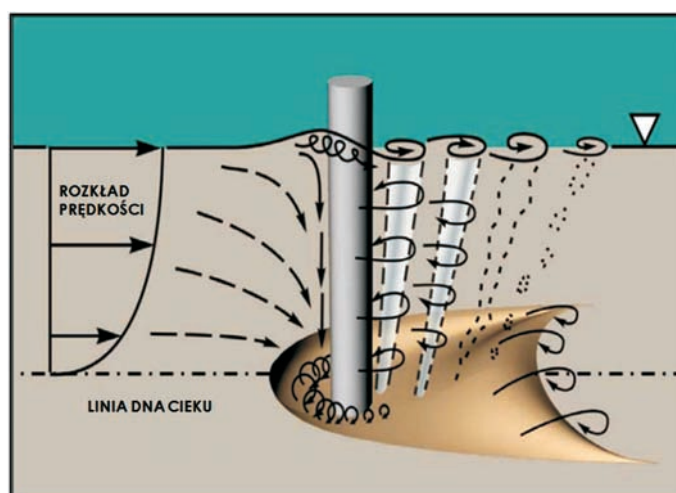
Rys. 9. Struktura przepływu: • makroturbulencje powodowane interakcją przepływu na terenie zalewowym i w głównym korycie cieku, • nurt opływający przyczółek, • wiry toru wodnego (kilwateru) nad terenem zalewowym; 1 – obszar rozmywania, 2 – obszar dużej turbulencji, 3 – wiry walcowe, 4 – rejon wirów kilwateru, 5 – rejon wirów oddzielonych [14]



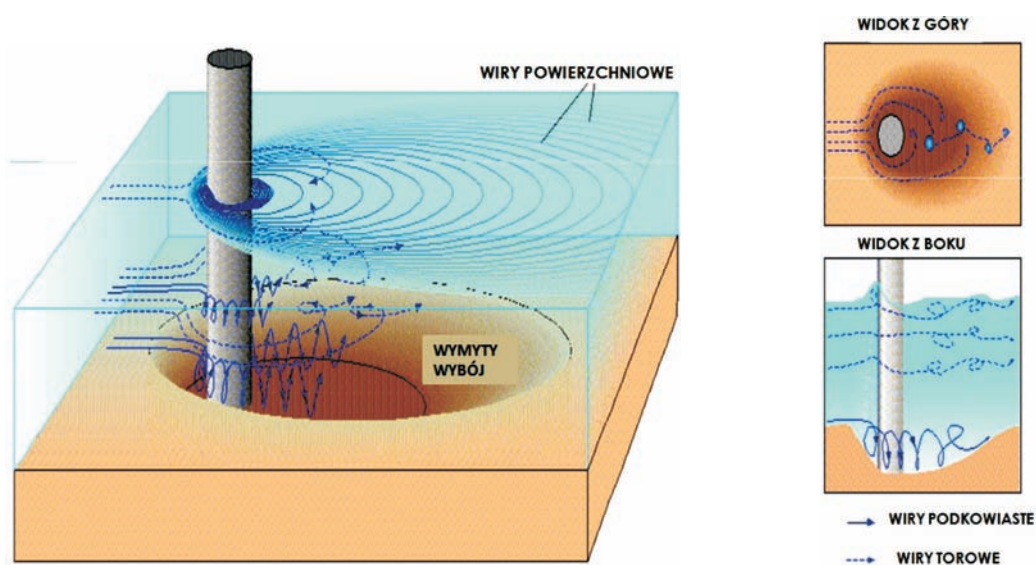
Rys. 10. Rozmycia przy wałach kierujących [12]



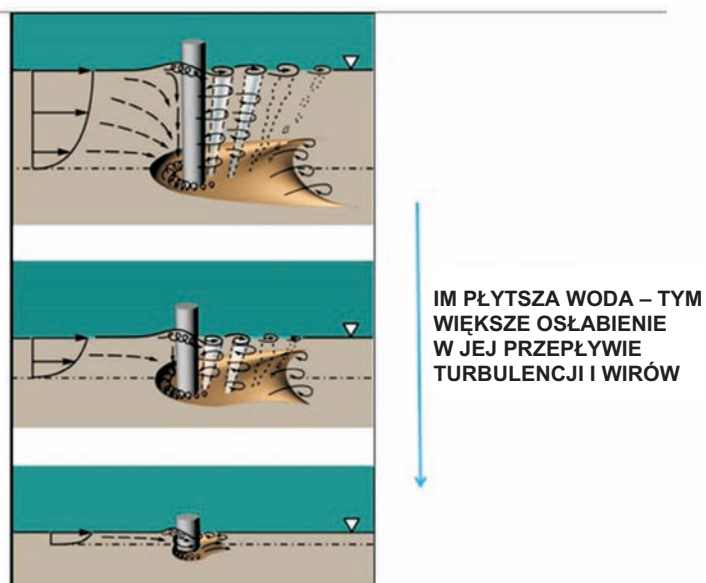
Rys. 11. Szkic obrazujący wiry rozmywające dno przy filarze słupowym [14]



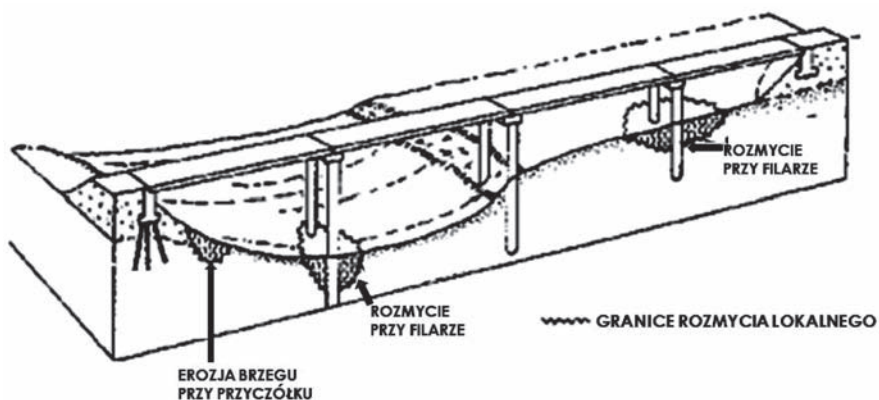
Rys. 12. Rozkład wzdłuż głębokości cieku prędkości przepływu oraz układ głównych nurtów i wirów w wodzie opływającej filar walcowy o niedużej średnicy [14]



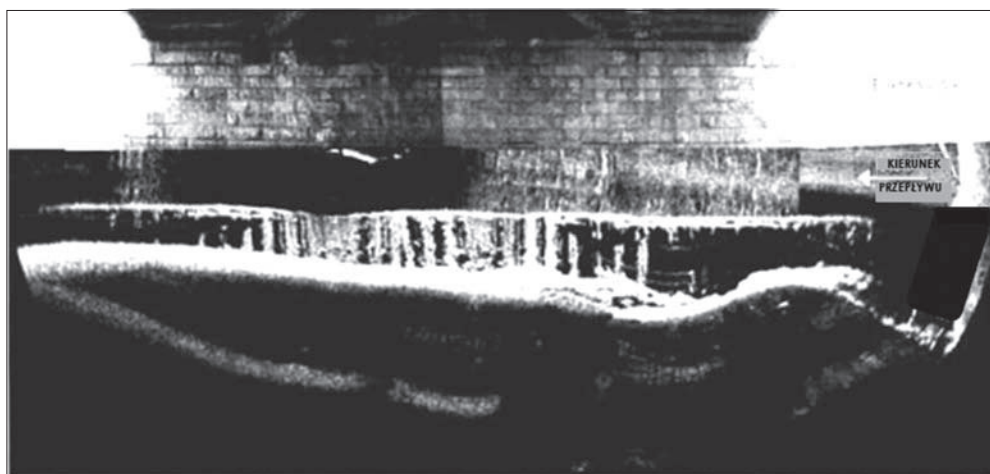
Rys. 13. Wiry podkowiaste i toru wodnego wokół filara walcowego niedużej średnicy



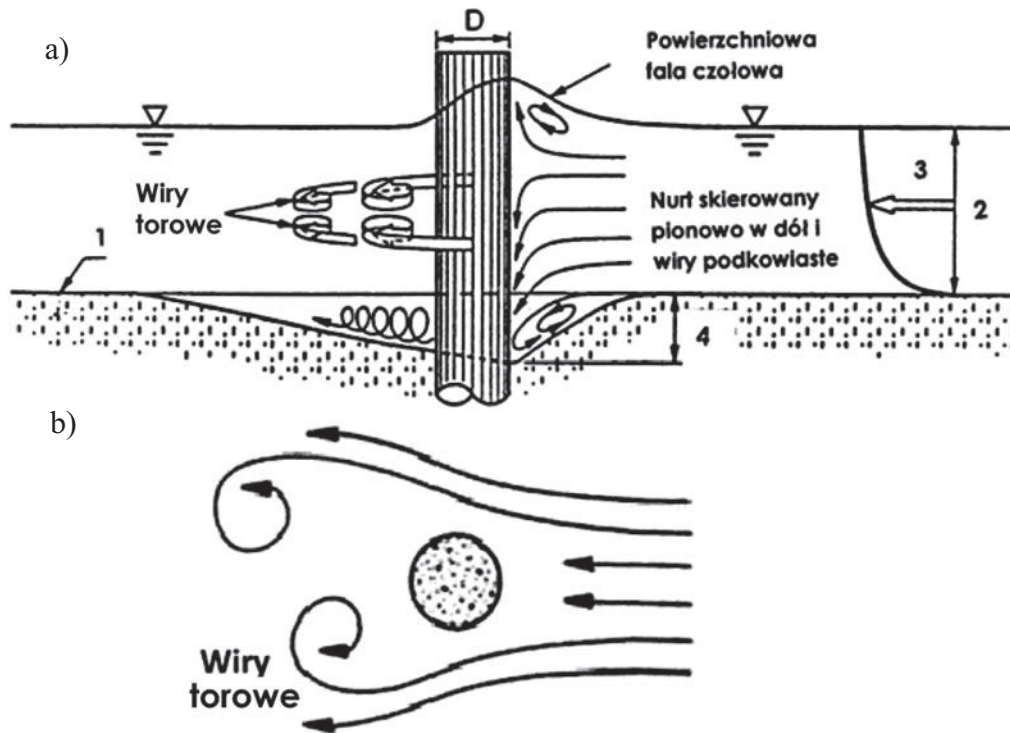
Rys. 14. Zmiana ze zmniejszeniem głębokości wody nurtów i wirów w cieku przy filarze walcowym o stałej średnicy (małej i umiarkowanej) [14]



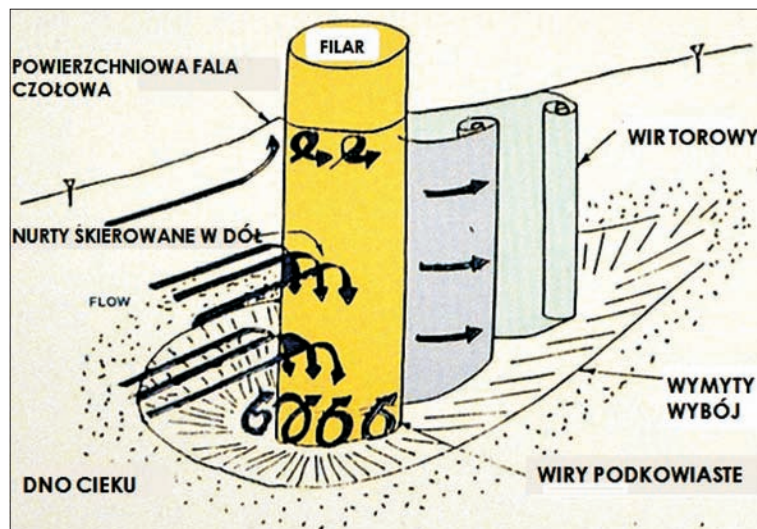
Rys. 15. Rozmycia lokalne przy filarach mostu [15]



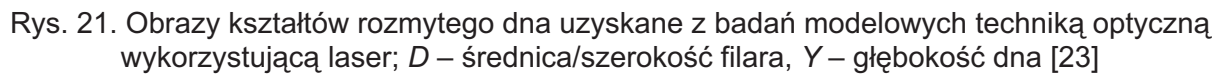
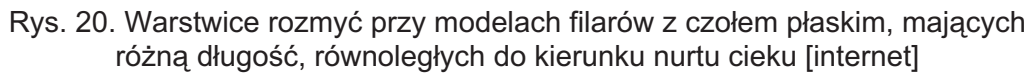
Rys. 16. Kształt rozmytego dna cieku przy filarze otoczonej ścianką szczelną; obraz uzyskany sonarem [Materiały własne firmy Escort Sp. z o.o.]

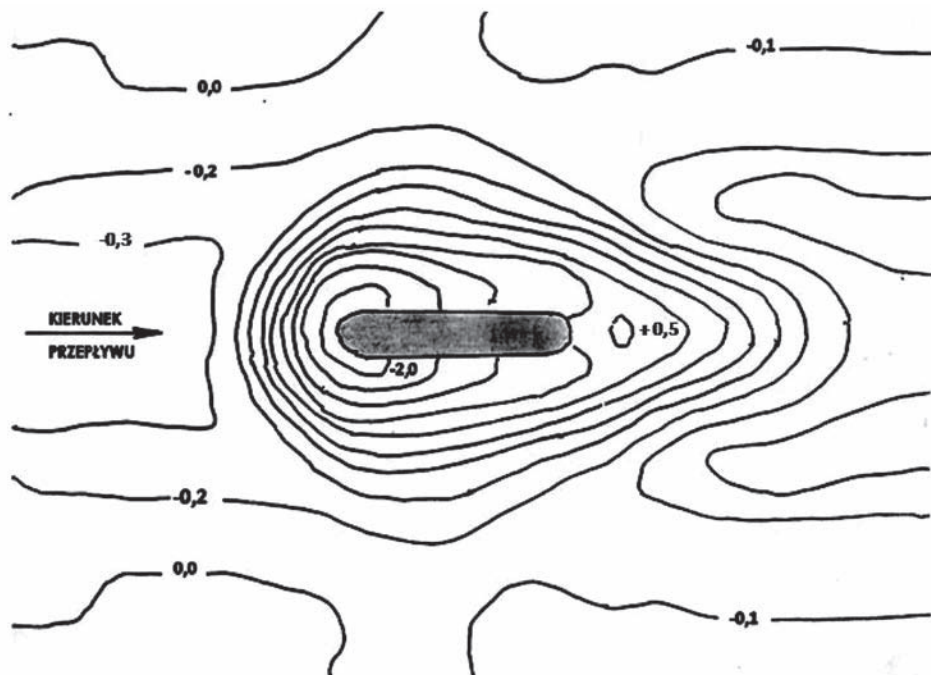


Rys. 17. Układ nurtów i wirów przy walcowym filarze w głębokiej wodzie: a) widok z boku, b) widok z góry; 1– dno cieku poza rozmyciem lokalnym, 2 – głębokość wody, 3 – kierunek i rozkład prędkości przepływu wody, 4 – rozmycie lokalne dna

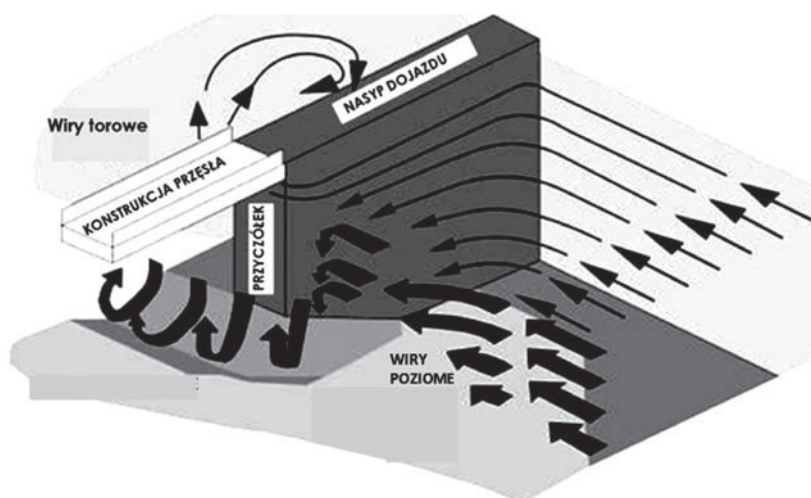


Rys.18. Struktura przepływu cieku przy filarze walcowym w warunkach przepływu „czystej wody” [11]

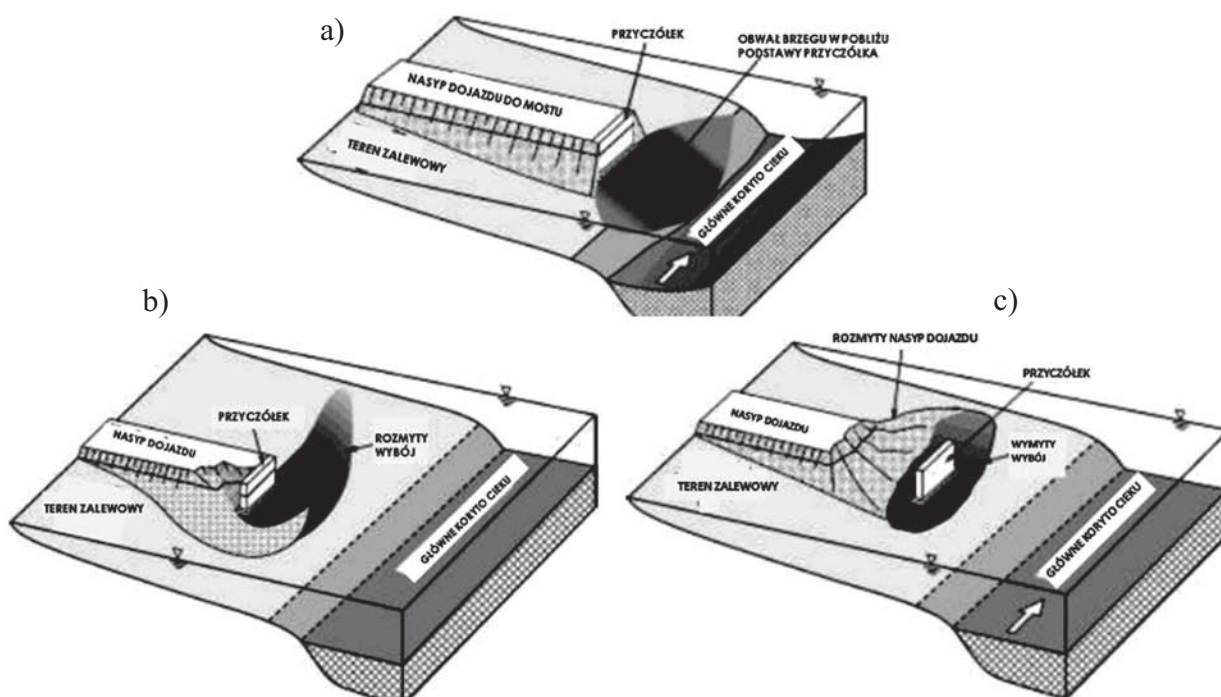




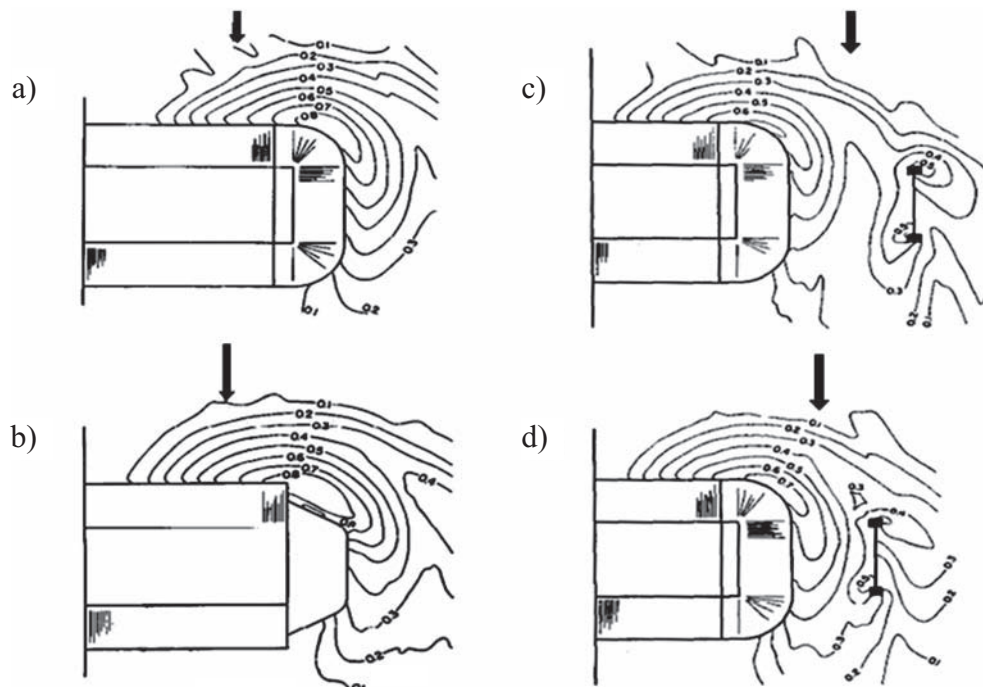
Rys. 22. Warstwice rozmytego dna przy podłużnym filarze, równoległym do kierunku przepływu cieku



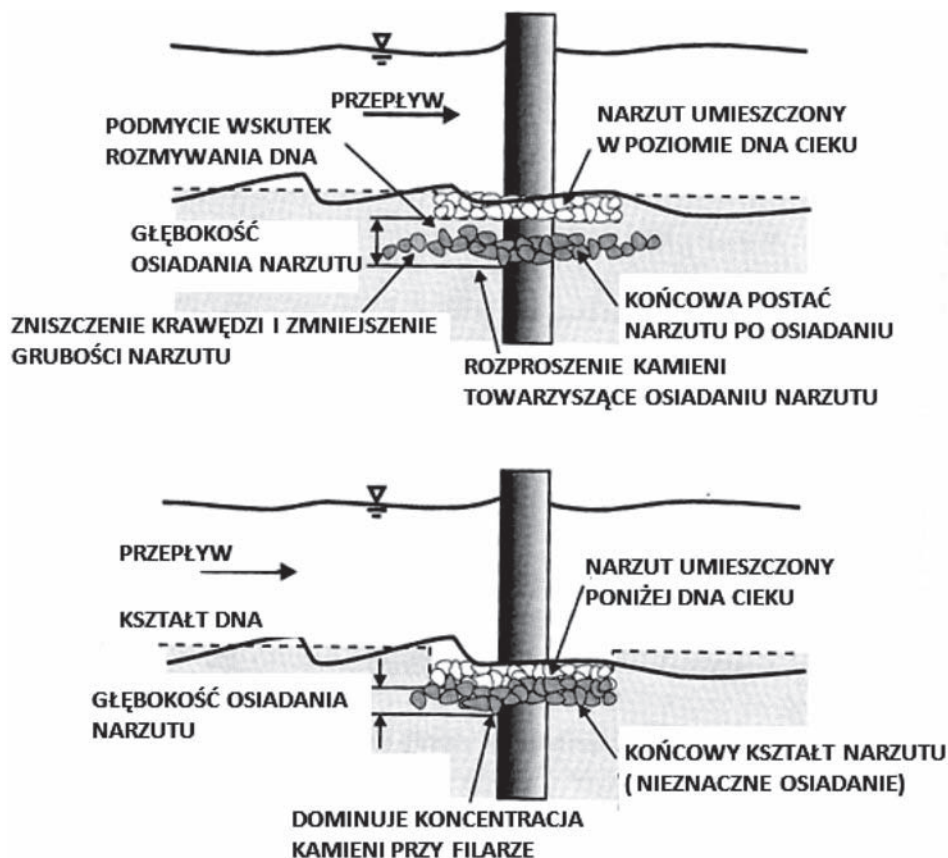
Rys. 23. Schemat ilustrujący układ nurtów i wirów powodujących lokalne rozmycia przy przyczółku [21]



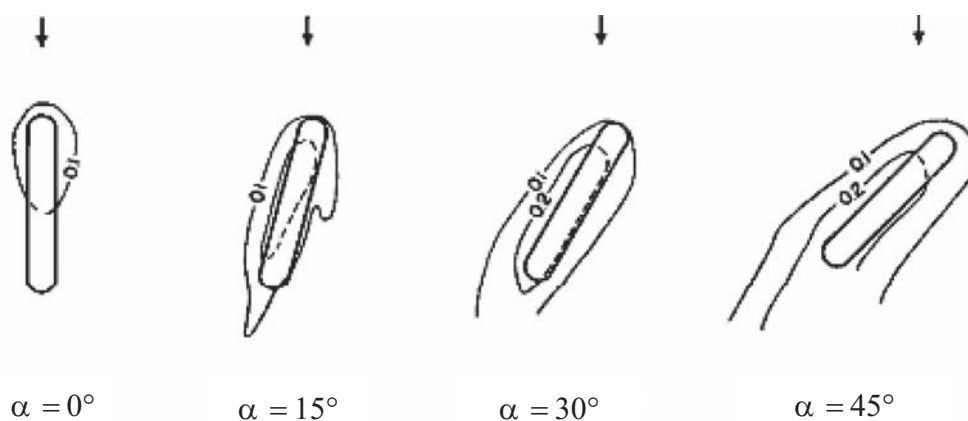
Rys. 24. Rozmycia rejonu przyczółka: a) usytuowanego blisko brzegu koryta cieku, b) i c) usytuowanego z dala od brzegu cieku (rozmycie przed przyczółkiem oraz rozmycie wokół przyczółka i wymycie nasypu dojazdu do mostu) [19]



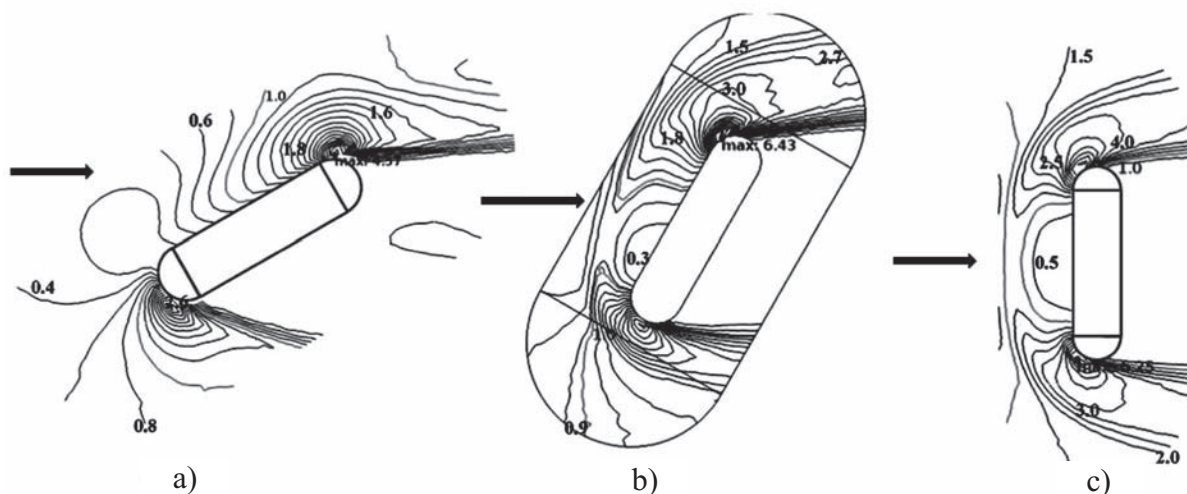
Rys. 25. Rozmycia przy przyczółkach o różnym kształcie w planie (a i b) oraz w przypadku różnej odległości przyczółka od sąsiedniego filara (c i d), według badań modelowych; strzałki pokazują kierunek przepływu cieku [8]



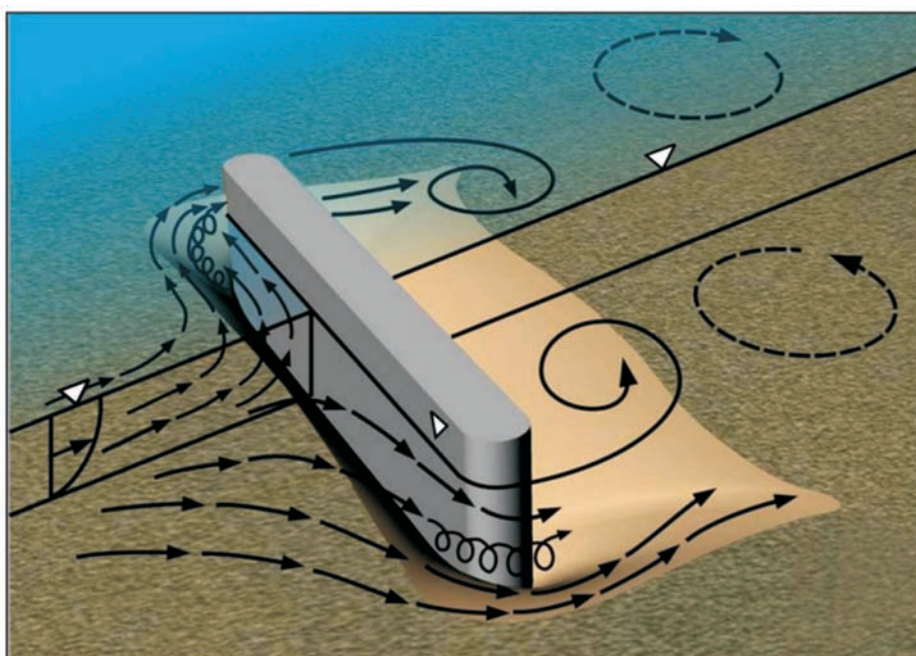
Rys. 28 Schematy niszczenia narzutu kamiennego [10]



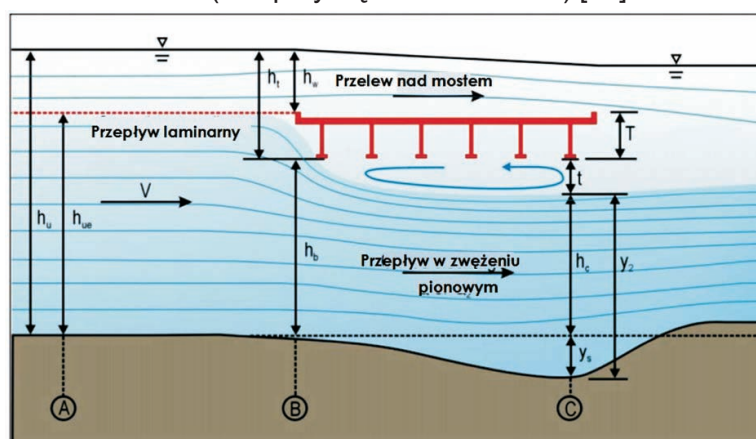
Rys. 29. Warstwyce rozmyć dna przy modelach filarów usytuowanych pod różnym kątem względem kierunku przepływu cieku (przy różnych kątach natarcia α) [8]



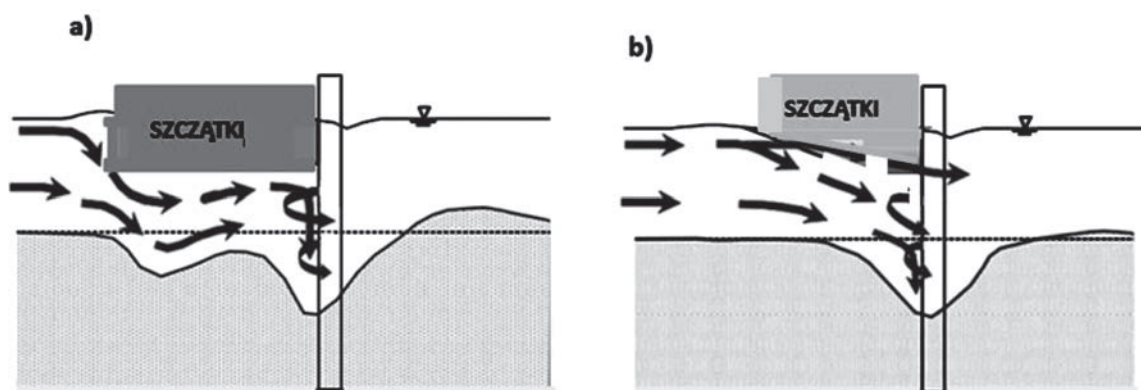
Rys. 30. Warstwy rozmyć dna cieku przy modelu filara z walcowymi powierzchniami czołowymi, przy różnym kącie natarcia na filar przepływającej wody na filar [2]



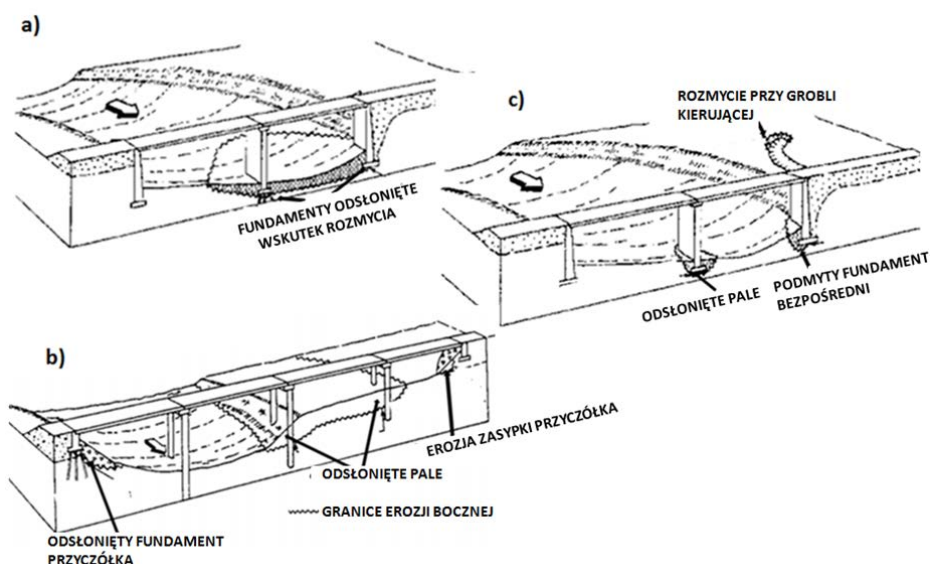
Rys. 31. Układ głównych nurtów i wirów w cieku, gdy kierunek jego przepływu jest prostopadły do filara (tzn. przy kącie natarcia 90°) [14]



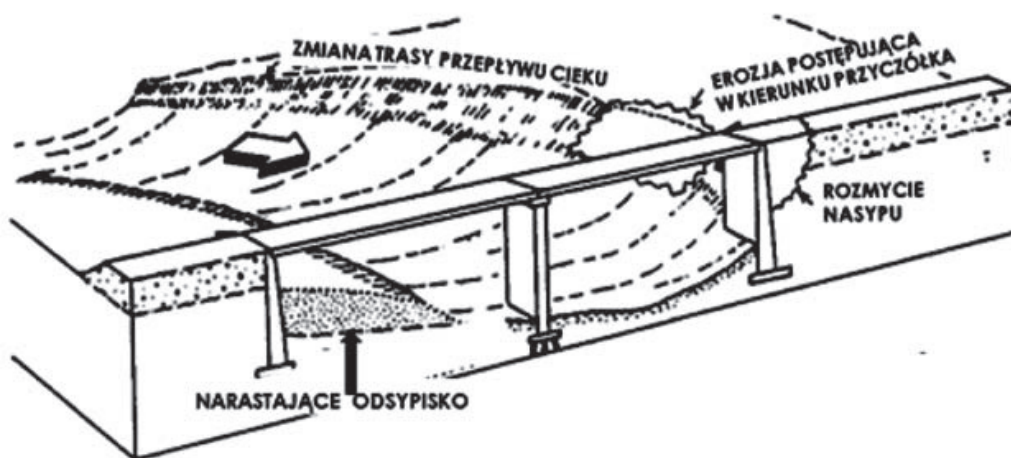
Rys. 32. Przepływ cieku przez zwężenie pionowe i jego parametry geometryczne [14]



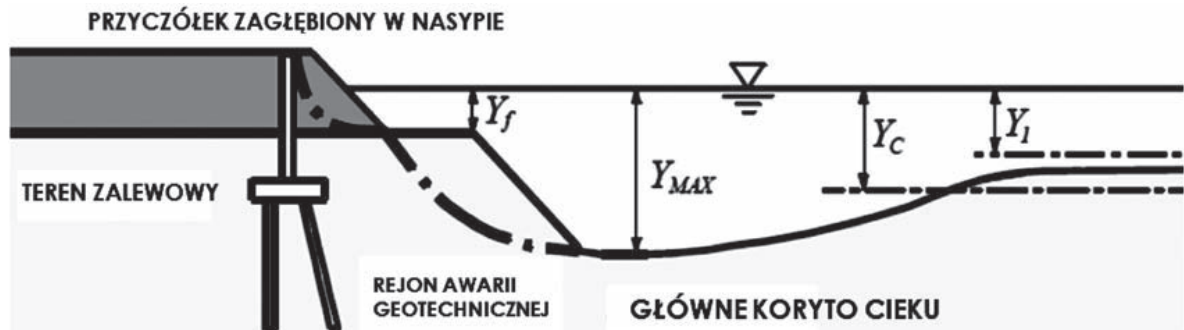
Rys. 33. Schematy warunków rozmywania dna pod ciśnieniem, które stwarzają szczątki zgromadzone przed filarem: a) gdy szczątki tworzą przeszkodę przepływu o przekroju prostokątnym, b) gdy o przekroju trapezu [18]



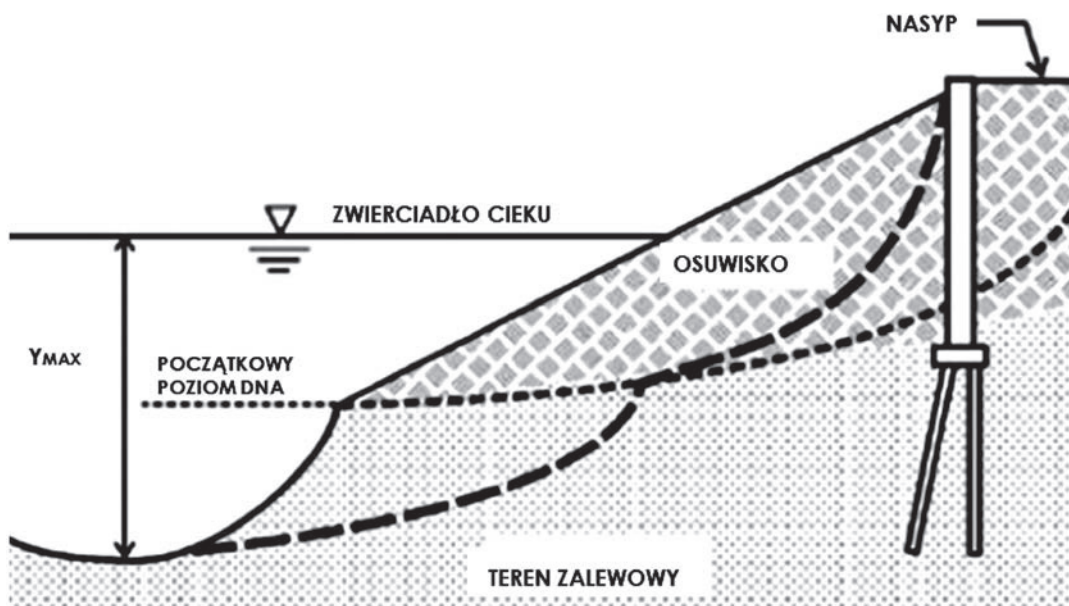
Rys. 34. Efekty bocznego przemieszczania się koryta cieku [15]



Rys. 35. Problemy hydrauliczne występujące przy moście położonym w zakolu koryta cieku [15]



Rys. 36. Geotechniczne uszkodzenie nasypu dojazdu otaczającego zagłębiony w nim przyczółek spowodowane podmyciem brzegu; są oznaczone głębokości względem poziomu wody powodziowej: Y_f i Y_l – brzegu i dna cieku przed rozmyciem, Y_c – dna po ogólnym rozmyciu koryta cieku, Y_{max} – maksymalnego rozmycia dna cieku [14]

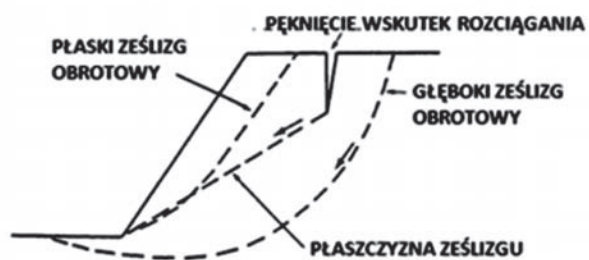


Rys. 37. Potencjalne powierzchnie osuwisk uruchamianych przez podmycia brzegu koryta cieku [14]

a) **GRUNTY NIESPOISTE**



b) **GRUNTY SPOISTE**



Rys. 38. Możliwe osuwiska brzegu z gruntu niespoistego (a) i spoistego (b), które uruchamia jego podmycie [15]

Prof. inż. Andrzej Jarominiak

Załącznik 2

Zasady monitoringu rozmyć w rejonach mostów

1. Wstęp

Poprawny monitoring rozmyć koryta cieków w rejonie mostu jest obowiązkiem jego administratora/właściciela. W przypadku katastrofy lub awarii mostu spowodowanej podmyciem konsekwencje niedopatrzenia tego obowiązku ponosi administrator/właściciel mostu.

