

Sławomir BAJKOWSKI

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, SGGW

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation, WULS – SGGW

Transport rumowiska przez przepusty drogowe **Sediment transport trough road culverts**

Słowa kluczowe: rumowisko, przepust drogowy
Key words: sediment, road culvert

Wprowadzenie

Zabudowa dolin rzecznych na obszarach zurbanizowanych prowadzi do ograniczenia terenu zajmowanego przez wody cieków. Na terenach miejskich budynki wznoszone są nie tylko na terenie zalewowym, ale również w bezpośredniej bliskości koryta. Niewielkie ciekówki zabudowuje się często rurociągami, lokalizując budynki bezpośrednio przy nich. Mamy więc sytuacje, w których ciekówki na terenach miejskich na części swojej trasy posiadają otwarte koryto, a na części zabudowane są rurociągami. Przykrywany odcinek łączy się ze starymi konstrukcjami przepustów, których na ciekach płynących przez tereny zabudowane jest zazwyczaj dużo. Wydłużanie przewodów przepustów ma również miejsce przy rozbudowie ciągów komunikacyjnych. Zabudowa taka wpływa na zmianę warunków przepływu, ogranicza ich zdolność przepustową oraz utrud-

nia eksploatację. Ogranicza możliwości przepuszczania zanieczyszczeń, prowadzenia konserwacji oraz utrzymania jednakowego spadku niwelety dna. Trudności, z którymi borykają się wtedy projektanci, to w szczególności, wymiarowanie nowych odcinków rurociągu oraz połączenie ich ze starymi konstrukcjami, w sposób zapewniający ciągłość parametrów hydraulicznych.

Do budowli, które piętrzą wodę w okresie przejścia wezbrań, a w pozostałym czasie nie powodują spiętrzeń lub są one niewielkie, zalicza się mosty i przepusty. Przepusty drogowe stosuje się do przekraczania ciągami komunikacyjnym cieków oraz zgłębień terenowych: jarów i wąwozów, prowadzących wodę stale lub okresowo. Stosowanie przepustów ogranicza się do małych cieków, większe przeszkody pokonuje się mostami i wiaduktami. Zaletą stosowania przepustów jest utrzymanie ciągłości konstrukcji drogowej, prostota wykonania, duża powtarzalność konstrukcji, pozwalająca na wykorzystanie prefabrykatów. Obudowa dna cieków w miejscu przeprawy ogranicza procesy erozyjne

w korycie. Większość przepustów nie posiada krat wlotowych – ich stosowanie jest wymagane tylko w sytuacjach, gdy rurociąg przepustu jest długi (Rozporządzenie... 2007).

W artykule poddano analizie warunki działania wydłużonego przewodu przepustu na Potoku Służewieckim. Warunki te badano pod kątem określenia stopnia ograniczenia zdolności przepustowej obiektu rurociągiem wykonanym na potoku poniżej starej konstrukcji przepustu drogowego pod ulicą Łączyny. Analizowano również warunki transportu rumowiska oraz zanieczyszczeń płynących z wodą, a szczególnie tych, które powodują zatykanie kraty wlotowej.

Obiekt badawczy

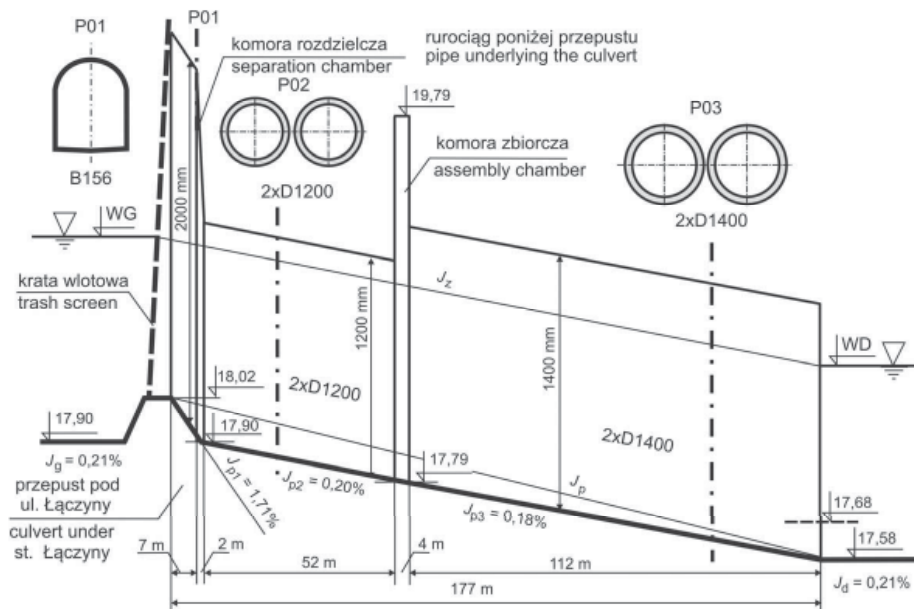
Analizowany przepust stanowi odcinek Potoku Służewieckiego zabudowany starą murowaną konstrukcją przepustu przełazowego pod ulicą Łączyny oraz dobudowanego poniżej rurociągu (rys. 1). Długość całkowita przewodu przepustu wynosi 177,0 m (od km 7+629 do km 7+806). Początkowy odcinek starego przewodu przepustu pod ulicą Łączyny (B156) długości 7,0 m posiada żelbetowe przyczółki oraz murowany z cegły przewód przełazowy szerokości 1,56 m. Spadek dna na długości starej części przepustu $J_{p1} = 1,71\%$. Oś murowanej części przewodu B156 usytuowana jest pod kątem 15° w stosunku do ściany czołowej wlotu. Ściana wlotowa od strony stawu Berensowicza jest wlotem starego przepustu, którego przewód przedłużono, dobudowując poniżej dwuprzewodowy rurociąg. Połączeniową komorę rozdzielczą przepustu dostosowano do

zmieniających się kształtów przewodów starego i nowego.

Linia osi początkowego odcinka rurociągu $2 \times D1200$ długości 7,0 m jest odchylona od osi starej części przepustu o kąt 4° . W km 7+790 przewód przepustu załamuje się w prawo pod kątem 30° , a w km 7+773 występuje ponowne załamanie, tym razem w lewo, pod kątem 27° . Odcinek przewodu o średnicy $2 \times D1200$ wykonano ze spadkiem $J_{p2} = 0,20\%$. W km 7+745 znajduje się studzienka zbiorcza długości 4,0 m, do której doprowadzony jest przewód o średnicy D800 mm, wpadający do komory z lewej strony rurociągu. Z komory zbiorczej przewód został wyprowadzany, jako dwuprzewodowy, o średnicy $2 \times D1400$ mm i spadku $J_{p3} = 0,18\%$. W odległości 83,0 m poniżej komory zbiorczej występuje kolejne załamanie trasy rurociągu w planie o kąt 22° . W km 7+629 znajduje się wylot przepustu, mieszczący jednocześnie rurociąg o średnicy D600 mm, zlokalizowany z lewej strony.

Transport rumowiska przez budowlę wodne

Analiza zjawisk erozyjnych w zlewni obejmuje zagadnienia dotyczące rozpoznania źródeł materiału erozyjnego, warunków jego dopływu do koryta i transportu w cieku. Do źródeł rumowiska rzecznoego zalicza się źródła obszarowe, obejmujące zlewnię, oraz liniowe, odnoszące się do dna i brzegów koryta. Transport rumowiska w cieku zależy od jego rodzaju, składu granulometrycznego materiału oraz parametrów hydraulicznych strumienia i stopnia zabudowy cieku.