Monitoring rozmyć jest konieczny dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom mostu. Stanowi poważny problem organizacyjny, techniczny i ekonomiczny. Aby był realizowany racjonalnie wymaga uwzględnienia wielu czynników, a mianowicie: rodzaju fundamentów mostu, miejscowych warunków geotechnicznych i hydrologicznych, morfologii cieków oraz stopnia ryzyka ekonomicznego związanego z awarią lub katastrofą mostu.

Przyjęcie właściwej metody i zakresu monitoringu rozmyć, bez ponoszenia zbędnych nakładów pracy i kosztów, ułatwia zakwalifikowanie mostu do jednej z następujących czterech kategorii:

1. Mosty wymagające najbardziej intensywnego monitoringu.

Do tej kategorii należą mosty drogowe wzdłuż autostrad, dróg ekspresowych, dróg głównych ruchu przyspieszonego i dróg głównych, mosty kolejowe na głównych liniach oraz pozostałe mosty drogowe i kolejowe uznane za zagrożone podmyciem, w tym mosty z nieznanymi fundamentami oraz których awaria spowoduje duże utrudnienia transportu mające, nie tylko lokalne, negatywne konsekwencje gospodarcze i społeczne. Dla mostów Kategorii 1 zaleca się:

- ♦ ciągły monitoring rozmyć przy podporach, których stateczność jest zagrożona podmyciem,
- ♦ przeprowadzenie w szczytowym okresie każdej powodzi, co najmniej jednorazowo, pomiaru głębokości dna cieków przy wszystkich pozostałych podporach mostu,
- ♦ stałą obserwację mostu i jego otoczenia w czasie każdej powodzi oraz
- ♦ zinventaryzowanie po zakończeniu powodzi koryta cieków: • w przekroju przeprawy mostowej, • wokół wszystkich filarów oraz • dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach.

Dla każdego mostu Kategorii 1 powinna być opracowana indywidualna instrukcja monitoringu rozmyć.

2. Mosty wymagające intensywnego monitoringu rozmyć.

Należą do nich mosty drogowe i kolejowe nie zaliczone do Kategorii 1: • oparte na fundamentach bezpośrednich niezabezpieczonych głębokimi ściankami szczelnymi, • oparte na krótkich palach, • usytuowane w zakolach niestabilnych koryt cieków, • przekraczające cieków górskie, które powodują gwałtowne rozmycia, a także • mosty, których zniszczenie spowoduje odcięcie okolicznych mieszkańców od źródeł zaopatrzenia, pomocy medycznej, straży pożarnej i środków transportu publicznego. Dla mostów Kategorii 2 zaleca się:

- ♦ przeprowadzenie w szczytowym okresie każdej powodzi, co najmniej jednorazowo, pomiaru głębokości dna cieku przy wszystkich podporach mostu i kilkakrotnego pomiaru głębokości przy podporach zagrożonych podmyciem; częstotliwość tych pomiarów powinna zależeć od intensywności zwiększania się głębokości rozmycia,
- ♦ stałą obserwację w czasie powodzi mostu i jego otoczenia oraz
- ♦ zinventaryzowanie po każdej powodzi koryta cieku: • w przekroju przeprawy mostowej, • wokół wszystkich filarów oraz • dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach.

3. Mosty wymagające umiarkowanego monitoringu rozmyć.

Mostami tej kategorii są mosty drogowe i kolejowe nie zaliczone do Kategorii 1 i Kategorii 2 oparte na fundamentach zagłębionych w grunty spoiste o dużej odporności na erozję lub w grunty, których stwierdzane rozmycia są znacznie mniejsze niż prognozowane oraz mosty mające podpory skutecznie zabezpieczone przed podmyciem. Dla mostów Kategorii 3 zaleca się:

- ♦ codzienne oględziny mostu i jego otoczenia w czasie powodzi,
- ♦ zinventaryzowanie po zakończeniu każdej powodzi koryta cieku wokół wszystkich filarów i dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach oraz
- ♦ regularne, co dwa lata, inwentaryzowanie koryta cieku: • w przekroju przeprawy mostowej, • wokół wszystkich filarów oraz • dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach.

4. Mosty wymagające jedynie pobieżnego monitoringu rozmyć.

Do tej kategorii zalicza się mosty drogowe wzdłuż dróg lokalnych o małym znaczeniu, dróg zbiorczych i dojazdowych oraz mosty kolejowe na bocznicach. Dla mostów Kategorii 4 zaleca się:

- ♦ przeprowadzenie w szczytowym okresie powodzi oględzin mostu i jego otoczenia,
- ♦ zinventaryzowanie po zakończeniu każdej powodzi koryta cieku wokół wszystkich filarów i dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach oraz
- ♦ regularne, co dwa lata, inwentaryzowanie koryta cieku: • w przekroju przeprawy mostowej, • wokół wszystkich filarów i • dna/terenu przy obu przyczółkach – z określeniem miąższości osadów zalegających w wymytych wybojach.

Obserwacje i oględziny każdego mostu oraz jego otoczenia w czasie przepływu wody powodziowej należy dokumentować fotografiami. Inwentaryzację głębokości dna cieku należy przeprowadzać sprzętem zapewniającym dokładność pomiarów nie mniejszą niż $\pm 25\text{cm}$.

Inwentaryzacja koryta cieku po powodzi bez użycia odpowiedniego urządzenia pomiarowego może nie dać poprawnych danych do oceny zakresu rozmyć, gdyż w czasie opadania wody powodziowej wymyte wyboje są zazwyczaj wypełniane osadami. Dlatego najbardziej wiarygodną metodą określania wielkości rozmyć jest monitorowanie głębokości dna cieku, odpowiednimi przyrządami, w czasie przepływu wody powodziowej. Gdy nie można zapewnić takiego monitoringu, to należy na podstawie analizy hydraulicznej, konstrukcyjnej i geotechnicznej określić dla mostu poziom i prędkość przepływu wody powodziowej, przy których prawdopodobnie wystąpi

krytyczne rozmycie powodujące zagrożenie mostu, wymagające zamknięcia go dla ruchu. Krytyczny poziom wody powinien określić projektant mostu, a gdy tego nie zrobił – kompetentny rzeczoznawca. Poziom ten należy oznaczyć na przyczółku lub filarze, w sposób widoczny z dojazdu do mostu.

2. Przyrządy monitoringu rozmyć

2.1. Uwagi ogólne

Generalnie, nie ma przyrządu, który nadaje się we wszystkich warunkach, jakie występują w rejonach przepraw mostowych. Każdy przyrząd ma swoje zalety i ograniczenia, które decydują o jego przydatności w danych warunkach miejscowych. Stąd jest wskazane monitorowanie rozmyć kilkoma rodzajami przyrządów, zwłaszcza przy dużych mostach. Wybierając oprzyrządowanie monitoringu należy m.in. uwzględnić charakterystykę hydrologiczną i geomorfologiczną cieku w rejonie przeprawy mostowej, charakterystykę techniczną i harmonogram użytkowania mostu (kiedy jest przewidziana jego wymiana), możliwość uzyskania oprzyrządowania i dostępność źródeł energii do jego zasilania, wymaganą częstotliwość pomiarów oraz problemy bezpieczeństwa operatorów przyrządów monitoringu i użytkowników przeprawy. Szczegółowe informacje na temat przyrządów stosowanych do monitoringu rozmyć są podane w punkcie **2.4 Charakterystyka przyrządów monitoringu**.

Rozmycia przy mostach są monitorowane przyrządami przenośnymi i stacjonarnymi.

Porównanie przenośnych i stacjonarnych przyrządów monitoringu rozmyć zawiera Tablica 1. Na decyzję, czy użyć sprzęt przenośny, czy stały ma wpływ ukształtowanie pomostu i wysokość górnej konstrukcji mostu nad wodą powodziową. Na przykład, gdy pomost ma wsporniki o dużym wysięgu lub jest wysoko na wodą, to stosowanie przyrządów przenośnych z górnej konstrukcji mostu jest trudne lub niemożliwe. Aby można było wykonywać przyrządami przenośnymi pomiary z łodzi, musi być pod mostem odpowiednio wysoka skrajnia pionowa i duże światło poziome. Użycie niektórych rodzajów stałych przyrządów monitoringu mogą utrudnić duże fundamenty bezpośrednie lub duże zwieńczenia pali, a także głęboka woda.

Wybór przyrządów monitoringu zawsze wymaga podjęcia uprzednio decyzji jaka powinna być zbierana ilość informacji o rozmyciach oraz określenia:

- dla oprzyrządowania przenośnego – wymaganej częstotliwości, szczegółowości i dokładności zbierania danych z uwzględnieniem, że w czasie któregoś zbierania pomiary batymetryczne (głębinowe) mogą być niewykonalne przy każdym filarze i przyczółku,
- dla oprzyrządowania stałego – liczby i miejsc instalowania przyrządów (wyposażenie każdego filara i przyczółka jest zwykle niepraktyczne lub nieefektywne kosztowo).

2.2. Przenośne przyrządy monitoringu rozmyć

Przenośnymi przyrządami monitoringu rozmyć są: • sondy fizyczne (tyczki z podziałką centymetrową (rys. 1), taśmy/linki z obciążnikami i pręty stosowane przez nurków), • sonary (m.in. jednowiązkowe, wielowiązkowe, boczne i skanujące), • aparatura do naziemnych badań geofizycznych, • przyrządy lokalizujące miejsca pomiaru głębokości cieku oraz • zdalnie sterowane pojazdy podwodne wyposażone w kamery, sonary i w czujniki laseru zielonego. Charakterystykę najczęściej stosowanych przyrządów przenośnych zawiera Tablica 2.

Przenośne systemy pomiaru rozmyć typowo zawierają cztery składniki:

- 1) instrument(y) pomiaru głębokości dna i ewentualnie prędkości przepływu cieku,
- 2) urządzenie doprowadzające instrument pomiarowy do miejsca pomiaru,
- 3) system lokalizacji w poziomie miejsca pomiaru,
- 4) urządzenie gromadzące dane.

Przenośny przyrząd monitoringu rozmyć powinien spełniać następujące wymagania:

1. musi być niezawodny w warunkach powodzi i umożliwiać wykonywanie w nich pomiarów z dokładnością pionową ± 25 cm i poziomą ± 50 cm,
2. musi być wystarczająco odporny na uszkodzenia w czasie częstych transportów i stosowania w trudnych warunkach,
3. musi mieć wymiary i ciężar umożliwiające szybkie i łatwe przewiezienie go samochodem; jest to konieczne ponieważ trudno przewidzieć w jakim cieku wystąpi powódź i jaka będzie jej wielkość, a do tego w przypadku małych cieków powódź zwykle trwa krótko,
4. czas potrzebny na przygotowanie przyrządu do monitorowania po dostarczeniu w rejon mostu nie powinien przekraczać 2 godzin; jest to wymagane, aby zminimalizować stratę możliwych uzyskania danych o rozmyciach.

Stosowanie przyrządów przenośnych jest zalecane, gdy trzeba monitorować rozmycia:

- stosunkowo rzadko przy kilku mostach przez nieduże cieki (przyrządy przenośne łatwo przewozić z jednego mostu na drugi),
- przy kilku podporach jednego mostu oraz
- na dużym obszarze w rejonie jednego mostu.

Przyrządy przenośne szczególnie nadają się do monitorowania rozmyć przy mostach z konstrukcją górną położoną nisko nad wodą. Umożliwiają dużą swobodę organizacji i szybkie uruchomienie monitoringu w warunkach powodzi. Niektóre przyrządy można obsługiwać manualnie i może je poprawnie stosować pracownik po krótkim przeszkoleniu. Nie wszystkie nadają się do monitoringu rozmyć w wodzie silnie napowietrzanej i z dużą ilością zawieszonych w niej osadów, co czyni te przyrządy nieprzydatnymi w szybkich, burzliwie płynących ciekach.

Częstotliwość zbierania danych przyrządami przenośnymi zależy od dopuszczalnego ryzyka podmycia mostu. Doprowadzanie z mostu w czasie powodzi przenośnego przyrządu monitorującego rozmycia do miejsc pomiaru głębokości cieku znacznie ułatwia użycie do tego: • żurawia samochodowego z odpowiednio dostosowanym wysięgnikiem, • pojazdu przeznaczonego do przeglądu mostów lub • wózka rewizyjnego.

Najbardziej rozpowszechnionymi przenośnymi przyrządami monitoringu rozmyć są sondy fizyczne. Można je stosować z mostu lub z łodzi. Ograniczeniami przydatności tych sond są:

- duży zakres monitoringu (wtedy pomiary sondą fizyczną są uciążliwe i kosztowne),
- uzyskiwana nieciągłość obrazu dna (otrzymuje się dane punktowe, nie jego profil),
- przepływ głębokiej, szybkiej wody powodziowej,
- duża wysokość pomostu nad wodą oraz
- nagromadzone przy moście szczątki i/lub lód.

W trudnych warunkach przepływu łatwiejsza w stosowaniu niż tyczka jest linka z ciężkim (do kilkudziesięciu kilogramów) obciążnikiem, obsługiwana lekką wciągarką (kołowrotkiem) lub żurawiem samochodowym. Aby obciążnik stawiał płynącej wodzie możliwie mały opór (był przez wodę mniej przesuwany) przyjmuje się go w kształcie torpedy (rys.2).

Do monitorowania poziomów dna cieków przy mostach w warunkach przepływu głębokiej i szybkiej wody powodziowej nadają się przenośne sonary. Umożliwiają monitorowanie rozmyć w rejonach mostów przez duże cieki. Przydatność przenośnych sonarów ograniczają:

- duże napowietrzenie wody,
- silna burzliwość jej przepływu,
- przenoszenie przez wodę dużej ilości szczątków, osadów i lodu,
- brak dostępu do miejsc pomiaru rozmyć.

Aparatura geofizyczna jest głównie stosowana do wykrywania i pomiaru maksymalnych głębokości rozmyć, które po ustąpieniu powodzi są niewidoczne wskutek ich zamulenia. Dane z badań geofizycznych obrazują profil nierozmytego dna cieków i pokazują w podłożu dawne powierzchnie dna, fundamenty mostu i warstwy geologiczne podłoża cieków.

W przypadku monitorowania rozmyć przyrządami przenośnymi trzeba zlokalizować każde miejsce pomiaru głębokości cieków. Zalety i ograniczenia metod lokalizacji są zestawione w Tabelicy 3. Przy pomiarze głębokości dna z mostu zlokalizowanie każdego miejsca pomiaru nie sprawia trudności. Natomiast w innych przypadkach dane lokalizacyjne zwykle uzyskuje się standardową na-ziemną techniką geodezyjną korzystając z tachimetru, dalmierza laserowego lub zautomatyzowanego instrumentu określającego azymuty. Jest to jednak dość pracochłonne i powolne oraz wymaga ustawienia instrumentu pomiarowego na brzegu, co w czasie powodzi – gdy woda zalewa brzeg, a roślinność nabrzeżna ogranicza linie celowania – bywa niemożliwe. Najszybszą i najdokładniejszą jest lokalizacja miejsc pomiarów przy użyciu GPS, jednak ta metoda nie nadaje się pod mostem.

Przyrządy przenośne, ze względu na:

- łatwość użycia przy różnych rodzajach mostów,
- bezpośrednie, stosunkowo łatwe uzyskiwanie w czasie powodzi aktualnych głębokości cieków wzdłuż przeprawy mostowej,
- możliwość szybkiego użycia,

nadają się bardziej niż przyrządy stałe do monitorowania rozmyć przy większości mostów w Polsce.

2.3. Stałe przyrządy monitoringu rozmyć

Są stosowane do ciągłego lub regularnego monitoringu rozmyć przy podporach mostu, np. raz dziennie, raz w tygodniu. Do stałych przyrządów należą: zautomatyzowane sondy tyczkowe, opadające pierścienie magnetyczne, sonary, wypływające czujniki rozmycia, pochyłomierze i reflektometry impulsu energii (TDR). Zalety i ograniczenia stałych przyrządów stosowanych do monitoringu rozmyć zawiera Tablica 4. Elementy systemu stałego sonaru monitorującego rozmycia dna przy filarze są pokazane na rys. 3, a sposoby zainstalowania go na moście pokazują rys. 4-7.

Stały przyrząd jest zainstalowany na podporze mostu lub przy niej, zwykle przy czole filara, albo w podłożu dna cieków blisko podpory, zawsze w miejscu największego rozmycia. Czujnik rozmycia współdziela z rejestratorem danych przyrządu. Dane mogą być odczytywane na miejscu lub przekazywane telemetrycznie do odległego punktu odbioru.

Zautomatyzowane sondy tyczkowe najlepiej nadają się w korytach cieków z dnem gruboziarnistym (gdy jest drobnoziarniste, to zdarza się blokowanie tyczki). Dokładność pomiarów ogranicza grawitacyjne zagłębianie się tyczki w dno, zwiększane przez drgania jej odcinków niepodpartych prowadnicami. Urządzenia z pierścieniem magnetycznym działają najlepiej w korytach z gruntów drobnoziarnistych. Pierścienie bywają blokowane szczątkami przynoszonymi przez wodę. Monitorowanie sonarem jest w warunkach głębokiej i szybkiej wody powodziowej znacznie łatwiejsze niż sondowanie fizyczne. Natomiast niekorzystnie wpływają na wyniki pomiarów stałym sonarem (tak, jak przenośnym):

- duża burzliwość przepływu wody,
- duża zawartości w niej szczątków gruntów,
- silne napowietrzenie wody
- duże rumowisko wleczone przez ciek.

W moście stosuje się jedno, albo kilka jednakowych lub różnych stałych urządzeń. Ponieważ umieszczenie ich przy wszystkich podporach mostu jest nieracjonalne, dlatego określa się, które podpory powinny być oprzyrządowane.

Stały przyrząd powinien bez udziału człowieka monitorować przez długi okres czasu obniżanie się dna w miejscu maksymalnego rozmywania. Należy mieć na uwadze, że miejsce to może przemieszczać się wskutek zmian geomorfologii koryta cieku zachodzących z upływem czasu i zmian przepływów cieku. Zdarzają się także pomyłki przy wyborze miejsca instalowania przyrządu. Dlatego co kilka miesięcy, zwłaszcza w czasie powodzi, należy kontrolować przenośną sondą fizyczną, czy urządzenie stałego monitoringu jest rzeczywiście nad miejscem maksymalnego rozmycia.

Aby wybrać właściwe stałe oprzyrządowanie monitoringu rozmycia i miejsce jego zainstalowania trzeba prawidłowo ustalić:

1. miejsca i rodzaje rozmyć, które mogą doprowadzić do uszkodzenia mostu,
2. głębokość rozmyć przy podporach, które mogą uszkodzić most,
3. hydrologiczne zachowywanie się cieku w rejonie mostu,
4. sytuacje, w których może nastąpić uszkodzenie systemów monitoringu,
5. możliwe miejsca przymocowania czujników rozmycia i okablowania,
6. dostępność tych miejsc,
7. trudności i koszty instalacji oprzyrządowania monitorującego,
8. ewentualne cele badawcze monitoringu.

Aby oprzyrządowanie stałe przetrwało w skrajnych warunkach polowych powinny być spełnione następujące **kryteria obligatoryjne**:

- możliwość zainstalowania przyrządu na filarze/przyczółku mostu lub w jego pobliżu,
- możliwość pomiaru maksymalnej głębokości rozmycia z dokładnością $\pm 0,25$ m,
- możliwość odczytywania z przyrządu głębokości dna z nad wody lub odczytywania zdalnego,
- przydatność do działania w warunkach nawałnic i powodzi.

Jeżeli możliwe, to powinny być także spełnione następujące **kryteria pożądane**:

- przydatność oprzyrządowania do stosowania w większości mostów użytkowanych i budowanych,
- możliwość napraw przyrządów w warunkach powodzi,
- odporność na działanie szczątków i lodu,
- odporność na wandalizm,
- możliwość obsługi i utrzymania przez personel utrzymania dróg.

2.4. Charakterystyka przyrządów monitoringu

Tyczki sondujące

Mogą być przenośne lub zautomatyzowane, zainstalowane na stałe w prowadnicach przymocowanych do podpór mostu. Na tyczce przenośnej (rys. 1) jest podziałka głębokości. Tyczkę opuszcza się do dna cieku manualnie i odczytuje wynik pomiaru w poziomie odniesienia, najczęściej na wysokości pochwytu poręczy mostu. Tyczka stała jest oparta na dnie cieku i gdy jest rozmywane, to obniża się z nim grawitacyjnie. Obniżanie tyczki powoduje zapisy poziomu jej stopy przez system licznika. Stopa musi mieć odpowiednią wielkość, aby nie zagłębiała się w dno pod ciężarem tyczki i/lub wskutek jej drgań, które wywołuje płynąca woda.

Tyczki zainstalowane na stałe są prostymi, łatwymi w stosowaniu urządzeniami mechanicznymi, niekiedy teleskopowymi. Najlepiej nadają się do monitorowania rozmyć dna z gruntów gruboziarnistych i ilastych oraz stabilności narzutów kamiennych (rys. 8). Gdy dno jest z drobnych piasków, to tyczka zagłębia się w nie pod własnym ciężarem, co powoduje, że licznik podaje błędny obraz rozmycia; w takich korytach zaleca się stosowanie urządzeń z opadającym pierścieniem magnetycznym. Tyczki stałe nie nadają się także do monitoringu rozmyć w ciekach przenoszących szczątki i duże ilości drobnych cząstek gruntów. Szczątki i grunty gromadzą się w prowadnicach tyczki powodując jej blokowanie. Ponadto, maksymalne możliwe obniżenie tyczki ograniczają drgania jej odcinka wystającego poniżej prowadnic i ciężar własny, powodujące zagłębianie się tyczki w dno.

Czujniki erozji

Ta technologia monitoringu polega na umieszczeniu na różnych głębokościach w podłożu cieku lub w narzucie kamiennym zabezpieczającym podporę mostu przed podmyciem czujników (monitorów) elektrycznych lub elektronicznych. Gdy rozmycie osiąga głębokość czujnika, to zostaje on uaktywniony przez przepływającą wodę – wysyła sygnał do odbiornika na moście lub w jego pobliżu. Prędkość przepływu cieku konieczna do aktywizacji czujnika przekracza 10 cm/s. Innym rozwiązaniem jest odbijanie przez odsłonięty czujnik sygnałów generowanych przez ich nadajnik na moście.

Jest wiele rozmaitych rozwiązań czujników erozji i pojawiają się nowe. Są relatywnie tanim uzupełnieniem innych przyrządów instalowanych na stałe. Mogą być także umieszczone z dala od mostu, co nie jest możliwe w przypadku innych rodzajów stałych przyrządów monitorujących rozmycia.

Brytyjczycy wynaleźli system monitorowania erozji zakopanymi w podłożu cieku wiotkimi taśmami z wielokierunkowymi elektronicznymi czujnikami ruchu, nazwany „Teil Tail” („Mówiący ogon”). Taśmy rozmieszczają radialnie wokół filarów na różnych poziomach pod dnem cieku.

Czujniki są połączone przewodami z odbiornikiem sygnałów elektrycznych na moście. Gdy erozja odsłania taśmę, to przepływająca woda pobudza czujnik/czujniki, które przekazują sygnały do odbiornika. Pionowa odmiana tego rozwiązania jest pokazana na rys. 9.

Amerykanie opracowali system monitoringu rozmyć stosujący zespół pojedynczych czujników osadzonych w podłożu ciekłu (rys. 10-12). Są to małe, cyfrowe, elektroniczne czujniki położenia, zawierające nadajniki sygnału radiowego pobierające małą moc. Czujnik wymaga zasilania przerywanym prądem stałym o mocy mniejszej niż 1 W. Prąd czerpie z baterii litowej. Gdy czujnik spoczywa biernie w podłożu ciekłu, to żywotność baterii wynosi 9 lat. Ponieważ nie ma możliwości sprawdzania zdolności czujników do działania, dlatego moc zainstalowana w czujniku musi być niezawodna przez długi okres czasu. Brak możliwości kontroli sprawności systemu wymaga okresowego kontrolowania innymi metodami głębokości ciekłu nad miejscami osadzenia w dnie czujników. System działa następująco: gdy rozmycie osiąga głębokość czujnika, to wypływa on na powierzchnię ciekłu, zmieniając przy tym swoją pozycję z pionowej w poziomą; zmiana uaktywnia nadajnik czujnika, który wysyła drogą radiową swój identyfikator cyfrowy. Sygnał jest wykrywany przez odbiornik na moście lub jego w pobliżu. Odbiornik stale nasłuchuje sygnałów emitowanych przez uaktywnione czujniki. Dekodujący interfejs odszyfrowuje numer aktywnego czujnika, określa gdzie nastąpiło rozmycie i do jakiej głębokości. Wszystkie dane z monitoringu kontroluje i automatycznie zapisuje urządzenie rejestrujące. Informacje o rozmyciu uzyskuje się z pewnym opóźnieniem.

Wypływające czujniki najłatwiej umieszczać w podłożach ciekłów okresowych, w czasie gdy ich koryta są suche, a także przy okazji umacniania dna przy filarze lub przyczółku, np. narzutem kamiennym oraz w czasie budowy mostu. Czujniki można instalować w podłożu ciekłu stosując wbijaną, inwentarzową rurę ze stożkowym, otwieranym zakończeniem lub konwencjonalną wiertnicę ze świdrem ślimakowym mającym rurową żerdź, wyposażoną na dole uchylne zamknięcie. Po doprowadzeniu rury/świdra do projektowej głębokości, opuszcza się czujnik przez wnętrze rury /żerdzi świdra i wyciągając ją zasypuje otwór nad czujnikiem gruntem podłoża ciekłu.

Czujniki erozji użyto w USA z technologią identyfikacji częstotliwości radiowej (RFID - RadioFrequency IDentification), rys.13. Głównymi elementami tego rozwiązania są: czytnik niskiej częstotliwości ($\approx 134,2$ kHz), transponder (radiolokacyjne urządzenie odzewowe), antena w kształcie prostokąta, z jedną lub kilkoma pętlami i system łączności. W technologii monitoringu rozmyć RFID wykorzystano zjawisko radiowego zdalnego wykrywania transpondera, gdy jest zorientowany prostopadłe do płaszczyzny anteny (zorientowany równolegle jest niewykrywalny). Transponder-y są przymocowane w określonych miejscach wzdłuż łańcucha osadzonego w dnie ciekłu, w miejscu oczekiwanego rozmycia. Antena jest zainstalowana bezpośrednio nad łańcuchem. Gdy transponder jest w gruncie, to urządzenie odzewowe znajduje się w pozycji prostopadłej do płaszczyzny anteny i jest dostrzegane radiowo. Odsłonięcie transpondera przez erozję powoduje zmianę przez przepływającą wodę położenia urządzenia odzewowego na równoległe do płaszczyzny anteny i zanik dostrzegania jego sygnału. Brak sygnału świadczy o osiągnięciu przez rozmycie głębokości transpondera. Trwają prace nad połączeniem systemu RFID i satelitarnej technologii przekazywania w czasie rzeczywistym informacji o rozmyciach do biura, które analizuje te dane.

Pochyłomierze (rys. 14 i 15)

Są stałym oprzyrządowaniem monitoringu rozmyć. O rozmyciach informują pośrednio. Mierzą obroty konstrukcji przęsła lub/i podpór mostu. Gdy podmycie powoduje osiadanie podpory, to pochyłomierz wykazuje jej przemieszczenie lub/i zmianę pochylenia opartej na tej podporze konstrukcji przęsła.

Elementami systemu pochyłomierza są: klinometry/czujniki nachylenia, rejestrator danych, aparatura telemetry i akumulator. Pochyłomierz zawiera dwa klinometry/czujniki nachylenia: jeden określa obrót wzdłuż mostu, drugi – obrót prostopadły do mostu. Klinometry i rejestrator danych wymagają ciągłego zasilania prądem stałym o mocy $1 \approx 5$ W. Jego źródłem są szczelnie, żelowe akumulatory 5 Ah lub o większej mocy. Są wspomagane przez ogniwo słoneczne o powierzchni co najmniej 465 cm^2 (np. Campbell SP5-L 5W). Przykład zainstalowania ogniwa na konstrukcji przęsła jest pokazany na rys. 16.

Ponieważ pochyłomierze mierzą ogólne przemieszczenia mostu, dlatego nie muszą być umieszczane w pobliżu miejsc występowania rozmyć tak, jak inne stałe przyrządy monitoringu. Są instalowane na konstrukcjach przęseł lub/i na podporach, powyżej wody. Czyni to instalowanie pochyłomierzy łatwiejsze i tańsze niż innych stałych przyrządów. Aby stosować pochyłomierze, most musi mieć odpowiedni nadmiar nośności. Jest to konieczne, żeby po wykryciu niepokojącego przemieszczenia było wystarczająco dużo czasu na określenie jego przyczyny i wzmocnienie lub zamknięcie mostu dla ruchu. Ponieważ nadmierny obrót elementów konstrukcji mostu może nie być spowodowany przez podmycie podpory, ale obciążenia użytkowe, zmiany temperatury, wiatr, napór wody lub gruntu, dlatego ustalenie rzeczywistej przyczyny przemieszczeń mostu wymaga czasu. Jednak, generalnie, trudno ustalić jaka wartość kąta wykazanego przez pochyłomierz świadczy o zagrożeniu mostu. Najlepiej określić kąty „alarmowe” obserwując przez kilka miesięcy (najlepiej przez rok) „normalne” ruchy mostu.

Obniżający się pierścień (rys. 17-21)

Przed podporą mostu, od strony góry cieku, gdzie występuje największe rozmycie lokalne, wbija się pionowo lub osadza w wywierconym w dnie cieku otworze stalową rurę. Na rurę nawleka się stalowy pierścień w kształcie podkowy, zwykle wyposażony w magnesy i opiera na dnie cieku. Gdy erozja obniża dno, to wraz z nim opada pierścień. Głębokość rozmycia zwykle określa się po powodzi, ustalając poziom pierścienia detektorem pola magnetycznego opuszczanym w rurze. W ten sposób uzyskuje się jedynie wartość rozmycia maksymalnego. Dokładność pomiaru wynosi $\pm 15 \text{ cm}$. Urządzenie jest proste pod względem mechanicznym. W zasadzie dobrze działa we wszystkich warunkach. Jego ograniczeniami są: blokowanie pierścienia na rurze przez szczątki przyniesione przez wodę i przemieszczenie rury, gdy nie jest odpowiednio połączona z podporą mostu.

Urządzenie wymyślono w latach 1970-tych w Nowej Zelandii do pomiaru maksymalnych rozmyć przy filarach mostów. Nazwano je „Scubamous” („Nurkująca mysz”). Początkowo stosowano rury z PCW, ale były uszkodzane przez szczątki płynące w ciekach. W rurę opuszczano detektor wyposażony w brzęczyk, który wydawał dźwięki, gdy detektor osiągał poziom dna, wyczuwał magnesy pierścienia.

Współczesne urządzenia są zautomatyzowane. Jest stosowana rura stalowa z umieszczonym w niej pionowym szeregiem wyłączników, rozmieszczonych w znanych rozstawach. Wyłączniki są sterowane magnetycznie. Gdy pierścień obniża się, to jego pole magnetyczne zamyka kolejne wyłączniki co zmienia poziom, na którym pierścień jest elektronicznie wyczuwany. Poziom pierścienia automatycznie odczytuje rejestrator danych. Zwykle robi to co godzinę i transmituje dane raz dziennie do komputera w biurze obserwacji rozmyć (np. w rejonie drogowym). Gdy pierścień osiąga określony poziom alarmowy, to rejestrator wysyła sygnał w sieć pagerów służby utrzymania mostu, podając numer mostu i kod podpory. Umożliwia to identyfikację miejsca wystąpienia groźnego rozmycia i podjęcie odpowiednich działań prewencyjnych (np. zamknięcie mostu).

Bywa też stosowane urządzenie składające się z rury stalowej, pierścienia radioaktywnego i detektora promieniowania opuszczanego w rurze. Monitoring tym urządzeniem jest zwykle zautomatyzowany.

Urządzenie z obniżającym się pierścieniem jest szczególnie przydatne w korytach z gruntów drobnoziarnistych, w których tyczka sondująca zagłębia się w dno cieku. Urządzenie jest proste pod względem mechanicznym i dość odporne na działanie szczątków i lodu, ale bywa przez nie deformowany odcinek rury niepodparty bocznie, co powoduje blokowanie na nim pierścienia. Mogą również zablokować pierścień szczątki, które dostały się pomiędzy niego i rurę. Urządzenie jest wrażliwe na nieprawidłowości obsługi i wandalizm.

Urządzenie zautomatyzowane wymaga zasilania prądem stałym $12 \approx 15$ V, o mocy $20 \approx 50$ W (zależnie od odmiany czujnika). Źródłem prądu jest szczelny żelowy akumulator 5 Ah, najlepiej z prądem obciążenia 10 A, który dostarcza moc w czasie pomiarów. Do wspomagania akumulatora jest stosowane ogniwo słoneczne 20 W.

Przed przystąpieniem do instalowania rury należy sprawdzić, czy w wybranym miejscu monitoringu nie zlegają głazy, konary drzew lub inne szczątki i je usunąć. Takie przeszkody mogą uniemożliwić wprowadzenie rury w dno cieku na wymaganą głębokość lub zablokować opadanie pierścienia. Sprawdza się czy nie ma przeszkód zagłębiając w dno cieku gładki pręt stalowy średnicy co najmniej 10 mm. Gdy próba wykaże, że nie ma przeszkód, to można rurę właściwie osadzić w dnie cieku. Należy również znaleźć najlepsze miejsce dla umieszczenia skrzynki z elektroniką i – na południowej stronie mostu – ogniwa słonecznego.

Sonar (rys. 22)

Nadajnik sonaru wysyła w kierunku dna cieku impulsy energii akustycznej, a odbiornik rejestruje czas powrotu części tej energii odbitej od dna. Na podstawie zmierzonego czasu, który upłynął od wygenerowania impulsu do jego powrotu do odbiornika oraz prędkości impulsu w wodzie, sonar określa odległość nadajnika od dna cieku, czyli głębokość wody. Prędkość propagacji fali akustycznej w wodzie zależy od współczynnika sprężystości objętościowej i masy właściwej (gęstości) wody, które zmieniają się z jej temperaturą. Dlatego, aby dokładnie określać głębokość wody należy w czasie pomiarów sonarem mierzyć jej temperaturę. Przykłady wykresów obrazujących rozmyte dno cieku uzyskane sonarem są pokazane na rys. 23 i 24.

Nazwa „sonar” jest akronimem „*SOund Navigation And Ranging*”. Wczesne systemy sonaru stosowano w czasie I Wojny Światowej pod nazwą ASDIC (*Antisubmarine Detection Investigation Committee*) do wykrywania okrętów podwodnych i gór lodowych. Systemy sonaru zostały rozwinięte w czasie II Wojny Światowej. W ostatnich latach udoskonalono technologię sonarów opracowując lepsze metody nadawania, odbioru i przetwarzania sygnałów, w tym przetwarzanie cyfrowe (DSP – *digital signal processing*).

Do monitoringu rozmyć są stosowane sonary aktywne, tzn. które generują i odbierają odbite impulsy dźwiękowe (sonary bierne tylko odbierają). Sonary śledzą także proces unoszenia przez wodę gruntu z dna cieku i wypełniania osadami wymytych wybojów.

Elementami systemu sonaru są: przetwornik i nadajnik (zwykle oba są połączone w jednej obudowie), procesor sygnałów, odbiornik (rejestrator danych), źródło zasilania systemu w energię elektryczną i przewody. Przetwornik konwertuje energię elektryczną w akustyczną. Nadajnik generuje impulsy akustyczne, ustala ich częstotliwość i moc. Procesor kształtuje wiązki impulsów

i nadaje wiązkom wychodzącym z nadajnika wąski kształt. Odbiornik zbiera odbite sygnały i stosując program uśredniający przetwarza je w postać odległości pomiędzy nadajnikiem i dnem cieku.

Przetwornik jest wyposażony w procedury samodiagnostyczne i ma zdolność do multipleksowania sygnałów (łączenia wielu sygnałów w jeden transmitowany). Wymaga zasilania prądem stałym rzędu 12 V o szczytowej mocy trwałej 10W, najlepiej ze uszczelnionego akumulatora żelowego o prądzie obciążenia 0,5 A. Do doładowywania akumulatora bywa stosowane ogniwo słoneczne o powierzchni co najmniej 470 cm² (np. Campbell SP5-L 5W).