RYSUNEK 1. Profil badanego przepustu
 FIGURE 1. Profile of the inspection culvert

Gdy materiał w cieku transportowany jest bez przewagi zjawisk akumulacji lub erozji, mamy do czynienia z ustalonym reżimem ruchu rumowiska. Przeszkody, znajdujące się w cieku, zmieniają formy przepływu wody i zaburzają ustalony reżim transportu rumowiska. Do przeszkód tych zaliczamy nieciągłości spadku podłużnego, zmiany kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego koryta oraz budowle wodne. Zmiana reżimu przepływu rumowiska na odcinku budowli wodnych wynika przede wszystkim z występowania dolnej zabudowy przekroju – w formie progów, oraz bocznej – przyczółkami i skrzydełkami. Konstrukcje te zaburzają warunki przepływu strumienia, powodując zmiany jego parametrów hydraulicznych, które decydują o zdolności transportowej strumienia. Obiekty wodne przepraw drogowych zazwyczaj nie posiadają ruchomych elementów regula-

cyjnych, a warunki przepływu kształtujące parametry hydrauliczne strumienia zależą wyłącznie od ich rozwiązań konstrukcyjnych oraz aktualnego natężenia przepływu.

Głównymi obszarami, w których gromadzi się rumowisko na budowach wodnych, są: stanowisko górne, zagłębienie w konstrukcji oraz stanowisko dolne. Procesy akumulacji stanowiska górnego i dolnego rozwijają się w zależności od okresu eksploatacji obiektu. W procesie tym wyróżnia się trzy fazy:
 faza I – początkowy okres rozwoju procesu przejawiający się wzmożoną erozją stanowiska dolnego oraz odkładaniem się rumowiska w stanowisku górnym,
 faza II – przejściowy okres, w którym następuje uaktywnienie się rumowiska nagromadzonego

w stanowisku górnym i przemieszczanie się jego w dół cieku,
 faza III – okres ciągłego przepływu rumowiska przez przekrój piętrzenia z górnego do dolnego stanowiska, w czasie którego następuje intensywne odkładanie się rumowiska w dolnym stanowisku.

Czas trwania I fazy zależy od gęstości właściwej materiału dennego, jednostkowego przepływu rumowiska w rzece oraz parametrów fałdy tworzącej się powyżej obiektu. Za koniec I fazy uznaje się moment, gdy czoło fałdy dotrze do przekroju piętrzenia i rumowisko zaczyna przepływać do stanowiska dolnego.

Powstawanie i czas trwania fazy II zależy od zmienności przepływów w rzece, ilości nagromadzonego rumowiska powyżej budowli, rzędnej progów oraz formy i zakresu rozmyć stanowiska dolnego.

W fazie III, charakteryzującej się odkładaniem rumowiska poniżej obiektu, następuje podwyższanie się poziomu wody dolnej. Na odcinku zmian koryta cieku zamulanie dolnych stanowisk zachodzi w warunkach, gdy zawartość cząstek zawieszonych i wleczonych jest większa od granicznej zdolności transportowej strumienia.

Wysokość odkładu rumowiska (Δh), według Lappo i innych (1988), określa wzór:

$$\Delta h = \frac{h_d}{2}(1 - \delta) \text{ [m]} \quad (1)$$

gdzie:

δ – względny deficyt prędkości na szczycie ławicy; wartość δ dla rzek nizinnych przyjmuje się z zakresu od 0,15 do 0,12,

h_d – głębokość wody dolnej przy przepływie obliczeniowym [m].

Odcinek budowli powinien posiadać spadek podłużny nie mniejszy od spadku (J_n):

$$J_n = \frac{V_n^2 (2 + \delta)^2}{2C^2 h_d (1 + \delta)^2} \text{ [-]} \quad (2)$$

gdzie:

V_n – prędkość obliczana według Šamowa (Dąbkowski i in. 1982):

$$V_n = A d_p^{1/3} h_d^{1/6} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

A – współczynnik przyjmowany w zależności od formy ruchu rumowiska ($A = 6,0$ – dla warunków ruchu masowego, $A = 4,0$ – dla prędkości nierozmywającej, $A = 3,7$ – dla prędkości przy której następuje przerwanie ruchu rumowiska),

d_p – średnica przeciętna materiału dennego [m],

C – współczynnik prędkości Chezy'ego dla odcinka dolnego, obliczany z wykorzystaniem współczynnik szorstkości Manninga (n) [$\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}^{-1}$].