Pomiar poziomów dna cieku wymaga zanurzenia nadajnika sonaru w wodzie, natomiast pozostałe jego elementy instaluje się powyżej wody. Sonar nie ma wytrzymałej konstrukcji. Dlatego trzeba go stosować poza trasą przepływu szczątków i lodu. Można przyjmować różne kąty pochylenia nadajnika; nie wpływa to na działanie sonaru tak długo, jak dno cieku jest prostopadłe do wysyłanego sygnału. Do przetworzenia danych z sonaru w dane poziomów dna muszą być znane: poziom powierzchni wody i zagłębienie w niej przetwornika. Poziom powierzchni wody można określić linką z obciążnikiem opuszczoną z miejsca na moście o znanej rzędnej lub mierząc laserem (rys. 25).

Sonary są stosowane zarówno jako stałe oprzyrządowanie monitoringu, jak i przyrządy przenośne. Na stałe –sonar jest umieszczany przy podporze mostu, nad spodziewanym miejscem największego rozmycia dna cieku. Przed przystąpieniem do instalowania należy usunąć w wybranym miejscu zgromadzone tam szczątki oraz znaleźć najlepsze miejsce na moście dla umieszczenia skrzynki z elektroniką systemu sonaru i dla zainstalowania ogniwa słonecznego (na południowej stronie mostu). Do użycia przenośnego sonar jest instalowany na sondzie fizycznej, na końcu przegubowego wysięgnika żurawia samochodowego lub na pływaku. Wtedy może być stosowany z pomostu. Na wysięgniku żurawia z powodzeniem nadaje się do monitoringu dna w warunkach powodzi, gdy woda płynie z prędkością przekraczającą 11 km/h. Pływającymi nośnikami sonarów mogą być deski surfingowe (do pływania na kolanach) i specjalnie zrobione pływaki. Płwak można przycumować do sondy fizycznej, wysięgnika żurawia, wózka rewizyjnego lub pojazdu do przeglądu mostu; ułatwia to sterowanie ruchem pływaka pod mostem. W odpowiednich warunkach, sonar przenośny może być doprowadzany do miejsc pomiaru głębokości cieków łodzią załogową lub bezzałogową.

Początkowo do monitoringu rozmyć przy mostach stosowano rybacki sonar jednowiązkowy i fazometr. Przyczyną ich rozpowszechnienia był niski koszt. Współcześnie są stosowane:

echo-sondy/fazometry, sonary wielowiązkowe, skaningowe burtowe (boczne),

skaningowe sektorowe, wielowiązkowe z obiektywami i sonary widoku rozmycia.

Te ostatnie są powszechnie używane w pomiarach oceanograficznych i hydrograficznych, dokładnie obrazują duże obszary dna. Są to sonary aktywne. Echosondy i sonary wielowiązkowe nadają się do ogólnego kartografowania obniżenia dna spowodowanych rozmyciami; sonar burtowy do poszukiwania obiektów podwodnych na dużych powierzchniach; sonary skaningowe sektorowe i sonary wielowiązkowe z obiektywami są stosowane głównie jako stałe oprzyrządowanie mostów.

Sonary dobrze działają w ciekach o głębokości co najmniej 3 m, płynących z prędkością mniejszą niż 4m/s. Natomiast w płytkich ciekach o głębokości do 2 m oraz płynących z prędkością powyżej 4m/s stosowanie echosond stwarza problemy. Wyniki pomiaru pogarsza: duża turbulencja przepływu wody, jej napowietrzenie, duża ilość stałych cząstek zwieszonych w wodzie, nagromadzony na dnie gruby osad, szczątki i lód. Sygnały akustyczne bywają zakłócone przez szумы powodowane wieloma odbiciami, w tym od brzegu i dna cieku oraz od filarów.

Wyniki pomiarów bardzo zależą od częstotliwości fali energii akustycznej generowanej przez sonar i od szerokości jej wiązki. Od częstotliwości sygnałów zależy także konieczna moc zasilania sonaru. Częstotliwość wpływa na dokładność obrazu. Na przykład większa niż 200 kHz zapewnia dobrą rozpoznawalność powierzchni dna, ale daje bardzo niepewne informacje o grubości zalegających na nim osadów. Natomiast impulsy energii o częstotliwości 20 kHz, wykrywają powierzchnie międzyfazowe w podłożu ciekła takie, jak dno wymytego wyboju wypełnionego osadami. Dlatego najlepiej, gdy sonar działa zarówno z częstotliwością niską, jak i wysoką. Wtedy wykrywa nie tylko mocniejsze dno rozmytego wyboju, ale także miękkie, pływne osady, które go wypełniają.

Od szerokości wiązki energii akustycznej - jej kąta wierzchołkowego, zależy szerokość na dnie ciekła „śladu” energii. Wiązka o dużym kącie ma ślad szeroki i gdy natrafia na wybój ze stromymi zboczami, to odbija się od nich powodując błędny wynik pomiaru (rys.26). Natomiast wiązka o małym kącie odbija się od dna wyboju. Dlatego zaleca się stosowanie sonarów generujących wiązki o kącie nie większym niż 8° . Rozwój technologii sonaru jest ukierunkowany na doskonalenie metod nadawania, odbioru i przetwarzania sygnałów, w tym cyfrową obróbkę danych. Sprzęt komputerowy i pakiety oprogramowania są jednak stosunkowo drogie.

Echosonda (rys. 27)

Emituje przez wodę w kierunku dna ciekła wiązkę energii akustycznej, mierzy czas w jakim energia dociera do dna i po odbiciu od niego wraca do przetwornika; na podstawie zmierzonego czasu echosonda określa głębokość wody. Częstotliwości impulsów są pomiędzy 24 kHz i 340 kHz. Wyższe dają większą rozróżnialność (rozdzielczość) i mniejszą penetrację dna. Typowo do monitoringu rozmyć stosuje się częstotliwość 240 kHz. Echosondy działające z dużą częstotliwością umożliwiają pomiar głębokości wybojów wypełnionych osadami. Dlatego mogą być stosowane także po powodzi. Najprostszą odmianą echosond są fazometry (rys. 28 i 29). Składają się z przetwornika/nadajnika sygnałów akustycznych i odbiornika odbitych/powracających sygnałów. Odbicia następują od powierzchni kontaktu ośrodków o różnej gęstości – wody i dna ciekła. Czas przepływu sygnału jest proporcjonalny do głębokości i gęstości wody.

Impuls energii generowanej przez echosondę ma postać wachlarzowej wiązki. Wiązka o większym kącie wierzchołkowym pokrywa większą powierzchnię dna, o małym – dokładniej obrazuje jego głębokości. Współczesne echosondy umożliwiają zmianę kąta wierzchołkowego i są wyposażone w GPS lub tachimetr elektroniczny lokalizujące miejsce pomiaru.

Dokładność pomiaru poziomu dna zależy od cech echosondy i stabilności jej nośnika. Jest ważne, aby echosonda przetwarzała odbierane sygnały na cyfrowe dane wyjściowe, które może zapisać komputer. Są stosowane dwie metody przetwarzania sygnałów: progowa i szczytowa. Najczęściej jest stosowana metoda progowa – pomiar odległości przetwornika od dna ciekła na podstawie czasu upływającego od wysłania sygnału akustycznego do odbicia go od dna ciekła i przekroczenia przez energię sygnału z góry ustalonego progu. W metodzie szczytowej odległość jest określana na podstawie pomiarów wartości całej odbitej energii i wartości szczytowej powracającego sygnału. Metoda szczytowa jest mniej czuła na odbicia sygnałów akustycznych w wodzie (od cząstek zawiesiny, ryb, szczątków itp.) niż metoda detekcji progowej oraz podaje głębokości raczej w pobliżu środka śladu akustycznego (jak metoda detekcji progowej), niż przy najpłytszej jego krawędzi. Współcześnie stosowane echosondy generują wiązki o kącie wierzchołkowym 3° , z częstotliwością 200 kHz; przekształcają postać analogową głębokości w numeryczną, stosując

wartość szczytową detekcji i mają zarówno kompatybilne szeregowo wyjście RS-232, jak i drukują analogowe, papierowe mapy. Sprzęt komputerowy i pakiety oprogramowania echosond są stosunkowo drogie.

Przydatność echosondy pogarszają: duża turbulencja przepływającej wody, jej napowietrzenie i duża ilość zwieszonych w wodzie cząstek. Sygnały zakłócają szумы wywołane wieloma odbiciami: od brzegów i dna cieku oraz od filarów. Ograniczeniem echosondy jest także brak możliwości punkowego pomiaru głębokości dna.

Sonar skaningowy burtowy/boczny (rys. 30)

Jego nadajnik jest zainstalowany na burcie jednostki pływającej lub w pojemniku holowanym przy lub za jednostką pływającą. Generuje wąskie wiązki sygnałów akustycznych w kształcie wachlarza, prostopadle do kierunku ruchu nadajnika impulsów. Wierzchołkowy kąt wiązki jest pomiędzy 35 i 60 stopni. Ciągły obraz dna i obiektów jest uzyskiwany przez łączenie obrazów otrzymywanych wzdłuż kierunku ruchu sonaru. Sonary burtowe działają z częstotliwością w zakresie $83 \div 800$ kHz; większa częstotliwość daje lepszą rozdzielczość, ale obrazuje mniejszy obszar dna. Zaletami sonaru burtowego są szybkość i skuteczność szczegółowego obrazowania dużej powierzchni dna, bez względu na przejrzystość wody oraz pokazywanie topografii i tekstury dna. Ograniczeniami sonaru burtowego jest m.in. niezdolność generowania szczegółowych obrazów elementów pionowych, nawet przy obrocie nadajnika oraz nie wykrywanie wąskich liniowych obiektów równoległych do wiązki.

Sonar skaningowy sektorowy

Działa podobnie jak sonar burtowy – emituje impulsy akustyczne w kształcie wachlarza, ale obraca się w stałym położeniu (burtowy wymaga wzdłużnego ruchu nadajnika) i jest umieszczany blisko dna. Obracający się nadajnik zapisuje obrazy seriami warstw. Komputer łączy je w ciągły obraz z pionową grafiką mozaikową lub podaje ukształtowania dna w widoku z góry. Operacyjne częstotliwości sonarów sektorowych są 330 kHz $\div$ $2,25$ MHz; do obrazowania dna stosuje się 675 kHz. Główną zaletą sonaru sektorowego jest szczegółowość obrazowania dna i elementów podwodnych, niezależnie od zanieczyszczenia wody.

Sonar skaningowy jest jednym z najdokładniejszych systemów obrazowania dużych obszarów dna akwenu, ale większość jego systemów nie dostarcza dokładnych informacji o głębokości wody. W sonarze skaningowym wiązki sygnałów są emitowane przez nadajnik obracający się lub poruszający wzdłuż łuku. Dlatego ten rodzaj sonaru może być stosowany w stałym położeniu. Głównym ograniczeniem sonaru skaningowego jest niezdolność do szybkiego generowania szczegółowych obrazów dużego obszaru dna.

Sonar wielowiązkowy

Generuje wiązkę impulsów w kształcie wachlarza, podobnie do sonaru skanującego, ale podaje głębokości, a nie obraz dna. Sonar wielowiązkowy jest umieszczany na jednostce pływającej lub jest przez nią holowany.

Sonar wielowiązkowy z obiektywami

Jest sonarem skanującym, który zamiast ruchomego nadajnika ma kilka umieszczanych obok siebie obiektywów. Wysyła przez nie wiązki energii akustycznej i uzyskuje obraz dna w jednym cyklu nadawania/odbioru. Częstotliwości operacyjne tego sonaru są zwykle w zakresie $0,7 \div 1,8$ MHz; wyższe dają lepszą rozdzielczość, ale mniejszy zakres. Wiele systemów sonaru wielowiązkowego

z obiektywami umożliwia manualnie nastawianie częstotliwości, a przez to zwiększanie rozdzielczości obrazu i zasięgu monitoringu. Na przykład, sonar działający z częstotliwością 0,7 MHz obejmuje około 70 m dna, a z częstotliwością 1,8 MHz – mniej niż 15 m. Zaletą sonaru z obiektywami jest niezależność obrazowania dna od przezroczystości wody, ale jakość obrazów pogarsza się z odległością od nadajnika. Daje obrazy w czasie rzeczywistym i umożliwia tworzenie filmów o jakości bliskiej fotograficznej (inne sonary dają obrazy nieruchome). Głównymi ograniczeniami sonaru wielowiązkowego z obiektywami są: relatywnie nieduży zasięg i mała szerokość wiązek energii, co utrudnia ocenianie rozmyć dużych obszarów dna.

Sonar widoku rozmycia (*Sonar Scour Vision System*)

Został opracowany na początku lat 1990-tych z inicjatywy Stowarzyszenia Amerykańskich Nurków Śródlądowych (*American Inland Divers, Inc - AIDI*). Zawiera nadajnik obrotowy, omiatający o wysokiej rozdzielczości (675 kHz). Nadajnik jest zainstalowany w stosunkowo dużym, hydrodynamicznym podwodnym pojemniku, którego holowanie z prędkością przekraczającą 6 m/s wywołuje siłę skierowaną w dół, odpowiednią do prędkości przetwornika. Gdy woda powodziowa płynie z co najmniej taką prędkością, to pojemnik można zawiesić, na przykład, na wysięgniku żurawia ustawionego na moście. Z jednego stanowiska można tym sonarem wykonać pomiary w promieniu do 100 m. Dane zebrane wzdłuż obu stron mostu można łączyć w czasie rzeczywistym w trójwymiarowy, wyraźny obraz dna z obu stron mostu, obejmujący obszar szerokości do 90 m.

Reflektometr czasu przebiegu impulsu energii elektromagnetycznej (TDR - *Time Domain Reflectometers*)

Generator wysyła impulsy elektromagnetyczne w dół jednej z dwóch sond (stalowych prętów, ewentualnie rur) zagłębionych w dnie cieku. Odbiornik mierzy czas powrotu przez drugi pręt energii odbitej w powierzchniach kontaktu ośrodków o różnych cechach dielektrycznych. Umożliwia to określanie poziomu dna, które jest powierzchnią kontaktu woda-grunt. Mierzając czas przebiegu impulsów w realnym czasie można korelować zmiany poziomu dna z procesami przenoszenia gruntów przez wodę oraz określać wpływ warunków hydraulicznych i lodowych w cieku na erozję jego koryta.

Reflektometry elektromagnetyczne zostały opracowane do lokalizacji nieciągłości linii przesyłowych energii elektrycznej. W inżynierii budowlanej są stosowane do badań betonu, wgłębnej stabilizacji gruntów, głębokości zamarzania gruntu, określania gęstości suchego gruntu, monitorowanie poziomu wody gruntowej, rozkładu wilgotności w gruncie, pomiarów jego przemieszczeń itp. Przydatność TDR do monitoringu rozmyć wynika z dużego kontrastu pomiędzy stałymi dielektrycznymi wody (około 81) i gruntów w dnie cieku (stała gruntów suchych jest pomiędzy 2 i 7, mokrych – zależy od stopnia nasycenia gruntu wodą).

Generator system TDR wysyła w sondę osadzoną pionowo w dnie cieku impuls elektromagnetyczny z szybko rosnącą częstotliwością: od około 20 Hz do 1,5 GHz. Część energii impulsu odbita w powierzchni kontaktu woda/dno wraca do nadajnika. Pozostała część energii przechodzi przez powierzchnię kontaktu i płynie do następnych granic zmiany stałej dielektrycznej (lub do końca sondy). Odbiornik mierzy czas, w którym odbity sygnał wraca do nadajnika. Znając prędkość fali, można obliczyć odległość jej przebiegu, w tym głębokość dna cieku. Schemat przepływu danych uzyskanych reflektometrem (TDR) z miejsca badania rozmyć do Internetu jest pokazany na rys. 31.

Reflektometry TDR nadają się do stosowania w warunkach powodziowych i oblodzenia. Można nimi wykrywać zmiany głębokości dna mniejsze niż 2,5 cm. Urządzenie wymaga zasilania prądem zmiennym o mocy większej niż 100 W.

TDR bywa także stosowany jako system czujników erozyjnych. Wtedy osadza się metodą wiertniczą w dnie cieką, pionowo, kabel elektryczny z przymocowanymi w jednakowych rozstawach kilkoma małymi kołnierzami. Rozmycie dna wystawia kołnierz na działanie przepływającej wody, powodując poprzeczną deformację kabla – od niej odbija się impuls generowany przez TDR. Analizując kształt fali odbitego impulsu można określić głębokość rozmycia. Wyerodowienie następnego kołnierza czyni poprzedni nieużytecznym.

Ostatnio opracowano dla TDR innowacyjną sondę, którą cechuje czułość, dokładność i odporność na działanie szczątków niesionych przez wodę. Jest umieszczana w otworze wywierconym w dnie cieką. Elementami sondy są dwie taśmy metalowe ze stali wysokowęglowej, każda ma szerokość 12,7 mm, grubość 0,254 mm. Są przedzielone dwumilimetrową warstwą teflonu. Aby zapewnić sztywność i wytrzymałość sondy, taśmy są umieszczone w ceowniku z włókna szklanego o wymiarach $50 \times 14 \times 3,2$ mm i przymocowane do niego taśma klejącą. Oporność właściwa sondy w powietrzu wynosi blisko 50 omów, stała dielektryczna taśmy klejącej – około 3,0, teflonu 2,1, powietrzna 1,0, włókna szklanego 6. Potencjał elektryczny w środku taśmy ma wartość 1 V, a na zewnątrz taśm –1 V. Indukcja elektryczna 0. Pole elektryczne sondy zanurzonej w wodzie jest określane metodą elementów skończonych.

Reflektometr optyczny czasu przebiegu impulsu światła energii (OTDR - *Optical Time Domain Reflectometers*)

Wykorzystuje światłowód. Dotychczas światłowody stosowano do wieloletnich pomiarów odkształceń konstrukcji, głównie z betonu sprężonego. Do monitoringu rozmyć dostosował reflektometry optyczne Korpus Inżynierów Armii USA. Dolny odcinek światłowodowego czujnika rozmyć, zakończony rodzajem martwej kotwicy (balastem) jest wprowadzony w dno cieką do głębokości większej niż prognozowane maksymalne rozmycie (rys. 32). Górny odcinek światłowodu jest w wodzie. Z górnym jego końcem jest połączony zespół optoelektroniczny, który generuje w światłowód cyklicznie impulsy światła, odbiera impulsy odbite od nierówności ścian światłowodu, określa czas obiegu impulsów i na tej podstawie oblicza głębokość, na której nastąpiło odbicie. Impuls odbija się w poziomie kontaktu wody z dnem, gdzie występuje odkształcenie światłowodu. Zespół optoelektroniczny przekazuje dane do systemu przetwarzania, analizy i ekspozycji. Światłowód jest w elastycznej osłonie z miękkiego plastyku. Wzdłuż światłowodu, wewnątrz osłony, znajduje się induktor umożliwiający powstawanie mikrowięć mających postać poprzecznych grzbietów. Od nich odbija się impuls światła.

Zaletą OTDR jest niezależność od gruntów w podłożu cieką. Tej cechy nie mają reflektometry elektromagnetyczne TDR, a w niektórych gruntach, zwłaszcza ilastych, występują silne tłumienia i osłabianie odbijanych impulsów – wtedy system TDR ich nie wyczuwa.

Czujnik światłowodowy z siatką/filtrem Bragg'a (FBG - *Fiber Bragg Grating*)

Zasada jego działania jest zbliżona do zasady OTDR. Elementem tego czujnika jest pojedynczy światłowód zawierający siatkę Bragg'a, zainstalowany wzdłuż pręta wbitego w dno cieką. Górny odcinek pręta wystaje nad dno. Przepływająca woda wygina ten odcinek. Obniżenie dna zwiększa długość wystającego odcinka, co powoduje wzrost wygięcia pręta, wykrywany przez

czujnik FBG (rys. 33). Aktualną głębokość dna cieku określa się mierząc długości fal świetlnych odbitych w światłowodzie od siatki Bragg'a w poziomie dna; siatka działa jak selektywne zwierciadło/filtr optyczny.

Przyrząd wykorzystujący film piezoelektryczny

Zawiera pionowy układ czujników filmowych, które wykrywają obniżenie dna cieku spowodowane erozją, generując sygnały elektryczne. Gdy czujnik znajduje się w podłożu cieku, wtedy jest nieruchomy; gdy rozmycie dna odsłonia czujnik, to porusza nim płynąca woda, co wywołuje w czujniku słaby prąd elektryczny. Pojawienie się prądu umożliwia określenie poziomu rozmycia, zaś znik prądu – osadzanie gruntu przy czujniku. Przyrząd z filmem piezoelektrycznym jest bardzo czuły, co niekiedy może prowadzić do błędnych wyników pomiarów. Elementami przyrządu są czujniki z filmem piezoelektrycznym, rejestrator danych, aparatura telemetryczna i akumulator.

Dla ciągłego pomiaru i rejestracji danych jest konieczny prąd stały o mocy $1 \div 5$ W. Źródłem zasilania jest szczelny, żelowy akumulator 5 Ah lub mocniejszy. Powinien być wspomagany przez ogniwo słoneczne o powierzchni co najmniej 465 cm^2 (np. Campbell SP5-L 5W).

System pneumatycznego wykrywania rozmyć (PSDS - *Pneumatic Scour Detection System*)

Jest przeznaczony do monitorowania w czasie rzeczywistym rozwoju rozmyć w najtrudniejszych warunkach powodziowych. Elementami systemu PSDS są:

- grubościenna, stalowa rura o średnicy co najmniej 100 mm, z osadzonymi wzdłuż niej porowatymi czopami,
- przewody powietrzne połączone z czopami i wyprowadzone z rury,
- rejestrator danych,
- pompa powietrzna,
- łącze telekomunikacyjne.

Czopy mają średnicę $6 \div 12$ mm, są zrobione ze spiekanego szkła. Rejestrator i pompa są w obudowie zabezpieczającej je przed osobami niepowołanymi, przymocowanej do górnego końca rury. System wymaga zasilania prądem zmiennym o mocy większej niż 100 W. Istotą działania systemu PSDS jest pomiar różnicy oporów przepływu powietrza w środowisku otaczającym rurę. Powietrze tłoczy pompa przez przewody i porowate czopy. Ciśnienie tłoczenia zapisuje rejestrator danych. Inne ciśnienie występuje, gdy czop jest w wodzie, inne gdy w warstwie osadów i jeszcze inne – gdy w gruncie naturalnym, przy czym zależy także od cech gruntu. Wartości ciśnienia powietrza tłoczonego przez poszczególne czopy są transmitowane w czasie rzeczywistym przez łącze telekomunikacyjne do biura analizującego dane z monitoringu rozmyć. Dzięki swej wytrzymałości rura jest odporna na uszkodzenia, gdy w czasie zagłębiania w grunt trafia na przeszkodę, na przykład, na pal fundamentu oraz gdy uderzają w nią szczątki płynące z wodą. Oprócz tego, zaletą PSDS jest brak części mechanicznych, które mogą zostać unieruchomione przez szczątki – jak opadający pierścień.

Powierzchniowe instrumenty geofizyczne

Generują fale energii i mierzą długość okresu czasu pomiędzy wysłaniem i powrotem fal odbitych. Impuls energii jest przesyłany w wodę i odbija się w powierzchniach kontaktu materiałów o różnych cechach fizycznych. Główna różnica pomiędzy możliwościami technologii geofizycznych i sonarów polega na tym, że instrumenty geofizyczne pokazują anomalie i granice zmian cech gruntów pod dnem cieku do głębokości kilku – kilkudziesięciu metrów, natomiast sonar „widzi”

powierzchnię kontaktu woda-grunt i tylko nieznacznie penetruje w podłoże ciekłu. Dlatego technologie geofizyczne nadają się do lokalizowania po powodzi zamulonych wybojów i oceny ich głębokości oraz do znajdowania obiektów w podłożu ciekłu i rozpoznawania w nim warstw gruntu.

Z powierzchniowych technologii geofizycznych do monitorowania rozmyć są stosowane głównie systemy radarowe i sejsmiczne. Różnią się rodzajem generowanych sygnałów i przez to wykrywaniem powierzchni międzyfazowych o różnych właściwościach fizycznych.

Rozpowszechnienie w monitoringu rozmyć technologii geofizycznych ograniczają duże koszty stosowanego w nich sprzętu i doprowadzania go do miejsc badań oraz skomplikowanie tego sprzętu i trudności interpretowania uzyskanych nim danych. Dlatego monitoring geofizyczny wymaga specjalnego wykształcenia operatorów sprzętu oraz interpretatorów wyników badań. Te wady są nieco złagodzone w nowszych opracowaniach sprzętu. Sprzęt nowych generacji jest tańszy i umożliwia komputerową obróbkę uzyskiwanych danych. Jednak nadal koszt i skomplikowanie technologii geofizycznych utrudniają ich stosowanie. Ponadto często jest konieczne wywiercenie w dnie ciekłu otworu kontrolnego dla ustalenia zalegających pod nim gruntów i posiadanie informacji o fundamentach podpór mostu, aby właściwie skalibrować i zinterpretować wyniki badań geofizycznych.

Przetworniki aparatury geofizycznej generujące sygnały o małej częstotliwości wytwarzają wiązki energii z większymi kątami wierzchołkowymi niż przetworniki, które generują sygnały dużej częstotliwości. Szeroki kąt wiązki powoduje liczne odbicia sygnałów od obiektów znajdujących się nie tylko pod odbiornikiem, ale także wokół niego. Sygnały mogą odbijać się od brzoju, fundamentu filara lub przyczółka i obiektów zalegających na dnie ciekłu. Echa te nakładają się na odbicia sygnałów pomiaru głębokości.

Innym powodem interferencji danych geofizycznych bywają wielokrotne odbicia sygnałów. Część energii odbitej od dna ciekłu może ponownie odbić się od powierzchni kontaktu woda/powietrze i powrócić do dna. Od niego znów zostaje odbita i powracającą przechwytyje odbiornik. Jest to nazywane podwójnym lub wielokrotnym przebiegiem woda-dno. Energia wielokrotnie odbijana kontynuuje obieg w wodzie. Wielokrotne odbicia woda-dno są najbardziej widoczne, gdy dno cechuje duży współczynnik odbicia, jak twarde podłoża koryt ciekłów.

Georadar (GPR - *Ground Penetrating Radar*)

Generuje sygnały elektromagnetyczne (typowo o częstotliwości 80-300 MHz), które odbijają się w powierzchniach kontaktu materiałów o różnych cechach elektrycznych. Georadar nadaje się do stosowania w wodzie mającej przewodność właściwą $155 \mu\text{S}/\text{cm}$, o głębokości do 6 m. Energia elektromagnetyczna jest transmitowana przez pływającą antenę. Sygnały elektromagnetyczne penetrują materiały rezystancyjne i nieprzewodzące. O rozróżnialności georadaru decyduje częstotliwość generowanych sygnałów: przy stosowaniu anteny 300 MHz wynosić 0,3 m, a anteny 80 MHz – 0,75 m. Sygnały wysyłane anteną 100 MHz penetrują grunt praktycznie do głębokości 6 m (w korzystnych warunkach, podobno, nawet do 12 m).

Georadar wykrywa warstwy gruntu miąższości 0,60 m i osady zalegające na dnie ciekłu, określa geometrię wymytych wybojów i miąższość wypełniających je osadów. Jest zatem przydatny do określania rozmyć historycznych, które występowały w czasie poprzednich powodzi. Sygnały elektromagnetyczne są szybko tłumione w wodzie słonej i w gruntach przewodzących elektryczność. Dlatego georadar nie nadaje się do stosowania w warunkach słonej wody, w wilgotnych pyłach i ilach oraz w zagęszczonych gruntach ziarnistych.

Profilowanie odbiciami sejsmicznymi (CSP - Continuous Seismic Profiling)

Przetwornik tego systemu jest umieszczony tuż pod powierzchnią wody. Generuje sygnały akustyczne podobnie jak sonar, ale o niższej częstotliwości (typowo 3,5-16,0 kHz). Podobnie jak sygnały sonaru, sygnały sejsmiczne są rozpraszane przez pęcherze powietrza w wodzie i dużą koncentrację zawieszonych w niej drobnych cząstek gruntów. Dlatego w takich warunkach technologia CSP jest nieprzystdatne.

Sygnały przebiegają od przetwornika/nadajnika CSP, przez wodę w podłoże ciek. Gdy sygnał natrafia na zmianę impedancji akustycznej jaka jest w powierzchni kontaktu woda/dno, to część energii sygnału odbija się i wraca do zwierciadła wody. Pozostała część przenika w grunt. O ilości energii odbitej decyduje współczynnik odbicia powierzchni kontaktu, który zależy od impedancji akustycznej materiału powyżej i poniżej tej powierzchni. Obraz podłoża ciek uzyskany metodą profilowania odbiciami sejsmicznymi jest pokazany na rys. 34.

O maksymalnej głębokości i rozdzielczości profilowania sejsmicznego decyduje częstotliwość generowanych sygnałów. Sygnał wysokiej częstotliwości ma małą długość fali i jest szybko tłumiony w podłożu ciek, ale ma wysoką rozdzielczość i wykrywa powierzchnie kontaktu warstw gruntów. Natomiast sygnał o małej częstotliwości ma dużą długość fali i jest mniej tłumiony, ale cechuje go gorsza rozdzielczość. Głębokość penetracji zależy także od cech gruntów podłoża ciek i od kąta wierzchołkowego wiązki sygnałów. W podłoża z gruntów drobnoziarnistych sygnały penetrują 3- do 5-krotnie głębiej niż z gruntów gruboziarnistych oraz penetrują głębiej, gdy kąt wierzchołkowy wiązki sygnałów jest mniejszy.

Do monitorowania rozmyć są stosowane dwie odmiany technologii CSP: sygnałów o częstotliwości stałej oraz o częstotliwości skokowej. Technologia stałej częstotliwości używa wąskie pasma sygnałów zwykle o częstotliwości 3,5; 7,0 lub 14 kHz. Stosująca sygnał o stałej częstotliwości 14 kHz nadaje się do użycia w wodzie o głębokości do 1,2 m, może w pewnych warunkach gruntowych penetrować podłoże ciek do głębokości 6 m i wykrywać w wymytych wybojach osady miąższości 0,3 m. Technologia stałej częstotliwości stosuje sygnał 3,5 kHz, nadaje się w wodzie głębokości do około 2 m, może penetrować podłoże do głębokości 30m i wykrywać w wybojach osady miąższości 0,75 m. Natomiast technologia skokowej częstotliwości stosuje sygnały w zakresie od 2 do 16 kHz, nadaje się w płytkiej wodzie – o głębokości do 0,3 m, penetruje podłoża z pyłów i ilów do 60 m i wykrywa w wymytych wybojach osady grubości 7-8 cm. Jakość danych CSP można poprawić stosując układ aktywnego pierścienia tłumienia i podwójnego przetwornika 14 kHz.

W profilowaniu sejsmicznym częściej występują wielokrotne odbicia sygnałów niż w badaniach georadarem. Natomiast w badaniach georadarem mogą występować większe interferencje wskutek bocznych odbić od fundamentów podpór.

W USA z pozytywnymi wynikami przeprowadzono próby systemu CPS działającego z częstotliwością dwuskokową, w którym przetwornik zawiera rozdzielone nadajnik i odbiornik. W nadajniku jest nastawiana częstotliwość i moc sygnału, w odbiorniku – wzmocnienie i filtrowanie sygnałów. Graficzny wykres danych generuje w realnym czasie rejestrator termiczny i zapisuje dane analogowe w postaci cyfrowej w standardowych kasetach. Przetwornik jest zainstalowany w holowanej, szczelnej obudowie mającej kształt torpedy. Stateczniki obudowy są przycięte, aby było można wykonywać pomiary CPS blisko filarów. Kolorowy monitor wyświetla w czasie rzeczywistym głębokość wody, informując o batymetrii jej dna. W czasie zbierania danych są także wyświetlane wykresy twardości dna i zgromadzone na nim osady. System wymaga zasilania generatorem prądu zmiennego 1000 W, 110 V.

2.5. Urządzenia pomocnicze

2.5.1. Urządzenia gromadzące dane

Dane z monitoringu rozmyć przenośnymi sondami fizycznymi są zapisywane ręcznie w notatnikach. Jest jednak tendencja zbierania danych w sposób zautomatyzowany, z użyciem rozmaitych urządzeń, które je gromadzą. Korzysta się z rejestratorów danych hydrometeorologicznych, laptopów, komputerów i organizatorów Palm. Rejestratory mają kompaktowe urządzenia gromadzenia danych, jednak na ogół są mało przyjazne dla użytkowników. Do tego każdy producent rejestratorów stosuje specyficzny język oprogramowania i własne podejście. Laptopy w zastosowaniach polowych są nieporęczne i mało odporne na deszcz, brud i pył. Komputery i organizatory Palm będą mogły być stosowane, gdy zostaną udoskonalone ich możliwości i przyjazność dla użytkownika. Zaletą sprzętu komputerowego Palm jest możliwość stosowania oprogramowania redukcji danych takiego, jak programy graficzne i kartograficzne dla ekspozycji danych w czasie ich zbierania.

W dawnych stałych przyrządach monitorujących rozmycia dane były odczytywane wizualnie w miejscu przyrządu. Dane ze współczesnych przyrządów są przekazywane do zbiorczej jednostki odbioru zainstalowanej na moście (rys. 35) lub w jego pobliżu. Następnie są z niej transmitowane do biura, które analizuje rozmycia. Bywa stosowana transmisja danych przez modem, telefonem komórkowym lub stacjonarnym, albo poprzez satelitę. Obecnie, instalacje zawierają system przekazujący dane do Internetu i upoważnione osoby, stosując komputer z dostępem do Internetu mogą odbierać te dane w dowolnym miejscu. Technologia zdalnego uzyskiwania danych pozwala uniknąć wielokrotnych przyjazdów do mostu. Chociaż zwiększa początkowy koszt oprzyrządowania, to może znacznie zmniejszyć koszty długotrwałego uzyskiwania danych. Zbieranie danych przy moście wymaga bowiem wysłania ludzi, bezpiecznego dostępu do urządzeń, zamknięcia pasa ruchu na moście lub zamknięcia mostu, ewentualnie użycia łodzi lub pojazdu udostępniającego rejestratory danych. Zdalna technologia odbioru danych z monitoringu zwiększa bezpieczeństwo ruchu publicznego na moście, gdyż pozwala w czasie gwałtownych powodzi i nawałnic monitorować stan dna cieku przy podporach, a przez to wcześniej wykrywać groźne rozmycia.

2.5.2. Urządzenia doprowadzające przyrządy przenośne do miejsc pomiaru głębokości cieków

Metoda doprowadzania przenośnych przyrządów monitorowania rozmyć do miejsc pomiaru głębokości dna cieku ma podstawowy wpływ na efektywność monitoringu, zwłaszcza w czasie powodzi. Brak możliwości doprowadzenia przyrządu monitorującego we właściwe miejsce uniemożliwia wykonywanie miarodajnych pomiarów rozmyć. Metody doprowadzania przenośnych instrumentów do miejsc pomiarów można podzielić na dwie grupy:

1. doprowadzanie z mostu,
2. doprowadzanie z powierzchni wody.

Doprowadzanie z mostu

Monitoring rozmyć przyrządem przenośnym stosowanym z mostu umożliwia pomiar wzdłuż niego głębokości dna od strony góry i dołu cieku. W przypadku filarów z odpowiednio dużymi, dostępnymi głowicami, bywają także możliwe pomiary z nich głębokości cieku wokół filarów. Sonar można doprowadzać do miejsc pomiaru przymocowując go do sondy tyczkowej (rys. 36) lub sondy linowej z obciążnikiem (rys. 37). Aby ułatwić pomiary sondą linową stosuje się do jej obsługi lekką wciągarkę. Doprowadzanie z pomostu przyrządów monitoringu do miejsc pomiarów

w czasie powodzi ułatwia stosowanie rozmaitego sprzętu dźwigowego. Na przykład sondę fizyczną lub sonar można przymocować do końca przegubowego wysięgnika żurawia samochodowego lub obsługiwać specjalnie w tym celu skonstruowaną lekką dźwignicą wyposażoną we wciągarkę (rys. 38). Jest ona konieczna, gdy szybki przepływ powodziowy uniemożliwia stosowanie sondy utrzymywanej rękoma. Żurawie są szczególnie przydatne, gdy pomost znajduje się wysoko nad wodą (do kilkunastu metrów) i nie ma możliwości prowadzenia z niego pomiarów głębokości cieku sondą fizyczną (tyczkową lub linką z obciążnikiem).

Federalna Administracja Drogowa USA sfinansowała opracowanie kilku systemów przegubowego wysięgnika zainstalowanego na samochodzie, doprowadzającego z mostu przyrząd monitoringu rozmyć do miejsc pomiaru głębokości cieku. Przykłady tych systemów są pokazane na rys. 39-41. Stosując te systemy można mierzyć rozmycia sonarem i sondą fizyczną (tyczkową i linką z obciążnikiem). Położenie miejsca pomiaru jest określone czujnikami zainstalowanymi na wysięgniku oraz kołem pomiarowym z tyłu ciężarówki (rys. 39). Niektóre systemy zawierają komputer pokładowy, który na podstawie kąta pochylenia wysięgnika oraz odległości pomiędzy przegubem wysięgnika i nadajnikiem sonaru oblicza położenie nadajnika względem znanego miejsca na pomoście. Wyniki pomiarów sonarem zbiera rejestrator na wysięgniku. Dalej, są one wraz z danymi lokalizacji miejsc pomiarów, transmitowane bezprzewodowo do laptopa. W ten sposób uniknięto przewodów pomiędzy powierzchnią wody i ciężarówką. Systemy doprowadzające zapewniają dobrą manewrowość przyrządem monitorującym. Są przydatne, gdy wysokość pomostu nad wodą wynosi od 5 do 15 m. Gdy światło pionowe pod mostem jest mniejsze niż 5 m, wtedy trzeba użyć specjalną podwodną głowicę sonaru lub musi być możliwość unoszenia przegubu wysięgnika. Wysięgnik z sonarem widoczny na rys. 41 jest dostosowany do mostów na różnej wysokości nad wodą i różnej geometrii ich konstrukcji górnej, w tym ograniczonej skrajni i różnej geometrii wsporników pomostu oraz do dużych prędkości przepływu wód powodziowych. Umożliwia uzyskiwanie dokładnej lokalizacji miejsc pomiaru i sprawnie zbiera dane monitoringu. Wyposażenie żurawia we wciągarkę dwubębnową umożliwia wykonywanie pomiarów także pod mostem (rys. 42).

Doprowadzanie z powierzchni wody

Do tego typowo stosuje się łodzie z załogą. Jednak bezpieczeństwo ludzi w warunkach powodzi przemawia za stosowaniem łodzi bezzałogowych i pływających nośników przyrządów monitorujących rozmycia. Użycie w warunkach powodzi łodzi z załogą wymaga odpowiednio wysokiego światła pionowego i poziomego pod mostem, a w jego pobliżu – możliwości wodowania łodzi. Dopuszcza się korzystanie z łodzi załogowej tylko wtedy, gdy wysokość światła pionowego i szerokość światła poziomego umożliwiają bezpieczny przypływ pod mostem łodzi ludźmi. Łódź musi mieć odpowiednią wielkość i silnik, który zabezpieczy ją przed zniesieniem przez wodę w dół cieku i przed kolizją z podporami mostu. W czasie powodzi, gdy łagodnie pochyłone brzegi są pod wodą, wodowanie dużej łodzi może być trudne. Łatwiej zwodować małą łódź, jednak w warunkach wielkiej wody bezpieczeństwo załogi wymaga użycia dużej łodzi. Zagrożenie bezpieczeństwa ludzi spowodowało, że jako nośniki przyrządów monitoringu rozmyć są w czasie powodzi stosowane łodzie bezzałogowe. Przykładem jest opracowana w USA zdalnie sterowana drogą radiową łódź z przyczepnym silnikiem mocy 8 KM (rys. 43). Jest wyposażona w ster rekreacyjny i w wysoko wydajne, wodoszczelne serwomechanizmy.

Innym rozwiązaniem, gdy spód konstrukcji prześel jest zbyt nisko nad wodą, aby bezpiecznie mogła pod nimi przepływać łódź z załogą, jest stosowanie jako nośników przyrządów monitoringu rozmyć pływaków na uwięzi. Pływak można, na przykład, przycumować do łodzi skutecznie zakotwiczonej przed mostem od strony góry cieku. Można z niej manewrować pływakiem, co pozwala

uniknąć problemów powodowanych przez nurty i burzliwy przepływ wody przy moście. W USA zostały również opracowane pływaki na uwięzi, którymi można zdalnie manewrować z mostu.

Pływające nośniki umożliwiają pomiary głębokości dna pod mostem i wzdłuż filarów. Tanim rozwiązaniem nośników sonaru są pływaki na uwięzi. To rozwiązanie nadaje się do stosowania także w warunkach powodziowych. Zostały opracowane różne pływaki: zawierają rurki z PCW (rys. 44), płyty piankowe, mają kształt kulisty, są wykorzystywane narty wodne i deski do pływania na kolanach (rys. 45). Wielkość pływaka jest ważna dla jego stabilności w szybko płynącej, burzliwej wodzie. Nośniki pływające mogą być także doprowadzane do miejsc pomiaru z wózka rewizyjnego, z pojazdu do inspekcji mostów lub żurawiem samochodowym z przegubowym wysięgnikiem.

2.5.3. Podwodne zdalnie sterowane roboty ROV (Remote-Operated Vehicles)

Jest dużo odmian robotów. Ich przykłady przedstawiają rys. 46 i 47. Są wykorzystywane w okresach małych prędkości przepływu wody do badań podwodnych części filarów i dna przy mostach przez duże przeszkody wodne. Wyposażenie robota może stanowić: światło strobowe, kamera wideo wysokiej rozdzielczości, aparat fotograficzny do zdjęć czarno-białych w słabym oświetleniu i aparat do stereofotogrametrii, sonar boczny lub wielowiązkowy. Robota ROV można wyposażać w czujniki światłowodowe i elektroniczne, w pamięć danych i w systemy transmisyjne. Zastosowanie żyrokompasu, dopplerowskiej nawigacji akustycznej, nawigacji bezwładnościowej i sonaru bocznego oraz sonaru z jednostki pływającej, pozwala uzyskiwać trójwymiarowe obrazy dna z niezwykłą dokładnością 25 mm. Roboty ROV opracowane do celów militarnych są autonomicznymi pojazdami, sterowanymi z wbudowaną w nie „pamięcią” komputerową. W zastosowaniach cywilnych są preferowane systemy „ROV” z przewodem doprowadzonym z pływającej jednostki nawodnej. Przewód służy do zasilania pojazdu w energię i umożliwia dokładniejsze sterowanie nim; umożliwia także wyposażenie pływającego robota w więcej rozmaitych, specjalistycznych funkcji niż system bezprzewodowy. Przez przewód są transmitowane do jednostki pływającej dane z pomiarów i obrazy. Ostatnio podwodne techniki fotograficzne zrewolucjonizowało opracowanie przez NASA wyjątkowo wrażliwego filmu (ASA 2000000). Jednak zamulenie wody cieków śródlądowych bardzo utrudnia stosowanie w nich technik fotograficznych, natomiast nadają się one do monitoringu rozmyć dna przy mostach morskich. Efektywność działania podwodnych, pływających robotów ROV powoduje szybki rozwój ich zastosowań. Stopniowo przejmują wiele prac dotychczas wykonywanych przez nurków.

3. Wymagania organizacyjne monitoringu rozmyć

Członkowie zespołu mającego monitorować rozmycia powinni być starannie przeszkoleni, aby:

- dobrze znali technologię monitoringu, którą będą stosować,
- sprawnie umieli obsługiwać instrumenty monitoringu.

Przed wyjazdem do mostu członkowie Zespołu Monitorującego rozmycia powinni zostać zapoznani z przeprawą mostową, którą będą monitorowali, powinni uzyskać wszystkie informacje niezbędne do skutecznej realizacji monitoringu oraz powinni sprawdzić czy mają sprawny, potrzebny do tego sprzęt i znaki drogowe konieczne do zapewnienia bezpiecznych warunków monitoringu i bezpieczeństwa użytkowników mostu. Kierownik Zespołu powinien poinformować jego członków:

- jakie mogą im zagrozić niebezpieczeństwa w czasie przygotowania i monitoringu rozmyć,
- kiedy rozpoczną monitoring rozmyć w czasie przepływu wody powodziowej,
- w których miejscach mogą występować najgroźniejsze rozmycia,
- jakie są wartości krytycznych poziomów rozmycia i krytyczny poziom powierzchni wody,
- co należy zrobić, gdy monitoring będzie wykazywał krytyczne dane,
- jakie są zainstalowane w rejonie mostu środki chroniące dno i brzegi przed rozmyciem.

Dla każdego mostu powinna być opracowana lista: • przyrządów potrzebnych do monitorowania przy nim rozmyć, • środków pomocniczych umożliwiających doprowadzenie tych przyrządów do miejsc monitoringu w czasie przepływu powodziowego oraz • zestawu oznakowań drogowych niezbędnych dla zapewnienia bezpieczeństwa członkom Zespołu Monitorującego i użytkownikom mostu.

Sygnałem rozpoczynania monitoringu mogą być wydarzenia podane niżej w malejącej kolejności preferencji:

- poziom alarmowy zwierciadła wody, jeżeli został określony i zaznaczony na podporze mostu lub inaczej wskazany Zespołowi Monitorującemu; przykład oznakowania na podporze poziomów rozpoczynania i kończenia monitoringu rozmyć jest na rys. 48,
- określony poziom zwierciadła wody, jeżeli w cieku są zainstalowane czujniki przepływu, które mierzą jego poziom w czasie rzeczywistym,
- podniesienie zwierciadła wody powyżej obliczonego poziomu powodzi 10- lub 50-letniej,
- osiągnięcie lub przekroczenie przez ciek poziomu pełnych brzegów i szybki dalszy przybór w nim wody,
- oficjalne ostrzeżenie powodziowe ogłoszone przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej dla danego cieku lub regionu geograficznego i podnoszenie się poziomu wody w cieku przy danym moście,
- wystąpienie na zlewni cieku opadów przekraczających wartość opadów powtarzalnych co 10 lub 50 lat.

4. Wytyczne monitoringu

4.1. Wytyczne ogólne

- 1) Zespół Monitorujący rozmycia dna cieku w czasie powodzi, oprócz pomiarów jego głębokości, powinien nieustannie zwracać uwagę na objawy zagrożenia mostu awarią lub katastrofą, zarówno w aspekcie bezpieczeństwa użytkowników mostu, jak i własnego.
- 2) Stan koryta cieku należy kontrolować wizualnie:
 - w regularnych odstępach czasu (co najmniej raz na trzy miesiące),
 - przed przystąpieniem do każdego monitoringu rozmyć koryta cieku w rejonie mostu,
 - w czasie przepływu wody powodziowej,
 - po zakończeniu powodzi.

Wyniki każdej kontroli wizualnej należy zapisać w postaci protokołu.

- 3) Planując monitoring rozmyć koryta cieków przy moście należy przede wszystkim ocenić możliwość użycia do tego sondy fizycznej. W wielu przypadkach proste sondowanie fizyczne jest najbardziej efektywnym sposobem pomiaru głębokości wody. Gdy warunki monitorowania rozmyć (szybki przepływ wody powodziowej, duża jej głębokość i/lub duża wysokość mostu nad zwierciadłem wody) uniemożliwiają stosowanie sondy fizycznej wtedy należy wybrać inny przyrząd monitoringu.

4.2. Wytyczne monitoringu powierzchni wody

- 1) Należy znaleźć na podporach mostu lub w jego pobliżu oznaczenia poziomów alarmowych: krytycznego poziomu zwierciadła wody, minimalnego poziomu wody rozpoczynania monitoringu rozmyć i/lub rzędnej powierzchni wody zamknięcia mostu; powinny być zaznaczone na przyczółku, albo w innym miejscu widocznym z mostu lub z pobocza drogi.
- 2) Należy porównać wizualnie aktualny poziom powierzchni wody z oznaczeniami wymienionymi w p. 4.2.1); pozwala to bezpośrednio skontrolować położenie powierzchni wody względem rzędnych alarmowych; poziom wody odczytuje się na wodomierzu, który może być zainstalowany na przyczółku, filarze lub na innym elemencie widocznym z mostu lub pobocza drogi, albo mierzy się względem znanego poziomu odniesienia (np. pochwyty poręczy na moście).
- 3) Gdy oznaczenia poziomów alarmowych nie istnieją, to należy porównać aktualny poziom wody z rzędnymi alarmowymi podanymi w dokumentacji utrzymania mostu.
- 4) Jeżeli poziom wody przekroczył rzędną rozpoczynania monitoringu rozmyć, to należy bezzwłocznie do niego przystąpić, ciągle przy tym obserwując most, czy nie ma oznak jego zagrożenia oraz regularnie kontrolować aktualny poziom powierzchni wody wizualnie lub pomiarami i dane zapisywać.
- 5) Należy zmierzyć i zanotować rzędne zwierciadła wody przy moście od strony góry i od dołu cieków; ich porównanie charakteryzuje warunki przepływu pod mostem; gdy jest duża różnica poziomów wody z obu stron mostu to może oznaczać, że naniesione szczątki blokują pod nim przepływ cieków; blokada zwiększa intensywność rozmyć dna i obciążenie boczne podpór, co może doprowadzić do awarii mostu; w takiej sytuacji należy częściej mierzyć głębokości dna wzdłuż podpór i wyniki pomiarów porównywać z głębokością krytyczną; gdy rozmycia dna osiągnęły poziom krytyczny lub może to wkrótce nastąpić, to należy bezzwłocznie zawiadomić administratora mostu o konieczności jego zamknięcia; każde niezwykle warunki zauważone w korycie cieków należy opisać, sfotografować i ewentualnie naszkicować.
- 6) Gdy są widoczne oznaki zagrożenia stabilności mostu lub poziom wody przekroczył rzędną jego zamknięcia, to należy bezzwłocznie zamknąć most dla ruchu.

4.3. Wytyczne monitoringu rzędnych koryta cieków

- 1) Przed rozpoczęciem pomiarów głębokości dna cieków należy upewnić się wizualnie, czy nie ma objawów zagrożenia bezpieczeństwa użytkowników mostu i trzeba go natychmiast zamknąć.
- 2) Głębokości dna należy mierzyć przy podporach mostu, w miejscach występowania największych rozmyć; jeżeli nie są one określone, to można skorzystać z rys. 49, który pokazuje typowe miejsca pomiaru rozmyć w czasie przepływu wody powodziowej; zwykle największe rozmycia powstają od strony góry cieków: • przy czole filara, • przy narożniku przyczółka kończącego nasyp dojazdu i • u podnóża nasypu otaczającego zagłębiony w nim przyczółek.

- 3) Częstotliwość pomiarów przy podporach mostu zagrożonych podmyciem należy dostosować do szybkości zmian zachodzących w korycie ciekę; zmierzone rzędne koryta należy porównywać z rzędnymi krytycznego rozmycia w tych samych miejscach.
- 4) Gdy woda płynąca z dużą prędkością naciera w podporę pod dużym kątem lub na podporze osadziło się dużo szczątków, to należy ocenić czy rozmycia przy tej podporze powinny być częściej monitorowane.
- 5) Gdy przy podporze mostu rozmycie powoduje gwałtowne obniżanie dna ciekę zbliżające się do poziomu krytycznego, to należy zaproponować administratorowi mostu rozważenie awaryjnego zabezpieczenia podpory przed dalszym podmywaniem - np. narzutem kamiennym lub workami z piaskiem (w warunkach powodzi szybkie wykonanie zabezpieczenia może być bardzo trudne); podstawą propozycji użycia zabezpieczenia awaryjnego powinien być pomiar głębokości dna przy podporze sondą fizyczną.
- 6) Gdy rozmycia dna osiągnęły poziom krytyczny lub może to wkrótce nastąpić, to należy bezzwłocznie zawiadomić administratora mostu o konieczności jego zamknięcia.

5. Problem zamknięcia mostu dla ruchu

Skuteczną metodą zapobiegania ofiarom ludzkim powodowanym przez awarie lub katastrofy mostów wskutek nadmiernych rozmyć koryta ciekę przy ich podporach jest zamknięcie we właściwym czasie ruchu na moście zagrożonym podmyciem. Problem stanowią wydarzenia, zwane stanami alarmowymi, które uzasadniają podjęcie decyzji zamknięcia mostu. Stany alarmowe dla mostu powinien określić jego projektant, z udziałem hydrologa. Jako wydarzenia/stany alarmowe bywają przyjmowane:

1. krytyczny poziom zwierciadła wody,
2. krytyczny przepływ wody,
3. krytyczne rozmycie dna ciekę przy podporze mostu,
4. przepływ szybko wypełniający brzegi koryta ciekę,
5. urzędowy komunikat o gwałtownej powodzi lub katastrofalnych opadach w dorzeczu ciekę powyżej mostu lub w jego rejonie.

Gdy jako wydarzenie alarmowe zostaje przyjęty krytyczny poziom (rzędna) zwierciadła wody, to należy go oznaczyć na wodowskazie przy moście lub na podporze mostu. Sygnałem zamknięcia mostu jest osiągnięcie przez wodę poziomu krytycznego. Jeżeli przy moście nie ma wodowskazu, to określa się aktualną rzędną zwierciadła wody korzystając ze znanego poziomu odniesienia na moście i porównuje z poziomem krytycznym.

Gdy wydarzeniem alarmowym jest wielkość przepływu, to porównuje się wartość aktualnego przepływu powodziowego uzyskaną ze stron internetowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, z wartością alarmową przepływu. Jeżeli aktualny przepływ przekracza wartość alarmową, to jest konieczny natychmiastowy przyjazd do mostu uprawnionego inspektora utrzymania mostów i sprawdzenie przez niego jak most się zachowuje. W przypadku jakichkolwiek niepokojących objawów należy podjąć działania zamknięcia mostu.

Gdy wydarzeniem alarmowym jest krytyczny poziom rozmycia dna ciekę przy podporze, to sygnałem dla zamknięcia mostu jest informacja uzyskana z monitoringu rozmyć, że rozmycie osiągnęło głębokość krytyczną.

Gdy wydarzeniem alarmowym jest przepływ, który szybko wypełnia brzegi cieku, to należy sprawdzić szybkość przyboru wody i jeżeli jej poziom podnosi się z szybkością większą niż 30 cm/godzinę, to most należy zamknąć. To kryterium jest zalecane przede wszystkim dla mostów przez cieki górskie.

Gdy wydarzeniem alarmowym jest ostrzeżenie o gwałtownej powodzi lub katastrofalnym opadzie, to inspektor mostowy po otrzymaniu tego ostrzeżenia powinien bezzwłocznie sprawdzić wizualnie zachowanie się mostu i w przypadku uznania, że gwałtowna zmiana przepływu cieku może zagrozić stabilności mostu, zainicjować jego zamknięcie.

W czasie przepływu wody powodziowej zamknięcie mostu dla ruchu jest uzasadnione, gdy:

- są wyraźne oznaki pogorszenia stanu konstrukcji mostu,
- obniżenie koryta cieku przy filarze lub przyczółku przekroczyło krytyczny poziom rozmycia,
- obniżenie koryta cieku przy filarze lub przyczółku jest bliskie krytycznego poziomu rozmycia i nadal obniża się szybko,
- poziom powierzchni wody podniósł się do rzędnej, której przekroczenie jest uznane za wymagające zamknięcia mostu,
- ocenia się, że zainstalowane środki zabezpieczające podpory mostu przed podmyciem zostały uszkodzone przez wodę powodziową,
- w rejonie mostu są już groźne warunki hydrauliczne, a do mostu zbliża się z góry cieku kolejna, wyższa woda powodziowa.

Bezzwłoczne zamknięcie mostu dla ruchu jest uzasadnione w następujących przypadkach:

1. gdy woda przelewa się przez nasyp dojazdu do mostu; nawet płytka woda na dojeździe może zepchnąć pojazd z nasypu oraz doprowadzić do awaryjnego podmycia przyczółka; inspektor mostowy powinien pamiętać, że w przypadku długiej przeprawy mostowej, podchodząc do mostu od strony jednego dojazdu można nie zauważyć, że woda przelewa się przez drugi dojazd,
2. gdy woda przelewa się przez pomost, nawet tylko małą warstwą (kilku – kilkunastocentymetrową) lub tylko miejscowo; stwarza to nie tylko bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników mostu, ale także powoduje, że górna konstrukcja mostu jest wtedy obciążona poziomym parciem wody nie uwzględnionym w projekcie mostu, co może doprowadzić do zrzucenia z podpór jego górnej konstrukcji; ponadto powstają pod mostem warunki przepływu wody pod ciśnieniem, w których występuje zwiększona intensywność rozmycia dna,
3. gdy pasy dolne konstrukcji przęsła (lub przęsła) są w większości lub całkowicie pod płynącą wodą; wtedy woda wywiera na konstrukcję siłę boczną, która może zepchnąć ją z podpór (niebezpieczeństwo potęgują szczątki zatrzymane przez konstrukcję); ponadto powstają pod mostem warunki przepływu wody pod ciśnieniem, w których występuje zwiększona intensywność rozmycia dna,
4. gdy zostanie zauważona któraś z następujących oznak złego stanu przeprawy mostowej:
 - uszkodzenie pomostu, konstrukcji górnej i/lub dolnej mostu,
 - pionowe lub/i boczne przemieszczenie górnej konstrukcji mostu,
 - nadmierne poziome lub/i pionowe rozwarście dylatacji pomostu,
 - zapadlisko nawierzchni na dojeździe przy przyczółku lub

- duże zbiorowisko szczątków, zwłaszcza przy dolnym pasie konstrukcji przęsła.

Natomiast, gdy w rejonie mostu:

- występują dramatyczne zmiany koryta cieku,
- woda płynąca z dużą prędkością naciera na filar lub przyczółek pod znacznym kątem,
- są widoczne silna erozja i przemieszczenia brzegów koryta cieku w rejonie przyczółków oraz
- inne oznaki erozji, w tym przewrócone drzewa na brzegach i widoczne zmiany nurtu w głównym korycie cieku,

to należy uważnie obserwować jaki wpływ mają te wydarzenia na zachowanie się mostu i w przypadku oznak niekorzystnego ich wpływu, należy zamknąć most dla ruchu.

Decyzję zamknięcia mostu podejmuje jego administrator, po skontaktowaniu się z organem zajmującym się sprawami wyjątkowych z ramienia lokalnej władzy publicznej. Administrator mostu powinien mieć opracowaną mapę objazdów i plan rozmieszczenia znaków drogowych, które należy użyć w przypadku zamknięcia mostu. Środki techniczne zamknięcia mostu (bariery, pryzmy piasku usypane w poprzek dojazdów) i oznakowania objazdu powinna zainstalować służba utrzymania mostu lub służba drogowa. Zespół Monitorujący rozmycia koryta cieku przy moście powinien pozostać przy nim do czasu przybycia służby utrzymania/drogowej. Gdy most staje się niebezpieczny dla ruchu, to w czasie oczekiwania na fizyczne zamknięcie Zespół Monitorujący powinien zamknąć most w sposób awaryjny. Dlatego zawsze powinien być wyposażony w podstawowe oznakowania i tymczasowe zapory oraz mieć uprawnienia do awaryjnego zamknięcia mostu.

6. Koszty monitoringu rozmyć

Obliczając koszty monitoringu rozmyć należy uwzględnić:

- koszty podstawowych przyrządów monitorujących,
- koszty elementów koniecznych do zainstalowania stałych przyrządów monitoringu lub nośnika doprowadzającego przyrząd przenośny do miejsc pomiarów głębokości dna,
- koszt rejestratora danych,
- koszt zasilania oprzyrządowania monitoringu w energię,

ewentualnie:

- koszt urządzenia zdalnej transmisji danych,
- koszt robocizny monitorowania,
- utrzymania stałego oprzyrządowania monitoringu rozmyć.

Koszt instalacji stałego oprzyrządowania monitoringu może znacznie zmieniać się w zależności od: warunków miejscowych, liczby i/lub doświadczenia personelu instalującego oprzyrządowanie oraz od zakresu prac instalacyjnych. Stałe oprzyrządowanie monitoringu rozmyć przy dużych mostach i mostach przez głębokie cieki jest kosztowniejsze niż oprzyrządowanie małych mostów, przez okresowe lub płytkie cieki. Niektóre przyrządy monitoringu rozmycia może zainstalować zespół utrzymujący most. Jednak w przypadku skomplikowanych instalacji, w miejscach trudnodostępnych jest zwykle konieczne zaangażowanie do zainstalowania przyrządów monitorujących rozmycia wyspecjalizowanego wykonawcy i specjalnego sprzętu.

Koszty instalacji oprzyrządowania monitoringu rozmyć, jego okresowych kontroli, utrzymania i napraw zwiększają: duża długość przeprawy mostowej, skomplikowana geometria filarów, duża wysokość pomostu nad wodą, duża głębokość cieku, konieczność stosowania długich przewodów elektrycznych, teletransmisja danych (np. przez Internet lub satelitę), konieczność zamknięcia pasa ruchu lub mostu na okres instalowania przyrządów, stosowanie sprzętu udostępniającego miejsca pomiaru głębokości cieku (łodzi, barki, pojazdu inspekcyjnego) oraz konieczność zatrudnienia zespołu wiertniczego i nurków. Koszt przypadający na jeden przyrząd zmniejsza się z liczbą przyrządów obsługiwanych przez zbiorczą stację rejestrowania danych.

Koszt przyrządów przenośnych można łatwo ustalić, natomiast znacznie trudniej skwantyfikować koszty przyrządów stałych, gdyż te zależą od specyfiki warunków miejscowych, w tym od kosztów instalacji i obsługi oraz od koniecznej ilości uzyskiwanych danych. W tablicach 5 i 6 są podane orientacyjne koszty przyrządów monitoringu rozmyć w USA. Chociaż w Polsce te informacje są bezpośrednio mało przydatne, to jednak pozwalają porównać koszty różnych przyrządów.

7. Podsumowanie zasad monitoringu rozmyć

1. Podstawowym działaniem monitoringu rozmyć w rejonie mostu powinny być systematyczne wizualne kontrole koryta cieku, przeprowadzane z regularną częstotliwością, nie rzadziej niż raz na kwartał oraz w czasie powodzi: • przed rozpoczęciem monitoringu rozmyć, • w czasie monitoringu i • po opadnięciu wody powodziowej.
2. Żaden rodzaj przyrządu mierzącego rozmycia nie nadaje się do stosowania w każdych warunkach przepływu i w każdych warunkach geomorfologicznych cieku. Niektóre ograniczenia wynikają z możliwości samego przyrządu, inne – z jego przydatności w danych warunkach miejscowych. Na przykład, pomiary tyczkami sondującymi dają niemiernodajne wyniki w ciekach z piaszczystym dnem; nawet gdy tyczka jest wyposażona w dużą płytę stopową, to zagłębia się grawitacyjnie w dno w sposób niekontrolowany. Przydatności niektórych technologii monitoringu jest ograniczona przez warunki środowiskowe. Udokumentowane informacje o ograniczeniach przyrządu trzeba uzyskać od jego producenta, albo wykonując własne badania, choćby tylko przybliżone.
3. System monitoringu rozmyć przy moście może stosować jeden przyrząd lub kilka przyrządów, także różnych rodzajów. Mogą być zainstalowane na elementach konstrukcji mostu lub w dnie cieku, w pobliżu mostu. Dane ze stałego przyrządu monitorującego rozmycia mogą być zapisywane przy nim, albo automatycznie przekazywane do zbiorczej rejestratora danych na moście lub obok niego i następnie transmitowane elektronicznie do biura analizującego dane. Może być stosowana transmisja danych przez modem telefonem komórkowym, stacjonarnym lub poprzez satelitę. Najnowsze systemy monitoringu przyrządami stałymi są wyposażone w urządzenie przekazujące dane do Internetu. Osoby upoważnione, stosując komputer z dostępem do Internetu, mają w dowolnym miejscu dostęp do danych z monitoringu rozmyć. Najpełniejszy obraz rozmyć dna w rejonie mostu uzyskuje się stosując równocześnie przyrządy monitoringu stałego i przenośnego oraz aparaturę do powierzchniowych badań geofizycznych. Przyrządami przenośnymi należy także weryfikować działanie przyrządów stałych oraz sprawdzać, czy rzeczywiście pod nimi występują maksymalne rozmycia.

4. Do najbardziej rozpowszechnionych przyrządów monitoringu rozmyć należą sondy fizyczne, opadające pierścienie magnetyczne i sonary. Echsonda stosowana z mostu oraz przyrząd z zsuwającym się pierścieniem nadają się w szerokim zakresie geometrii podpór mostowych, warunków przepływu i geomorfologicznych. Gdy chce się uzyskać tylko informację, że rozmycie dna osiągnęło określony poziom, to można użyć czujniki wypływające. Do obserwacji zachowania się filarów i przyczółków nadają się pochyłomierze zapisujące obrót elementów, na których są zainstalowane. Uzupełniając system sonaru dodatkowymi czujnikami można w czasie jego stosowania zbierać informacje o poziomie wody, prędkości jej przepływu i temperaturze.
5. Federalna Administracja Drogowa USA preferuje monitorowanie rozmyć przy mostach taną echosondą. Nośnikiem doprowadzającym jej przetwornik do miejsc pomiarów może być utrzymywana na uwięzi deska do pływania na kolanach lub inny prosty pływak. Innym zalecanym nośnikiem jest łódź bezzałogowa, zdalnie sterowana.
6. Skrajnie trudne warunki stosowania stałego oprzyrządowania monitorującego rozmycia stwarzają: duży przepływ wody, duża jego prędkość, niesione przez wodę szczątki i rumosz, obciążenia wywierane przez lód oraz temperatura wody. Większość uszkodzeń i zakłóceń systemów monitorujących rozmycia powodują szczątki i lód. Zazwyczaj zakres i częstość uszkodzeń przyrządów monitoringu rozmyć są nieprzewidywalne. Dlatego przy wyborze przyrządu, poza przydatnością użytkową, należy preferować następujące jego cechy:
 - odporność na uszkodzenia – przyrząd powinien cechować się niezawodnością i długowiecznością,
 - nieduży koszt,
 - nieduża pracochłonność utrzymania,
 - przydatność do stosowania przy różnych rodzajach mostów oraz
 - możliwość dodatkowych pomiarów: parametrów hydraulicznych i/lub zachowania się konstrukcji mostu.
7. Do monitorowania rozmyć w czasie powodzi przy podporach mostów przez duże rzeki są szczególnie przydatne przyrządy zainstalowane na stałe. W większości pozostałych mostów bardziej praktyczne w stosowaniu są przenośne przyrządy monitoringu; są łatwe w użyciu przy różnych rodzajach mostów, dostarczają bezpośrednio informacje o aktualnych głębokościach cieku wzdłuż przeprawy mostowej i przy podporach mostu oraz można je szybko dostarczyć do mostu i użyć do monitorowania rozmyć.
8. Przyrządy monitoringu rozmyć łatwo instalować gdy ściany filarów i przyczółków są pionowe lub niewiele odchylone od pionu. Filary o ścianach ze znacznym pochyleniem, przyczółki zagłębione w nasypach oraz podpory mające duże fundamenty bezpośrednio i podpory oparte na zwieńczeniach grup pali stwarzają trudności instalowania większości przyrządów. W przypadku takich podpór nie sprawia trudności zainstalowanie przyrządu z opadającym pierścieniem magnetycznym oraz sonaru przymocowanego do korpusu podpory, z przetwornikiem/nadajnikiem odchylonym od pionu tak, aby fala dźwiękowa omijała zwieńczenie pali lub płytę fundamentową.
9. Systemy sonaru i odczytywanego wizualnie opadającego pierścienia są wrażliwe na działanie szczątków i lodu. Sonar mogą unieruchomić szczątki i lód zebrane pomiędzy przetwornikiem/nadajnikiem i dnem cieku. Pierścień bywa blokowany na rurze. Mniej wrażliwy na lód i szczątki jest zautomatyzowany system opadającego pierścienia, jeżeli kabel łączący urządzenie z rejestratorem na moście jest umieszczony w kanale uformowanym w filarze/przyczółku

Wrażliwość sonaru na lód i szczątki można zmniejszyć umieszczając jego przetwornik blisko nad dnem cieku, ale to nie eliminuje całkowicie możliwości uszkodzeń przetwornika przez szczątki.

10. Dane zebrane po szczycie powodzi sondą fizyczną mogą nie przedstawiać maksymalnych głębokości rozmyć. Często bowiem wymyte w dnie wyboje wypełniają wtedy osady. Do wykrywania wymytych przy podporach mostów zamulonych wybojów, do pomiaru ich głębokości i zasięgu nadaje się szczególnie: ciągłe profilowanie sejsmiczne (CSP) i georadar (GPR). Rodzaj georadaru (z wodoszczelną anteną 80 lub 100 MHz) jest wybierany odpowiednio do wymaganej głębokości penetracji podłoża cieku i potrzebnej rozróżnialności; zależą one od cech fizycznych miejsca badań (rodzaju gruntów i przewodności wody).
11. Czujniki erozji są zwykle stosowane jako dodatek do innych rodzajów stałego oprzyrządowania monitoringu rozmyć. Ten rodzaj czujników można bez większych trudności wyprodukować i są relatywnie niedrogie. Instalowanie tych czujników jest stosunkowo łatwe w podłożach koryt cieków sezonowych i w grodzach, natomiast pod wodą – bywa trudne i kosztowne. Wyptywające czujniki erozji można umieszczać w miejscach krytycznych rozmyć – zarówno w pobliżu filarów i przyczółków, jak i w miejscach odległych od mostu, co nie jest możliwe w przypadku stosowania innych rodzajów stałych przyrządów monitoringu.
12. Stosowanie wszystkich przyrządów używających wbijane pręty/elektrody (jak reflektometr TDR) jest ograniczone cechami podłoża cieku. Można rozszerzyć przydatność tych przyrządów stosując wstępne wiercenie, wplukiwanie lub wkręcanie elektrod, ale bywa to kosztowne i w wodzie kłopotliwe.
13. Do rzetelnego prognozowania rozmyć są konieczne odpowiednie dane hydrauliczne, w tym charakteryzujące transport gruntów przez wodę powodziową. Dane te uzyskuje się trójwymiarowymi pomiarami parametrów przepływu i batymetrii koryta cieku, badaniami składu granulometrycznego gruntów jego podłoża i obciążenia tych gruntów oraz pomiarami rzędnych i nachylenia zwierciadła wody i jej temperatury. Dane te powinny być określone dla warunków w górze cieku, przy moście i poniżej mostu, w czasie przyboru wody, w szczycie powodzi i w czasie jej opadania. Ostatnio udoskonalono i opracowano nowe technologie pomiarów oraz nowe przyrządy do badań hydrograficznych. Umożliwiają uzyskiwanie dokładniejszych danych batymetrycznych i hydraulicznych. Jednak w mostownictwie te rozwiązania są dotychczas niedostępne i prognozowanie rozmyć przy mostach nadal daje wyniki niepewne. Dlatego w praktyce, jedyną rzeczywiście wiarygodną metodą oceny rozmyć jest ich monitoring.
14. Szczegółowe informacje o technikach pomiaru rozmyć można znaleźć m.in. pod adresem internetowym [http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp 2175/](http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp%202175/).

Bibliografia

1. *Ansari F.*: Simple Cost-Effective Scour Sensor. Research Report. Illinois Center for Transportation, Illinois, 2010
2. *Dong Y., Song R., Liu H.*: Bridge Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology. Final Report. Fairbanks, 2010
3. *Garret K.*: Solve sensing challenges with optical sensor. Electrical Design News, Nov. 2012

4. *Jarominiak A.*: Rozmycia przy mostach i ich monitorowanie. Drogownictwo nr 12/2013 i nr 1/2014
5. *Kosnik D.E.*: Internet-Enabled Remote Monitoring of Civil Infrastructure with TDR. Purdue University, West Lafayette, 2006
6. *Melville B.W., Coleman S.E.*: Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, US, 2000
7. *Mueller D.S., Landers M.N.*: Portable Instrumentation for Real-Time Measurement of Scour Bridge. FHWA-RD-99-085, George Pike McLean, 1999
8. *Nassif H., Ertekin A.O., Davis J.*: Evaluation of Bridge Scour Monitoring Methods. FHWA-NJ-2003-009, 2002
9. *Schall J.D., Price G.R.*: Portable Scour Monitoring Equipment. NCHRP Report 515. Transport Research Board of the National Academies, 2004
10. Monitoring Scour Critical Bridges. NCHRP Synthesis 396. Transportation Research Board of National Academies, N.York, 2009
11. NCHRP Synthesis 396. Monitoring Scour Critical Bridges. Transportation Research Board of National Academies, N. York, 2009
- 12a. *Lagasse P.F., Richardson E.V., Schall J.D., Richardson J.R., Price G.R.*: Fixed Instrumentation for Monitoring Scour at Bridges. Stream Stability and Scour at Highway Bridges, Compendium of Papers ASCE Water Resources Engineering Conference 1991-1998, Reston 1998
- 12b. *Mueller D.S., Landers M.N.*: Detailed Field Measurement of Scour Processes During Floods. Compendium of Papers ASCE Water Resources Engineering Conference 1991-1998, Reston 1998
13. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experiences , Selection, and Design Guidance. Third Edition. US Dep. of Transportation, FHA, National Highway Institute, Hydraulic Engineering Circular No. 23, 2009
14. Bridge Scour Monitoring Technologies: Development of Evaluation and Selection Protocols for Application on River Bridges in Minnesota. Minnesota DOT. Research Service, 2010
15. Evaluation Scour at Bridges. Fifth Edition. Hydraulic Engineering Circular No. 23. Publication No. FHWA-HIF-12-003. US Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012
16. Field Manual - Scour Critical Bridges: High-Flow Monitoring and Emergency Procedures, Idaho Transportation Department, FHWA, 2004
17. Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments. NCHRP Report 396, Transportation Research Board US, 1997
18. US Patent 6526189. Scour sensor assembly 06/13/2001
19. *Placzek G., Haeni F.P.*: Surface Geophysical Techniques Used to Detect Existing and Infilled Scour Holes Near Bridges Piers. US Geological Survey, 2001
20. *Rantz S.E. and other*: Measurement and Computation of Streamflow. Vol. 1. Measurement of Stage and Discharge. US Geological Survey Water-Supply, Paper 2175, Washington, 1982

Tablica 1. Porównanie przenośnych i stałych przyrządów monitoringu rozmyć

Rodzaj przyrządu	Zalety	Ograniczenia
Przenośny	• możliwość monitoringu punktowego i wielopunktowego, • stosowanie w wielu mostach	• pracochłonność, • często konieczna platforma udostępniająca miejsce pomiaru rozmycia
Stały	• ciągłość monitoringu, • niski koszt użytkowania, • łatwość stosowania	• maksymalne rozmycie może być w innym miejscu niż monitorowane, • możliwość utraty sprzętu
Geofizyczny	• badania śledcze (ustalanie charakterystyki podłoża ciek)	• pracochłonność, • konieczna wyszkolona obsługa, • konieczna platforma udostępniająca miejsce badania

Tablica 2. Charakterystyka przyrządów przenośnych monitoringu rozmyć

	Najlepiej stosować do monitoringu rozmyć	Zalety	Ograniczenia
Sondy fizyczne	przy mostach przez małe ciek	prosta technologia	dokładność i wysoki przepływ
Sonary	przy mostach przez duże ciek	dokładność, możliwość monitoringu w jednym punkcie oraz kartografowania liniowego i powierzchniowego	wysoki przepływ, napowietrzenie i zamulenie wody, szczątki

Tablica 3. Charakterystyka metod lokalizacji miejsc pomiaru rozmyć

	Najlepiej nadaje się	Zalety	Ograniczenia
Metody przybliżone	do rozpoznania lub inspekcji	zbędność specjalnego przeszkolenia i sprzętu	dokładność
Metody tradycyjnej geodezji lądowej	przy małych ciekach i do geodezji powierzchni	zwykle techniki stosujące popularny sprzęt	pracochłonność, stanowisko na brzegu
GPS	do pomiarów poza obszarem pod mostem	prędkość, dokładność	nie działa pod mostem

Tablica 4. Charakterystyka stałych przyrządów monitoringu rozmyć

Rodzaj przyrządu	Najlepiej stosować	Zalety	Ograniczenia
Sonar	regiony przybrzeżne	rejestracja danych; historia rozmyć w czasie; można budować z elementów dostępnych w handlu	szczątki, duże zamulenie i napowietrzenie wody oraz lód mogą zakłócać odczyty
Zsuwający się pierścień magnetyczny	koryta niedużych cieków	proste urządzenie pod względem mechanicznym	wrażliwy na uderzenia lodu i szczątków; pomiar tylko maksymalnego rozmycia; ma odcinek niemierzenia; zawieszanie się pierścienia
Pochyłomierz	można w każdym moście	można zainstalować na moście	dostarcza dane przemieszczeń mostu, które mogą być lub nie są wynikiem rozmyć
Urządzenie wypływające	cieki sezonowe	niski koszt; łatwość instalacji; niski koszt utrzymania części zasypanych, nie jest narażone na działanie szczątków, lodu i na wandalizm	nie zapewnia ciągłego monitorowania rozmyć; żywotność baterii
Tyczka sondująca	koryta cieków z dnem gruboziarnistym	prostota przyrządu	drżania odcinka swobodnego, zagłębianie się w dno, zablokowanie w dnie
Reflektometr TDR	koryta cieków, w których występuje lód	solidność; odporność na lód, szczątki i wysokie przepływy	ograniczenie maksymalnych długości kabla i sondy, przy których uzyskuje się wiarygodne sygnały

Tablica 5. Szacunkowe koszty w USA przenośnych przyrządów monitoringu rozmyć [USD]

	Koszt przyrządu	Koszt stosowania
Sonda fizyczna	< 500	zmienny; ze względów bezpieczeństwa zespół minimum 2 osobowy
Sonar przenośny	wykrywacz ryb – 500 pomiarowy – 15 000 ±	zmienny; ze względów bezpieczeństwa zespół minimum 2 osobowy
Tradycyjna geodezja lądowa	10 000 ±	wymaga zatrudnienia dwóch lub trzech osób
GPS	o dokładności < 1 m – 5 000, centymetrowej – 20 000	wymaga zatrudnienia jednej lub dwóch osób