Warunki transportu rumowiska przez przepust Łączyny

Zdolność transportową przewodu przepustu oszacowano, analizując warunki hydrauliczne w przewodzie, charakterystyki rumowiska, pomierzone spadki przewodu oraz wartości obliczone ze wzoru (2). Zakres badanych spadków obejmował wartości mniejsze od 0,020 – tak jak dla przepustów na ciekach nizin-

nych, według Rozporządzenia... (2000). Przewód przepustu Łączyny kilkakrotnie zmienia kierunek w planie, a linia dna przewodu załamuje się na długości. Spadek dna przewodu maleje z kierunkiem przepływu (rys. 1). Jest to zjawisko niekorzystne i niezalecane przez projektantów z uwagi na możliwość nasilania się zjawisk sedymentacji rumowiska na dolnym odcinku przewodu.

Spadek podłużny starej części przepustu (J_{p1}), wynoszący 1,71%, został dobrany z zakresu zalecanego w Rozporządzeniu... (2000). Jest on większy od $J_{\min} = 0,005\%$ i nie przekracza wartości 2,0%. W komorze rozdzielczej następuje załamanie spadku, zmniejsza się on do wartości $J_{p2} = 0,20\%$, a poniżej komory zbiorczej spadek dna ulega ponownemu zmniejszeniu do wartości $J_{p3} = 0,18\%$. Dobudowane części rurociągu wykonano ze spadkiem zbliżonym do naturalnego spadku dna potoku wynoszącego 0,21%. Mają one spadek mniejszy od spadku minimalnego $J_{\min} = 0,50\%$. Występuje więc duże prawdopodobieństwo, że transportowane rumowisko będzie odkładało się na długości dolnej czę-

ści przewodu przepustu. Średni spadek dna, obliczony z różnicy rzędnych wlotu i wylotu (J_p), wynoszący 0,25%, jest również mniejszy od minimalnego.

W trakcie prac inwentaryzacyjnych pobrano próbki rumowiska ze stanowiska górnego z odkładu zgromadzonego w przekroju wylotowym przepustu oraz z koryta potoku 100 m poniżej wylotu. Podstawowe charakterystyki rumowiska zestawiono tabeli 1.

Widoczny jest wpływ obiektu na parametry materiału dennego. Na badanym odcinku potoku występuje tendencja do segregacji rumowiska. W stanowisku górnym rumowisko jest najgrubsze, słabo wysortowane, przy wylocie gromadzi się rumowisko najdrobniejsze, średnio wysortowane. Poniżej obiektu rumowisko podobne jest do materiału występującego w stanowisku górnym, jest jednak bardzo słabo wysortowane. Badany przepust ogranicza transport rumowiska grubszego, a zakres tego wpływu rozciąga się na odcinek cieku poniżej obiektu. Zróznicowanie gęstości rumowiska wskazuje, że gromadzący się poniżej obiektu materiał jest nie tylko wynikiem