Tablica 6. Szacunkowe koszty w USA stałych przyrządów monitoringu rozmyć [USD]

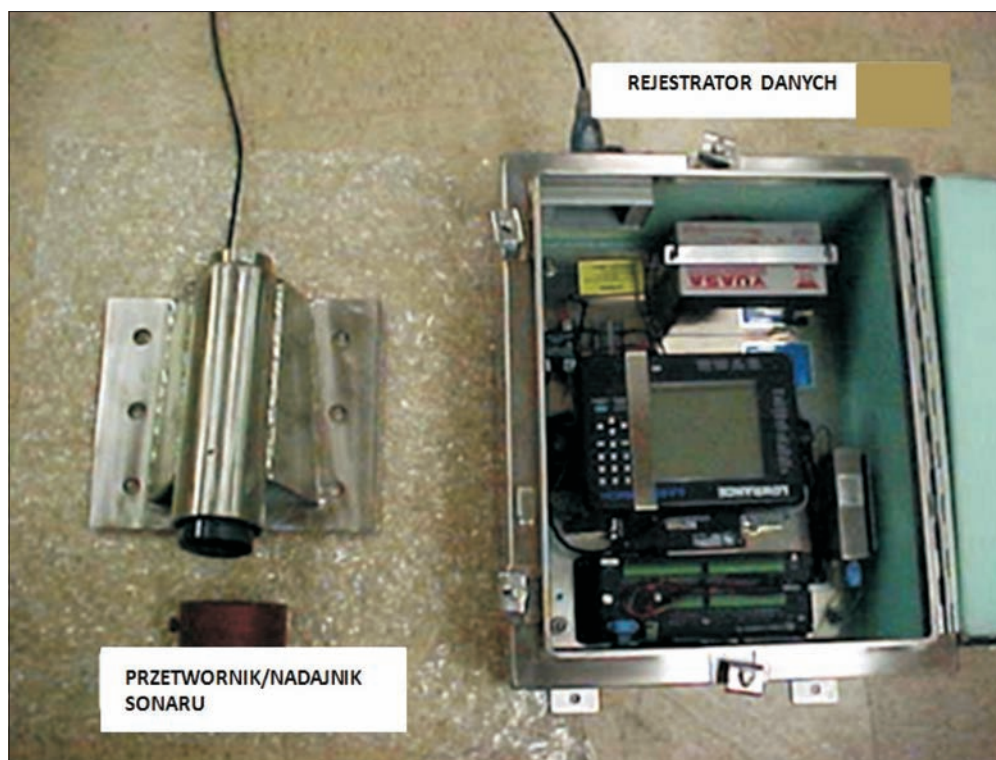
Rodzaj stałego przyrządu	Koszt przyrządu z technologią zdalnego uzyskiwania danych	Koszt każdego dodatkowego oprzyrządowania	Koszt instalowania przyrządu	Koszt obsługi/utrzymania
Sonar	12 000 - 18 000	10 000 - 15 500	średni do dużego; instalacja 2 ÷ 5 osobo-dni	średni do dużego
Opadający pierścień magnetyczny	13 000 - 15 000	10 500 - 12 500	średni; instalacja minimum 5 osobo-dni	umiarkowany
Pochyłomierz	10 000 - 11 000	8 000 - 9 000	niski	niski
Czujniki wypływające	10 100 - 10 600	1 100 - 1 600	średni; zmienia się z instalowaną liczbą czujników	niski
Tyczka sondująca	7 500 - 10 000	7 500 - 10 000	średni; instalacja minimum 5 osobo-dni	duży
Reflektometr TDR	5 500 - 21 700	500	niski	średni



Rys. 1. Pomiar głębokości dna z pomostu przenośną fizyczną sondą tyczkową [13]



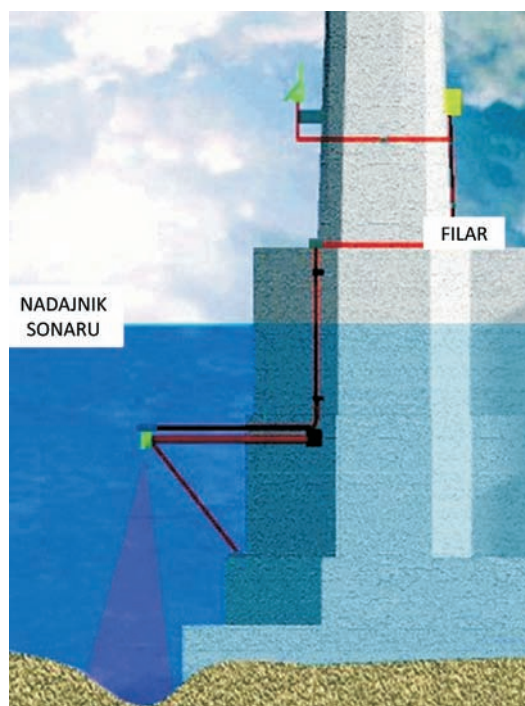
Rys. 2. Obciążnik sondy fizycznej z linki stalowej mający kształt torpedy; obciążniki są o masie od 7 do 45 kg; sondy z obciążnikiem cięższym niż 10 kg są obsługiwane wciągarką [13]



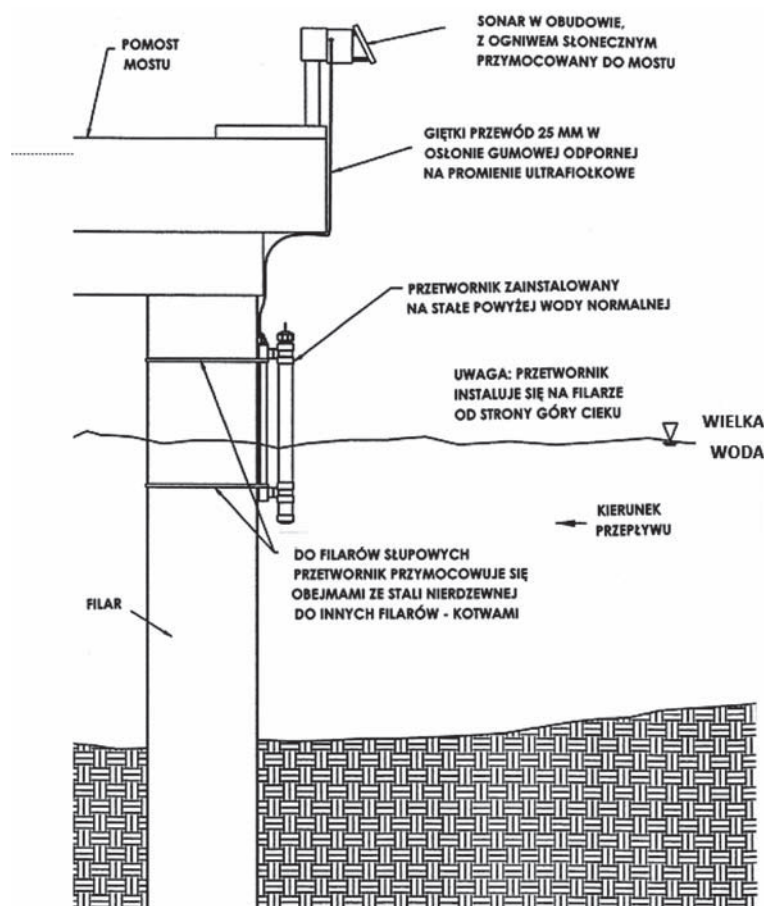
Rys. 3. Elementy systemu stałego sonaru [8]



Rys. 4. Sposób połączenia stałego sonaru z filarem [8]



Rys. 5. Sposób zainstalowania pod wodą stałego sonaru monitorującego rozmycia przed filarem; konstrukcję wsporczą i nadajnik sonaru instalują nurkowie; umieszczenie sonaru na znacznej głębokości pod wodą chroni go przed lodem i wandalami oraz zmniejsza zagrożenie uszkodzeniami przez szczątki płynące z wodą [Hardesty and Hanover, ETI's Scour Tracker™, Internet]



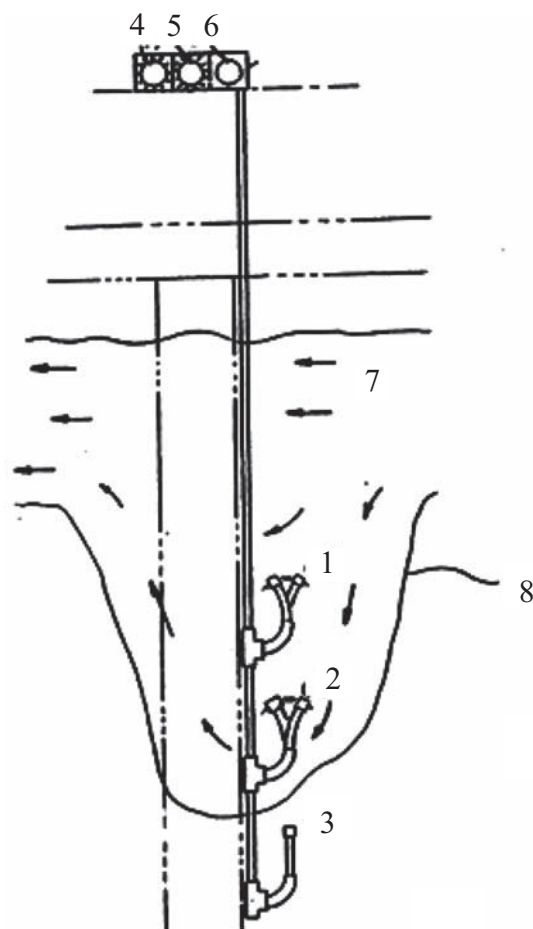
Rys. 6. System monitorowania rozmyć dna cieku stałym sonarem zainstalowanym na filarze mostu; sonar jest instalowany w czasie wody normalnej na takim poziomie, aby jego przetwornik był w wodzie powodziowej [12a]



Rys. 7. Widok instalacji stałego sonaru monitorującego rozmycia dna przy filarze zawierającej stację zdalnej transmisji danych i ogniwo słoneczne; na filarze 3 widać zainstalowany rejestrator sonaru [13]

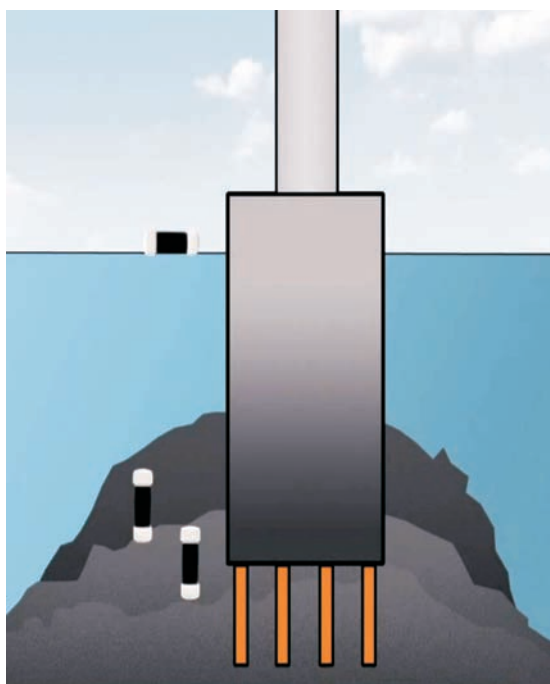


Rys. 8. Zainstalowane na ścianie filara obudowy dwóch stałych, zautomatyzowanych tyczek sondujących, które monitorują poziomy narzutu kamiennego [13]



Rys. 9. Sposób monitorowania rozmyć według patentu EPO459749A1:

- 1 i 2 – czujniki odsłonięte przez erozję, poruszane przez płynącą wodę,
- 3 – czujnik nieruchomy poniżej poziomu rozmycia dna cieku,
- 4 i 5 – świecące się kolorowe lampy połączone z czujnikami 1 i 2 poruszanymi przez wodę,
- 6 – nieświecąca się kolorowa lampa połączona z nieruchomym czujnikiem 3,
- 7 – przepływający ciek,
- 8 – dno cieku



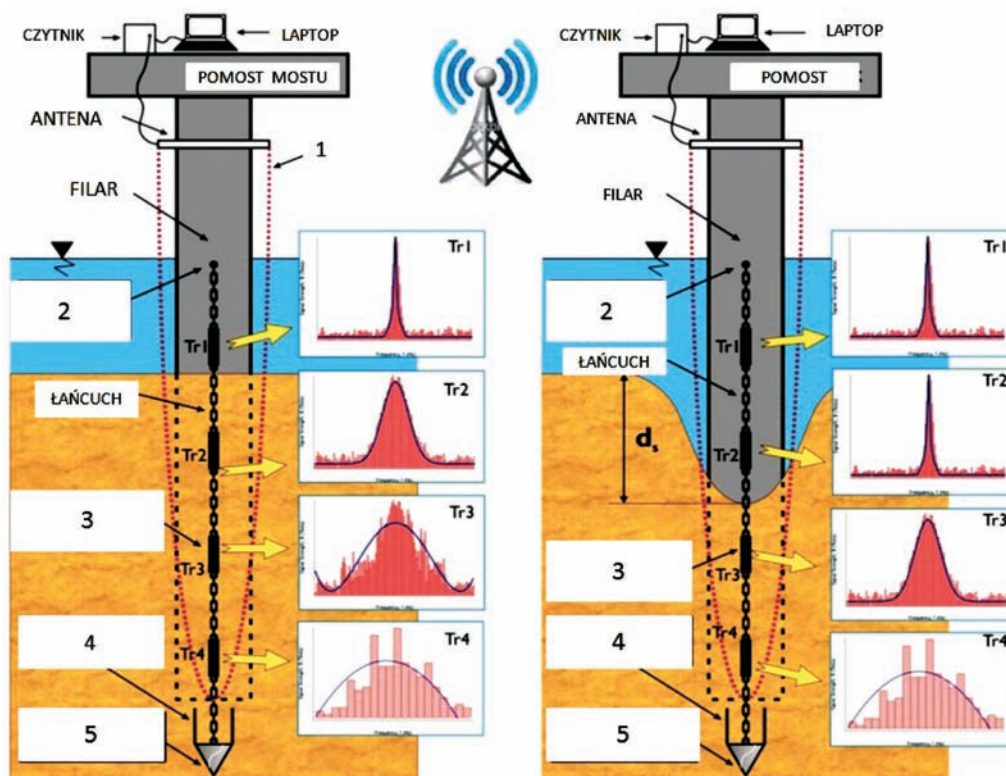
Rys. 10. Schemat działania wypływających czujników rozmycia [University of Pittsburg, Swanson School of Engineering, Internet]



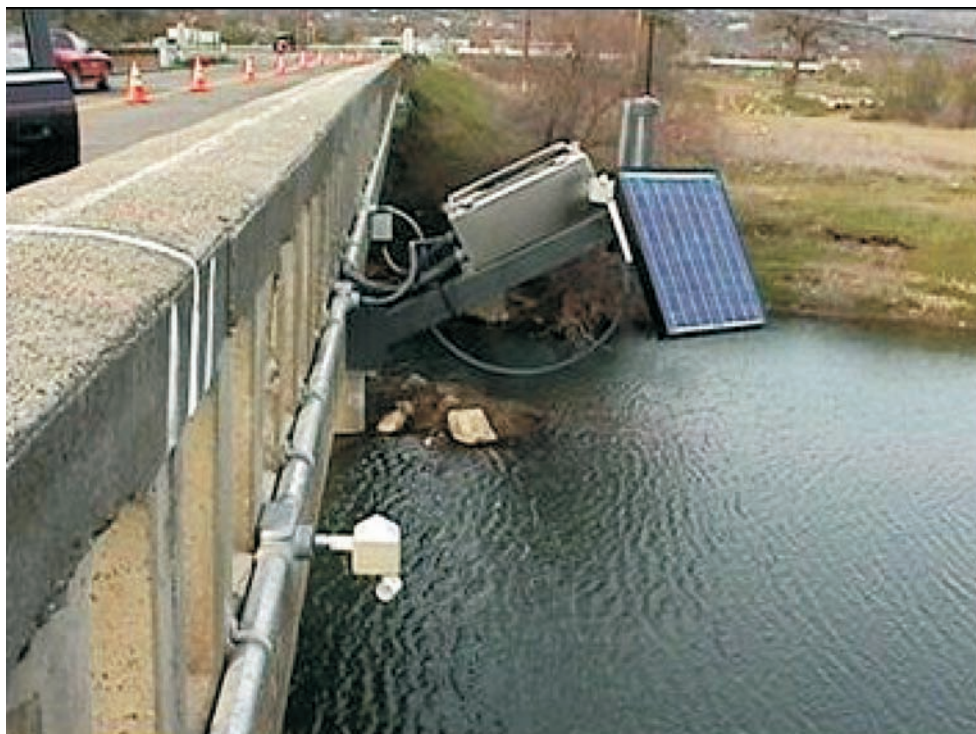
Rys. 11. Wypluwające czujniki rozmycia przed osadzeniem w podłożu cieku. Kolor i numer czujnika umożliwiają jego identyfikację [13]



Rys. 12. Elementy wypływającego czujnika rozmyć [University of Pittsburg, Swanson School of Engineering, Internet]



Rys. 13. Czujniki erozji systemu RFID rozmieszczone wzdłuż łańcucha: z lewej stan przed rozmyciem dna, z prawej - po rozmyciu: 1 – element anteny prostokątnej z jedną pętlą (może być więcej), 2 – górny koniec łańcucha przymocowany do filara, 3 – obudowa transpondera (długości 120 mm), w której płynąca woda obraca nadajnik do poziomu, 4 – zakotwienie dolnego końca łańcucha w dnie cieku, 5 – stalowy stożek stanowiący zakotwienie łańcucha, wbity w dno z użyciem odzyskiwanej rury [Arizona State University, Internet]



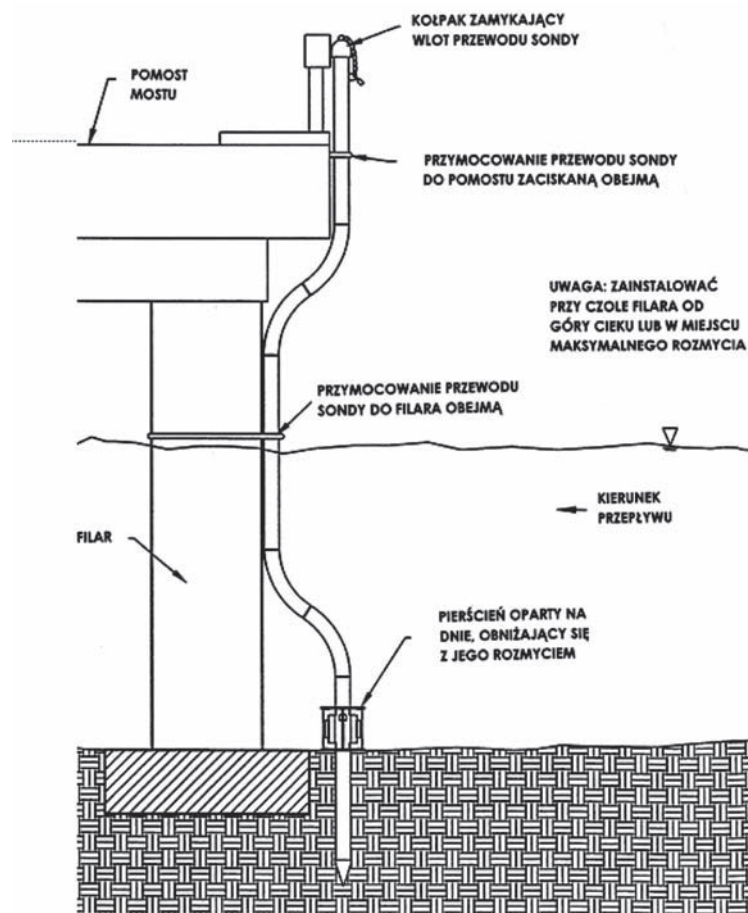
Rys. 14. Pochyłomierz z ogniwem słonecznym przymocowany do belki policzkowej wspornika pomostu [13]



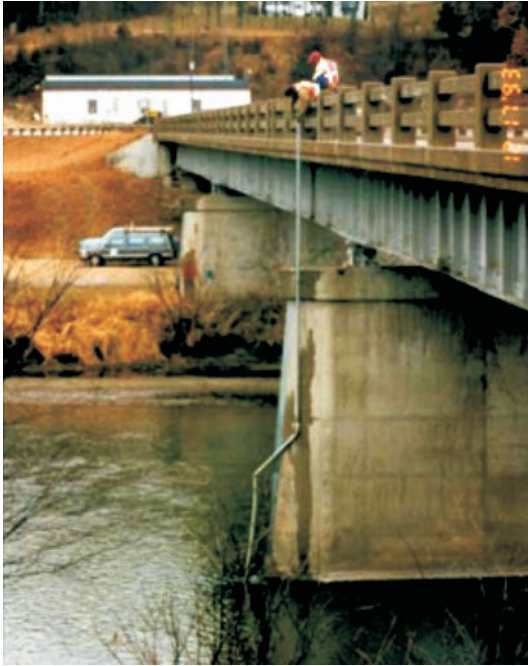
Rys. 15. Rejestrator danych pochylomierza [13]



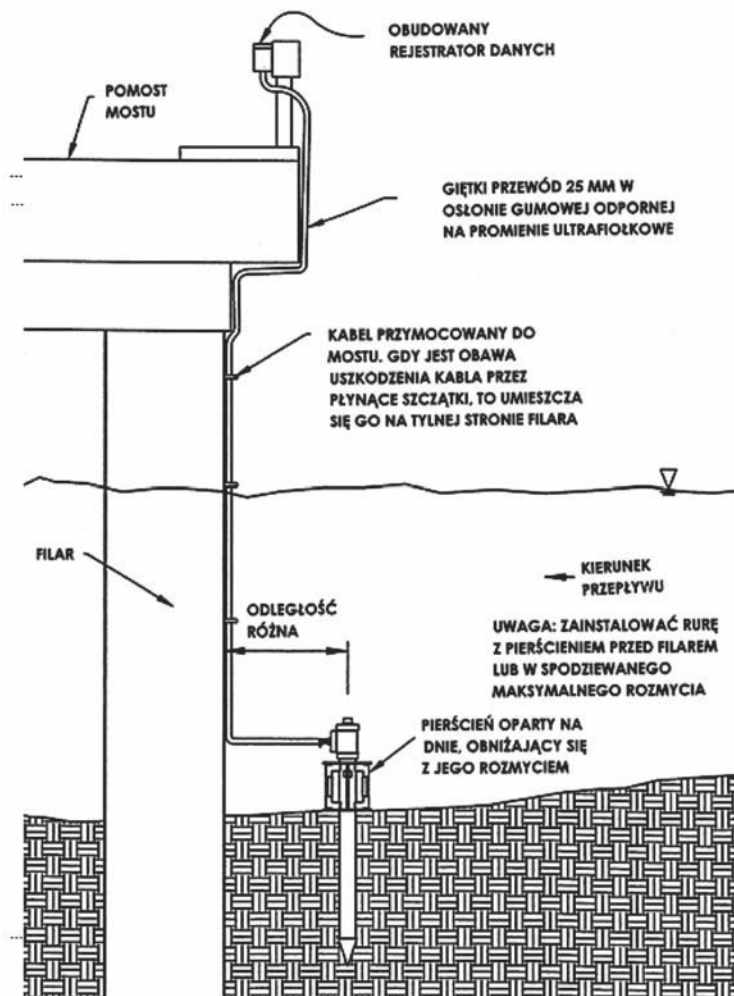
Rys. 16. Ogniwo słoneczne zainstalowane na pasie dolnym blachownicowego dźwigara głównego górnej konstrukcji mostu [8]



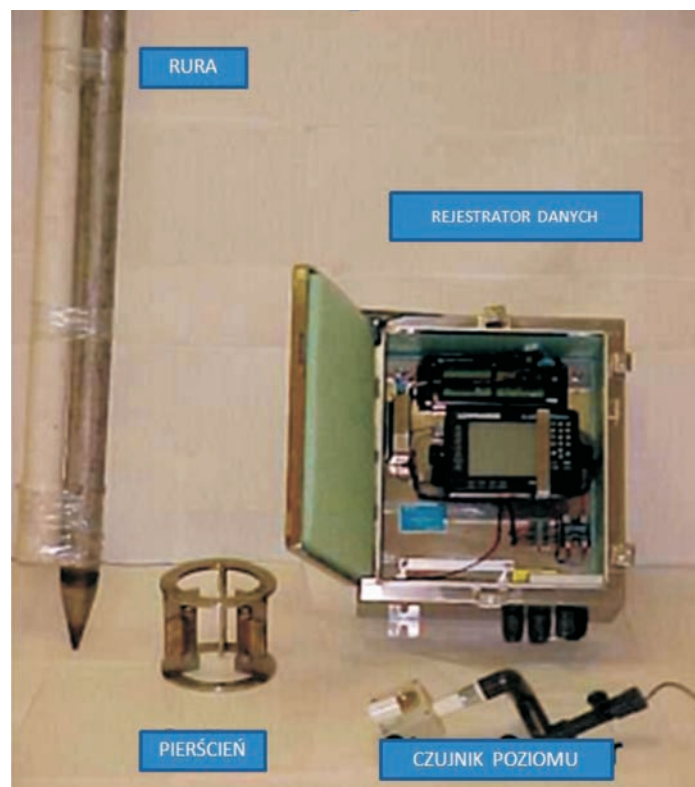
Rys. 17. System monitoringu rozmyć pierścienia opartego na dnie, obniżającego się z jego rozmyciem, z manualną rejestracją danych [12a]



Rys. 18. Widok instalacji opadającego pierścienia z manualną rejestracją danych [Internet]



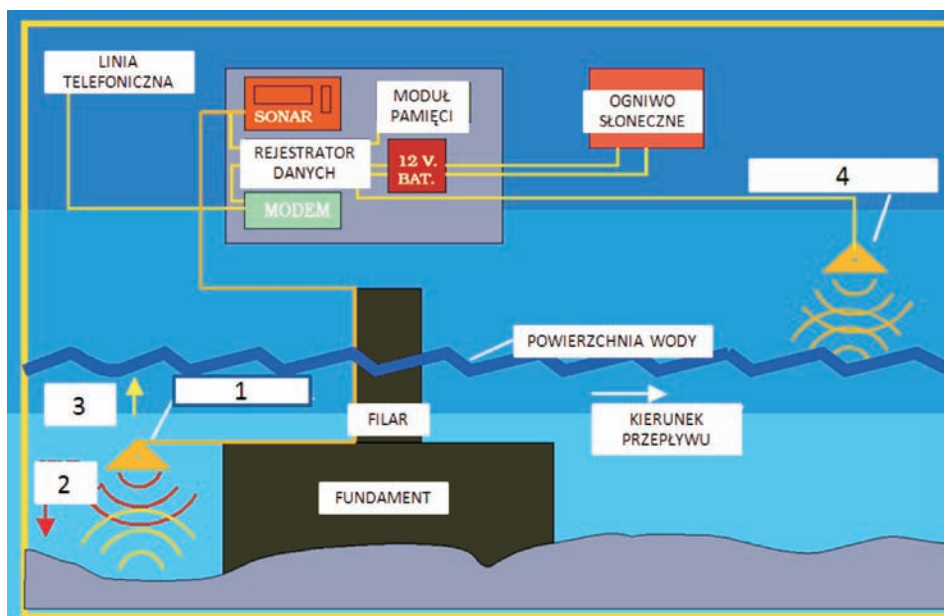
Rys. 19. System monitoringu rozmyć opartym na dnie pierścieniem o zautomatyzowanym zapisie danych [12a]



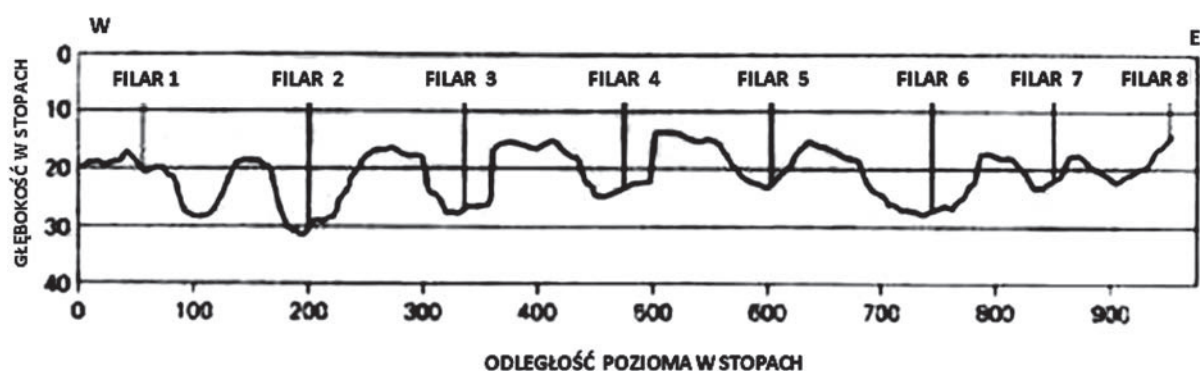
Rys. 20. Podstawowe elementy zautomatyzowanego systemu monitorowania rozmyć obniżającym się pierścieniem [8]



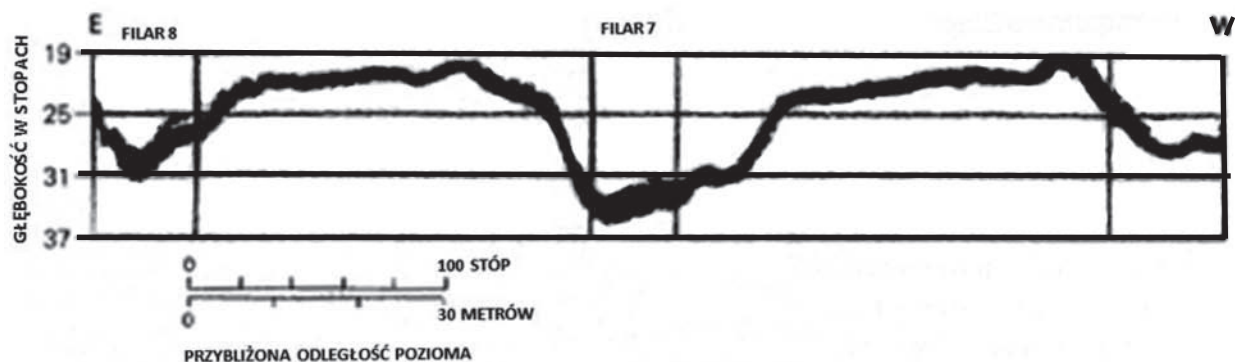
Rys. 21. Widok magnetycznego pierścienia opadającego, leżącego na dnie cieku, systemu zautomatyzowanego [13]



Rys. 22. Schemat systemu stałego sonaru monitorującego rozmycia dna przy filarze:
1 – przetwornik, 2 – sygnał wysyłany, 3 – sygnał powracający, 4 – przetwornik poziomego ciek
[Oregon Water Science Center Study, Dep. of the Interior Geological Survey, Internet]



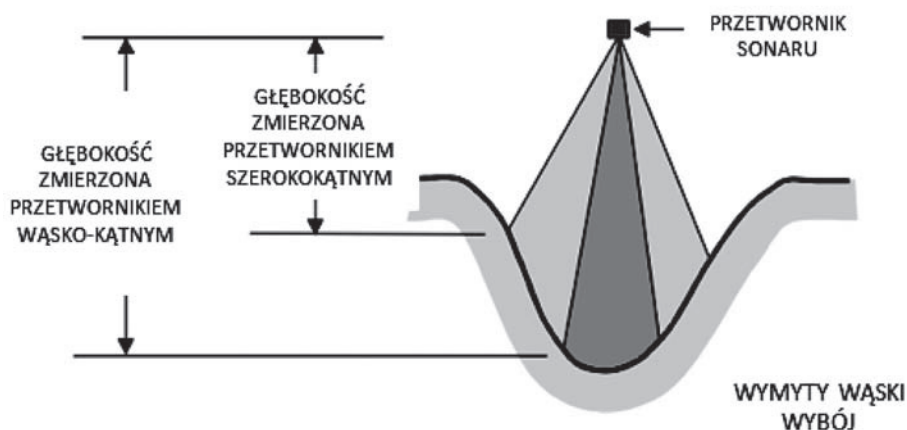
Rys. 23. Przekrój dna w odległości 1,5 m w górę rzeki od filarów mostu w Bulkeley, Hartford wykonany przenośną echosondą 200-kHz [19]



Rys. 24. Profil w odległości 1,5 m w górę rzeki od filarów w czasie budowy mostu Baldwin, Old Saybrook uzyskany przenośną echosondą 200-kHz [19]



Rys. 25. Radarowy czujnik poziomy do bezkontaktowego pomiaru odległości od zwierciadła wody; umożliwia pomiar z wysokości do 35 m w szerokim zakresie temperatur i zmian poziomu zwierciadła wody [Internet]



Rys. 26. Efekty pomiaru głębokości wyboju rozmytego w dnie cieku sonarem generującym wiązkę energii akustycznej z dużym i z małym kątem wierzchołkowym („szeroką” i „wąską”) [7]



Rys. 27. Echosonda: przetwornik/nadajnik i rejestrator danych z ekranem ciekłokrystalicznym [Internet]



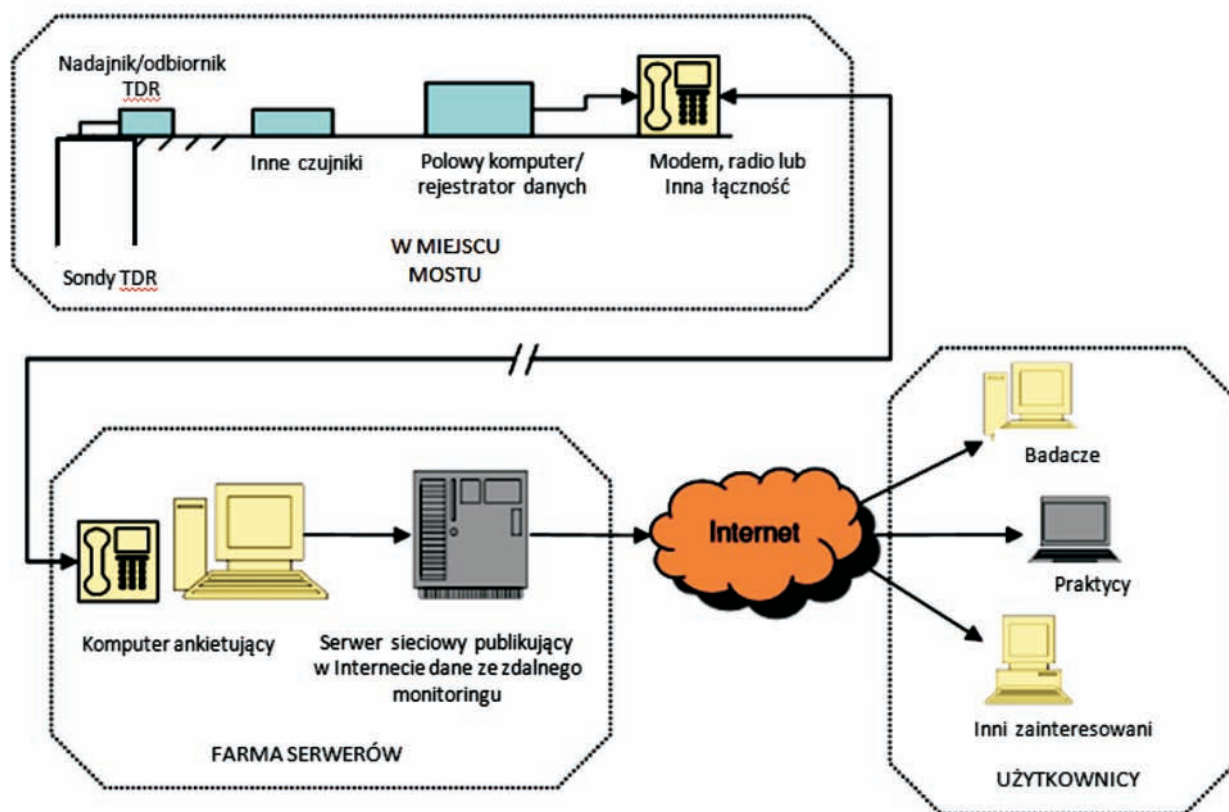
Rys. 28. Manualna, cyfrowa echosonda do pomiaru głębokości; działa z częstotliwością 200 kHz, jest zasilana baterią 9V, która umożliwia wykonanie 500 pomiarów; wysyła sygnał akustyczny, odbity przekształca w elektryczny; wyłącza się automatycznie po 10 s; koszt tego rodzaju przyrządu jest od kilkudziesięciu do dwustu kilkudziesięciu euro [Internet].