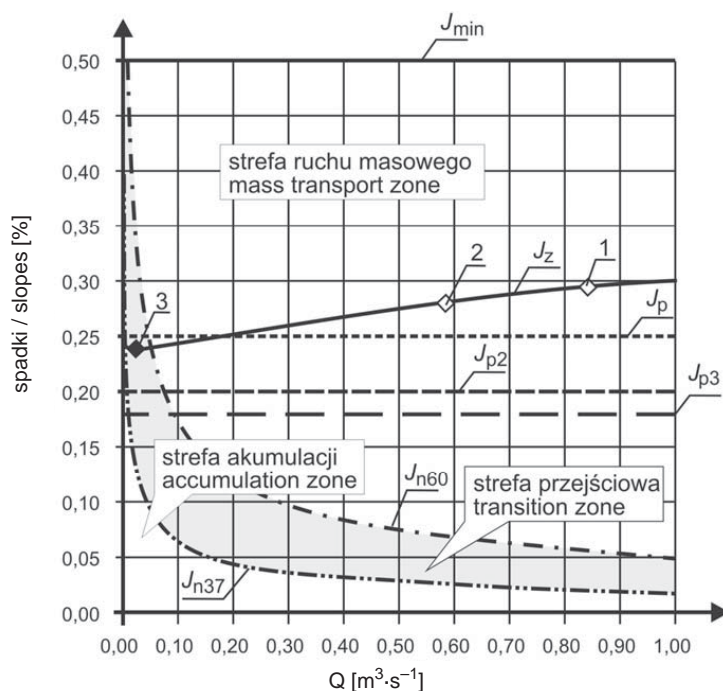
TABELA 1. Charakterystyki rumowiska
TABLE 1. Sediment characteristics

Wyszczególnienie Specification	Próbka 1 Sample 1	Próbka 2 Sample 2	Próbka 3 Sample 3
Miejsce pobrania Collecting place	Stanowisko górne Upstream	Wylot przepustu Culvert outlet	Stanowisko dolne Downstream
$d_{50\%}$ [mm]	0,310	0,202	0,234
d_p [mm]	0,433	0,278	0,424
Gęstość właściwa [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] Specific density [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,73	2,84	2,76
Wskaźnik różnoziarnistości Coefficient uniformity	1,773	2,257	2,164
Wskaźnik krzywizny Coefficient curvature	0,892	1,043	0,904

procesów transportowych przez przepust, ale również dopływu rumowiska spoza stanowiska górnego, kolektorem D800, zbierającym wody z kanalizacji deszczowej.

Na rysunku 2 naniesiono krzywe obliczone ze wzoru (2) dla średniej wartości zalecanego współczynnika deficytu prędkości (δ) równej 0,135, współczynnika prędkości C obliczonego dla $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości V_n , według wzoru (3), obliczono dla przeciętnej średnicy materiału dennego gromadzącego się w stanowisku górnym ($d_p = 0,434 \text{ mm}$) i współczynnika A równego 3,7 (krzywa J_{n37}) oraz 6,0 (krzywa J_{n60}). Krzywe te dzielą obszar rysunku na trzy strefy. Obszar z lewej strony i poniżej krzywej J_{n37} charakteryzuje

warunki, w których ruch rumowiska nie występuje – jest to strefa akumulacji rumowiska. W warunkach tych rumowisko może odkładać się na długości przewodu przepustu oraz na odcinku poniżej wylotu. Przy wzrastających przepływach lub spadkach rumowisko to jest transportowane w dół rzeki. Powyżej i po prawej stronie krzywej J_{n60} znajduje się strefa intensywnego ruchu rumowiska. W obszarze tym przez przewód przepustu transportowane jest rumowisko, dopływające do stanowiska górnego, jak też zgromadzone na długości przewodu – w jego zagłębieniach. Strefa przejściowa odpowiada warunkom, w których rozpoczynają się procesy erozyjne, gdy natężenie przepływu wzrasta, lub akumulacyjne, gdy przepływ maleje.



RYSUNEK 2. Zmienność spadków w przepuscie: 1, 2, 3 – punkty charakterystyczne
 FIGURE 2. Slope distribution in the culvert; 1, 2, 3 – characteristic points

Linia J_z na rysunku 2 odzwierciedla uśredniony spadek zwierciadła wody w przepuście, obliczony z różnicy rzędnych wody górnej i dolnej oraz długości całkowitej rurociągu. Spadki zwierciadła wody zależą od natężenia przepływu i są większe od spadków dna dobudowanej części przewodu J_{p2} i J_{p3} . Są one również większe od średniego spadku przewodu dla natężeń przekraczających $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Porównując wartości spadków dna przewodu z obliczonymi według wzory (2), widać, że krzywa J_{n37} położona jest praktycznie poniżej linii analizowanych spadków. Przebieg poszczególnych linii spadków poza strefą akumulacji wskazuje, że strefa ta w badanym przepuście nie występuje. Zdolność transportowa strumienia w przewodzie jest wystarczająca do przeprowadzania materiału dennego. Dla przepływów mniejszych od $0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ może mieć miejsce faza przejściowa z tendencją osadzania się rumowiska w najniższej części rurociągu o spadku J_{p3} .