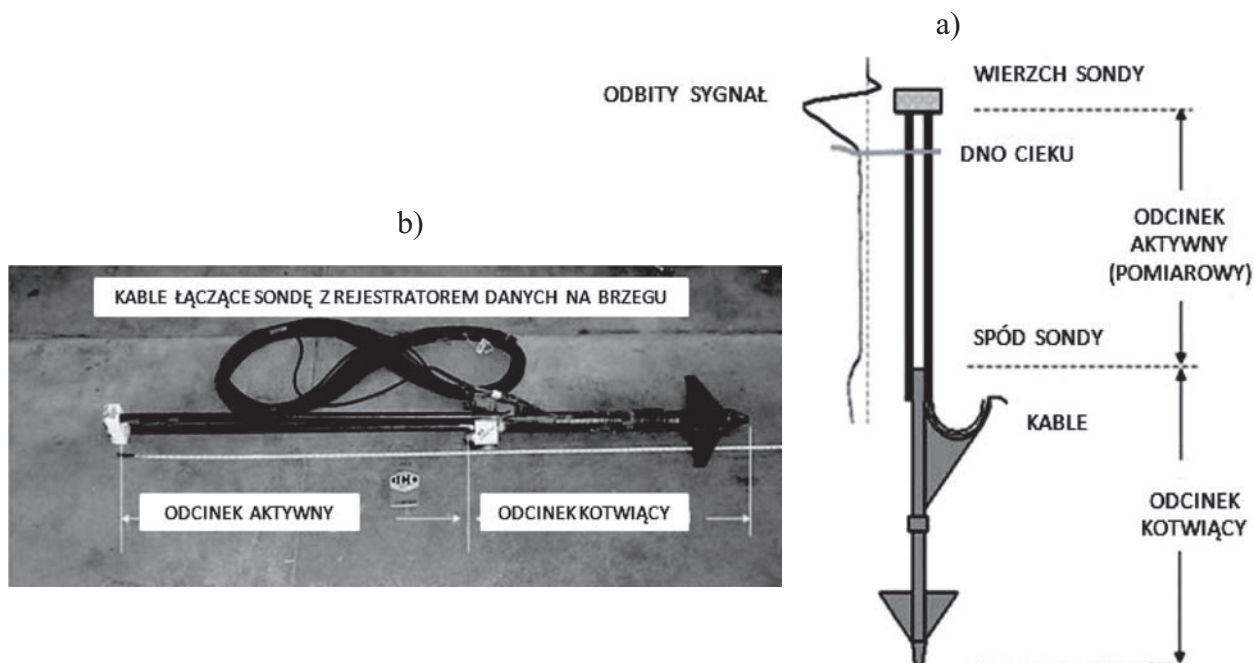
Rys. 29. Manualna cyfrowa echosonda do pomiaru głębokości wody [Internet]



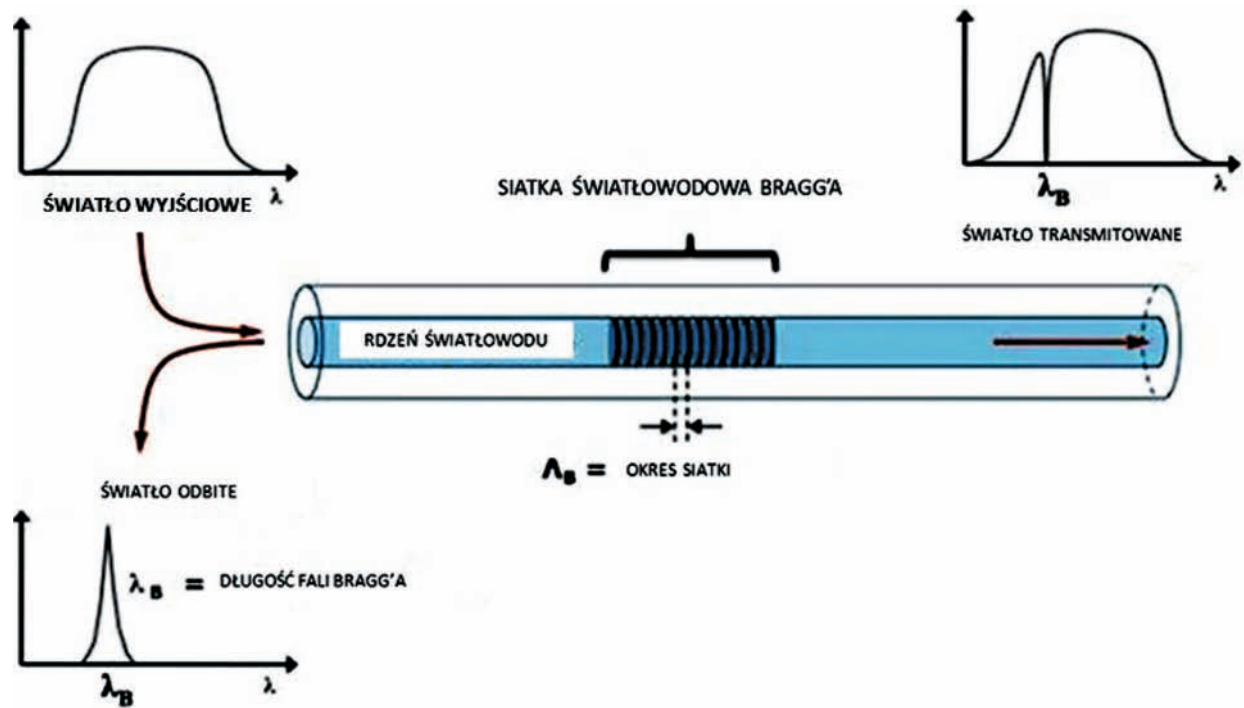
Rys. 30. Burtowy sonar skanujący [Internet]



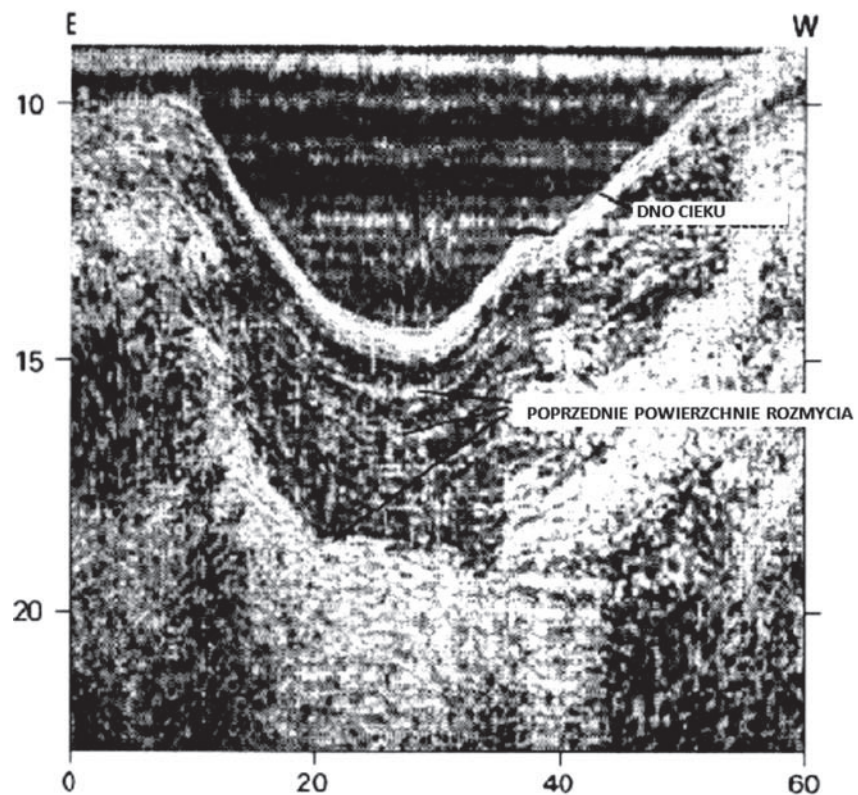
Rys. 31. Schemat przepływu danych monitoringu rozmyć reflektometrem (TDR) z miejsca badania do Internetu [5]



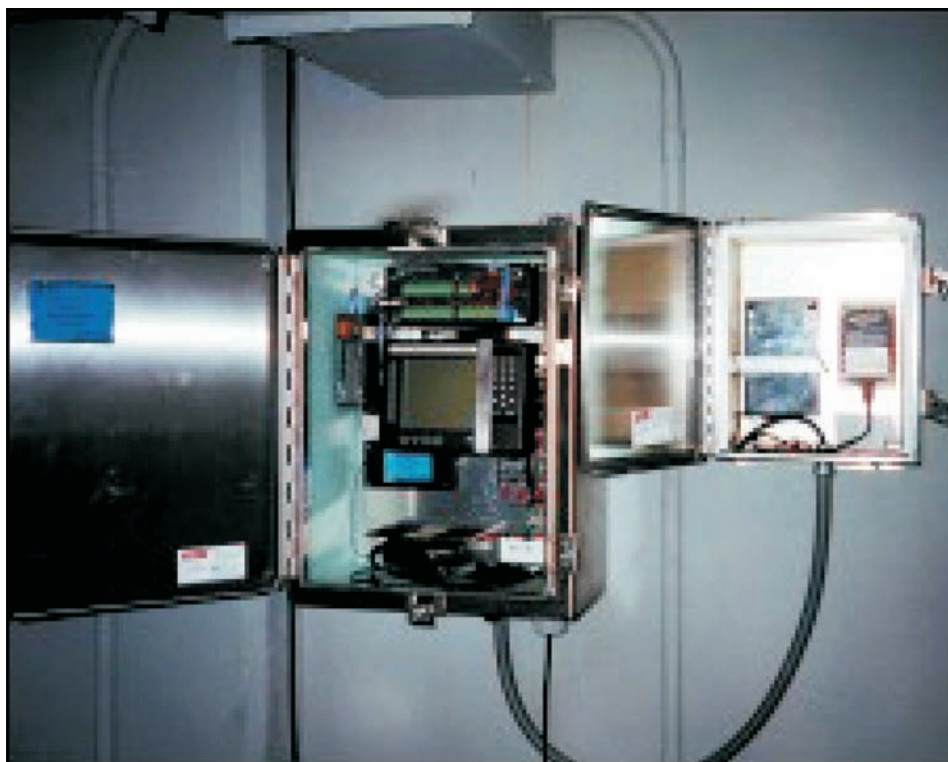
Rys. 32. Reflektometr optyczny czasu przebiegu impulsu energii światła (OTDR) opracowany przez Korpus Inżynierów Armii USA [13]



Rys. 33. Zasada działania czujnika optycznego FBG z siatką Bragg'a [3]



Rys. 34. Obraz podłoża dna cieku uzyskany metodą profilowania odbiciami sejsmicznymi, po filtracji cyfrowej [19]



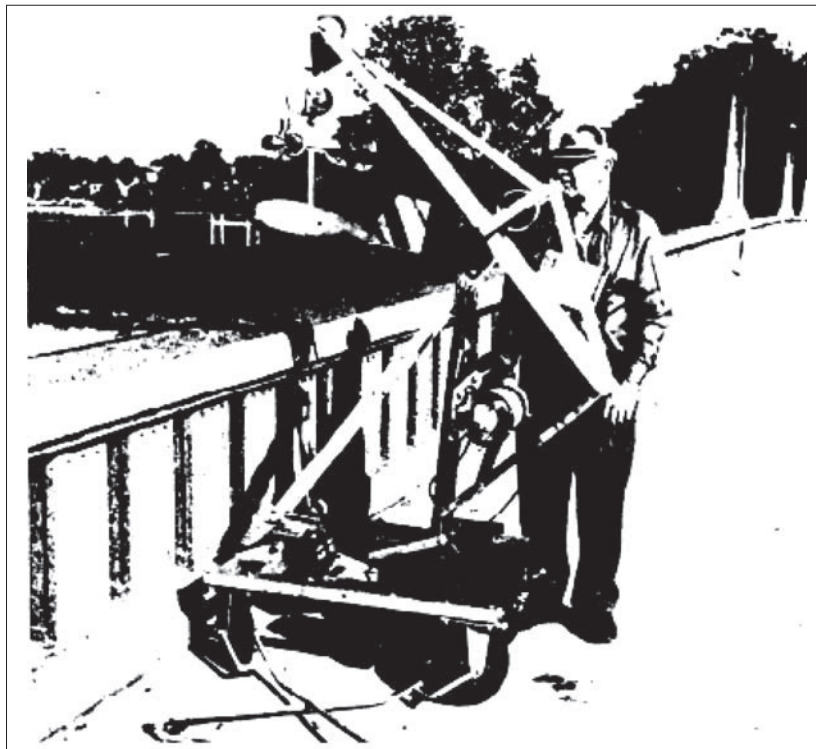
Rys. 35. Zbiórny rejestrator danych nadający się do stosowania z dowolnymi stałymi przyrządami monitoringu rozmycia [13]



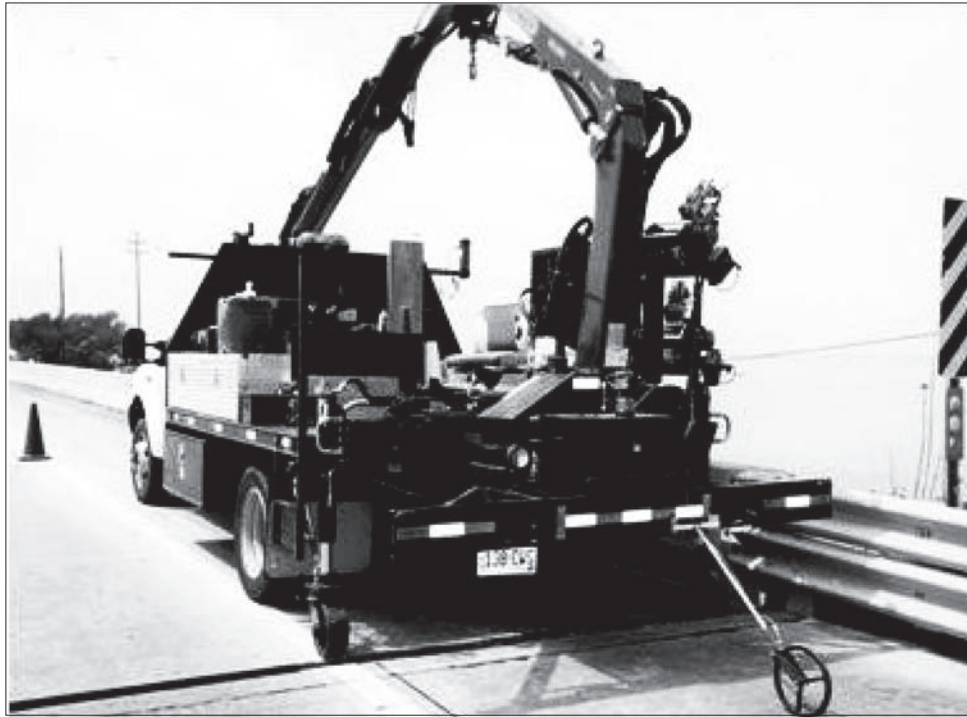
Rys. 36. Pomiar z mostu głębokości dna cieku sondą fizyczną z tyczki zakończonej echosondą [13]



Rys. 37. Sonar zawieszony na linie stalowej z obciążnikiem w kształcie torpedy [Internet]



Rys. 38. Czterokołowa dźwignica wyposażona we wciągarkę jednobębnową; na zdjęciu wysięgnik jest w pozycji cofniętej; przy zewnętrznym końcu wysięgnika widać zawieszony na linie jej obciążnik w kształcie torpedy i przyrząd do pomiaru prędkości przepływu wody [20]



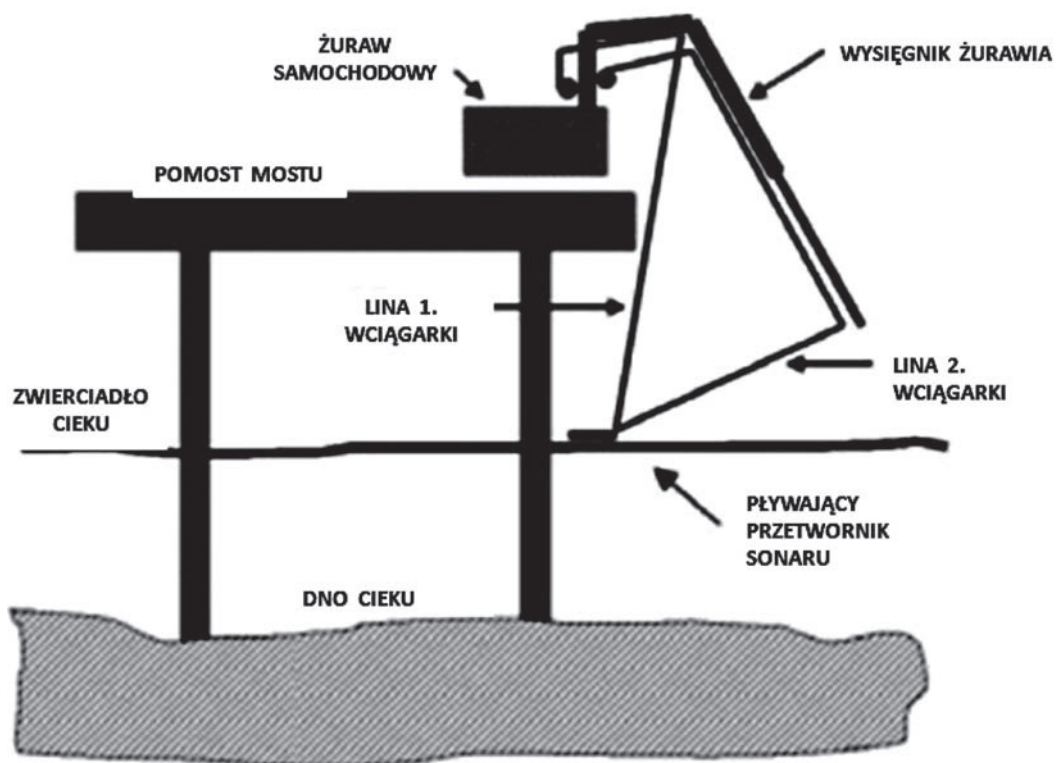
Rys. 39. Przegubowy wysięgnik zainstalowany na ciężarówce, doprowadzający sonar wzdłuż mostu do miejsc pomiaru głębokości cieku; z tyłu ciężarówki widać kółko pomiaru odległości, będące elementem systemu lokalizacji miejsc pomiaru sonarem [13]



Rys. 40. Doprowadzani sonaru z mostu do miejsca pomiaru głębokości przegubowym wysięgnikiem zainstalowanym na samochodzie [Internet]



Rys. 41. Doprowadzanie sonaru do miejsc pomiaru systemem przegubowego wysięgnika zainstalowanego na ciężarówce [13]



Rys. 42. Układ lin żurawia samochodowego wyposażonego we wciągarkę dwubębnową, umożliwiający doprowadzanie przyrządu monitorującego rozmycia pod wspornik chodnikowy pomostu



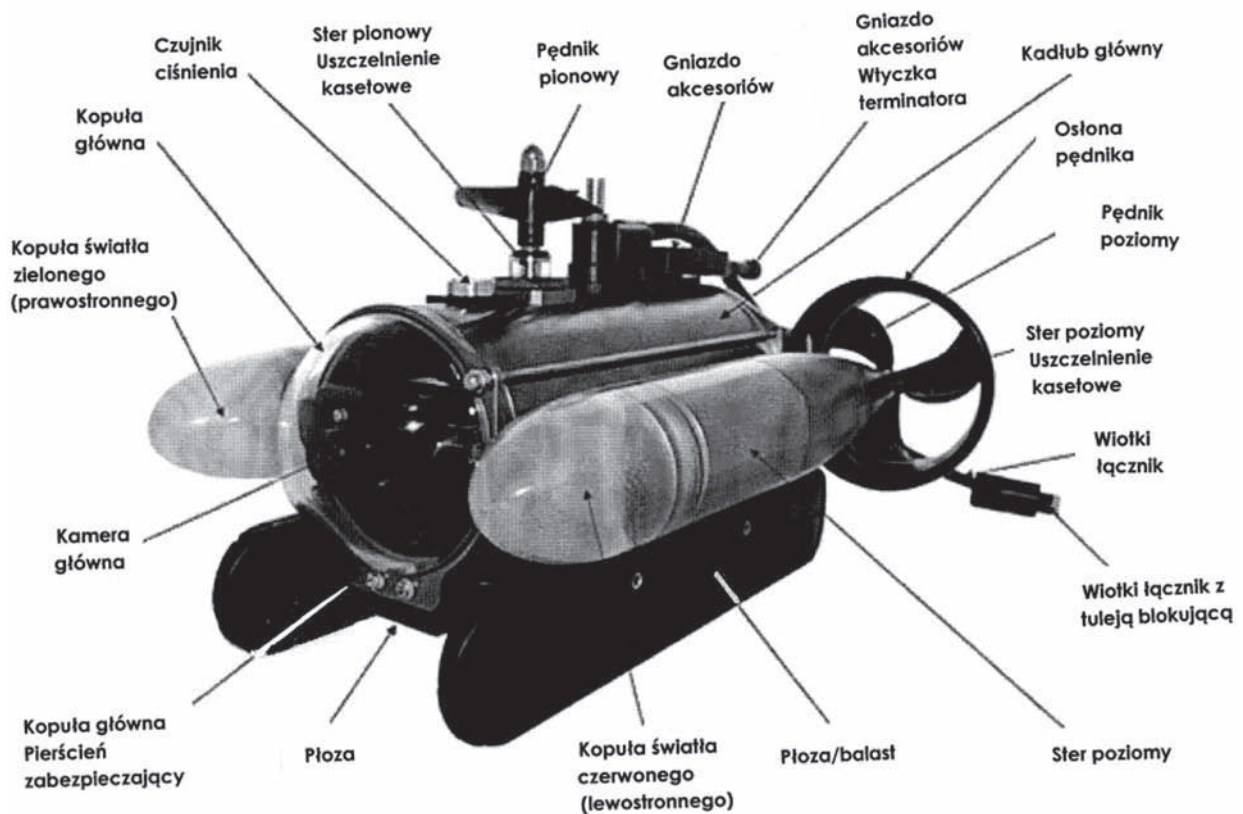
Rys. 43. Bezzałogowa łódź stosowana jako nośnik przenośnych przyrządów monitoringu rozmyć [13]



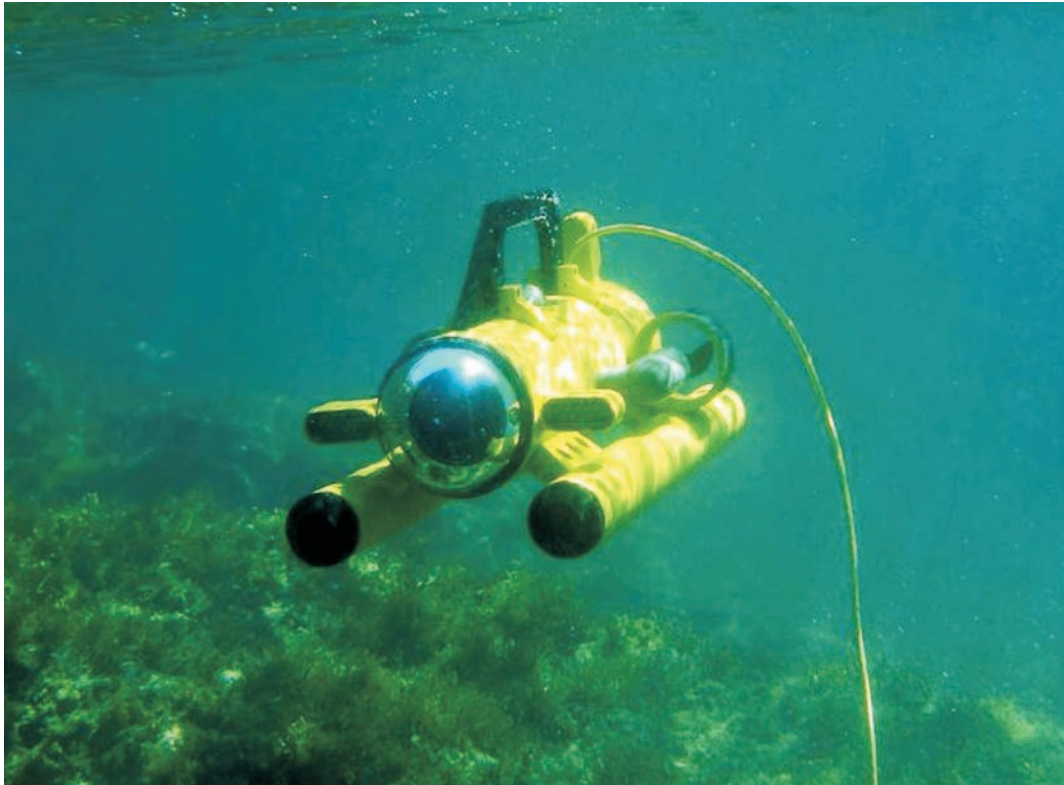
Rys. 44. Pływak stosowany jako nośnik na uwięzi sonaru [13]



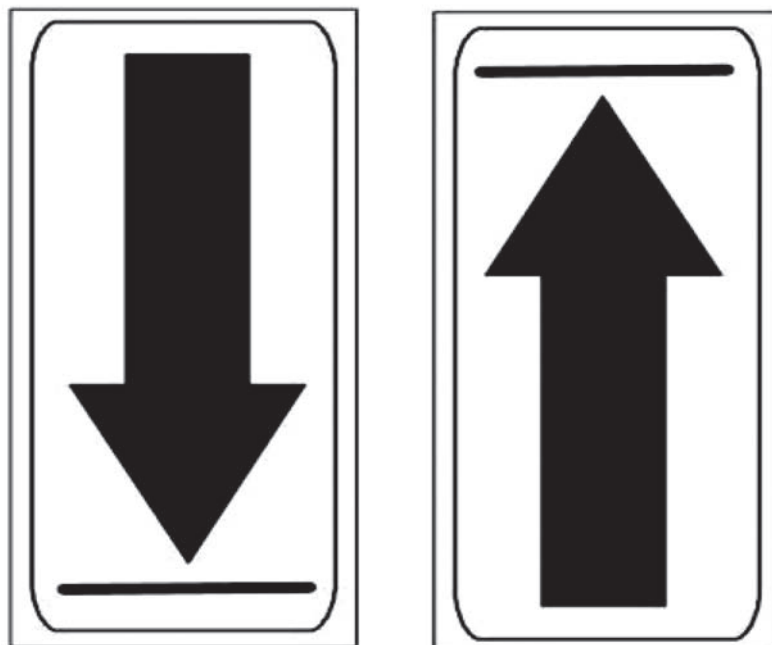
Rys. 45. Deska do pływania na kolanach stosowana jako nośnik na uwięzi sonaru [13]



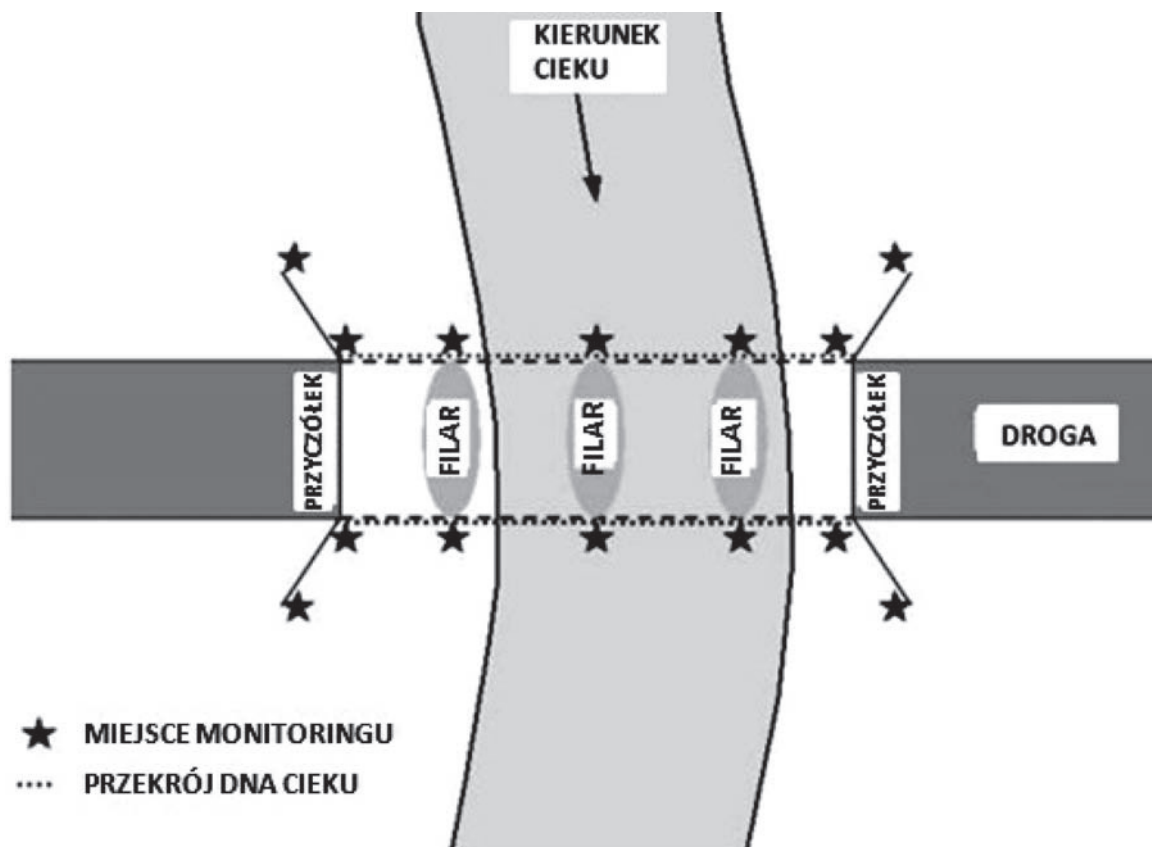
Rys. 46. Zdalnie sterowany pojazd podwodny (ROV) produkcji Video Ray [Internet]



Rys. 47. Widok pojazdu podwodnego sterowanego z powierzchni wody, wyposażonego w kamerę filmową [Internet]



Rys. 48. Oznakowania poziomów wody (WSEL – *Water Surface Elevation*) stosowane w USA; z lewej – oznakowanie poziomu wody, przy którym należy rozpocząć monitorowanie rozmyć koryta cieków; z prawej – poziomu wody, przy którym można monitorowanie zakończyć [16]



Rys. 49. Typowe miejsca monitoringu rozmyć przy moście [16]

Prof. inż. Andrzej Jarominiak

Załącznik 3

Mosty z nieznanymi fundamentami

1. Wstęp

Aby ocenić czy most jest zagrożony przez podmycia trzeba wiedzieć na jakich fundamentach są posadowione jego podpory i do jakich rzędnych ich fundamenty są zagłębione w gruncie. Poznanie zagrożenia umożliwia wybór poprawnego postępowania, tzn.:

- gdy most jest bezpieczny – nie podejmuje się żadnych działań,
- gdy rozmycie zmniejszyło zagłębienie fundamentu (lub fundamentów) w gruncie do mogącego zagrozić bezpieczeństwu użytkowników mostu – należy przeciwdziałać dalszemu pogłębianiu rozmycia,
- gdy rozmycie zagraża katastrofą mostu – należy zamknąć ruch na moście.

W Polsce jest stosunkowo dużo mostów, których fundamenty są nieznanne. Administratorzy nie mają ich dokumentacji powykonawczej, a nawet projektowej. Przyczyny są obiektywne – wojny, wielokrotne zmiany administracji, nakaz w czasach PRL niszczenia wszelkiej dokumentacji po 10 latach jej archiwizowania oraz subiektywne – niedocenianie przez administratorów ważności przechowywania dokumentacji mostów i bałaganiarstwo.

Uznaje się, że fundamenty mostu są nieznanne, gdy nie wiadomo:

- na jakim rodzaju fundamentów most jest oparty: czy na bezpośrednich (ławowych lub stopowych, jaka jest głębokość otaczających je ścianek szczelnych), czy na głębokich (kesonach, studniach, z pali o małej lub dużej średnicy, ze ścian szczelinowych),
- jakie wymiary mają fundamenty (w tym średnica i liczba pali, rzędne stóp) oraz
- jakie są warunki geotechniczne w miejscu podpór mostu.

2. Postępowanie w przypadku mostów o nieznanymi fundamentach

Każdy most z nieznanymi fundamentami należy traktować jako potencjalnie zagrożony podmyciem. Zagrożenie jest klasyfikowane trzema stopniami:

- wysokie,
- umiarkowane,
- małe.

Najmniej zagrożone są mosty, w których historii nie było problemów powodowanych przez rozmycia. W przypadku takiego mostu wystarcza kontrola przy nim dna i brzegów cieku co dwa lata i po każdym nietypowym, ważnym wydarzeniu (po wyjątkowo dużej powodzi, wyjątkowo dużych opadach, spiętrzeniu wody w cieku przez szczątki itp.). Wszystkie dane z obserwacji i kontroli koryta cieku powinny być zapisywane w raportach z przeglądów mostu, aby było można śledzić zachodzące przy nim zmiany w cieku.

Za najbardziej zagrożone uznaje się mosty, w których w historii bywały problemy powodowane rozmyciami. W tym przypadku minimalnym wymaganiem jest częstsze monitorowanie stanu dna niż w przypadku mostów o małym i umiarkowanym zagrożeniu. Kontrola koryta cieku powinna być robiona corocznie. Należy zwiększyć intensywność obserwacji zachowania się mostu w okresach przepływu wody powodziowej: czy występują osiadania lub obroty podpór mostu, czy przemieszcza się jego górna konstrukcja (co szczególnie uwidacznia się w deformacjach poręcz, w zmianach rozwarłości urządzeń dylatacyjnych i w osiadaniu zasypki przyczółków).

Gdy most jest bardzo zagrożony podmyciem, to należy po każdej powodzi ustalić, jakie nastąpiło zmniejszenie zagłębienia fundamentów mostu w gruncie nienaruszonym przez rozmycia. Jeżeli stwierdza się znaczące zmniejszenie zagłębienia, to należy możliwie bezzwłocznie zastosować środki zabezpieczające podpory/podporę mostu przed dalszym podmywaniem oraz rozpocząć starania o zbudowanie nowego, bezpiecznego mostu.

Zaleca się, aby administrator mostu z nieznanymi fundamentami opracował:

- 1) plan rozpoznania fundamentów podpór mostu i określenia dla każdej podpory granicznego rozmycia koryta cieku (jego głębokości i zakresu), którego wystąpienie stworzy zagrożenie dla bezpieczeństwa mostu,
- 2) zasady postępowania z mostem do czasu zidentyfikowania jego fundamentów oraz
- 3) zapewnił przy moście w okresach powodzi środki umożliwiające skuteczne zamknięcie na nim ruchu, w przypadku pojawienia się objawów niestabilności mostu.

Ustalenie jaki jest rodzaj nieznanego fundamentu ułatwia:

- a) zebranie i udokumentowanie wiadomości historycznych o fundamentach i praktyce ich projektowania w czasach budowy mostu (bywa przydatne informacja, jakie wtedy stosowano rodzaje fundamentów),
- b) znalezienie dokumentów dotyczących mostu w archiwach oraz w instytucjach, urzędach i przedsiębiorstwach, które zajmowały się mostem; charakterystyki mostów bywają też zamieszczane w czasopismach i materiałach konferencji technicznych,
- c) ustalenie specyfiki produkcyjnej wykonawcy fundamentów; może ona wskazać jaki jest prawdopodobny rodzaj fundamentów – na przykład, są firmy budowlane, które realizują fundamenty z wbijanych żelbetowych pali prefabrykowanych, z wierconych pali wielkośrednicowych, ze ścian szczelinowych, ulepszające grunty „*in situ*” itd.,
- d) uzyskanie informacji u ludzi, którzy byli związani z projektowaniem, budową lub utrzymaniem mostu, a nawet u zamieszkujących w pobliżu mostu; a ponieważ pamięć ludzka jest zawodna, dlatego za wiarygodne można uznawać tylko informacje potwierdzone relacją innego świadka.

W archiwalnych plikach administratora mostu można czasami znaleźć pośrednie informacje, które pozwalają wydedukować jakie są charakterystyki fundamentów mostu. Przeglądanie archiwum dostarcza informacje o fundamentach nawet, gdy nie jest dostępna dokumentacja powykonawcza mostu:

- zapisy z przeglądów mostu mogą zawierać poziomy koryta cieku występujące w różnym czasie, także poziomy dna koryta przy podporach mostu po dużej powodzi, które mogą służyć jako poziomy odniesienia dla oceny aktualnych warunków hydrologicznych; na

przykład, gdy aktualnie dno jest 1,0 lub 1,5 m powyżej jego stanu po dużej powodzi, a most nie został przez nią uszkodzony to świadczy, że obecnie zagrożenie mostu przez podmycia jego podpór jest mało prawdopodobne,

- inspektorzy przeprowadzający przeglądy mostu mogli udokumentować fundament lub fundamenty odsłonięte przez którąś z poprzednich powodzi; gdy fundament/ fundamenty były widoczne, to informacja o poziomie wierzchu lub poziomie stopy fundamentowej może ułatwić określenie jaki jest to fundament,
- zapisy z przeglądów mostu często zawierają podstawowe informacje o jego fundamentach: czy są bezpośrednie, czy palowe; ta informacja może ułatwić oszacowanie, z rozsądną dokładnością, wymiarów fundamentu bezpośredniego, a także ocenę, czy są prawdopodobne najgroźniejsze przypadki rozmycia, tzn. do poziomu poniżej stopy fundamentu,
- w ciekach z „żywym korytem” wymyte wyboje po opadnięciu wody powodziowej są wypełnione osadzonym w nich gruntem, zwykle drobnym i miękkim; w takim gruncie można łatwo wykonać sondowanie prętem zbrojeniowym; sondowanie pozwala wykryć wierzch fundamentu mimo, że znajduje się poniżej aktualnego dna cieku.

Pogląd jakie prawdopodobnie są fundamenty i jakie jest ich zagłębienie w gruncie można uzyskać przeprowadzając analizę warunków geotechnicznych w miejscu mostu, z uwzględnieniem dostępnych informacji na temat fundamentów pobliskich mostów.

3. Metody polowe identyfikacji nieznanymi fundamentów

3.1. Metody konwencjonalne

Odkopanie fundamentu

Metoda ma ograniczony zakres przydatności. Zwykle daje częściową identyfikację fundamentu. Jest kosztowna i bywa trudna w realizacji.

Sondowanie

Przeprowadza się sondą wbijaną lub wplukiwaną. W tym drugim przypadku jest konieczna ostrożność, aby zbyt nie rozluźnić gruntów przy fundamencie. Sondowanie jest metodą szybką i tanią. Głębokość badania jest ograniczona. Gdy fundament jest w gruncie ziarnistym i z otoczkami lub gdy podpora jest otoczona narzutem kamiennym, to uzyskuje się niepewną identyfikację fundamentu lub może być błędna.

Wiercenie rdzeniowe

Badanie polega na wykonaniu otworu rdzeniowego przez korpus i fundament podpory - do zalegającego pod nim gruntu nośnego. Metoda bywa skutecznym sposobem rozpoznania nieznanego fundamentu. W czasie wiercenia rejestruje się prędkości głębinienia otworu i ocenia zwierzchnię. Uzyskane próbki rdzeniowe umożliwiają zbadanie wytrzymałości materiału podpory. Rzetelność tej metody zależy od rodzaju fundamentu; jest mało wiarygodna w przypadku fundamentu palowego.

Wiercenia geotechniczne

Wiertnicami do badań geotechnicznych wykonuje się obok badanej podpory mostu pewną liczbę otworów ukośnych skierowanych pod jej korpus. Można w ten sposób uzyskać pogląd jaki jest fundament podpory i zlokalizować w nim pale lub ściany/słupy szczelinowe. Metoda nie daje informacji o zagłębieniu pali. Jest kosztowna i pracochłonna. Stosowana do badań fundamentów w wodzie wymaga użycia barki.

Generalnie, metody konwencjonalne są kosztowne, mogą powodować uszkodzenie badanego fundamentu. Ich przydatność do identyfikacji nieznanymi fundamentów jest ograniczona.

3.2. Metody nieniszczące

Są preferowane, gdyż w wielu przypadkach dają bardziej wartościowe informacje i ich stosowanie jest mniej kosztowne, niż metody konwencjonalne. Interpretacja danych uzyskanych metodą nieniszczącą może stwarzać trudności, gdy badanym fundamentem jest palowy lub ze ścian/słupów szczelinowych.

Istotą metod nieniszczących jest wykrywanie zmian w badanych ośrodkach (fundamencie i gruntach):

- gęstości,
- przebiegu fal naprężeń,
- pola elektrycznego,
- pola magnetycznego,
- pola elektromagnetycznego lub
- pola grawitacyjnego.

Interpretację wyników nieniszczącego badania fundamentu zwykle ułatwia wykonanie co najmniej jednego wiercenia rdzeniowego. Skuteczność metody badania nieniszczącego zależy od:

- cech fundamentu – materiału i rodzaju, czy jest bezpośredni, czy pośredni (głęboki),
- dostępu do fundamentu,
- kosztu sprzętu badawczego i kosztu badań,
- wymaganej wiedzy fachowej wykonawców i interpretatorów wyników badań oraz od
- ograniczeń użytej metody.

W USA przeprowadzono badania przydatności do rozpoznawania nieznanymi fundamentów podpór mostowych m.in. następujących metod nieniszczących:

- odpowiedzi echa/impulsu akustycznego (rys. 1),
- odpowiedzi dynamicznej fundamentu,
- radaru stosowanego w otworze wiertniczym (rys. 2),
- georadaru (radaru penetrującego z powierzchni terenu),
- zginanej fali,
- ultra-sejsmicznej,
- sejsmicznej w równoległych otworach,
- akustycznej z otworu równoległego (rys. 3),

- spektralnej analizy fal powierzchniowych,
- indukcji polowej.

Generalnie, wyniki tych badań okazały się mniej zadowalające, niż oczekiwano na podstawie prób początkowych. W rezultacie badań uznano, że najbardziej obiecujące są metody:

- ultra-sejsmiczna,
- badania sejsmicznego z otworu równoległego oraz
- indukcji polowej.

Pozostałe metody mają ograniczone, specyficzne zakresy przydatności.

Metoda ultra-sejsmiczna (rys. 4)

Badanie polega na uderzaniu w podporę mostu młotkiem w celu generowania fal naprężeń. Uderzenia pionowe generują fale ściskania, uderzenia poziome – fale zginania. Fale przebiegają w dół – do stopy fundamentu i po odbiciu od niej – wracają w górę podpory. Przebieg wygenerowanych i odbitych sygnałów jest rejestrowany przez kilka odbiorników rozmieszczonych wzdłuż wysokości podpory. Dlatego jest konieczny dostęp do podpory z jej boku, o wysokości co najmniej 1,50 m. Analiza przebiegów fal energii umożliwia identyfikację poziomu stopy fundamentu. Metoda jest nieprzydatna, gdy fundamentem podpory mostu jest grupa pali zwieńczona dużym elementem.

Metoda badania sejsmicznego z otworu równoległego (rys. 5)

Polega na uderzaniu młotkiem pionowo lub poziomo w dostępną część podpory, które generuje fale ściskania lub zginania. Fale przebiegają w dół fundamentu i część ich energii jest przekazywana w podłoże gruntowe. Powracające fale są przechwytywane przez hydrofon odbiorczy zawieszony w wodzie wypełniającej zarurowany otwór wiertniczy wykonany obok fundamentu (procedura pierwotna), albo przez geofon w otworze zarurowanym lub bosym (gdy jest stabilny bez rury osłonowej; procedura nowa, lepiej przechwytyująca fale). Głębokość fundamentu jest wykazywana przez przybycie sygnału słabszego lub wolniejszego z gruntu poniżej stopy fundamentu, gdzie następuje rozproszenie energii fali.

Metoda indukcji polowej (rys. 6)

Stosuje fale elektromagnetyczne. Jest przydatna tylko w przypadku fundamentów żelbetowych zawierających ciągle zbrojenie pionowe i z pali stalowych (lub zawierających element stalowy, który może być wykorzystany jako elektroda). W odległości nie większej niż 1 m od fundamentu wykonuje się otwór wiertniczy zabezpieczony rurą z PCW, sięgający około 3 m poniżej spodziewanego poziomu stopy fundamentu. W gruntach przy fundamencie jest tworzone trójosiowe pole elektromagnetyczne. W otwór opuszcza się zwojnicę i za jej pomocą mierzy natężenia pola elektromagnetycznego. Gdy zwojnica znajdzie się poniżej stopy fundamentu, wtedy występuje zmniejszenie amplitudy pola elektromagnetycznego. Interpretację danych uzyskiwanych metodą indukcji polowej komplikują znajdujące się w gruncie przy fundamencie elementy przewodzące elektryczność (takie jak kable lub rury).

W praktyce, za najbardziej przydatną do określania zagłębienia fundamentów w gruncie jest uważana metoda badania sejsmicznego z otworu równoległego. Z metod badań nie wymagających wiercenia najszerze zastosowanie do określania zagłębienia nieznanymi fundamentów ma badanie ultra-sejsmiczne. Ale nie daje ono zadowalających informacji, gdy fundamentem jest grupa pali zwieńczona dużym elementem.

Raporty z badań fundamentów metodami nieniszczącymi są dostępne na stronie internetowej: FHWA Unknown Foundations.

4. Informacje uzupełniające

Federalna Administracja Drogowa (FHWA) USA od wielu lat finansuje badania nad metodami rozpoznawania nieznanymi fundamentów mostów. M.in. w 2008 r. utworzyła „Zespół Nierozpoznanych Fundamentów”, którego zadaniami są: opracowanie dla potrzeb kierownictwa FHWA generalnego planu postępowania z mostami o nieznanymi fundamentach oraz zapewnienie właścicielom mostów doradztwa i pomocy w zakresie technologii rozpoznawania fundamentów, a także w zakresie procesów rozwoju i wdrożeń tych technologii. Zespół jest interdyscyplinarny. Składa się m.in. ze specjalistów geotechników, hydraulików, konstruktorów mostów, przedstawicieli instytucji naukowych i rządowej administracji drogowej.

Informacje o swoich opracowaniach Zespół zamieszcza na stronie internetowej: www.fhwa.dot.gov/unknownfoundations.

Podawane na niej informacje, wytyczne techniczne i zalecenia są przedstawiane w czterech działach:

1. Określanie fundamentów.
2. Określanie rozmycia.
3. Możliwości postępowania w przypadku nieznanymi fundamentów.
4. Plany postępowania z mostami o nieznanymi fundamentach.

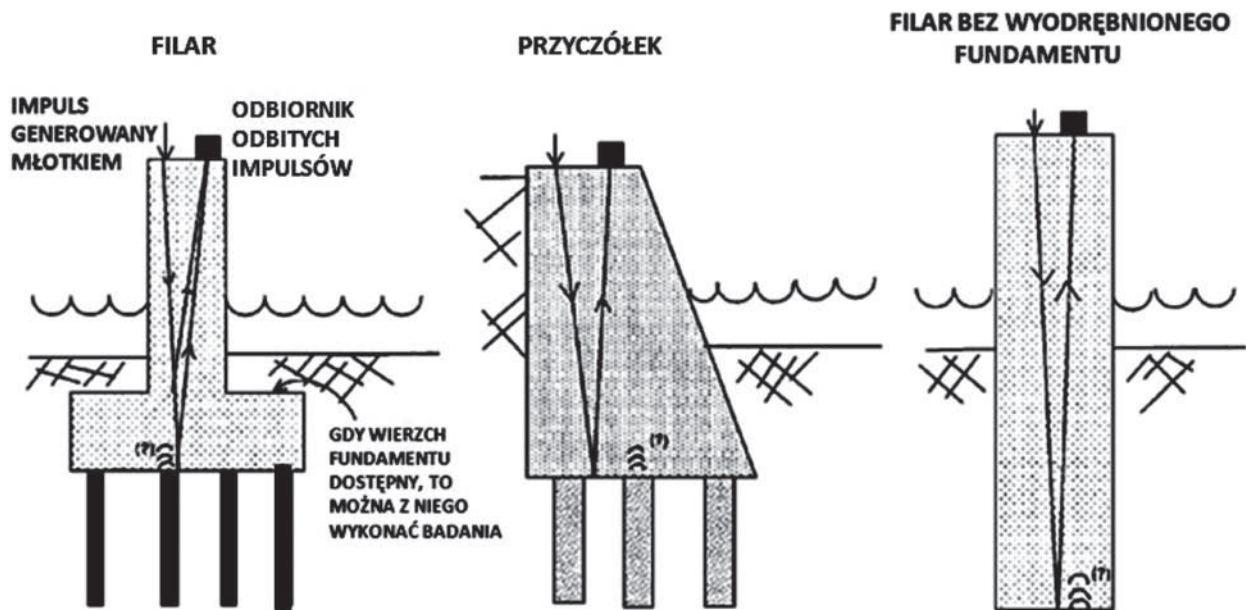
5. Sposób uwieczniania charakterystyk fundamentów podpór mostowych

Ze względów bezpieczeństwa powinien być wprowadzony obowiązek umieszczenia na każdej podporze mostu trwałego zapisu rzędnej granicznego (dopuszczalnego) rozmycia przy niej koryta cieku. W nowych, budowanych mostach zapis powinien być uzupełniony informacjami: jaki jest rodzaj fundamentu podpory, jaka rzędna jego stopy (stóp pali lub słupów/ścian szczelinowych) i jakie są wymiary fundamentu w planie (w przypadku fundamentu z pali ukośnych powinny być podane wymiary płyty zwieńczającej i wymiary grupy pali w poziomie ich dolnych końców). Ewentualnie mogą być jeszcze podane: liczba pali lub słupów/ścian szczelinowych w fundamencie, wymiary przekroju/średnicy pala lub słupa/ściany szczelinowej oraz schemat fundamentu. Informacje te powinny być zapisane w sposób odporny na uszkodzenia przez czynniki naturalne i wandalii. Na przykład, mogą być podane na tablicy odlanej z trwałego tworzywa sztucznego, osadzonej w górnej części podpory. Zapis parametrów fundamentu powinien być obowiązkowo stosowany w projektach podpór nowych mostów, a do umieszczenia zapisu maksymalnego dopuszczalnego rozmycia na podporach mostów użytkowanych – powinni być

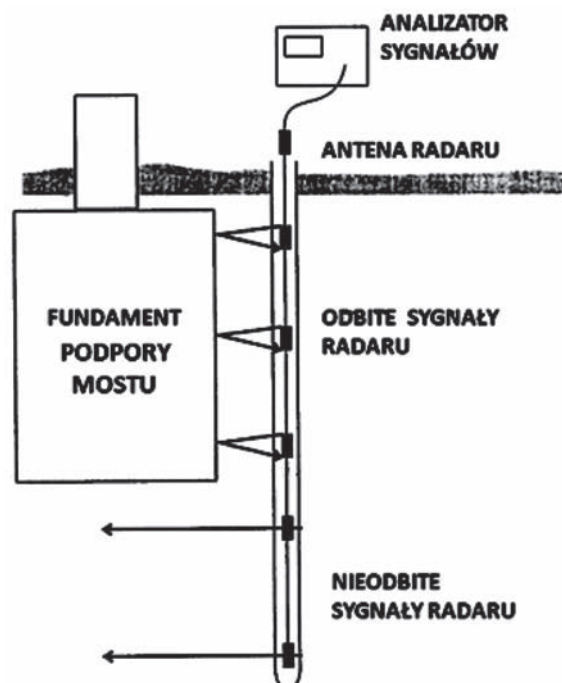
zobligowani ich administratorzy. Realizacja zapisów w nowych mostach będzie łatwa, natomiast w istniejących – kłopotliwa. Jednak obie propozycje są w pełni uzasadnione względami bezpieczeństwa użytkowników przepraw mostowych i dadzą wielopokoleniowe korzyści.

Bibliografia

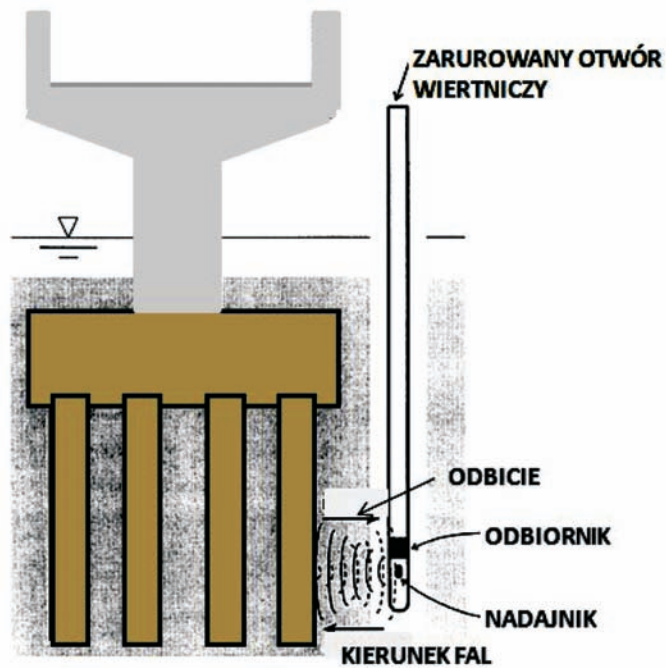
- [1] *Olson L.D., Jalinoos F., Aouad M.F.*: Determination of unknown Subsurface Bridge Foundations. NCHRP 21-5. FHWA, 1998
- [2] Unknown Foundation Determination for Scour. Texas Transportation Institute. Report No FHWA/Tx-12/06604-1, 2012
- [3] *Stein S., Sedmera K.*: Risk-Based Management Guidelines for Scour at Bridges with Unknown Foundations. NCHRP, Transportation Research Board, 2006 (tylko w Internecie)
- [4] Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition. Hydraulic Engineering Circular No 18, FHWA-HIF-12-003, 2012



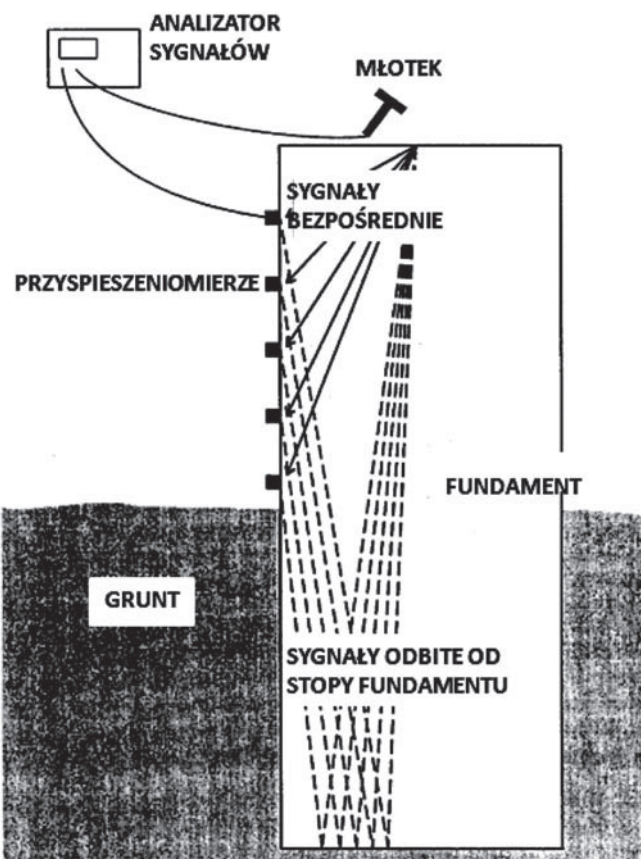
Rys. 1. Schemat badania fundamentu podpory metodą odpowiedzi echa/impulsu akustycznego; jest wymagany dostęp do wierzchu podpory; impulsy odbite od spodu zwieńczenia pali lub korpusu podpory, tj. pomiędzy palami, wykazują mniejsze niż rzeczywiste zagłębienie fundamentu w podłożu gruntowym [2]



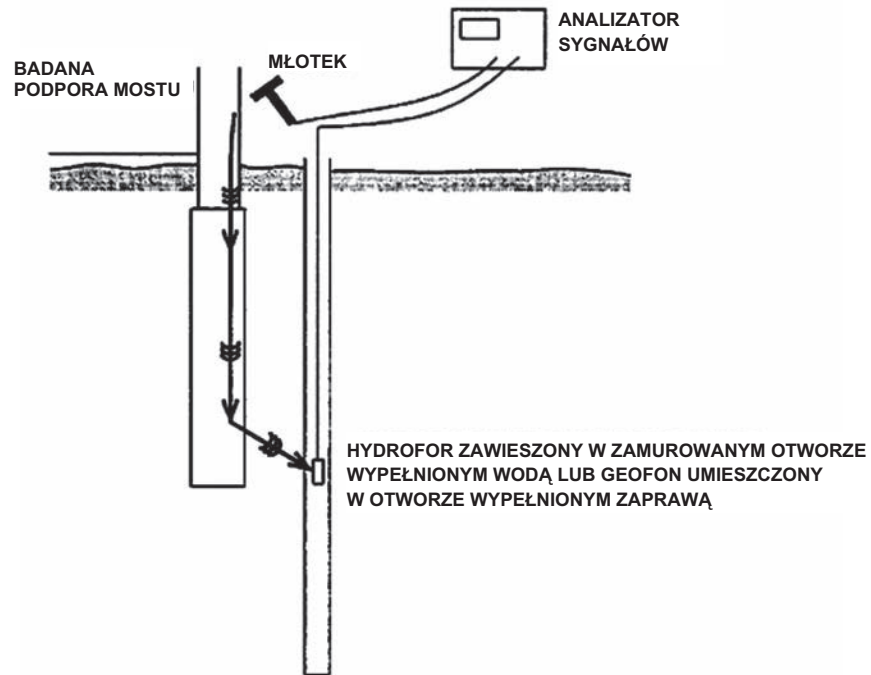
Rys. 2. Schemat badania zagłębienia w gruncie fundamentu podpory mostu radarem z anteną opuszczaną w otworze wywierconym przy fundamencie [1]



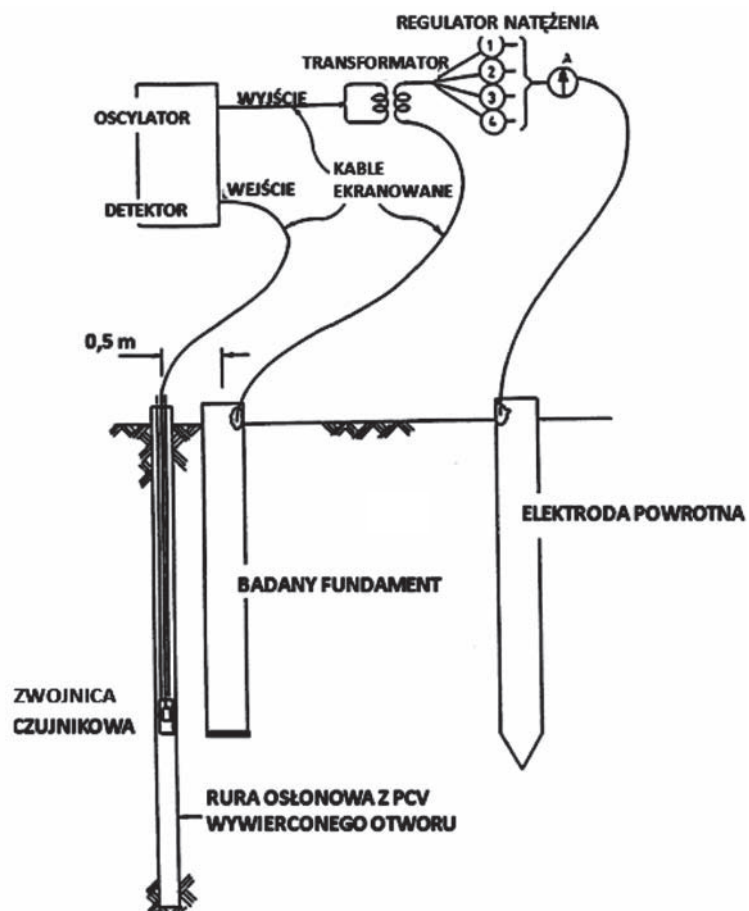
Rys. 3. Schemat badania nieznanego fundamentu metodą akustyczną z wywierconego przy nim otworu [1]



Rys. 4. Schemat metody ultra-sejsmicznej [4]



Rys. 5. Schemat metody badania sejsmicznego z otworu równoległego [2]



Rys. 6. Schemat metody indukcji polowej [1]

Inż. Paweł Mikołajewski

Mgr inż. Zenon Markowski

Załącznik 4

Zastosowanie hydroakustyki w inspekcji budowli wodnych

1. Wstęp

Zarówno powstające nowoczesne mosty i inne budowle wodne imponujące nowoczesnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, jak i konstrukcje mocno przestarzałe, ale w dalszym ciągu eksploatowane wymagają przeglądów powyżej i poniżej linii wodnej. Pomimo, że poziom techniczny przeglądów stanu technicznego powyżej linii wodnej znacznie wzrósł, to przeglądy poniżej linii wodnej w dalszym ciągu polegają na technice z przed 50 lat – przy pomocy nurków.

Do przeglądów i szacowania warunków podwodnych oraz do budowy struktur pod wodą przez ostatnie 150 lat wykorzystywano nurków wspomaganych z powierzchni. Wiele z tych projektów przeprowadzano w bardzo trudnych warunkach środowiskowych pracując przy silnych prądach wodnych, na dużych głębokościach, przy braku widoczności spowodowanej opadaniem osadów oraz gromadzeniem się rumowisk wokół podwodnych struktur. Rumowiska powstające wokół filarów mostowych to potencjalnie jedno z największych zagrożeń podczas inspekcji wykonywanych przez nurków. Przeważnie jest to płatanina różnych przedmiotów i lin stanowiących pułapkę dla nurka, zwłaszcza, jeśli są ruchome. To ogranicza prowadzenie inspekcji. Pomimo takich warunków komercyjni nurkowie oraz firmy specjalizujące się w pracach podwodnych są stale angażowane do prac przy inspekcji mostów i innych struktur podwodnych.

Niezależnie od profesjonalizmu nurków wspólny niepokój zawsze budzą różnice w ocenie stanu struktur podwodnych prezentowane przez każdego z nich oraz różnice stanowisk w ich raportach. Takie niekonsekwencje mogą istnieć nie tylko w opiniach sporządzanych przez różne firmy, ale także przez każdego nurka z osobna. W rezultacie instytucja upoważniona do podejmowania decyzji o konieczności i o sposobie lub o terminie wykonania napraw nie posiadając jednoznacznych opinii technicznych nie może mieć do nich zaufania. To może stwarzać sytuacje zagrażające sprawności infrastruktury.

Obecnie wiele firm mających lata doświadczeń w przeprowadzaniu operacji podwodnych, inspekcji mostów, zapór, wejść do portów czy nabrzeży portowych konsekwentnie rozwija różne technologie, aby uzyskać najlepsze możliwości w realizacji zleceń i prezentowaniu obiektywnych rezultatów. Obecnie wiele firm mających lata doświadczeń w przeprowadzaniu operacji podwodnych, inspekcji mostów, zapór, wejść do portów czy nabrzeży portowych konsekwentnie rozwija różne technologie, aby uzyskać najlepsze możliwości w realizacji zleceń i prezentowaniu obiektywnych rezultatów.

2. Urządzenia hydroakustyczne

2.1. Uwagi ogólne

Umożliwiają wykonywanie badań stanu infrastruktury podwodnej w jej podwodnych partiach, np. filary mostowe, nabrzeża portowe itp. Urządzenia te w zależności od zastosowanego sposobu dokonywania pomiarów dzielą się na:

- echosondy jednowiązkowe,
- echosondy wielowiązkowe,
- echosondy parametryczne,
- sonary wielowiązkowe (kamery akustyczne),
- sonary boczne (holowane),
- sonary skanujące.

Niektóre z tych urządzeń bardziej nadają się do oceny stanu dna (ubytki lub nanosy) w bezpośrednim sąsiedztwie budowli, natomiast inne są bardziej przydatne do oceny stanu technicznego ścian badanych elementów struktury podwodnej. Są też takie, które posiadają możliwości badania i oceny zarówno stanu technicznego ścian jak i stanu dna w bezpośrednim sąsiedztwie.

Zaletą urządzeń hydroakustycznych jest możliwość uzyskiwania doskonałych rezultatów w warunkach braku przejrzystości wody. Woda mętna nie stanowi przeszkody w rozprzestrzenianiu się fal ultradźwiękowych na niewielkie odległości, rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. Przeszkodę dla propagacji tych fal stanowi silne, trwałe zapowietrzenie wody. Propagacja jest także uzależniona od zastosowanej częstotliwości. Na wielkość zasięgu podstawowy wpływ ma stopień tłumienia fal akustycznych (ultradźwiękowych) w wodzie. Częstotliwości wyższe są tłumione bardziej, natomiast niższe są tłumione mniej. Tłumienie fali akustycznej w wodzie w pewnym zakresie częstotliwości jest proporcjonalne do kwadratu częstotliwości. Praca przy wyższych częstotliwościach pozwala na uzyskiwanie dużo lepszej rozdzielczości obrazów (echogramów). Dla badań infrastruktury podwodnej czy stanu pobliskiego dna zasięgi kilku lub kilkunastometrowe są zwykle wystarczające. Dlatego aby uzyskać wysokiej jakości echogramy często stosowane są fale ultradźwiękowe o bardzo wysokich częstotliwości (nawet kilka MHz).

Ogólnie każde współczesne urządzenie hydroakustyczne w zastosowaniach cywilnych składa się z przetwornika ultradźwiękowego, zespołu nadawczo-odbiorczego, procesora sterującego pracą oraz monitora. Działanie urządzeń i systemów hydroakustycznych opiera się na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się fal akustycznych w wodzie. Źródłem, które może wysyłać falę akustyczną do wody oraz odbierać sygnał wywołany taką falą jest przetwornik ultradźwiękowy. Przetwornik ultradźwiękowy stanowi sobą bryłę materiału piezoceramicznego o właściwościach piezoelektrycznych. Piezoelektryczność polega na pobudzeniu do drgań bryły przetwornika pod wpływem przyłożonego do jego przeciwległych ścian zmiennego pola elektrycznego. Częstotliwość drgań jest zgodna z częstotliwością zmian pola elektrycznego, a amplituda drgań jest proporcjonalna do wartości pola elektrycznego. Zjawisko piezoelektryczności działa też w kierunku odwrotnym. Na przeciwległych bokach bryły przetwornika, na którą działa zmienne ciśnienie indukuje się napięcie o częstotliwości tego ciśnienia i o amplitudzie proporcjonalnej do wielkości tego ciśnienia. Rozwój technologii w dziedzinie opracowywania nowych urządzeń i systemów hydroakustycznych głównie zawdzięcza się coraz to nowocześniejszym konstrukcjom przetworników ultradźwiękowych.

Przetworniki ultradźwiękowe są najistotniejszym elementem stanowiącym o jakości i możliwościach eksploatacyjnych tych urządzeń. Kierunek promieniowania wiązki akustycznej przez przetwornik decyduje o funkcji czy urządzenie jest echosondą, czy sonarem. Parametry przetworników rzutują na uzyskiwane efekty badań i pomiarów. W profesjonalnych urządzeniach hydroakustycznych przetworniki stanowią największy udział w kosztach tych urządzeń. Cena urządzenia przeważnie jest odzwierciedleniem jakości parametrów technicznych przetwornika.

W urządzeniach hydroakustycznych uzyskiwanie informacji o odległości do obiektów znajdującym się w toni, na dnie lub pod dnem polega na odbiorze echa od nich. Czas upływający od momentu wysłania impulsu akustycznego do wody do momentu odbioru echa jest proporcjonalny do odległości pomiędzy przetwornikiem a badanym obiektem i zależy od prędkości rozchodzenia się dźwięków w wodzie. Prędkość propagacji fali dźwiękowej zmienia się lekko w zależności od temperatury, zasolenia oraz ciśnienia. Zależnie od tych parametrów może zawierać się w zakresie od 1400 do 1540 m/sek. Ponieważ sygnał echa na ogół jest bardzo słaby, czułość echosond oraz sonarów ma bardzo istotne znaczenie. Czułość zależy przede wszystkim od parametrów przetworników. Oprócz czułości istotnym parametrem jest kształt wiązki akustycznej, jaką przetwornik promieniuje do wody. Od kształtu wiązki akustycznej zależy możliwość rozróżniania badanych obiektów. Im wiązka jest węższa, tym odwzorowanie badanego obiektu na echogramie może być dokładniejsze.

2.2. Podstawowe właściwości fal akustycznych

Długość impulsu w wodzie zależy od jego czasu trwania, przy czym:

- impuls trwający 1 msek ma w wodzie długość 1,5 m,
- impuls trwający 0,5 msek ma w wodzie długość 0,75 m.

Prędkość fali w wodzie wynosi średnio 1500 m/s, przy czym:

- prędkość fali zależy od temperatury i zasolenia wody,
- wzrost zasolenia i temperatury powoduje wzrost prędkości,
- zmiana prędkości powoduje załamanie kierunku fali,
- fala ugina się w kierunku niższej temperatury,
- na pomiar celu w odległości 150 m potrzeba 0,2 sekundy.

2.3. Energia fali akustycznej

Wielkość promieniowanej energii zależy od amplitudy i długości wysyłanego impulsu, przy czym:

- gdy większa energia – większy zasięg,
wydłużenie impulsu przy stałej amplitudzie lub wzrost amplitudy przy stałej długości impulsu daje ten sam efekt – zwiększenia energii fali ultradźwiękowej,
- tłumienie i rozpraszanie energii zmniejsza zasięg,
 - rozpraszanie rośnie wskutek oddalania od przetwornika,
 - tłumienie zależy od częstotliwości i parametrów wody,
 - wyższa częstotliwość - większe tłumienie energii,
 - wyższa temperatura i zasolenie - większe tłumienie energii.

2.4. Przetworniki ultradźwiękowe

Przetworniki służą do wysyłania impulsów ultradźwiękowych. Parametry charakterystyki kierunkowej przetworników to:

- kąt promieniowanej wiązki w pionie i w poziomie,
- wielkość listków bocznych.

Parametry zależą od częstotliwości i gabarytów przetwornika, przy czym:

- wyższa częstotliwość – węższa wiązka,
- większe gabaryty – węższa wiązka,
- węższa wiązka – mniejsze listki boczne.

Listki boczne powodują powstawanie fałszywych ech na małych zakresach (do około 50 m).

2.5. Echosondy jednowiązkowe

Służą do punktowego pomiaru głębokości wody pod przetwornikiem (rys. 1). Mogą być przenośne lub instalowane na stałe na jednostce pływającej. Podczas ruchu jednostki, przy jednoczesnej znajomości jej pozycji geograficznej lub geodezyjnej, pozwalają na odwzorowanie profilu dna akwenu. Przy zastosowaniu bardzo wąskiej wiązki akustycznej można uzyskiwać dość dokładne informacje o profilu dna wokół filarów mostowych. Wykorzystując profesjonalne oprogramowanie oraz system pozycyjny GPS lub inny lokalny system dostarczający informacji o pozycji można automatycznie wykreślać mapy batymetryczne. Uzyskanie szczegółowych map wymaga wielokrotnego przepływania nad badanym rejonem wzdłuż zaplanowanych tras pomiarowych.

2.6. Echosondy wielowiązkowe

W odróżnieniu od echosond jednowiązkowych, echosondy wielowiązkowe promieniują jednocześnie wiele wiązek akustycznych pod różnymi kątami w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku poruszania się jednostki pływającej i z tych kierunków odbierają echa. Ilość promieniowanych wiązek zależy od konstrukcji głowicy zawierającej wbudowane przetworniki. Echa od dna odbierane przez wiązki coraz bardziej odchylone od pionu są coraz słabsze. Zawierają one coraz mniej energii, ponieważ zasadnicza część energii odbiła się w przeciwnym kierunku. Energia ech w tych wiązkach wynika z rozproszenia wskutek chropowatości dna. Każda z wiązek sąsiednich jest odchylana o kąt wynikający z budowy głowicy z przetwornikami. Konstrukcja tych echosond pozwala na zdejmowanie profilu głębokości na kierunku prostopadłym do kierunku poruszania się jednostki pływającej. Szerokość pasa pomiarowego jest uzależniony od typu urządzenia oraz od głębokości akwenu. Ilość wiązek akustycznych we współczesnych echosondach wielowiązkowych wynosi od kilkuset do kilku tysięcy. Realna szerokość pasa pomiarowego zależy od typu echosondy wynosi od 4 do 11 głębokości wody pod głowicą echosondy. Są produkowane echosondy wielowiązkowe, które umożliwiają pomiar profilu głębokości w kącie nawet 180°, jednak skrajne pomiary mogą być obciążone dużym błędem ze względu na załamania wiązek akustycznych spowodowanym znacznymi różnicami w prędkości dźwięku w wodzie na różnych głębokościach. Echosondy wymagają stałej instalacji na jednostce pływającej. Specjalne oprogramowanie umożliwia automatyczne wykreślanie map batymetrycznych. Dla uzyskania szczegółowej mapy batymetrycznej wystarczy jedno przepłynięcie nad badanym rejonem, np. wokół filaru mostowego. W przypadku pochylenia głowicy echosondy (zawierającej przetwornik) na bok, można dokonywać

pomiarów kształtu (profilu) ścian bocznych filarów mostowych lub nabrzeży portowych (rys. 2). Echosondy wielowiązkowe wymagają współpracy z dodatkowymi urządzeniami takimi jak:

- czujnik ruchu służący do kompensacji przechyłów jednostki powodowanej falowaniem wody,
- dokładny system pozycyjny,
- dokładny system określający kierunek poruszania się jednostki,
- sonda do pomiaru profilu prędkości dźwięku w wodzie.

2.7. Echosondy parametryczne

Echosondy te służą do pomiarów i odwzorowywania warstw zalegających pod dnem badanego akwenu. Można nimi mierzyć grubości warstw nanosów mułu, piasku czy żwiru wokół filarów mostowych. Ich działanie jest podobne do działania klasycznej echosondy służącej do pomiaru głębokości, jednak pracują na bardzo niskiej częstotliwości. Fale akustyczne o bardzo niskiej częstotliwości mają zdolność do penetracji w głąb dna (rys. 3). Napotykając na warstwy pod dnem różniące się własnościami fizycznymi odbijają się od nich. Rejestracja ech od tych warstw umożliwia ich prezentację na echogramie (rys. 4). Bardzo ważnym parametrem podczas badań warstw nanosów wokół filarów mostowych jest rozdzielczość głębina oraz boczna. Ponieważ wypłukania i nanosy wokół filarów z reguły mają rozmiary kilku lub kilkunastu metrów, należy je badać wykorzystując krótkie impulsy i bardzo wąską wiązkę akustyczną. Uzyskanie wąskiej kilkustopniowej wiązki w typowych echosondach pracujących na niskich częstotliwościach (poniżej 10 kHz) fizycznie nie jest możliwe. Fizycznie realizowalne szerokości wiązek w typowych echosondach pracujących na niskiej częstotliwości wynoszą kilkadziesiąt stopni. Takie szerokości wiązek w warunkach monitoringu warstw pod dnem wokół filarów mostowych ze względu na małą rozdzielczość kątową są bezużyteczne. Natomiast w echosondach parametrycznych możliwe jest uzyskanie bardzo wąskich wiązek akustycznych (kilka stopni) przy bardzo niskich częstotliwościach. Efekt parametryczny uzyskuje się w wyniku jednoczesnego promieniowania do wody dwóch sygnałów f_1 oraz f_2 o bardzo dużej mocy i różnej częstotliwości. W wyniku zastosowania dużej mocy, w wodzie zachodzi zjawisko nieliniowej zmiany ciśnienia wody w stosunku do prędkości rozchodzenia się tych zmian. W efekcie powstaje fala akustyczna o częstotliwości F równej różnicy $f_1 - f_2$ dwóch doprowadzonych sygnałów mająca jednocześnie bardzo wąską wiązkę. Przykładowo przy jednym sygnale o częstotliwości $f_1 = 100$ kHz i drugim $f_2 = 95$ kHz uzyska się częstotliwość wynikową fali akustycznej $F = 5$ kHz o szerokości wiązki rzędu 2° przy rozmiarach przetwornika około $0,2 \times 0,2$ m. Chcąc uzyskać w typowej echosondzie takie parametry należałoby zastosować przetwornik o powierzchni 10 m^2 (powierzchnia porównywalna z wielkością dna łodzi).

2.8. Sonary wielowiązkowe

Sonary wielowiązkowe stosowane do monitoringu podwodnego, zwane inaczej kamerami akustycznymi pracują na bardzo wysokich częstotliwościach > 1 MHz. Ich praca polega na jednoczesnym wysyłaniu kilkadziesiątu lub kilkuset bardzo wąskich wiązek akustycznych w kierunku monitorowanego obiektu. Pole widzenia jest ograniczone do kąta około $15^\circ - 30^\circ$. W wyniku odbioru ech na ekranie monitora powstaje jednobarwny obraz obiektu (rys. 5), gdzie kształty są przedstawiane poprzez różne stopnie intensywności jednej barwy. Kamery akustyczne zwykle są instalowane na rotatorze, który ma możliwość obracania oraz pochylania kamery (rys. 6). Ze względu na stosowaną bardzo wysoką częstotliwość, obraz echogramu ma bardzo dobrą rozdzielczość

w zakresie odległości do kilku metrów. W warunkach braku widoczności w mętnej wodzie dla kamery optycznej, przy pomocy kamery akustycznej można z dość dużą precyzją monitorować elementy struktury podwodnej (rys. 7). Kamera akustyczna jednocześnie umożliwia rejestrację obrazów akustycznych w formie filmu na komputerze. Kamera taka posiada możliwość pomiaru na ekranie wielkości interesujących elementów podczas odtwarzania obrazu w biurze wykorzystując różne możliwości nastaw parametrów. Obraz uzyskiwany kamerą akustyczną jest bardzo intuicyjny, jego interpretacja nie wymaga szczególnego doświadczenia ze strony operatora. Oprogramowanie pracuje pod systemem operacyjnym Windows.

2.9. Sonary boczne (holowane)

Sonary boczne przeważnie są wykorzystywane jako holowane w wodzie za jednostką pływającą (rys. 8). Mogą jednak także być montowane pod dnem jednostki (rys. 9) lub opuszczane z burty (rys. 10). Im bardziej są zagłębione w wodzie, tym pracują w lepszych warunkach akustycznych, ponieważ są oddalone od szumów i zakłóceń powierzchniowych oraz od śruby napędowej. Holowana głowica sonaru bocznego posiada po obu stronach pływaka zamontowane pod pewnym kątem w stosunku do pionu dwa długie przetworniki ultradźwiękowe. Wiązki akustyczne takich przetworników są bardzo wąskie w poziomie ($a < 1^\circ$), natomiast w pionie są szerokie ($b > 30^\circ$).

Praca sonaru bocznego jest podobna do pracy echosondy wielowiązkowej. Różnica polega na tym, że nie są tworzone oddzielne wiązki akustyczne, lecz po obu stronach głowicy w kierunku dna promieniowane są wiązki w kształcie przypominające wachlarze ten sposób echa od partii dna znajdujące się bliżej głowicy wystąpią na ekranie wcześniej niż echa od dalszych partii dna. Podstawowym warunkiem poprawnej pracy jest holowanie głowicy ze stałą prędkością. Ruch jednostajny jednostki pozwala na rysowanie echogramu, w którym podstawą czasu jest droga pokonywana przez jednostkę pływającą. Uzyskany echogram będzie realną akustyczną fotografią dna i elementów leżących na dnie. Obiekty wystające ponad dno będą powodować występowanie na ekranie cieni akustycznych. Ze względu na to, że wiązki z obu przetworników są skierowane na boki, pas dna leżący na kierunku pionowym bezpośrednio pod głowicą będzie występował jako pusty, bez żadnych ech.

2.10. Sonary skanujące

W wielu przypadkach sonar holowany daje bardzo dobrą wizualizację dna. Jednak w sąsiedztwie filarów, nawet jeśli prąd wodny jest umiarkowany (poniżej 8 km/godz.) stabilne utrzymanie głowicy sonaru jest problematyczne a geometria struktury podwodnej ogranicza manewry statku holującego głowicę. Wykorzystanie echosondy, chociaż nie jest limitowane wymogami jak dla sonaru holowanego jest także ograniczone ze względu na wąską wiązkę akustyczną oraz małą zdolność manewrowania statkiem przy silnych prądach. Świadomość ograniczeń przy posługiwaniu się sonarem holowanym i konwencjonalną echosondą spowodowała rozpoczęcie prac eksperymentalnych podczas inspekcji struktur podwodnych z wykorzystaniem głowicy sonaru skanującego mechanicznie (rys. 12). Sonar skanujący z dodatkowym silnikiem krokowym do obracania przetwornikiem wykorzystuje podobne elementy składowe co echosonda czy konwencjonalny sonar holowany.

W sonarze skanującym mechanicznie po wysłaniu akustycznego impulsu nadawczego system czeka na odebranie ech. Czas oczekiwania jest wprost proporcjonalny do wybranego zakresu. Po zakończeniu cyklu nadawanie/odbiór silnik krokowy obraca przetwornikiem o jeden skok katowy

i proces się powtarza. Szerokość wiązki akustycznej sonaru skanującego zależy od rozmiarów, kształtu i częstotliwości przetwornika. Sonar wysokiej rozdzielczości w wersji głowicy z podwójnym przetwornikiem umożliwia użytkownikowi skompletowanie zarówno profili podwodnej struktury jak i pełną wizualizację obrazu badanego dna (rys. 13).

Istotną przewagą sonaru skanującego jest to, że wykorzystując różne możliwości ustawienia położenia głowicy w stosunku do badanego obiektu powstają możliwości precyzyjnego odwzorowania obrazu dna, obrazu struktur pionowych obiektu (rys. 13-16) dokładnych profili umożliwiających obliczanie nanosów lub ubytków gruntu.

Przy konwencjonalnym odtwarzaniu obrazu sonarem skanującym korzysta się z głowicy zamontowanej na trójnogu opuszczanym na dno rzeki. Nawet przy silniejszych prądach ustawiony na dnie trójnog z zawieszoną na kardanie głowicą daje stabilność wymaganą do uzyskania obrazu o wysokiej rozdzielczości. Przenoszenie trójnogu z odpowiednio zawieszoną głowicą wokół struktury podwodnej ułatwia zapisywanie plików z danymi, które mogą utworzyć kompletną mozaikę dna (rys. 17). Analizując mozaikę dna – w tym wypadku wokół filaru mostu – operator jest w stanie dobrać optymalne miejsca do skanowania profili tak, aby w oparciu o zebrane dane batymetryczne można było określić rzeczywiste głębokości i wyliczyć wielkości degradujących nanosów czy ubytków. Sonar skanujący daje także sposobność do kompletnej pionowej wizualizacji filarów mostów i innych struktur.

Przy zastosowaniu różnych położen głowicy wachlarzowej można stworzyć obrazy ukazujące przekroje całego cieku wodnego (rys. 18). Obrazy tego typu pozwalają na zobrazowanie poprzeczne koryta rzeki oraz przebiegu dna u podnóża podpór.

Wykorzystanie wszystkich obrazów oraz profili, a także ich kombinacji z fotografiami struktury powyżej wody umożliwia opracowanie kompletnej mozaiki wizualizującej dno rzeki oraz filarów. Dostarcza to inżynierom podstaw do łatwej interpretacji aktualnej sytuacji hydrotechnicznej oraz do ilościowej i jakościowej analizy aktualnego stanu filarów mostu i występujących zagrożeń. Zobrazować można aktualne rozmieszczenie np. narzutów kamiennych służących jako wzmocnienie podnóżu podpór (rys. 19). Pozwala to na monitorowanie dna i stanu usypów np. po przejściu fal powodziowych.

W wyniku stosowania mechanicznie skanowanego sonaru można ustalić bazę odniesienia zarówno dla starych jak i nowych konstrukcji mostowych, która jest pomocną w podejmowaniu decyzji dotyczących całej infrastruktury i dokładnym definiowaniu poziomów dna rzeki. Rezultaty dalszych inspekcji (będących w planowaniu lub wynikających z powodzi, wpływu ruchu statków itp.) mogą być potem porównywane z oryginalnymi zarchiwizowanymi zbiorami umożliwiając w ten sposób rejestrację wszelkich zmian warunków i struktury dna. W szczególności przydatne są dane o profilach uzyskane sonarem skanującym, ponieważ degradacja dna wynikająca z osadów może być obserwowana z upływem czasu przez porównywanie poprzednich zapisów dna rzeki sąsiadującego ze strukturami podwodnymi z badaniami bieżącymi. Monitoring stanu technicznego ścian podpór pozwala na wykrywanie ubytków i zniszczeń powstających w samych fundamentach (rys. 20-21).

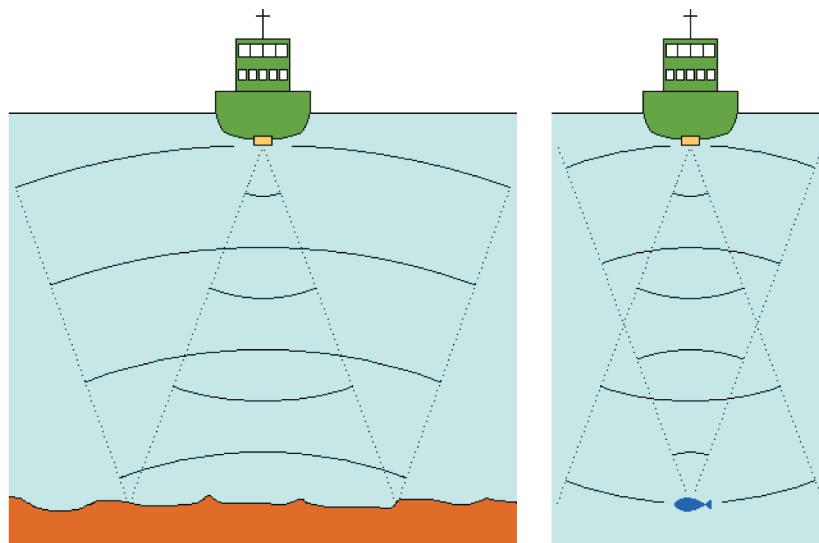
W wielu przypadkach z powodu upływu lat brak jest starych dokumentacji, rysunków czy planów mostów. Sonar skanujący dostarcza zestawu danych ilościowych oraz wizualnych, które pozwalają na poznanie kształtu podpór pod linią wody (rys. 22) i mogą stanowić odniesienie do przyszłych inspekcji struktur podwodnych. Ponadto, co jest też bardzo ważne przy korzystaniu z nurka, wzrasta poziom bezpieczeństwa, ponieważ sonar zidentyfikuje potencjalne zagrożenia

zanim nurek zejdzie po wodę. Dodatkowo sonar pozwala na śledzenie przez nadzór na powierzchni w czasie rzeczywistym położenia nurka pod wodą. Innym obszarem możliwości jakie daje sonar skanujący w przypadku konstrukcji podwodnych jest prowadzenie kontroli jakości prac a także możliwości dokumentacyjne w zakresie ich ubezpieczenia.

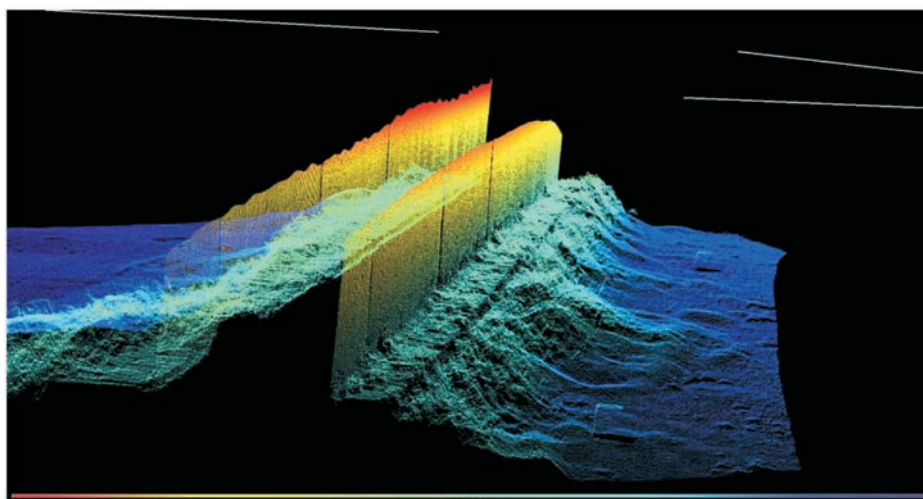
Najlepsze rezultaty podwodnych inspekcji uzyskuje się w wyniku kombinacji różnych dziedzin, dysponując różnymi technikami. Wiele firm przekonało się, że dokonywanie inspekcji przy wykorzystaniu nurka oraz sonaru skanującego zapewnia najwyższy z możliwych poziom jakości podczas przeprowadzenia inspekcji stanu struktur podwodnych. Wspierając sonarem skanującym tradycyjne metody inspekcji wykorzystujące nurka dostarcza się instytucjom odpowiedzialnym za stan techniczny mostów i innych budowli hydrotechnicznych niezbędnych informacji do podejmowania decyzji. Służy to do lepszego gospodarowania środkami przeznaczanymi na remonty i ma wpływ na roczne budżety tych instytucji.

Bibliografia

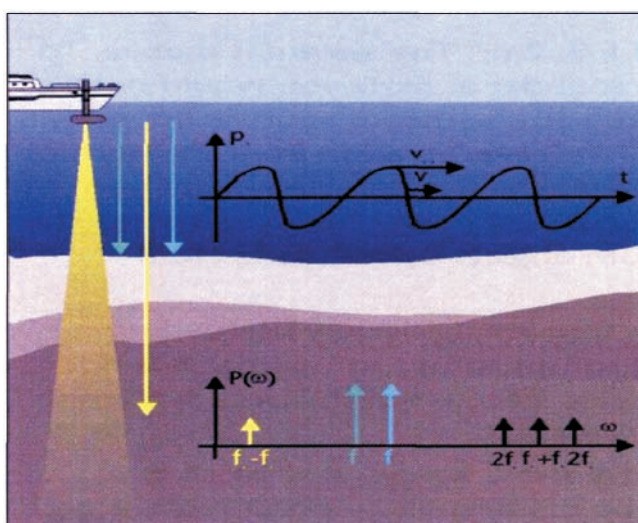
- [1] Instrukcja użytkowania echosondy EA400 firmy Kongsberg Maritime
- [2] Materiały promocyjne echosondy wielowiązkowej firmy Kongsberg Maritime
- [3] Materiały informacyjne na temat echosondy parametrycznej SES2000 firmy Innomar Technologie GmbH
- [4] Materiały promocyjne firmy Sound Metrics, Inc.
- [5] *Mikołajewski P.*: Opracowanie własne, Escort Sp. z o.o.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Side-scan_sonar
- [7] Materiały informacyjne dotyczące sonaru skanującego firmy Kongsberg Mesotech
- [8] Materiały promocyjne udostępnione przez firmę Kongsberg Mesotech
- [9] *Mikołajewski P.*: Opracowanie obrazów sonarowych - Wyniki badań firmy Escort Sp. z o.o.



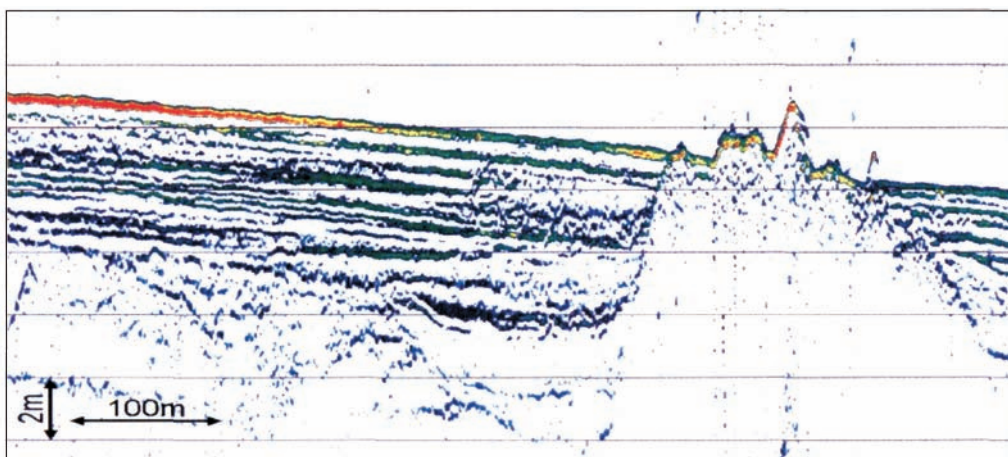
Rys. 1. Zasada pomiaru głębokości i odległości echosondą jednowiązkową [1]



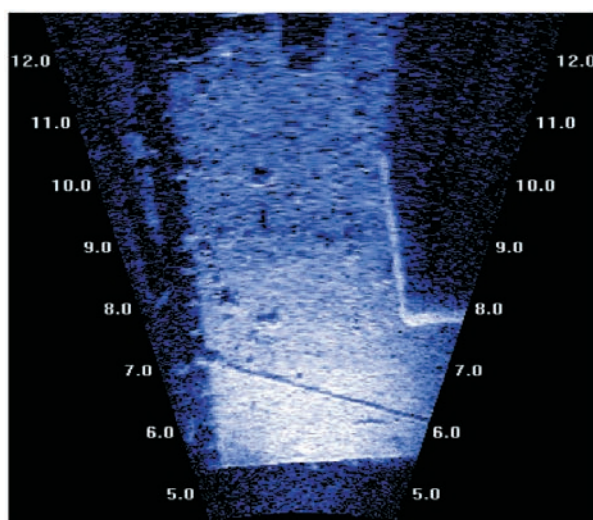
Rys. 2. Echogram nabrzeża uzyskany echosondą wielowiązkową [2]



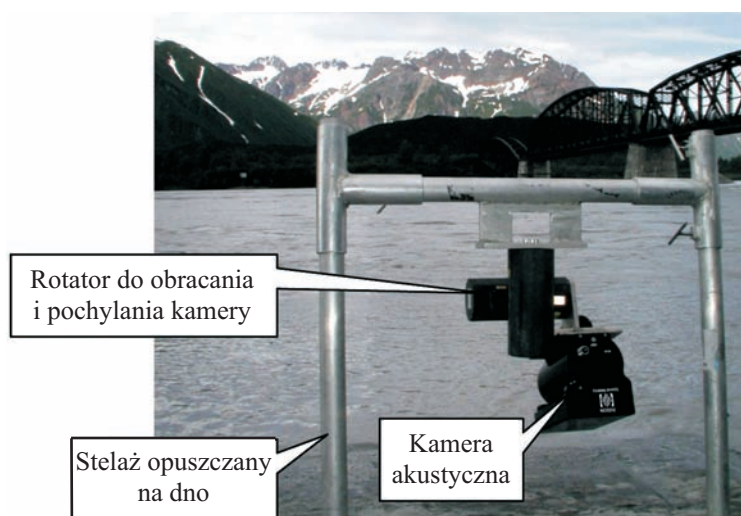
Rys. 3. Zasada powstawania efektu parametrycznego [3]



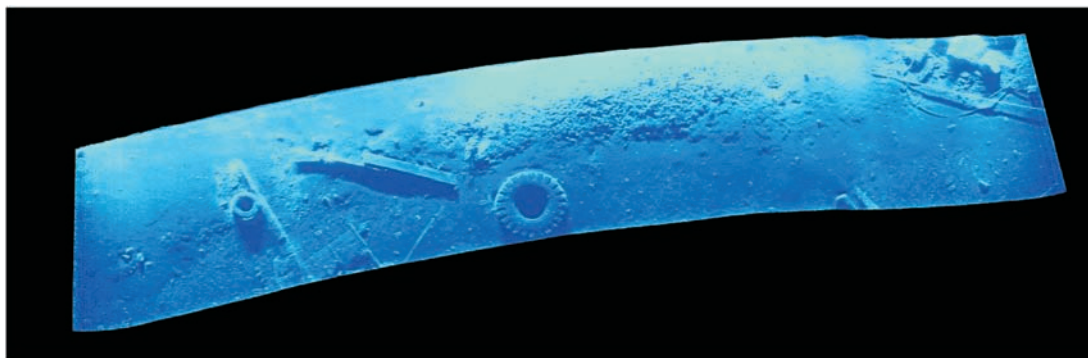
Rys. 4. Echogram z różnymi poziomami piasku, gliny i skał uzyskany echosondą parametryczną [3]



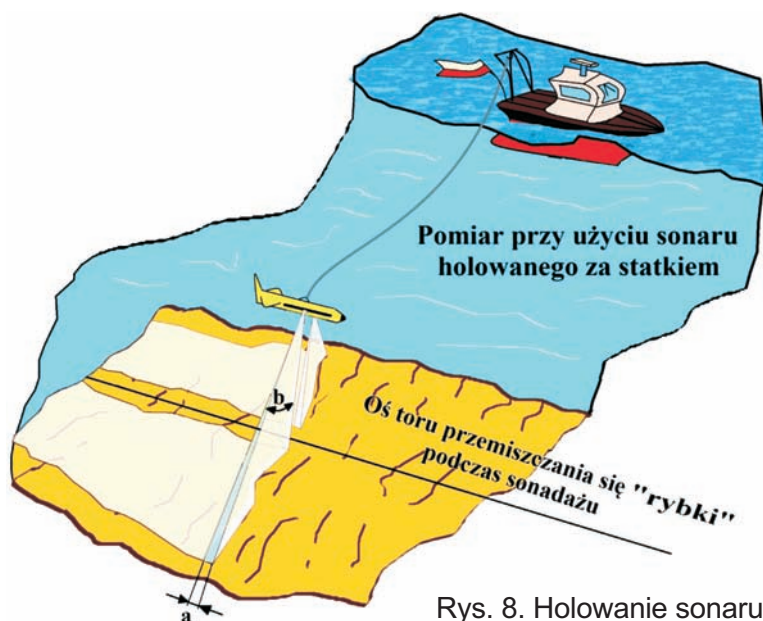
Rys. 5. Dno wokół narożnika filaru mostowego widziane kamerą akustyczną [4]



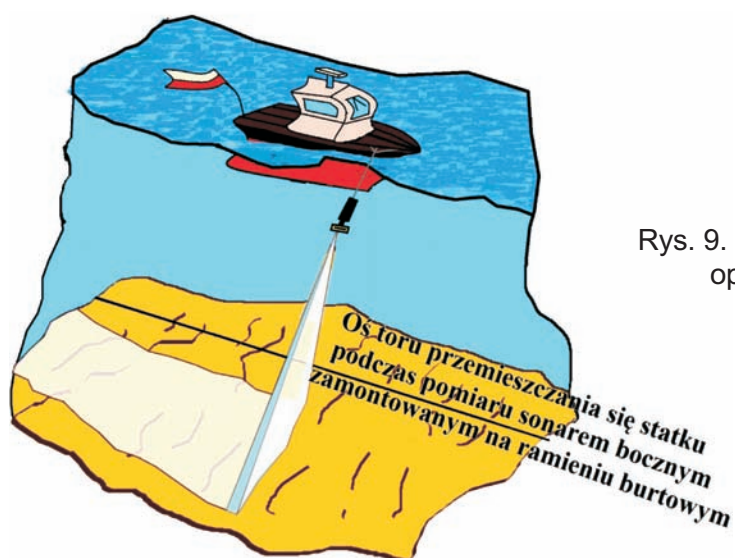
Rys. 6. Kamera akustyczna na stelażu opuszczanym na dno z rotatorem do obracania i pochylania [4]



Rys. 7. Obiekty leżące na dnie widziane kamerą akustyczną w mętnej wodzie [4]



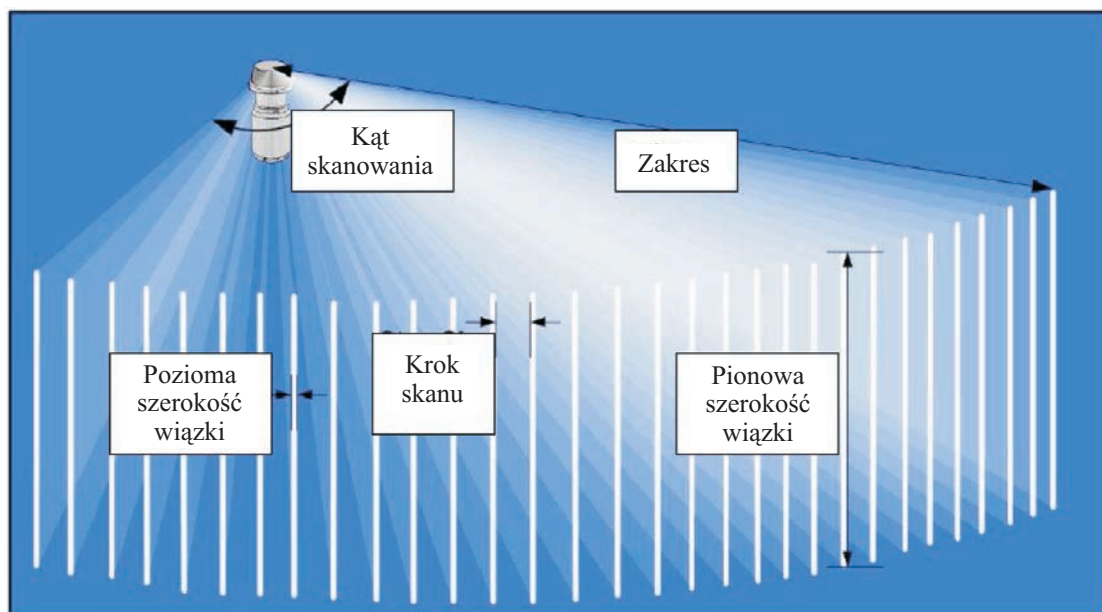
Rys. 8. Holowanie sonaru bocznego [5]



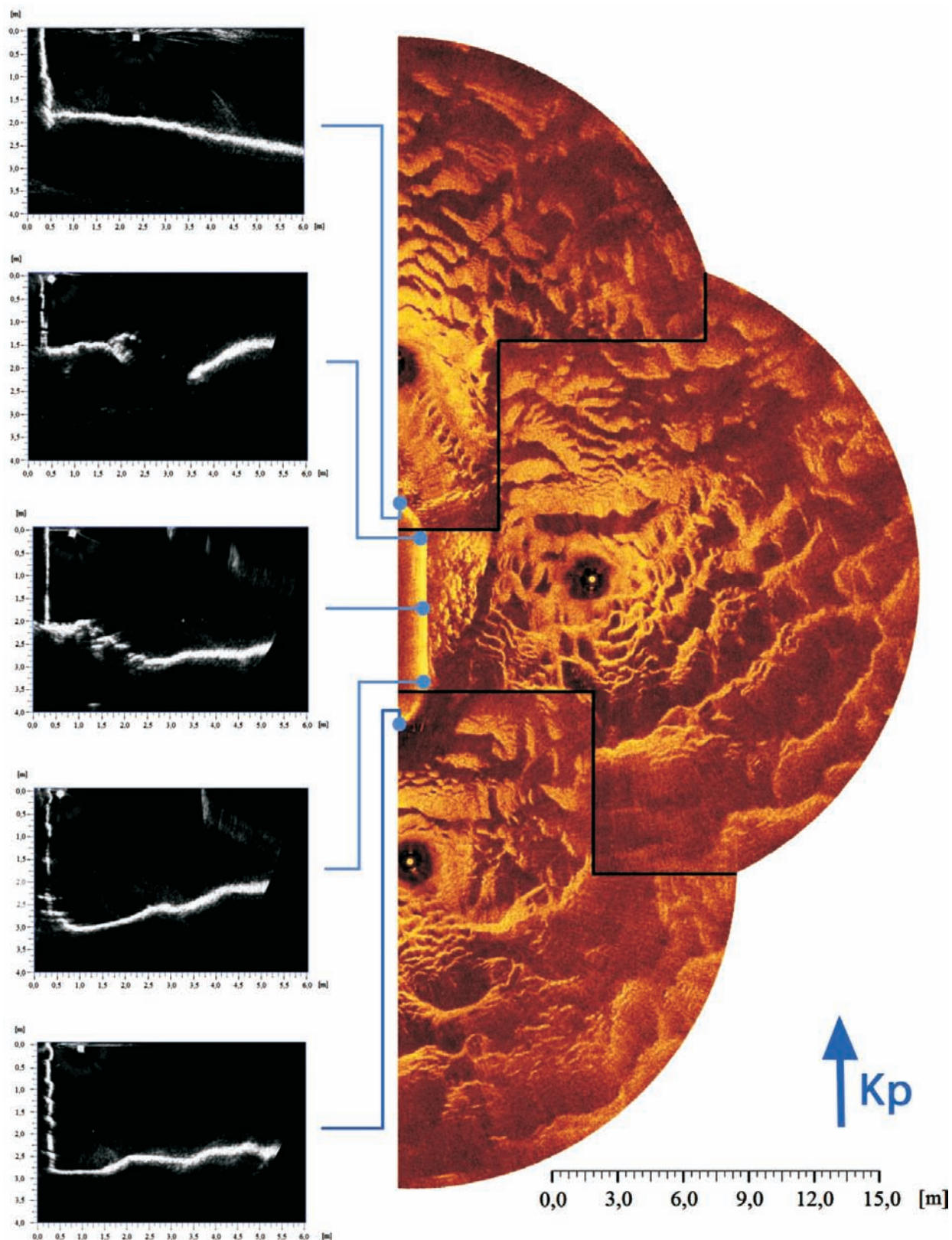
Rys. 9. Zobrazowanie pracy sonaru bocznego opuszczonego z burty jednostki [5]



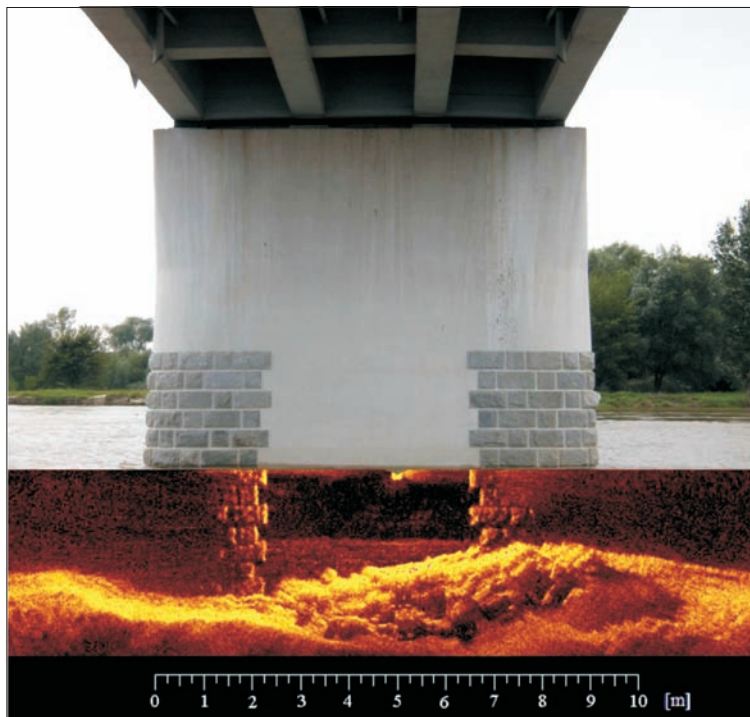
Rys. 11. Echogram zawalonego mostu uzyskany sonarem bocznym [6]



Rys. 12. Schemat działania sonaru skanującego [7]



Rys. 13. Połączenie obrazów dna oraz obrazów profilowych ukazujące łączne rozmieszczenie narzutu kamiennego na całej długości ścianki podpory (sonar skanujący) [9]



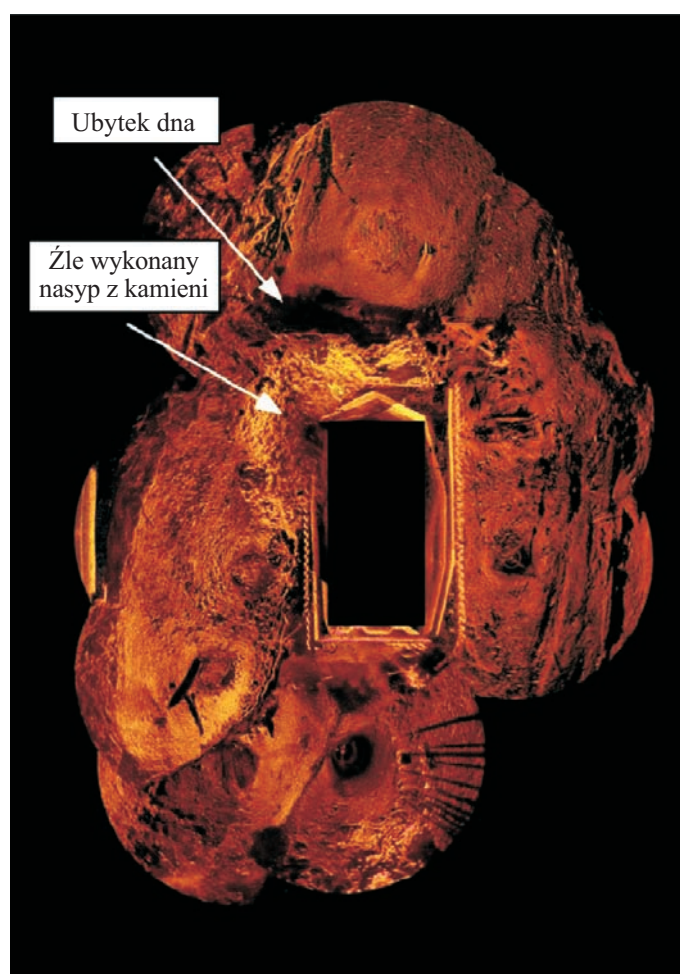
Rys. 14. Podwodny obraz sonarowy i zdjęcie nad powierzchnią wody łącznie prezentują dno rzeki z widocznym narzutem kamiennym usypanym przy podporze (sonar skanujący) [9]



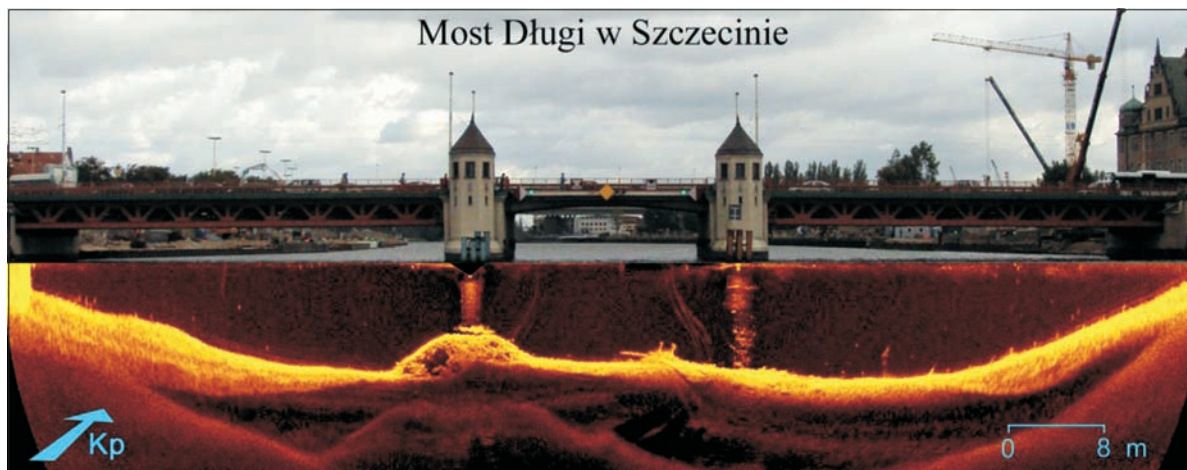
Rys. 15. Podwodny obraz sonarowy i zdjęcie nad powierzchnią wody łącznie prezentują dno rzeki oraz strukturę podwodną mostu (sonar skanujący) [8]



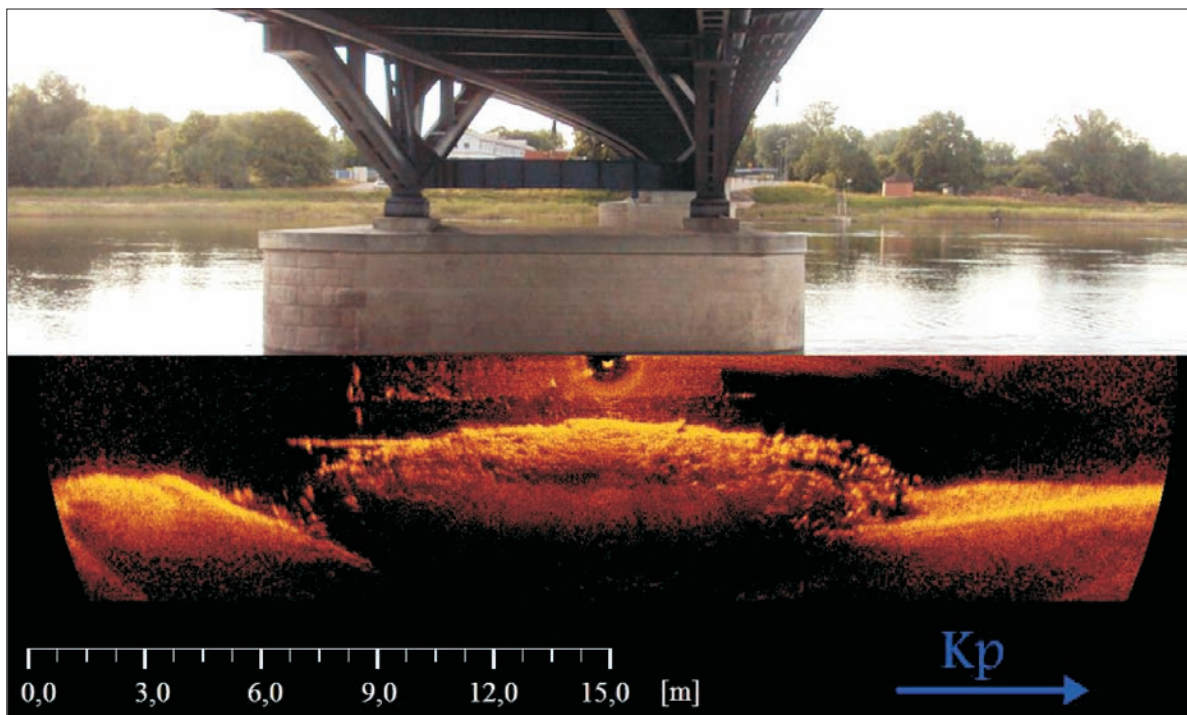
Rys. 16. Rezultat pionowej wizualizacji filaru mostu uzyskany sonarem skanującym ukazujący nieprawidłowe rozmieszczenie narzutu kamiennego (sonar skanujący) [8]



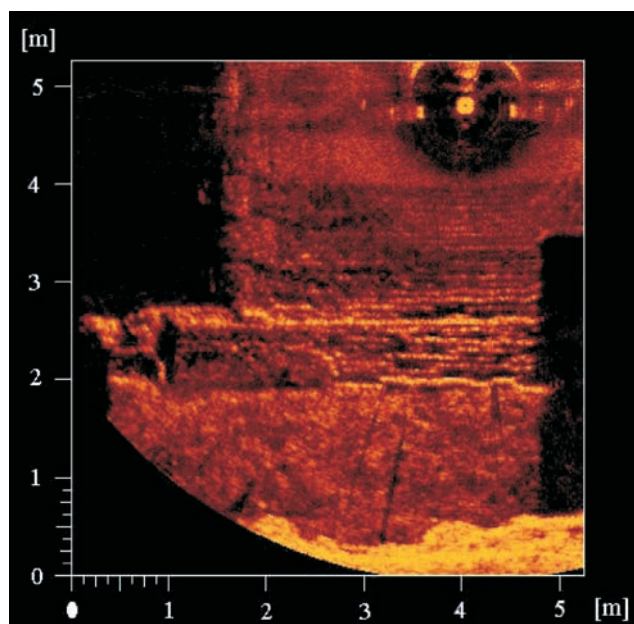
Rys. 17. Obraz mozaiki uzyskanej sonarem skanującym pokazujący ubytki w dnie oraz nieprawidłowe rozmieszczenie narzutów kamiennych (sonar skanujący) [8]



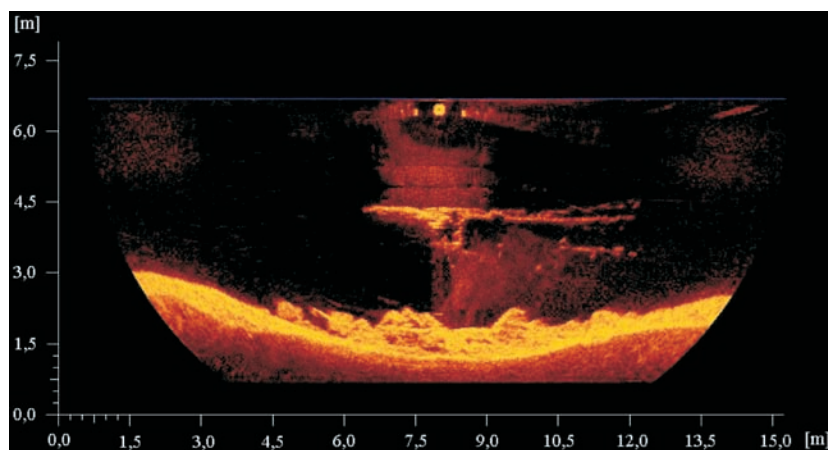
Rys. 18. Obraz sonarowy ukazujący przekrój poprzeczny rzeki z widocznym ułożeniem dna u podnóża obu podpór mostowych (sonar skanujący) [9]



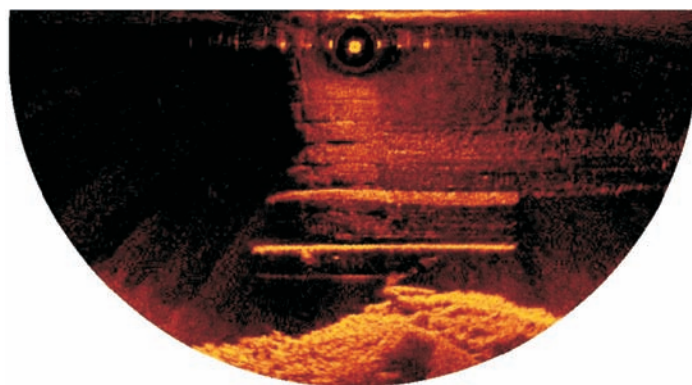
Rys. 19. Obraz ukazujący stan i aktualne rozmieszczenie narzutu kamiennego (sonar skanujący) [9]



Rys. 20. Obraz przedstawiający powierzchnię ścianki podpory z widocznym ubytkiem w fundamencie (sonar skanujący) [9]



Rys. 21. Obraz ukazujący stan fundamentu z widocznymi ubytkami (sonar skanujący) [9]



Rys. 22. Obraz ukazujący podwodną część podpory mostowej z wyraźnie widocznymi elementami konstrukcyjnymi budowli [9]