Intensywny ruch rumowiska w rurociągu, spowodowany spiętrzeniem się wody na wlocie przepustu, zachodzi, gdy przepływy wzrosną ponad $0,050 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przepust zapewnia wtedy swobodny przepływ rumowiska. Przekroczenie tego przepływu nie gwarantuje jednak, że nastąpi intensywne wynoszenie wcześniej nagromadzonego rumowiska. Czynnikiem przyspieszającym ten proces jest pojawienie się wezbrań płuczających.

Analiza hydrogramu przepływu wykazała, że w okresie dwóch miesięcy poprzedzających pomiar w dniu 03.10.2007 roku o godz. 15:30, na Potoku Służewieckim w przekroju przepustu wystąpiło 6 wezbrań. Przepływ kulminacyjny największego z nich, z dnia 12.08.2007 roku

o godz. 19:50 był równy $3,266 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Na krzywej spadków zwierciadła wody naniesiono punkty dla dwóch ostatnich wezbrań (1 – z dnia 18.09.2007 roku o godz. 19:00, o przepływie $0,839 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 2 – z dnia 28.09.2007 roku o godz. 22:40, o przepływie $0,582 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Punkty te położone są w strefie masowego ruchu rumowiska. Po przejściu ostatniego wezbrania przepływ ustabilizował się na poziomie $0,029 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co odzwierciedla punkt 3. Wezbranie to wypłukało część rumowiska, nie było ono jednak na tyle duże, aby mogło całkowicie oczyścić przewód. Rumowisko zaczęło się ponownie osadzać w okresie trwania niskiego przepływu.

Zaobserwowany odkład rumowiska jest wynikiem procesów zachodzących w czasie poprzedzającym pomiar. Prognozowana wielkość odkładu (Δh) obliczona ze wzoru (1) dla przepływu $0,029 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ wynosi $0,05 \text{ m}$. Jest ona mniejsza od wartości zaobserwowanej, wynoszącej $0,10 \text{ m}$. Wynika stąd, że odkład ten formował się pod wpływem wcześniej występujących warunków na obiekcie oraz dopływu rumowiska kolektorem deszczowym, czego nie uwzględniają przeprowadzone analizy. Wezbranie z dnia 28.09.2007 roku o godz. 22:40, nie oczyściło dolnego odcinka przewodu z nagromadzonego tam rumowiska. Określenie wielkości przepływu płuczającego wymaga prowadzenia dalszych cyklicznych obserwacji na obiekcie.

Podsumowanie

Piętrząca się przed wlotem woda powoduje zwiększanie się zdolności transportowej i swobodny przepływ ru-

rumowiska przez przekrój piętrzenia. Dla przepływów większych od $0,050 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, punkty spadku zwierciadła wody znajdują się w strefie masowego ruchu rumowiska, a gdy przepływ jest odpowiednio duży, następuje wynoszenie z przewodu wcześniej osadzonego materiału.

W badanym przepuszczeniu rumowisko nie zalega na długości odcinka wlotowego. Przez to nie powoduje zmian wydatku wlotu przepustu. Krata wlotowa, gdy jest czysta, nie stanowi przeszkody dla przepływu rumowiska. Denny odkład rumowiska zaobserwowano na końcowym odcinku przewodu i tuż poniżej wylotu. Ilość nagromadzonego tam rumowiska zależy od natężenia przepływu, występowania wezbrań płuczających oraz ilości materiału dostarczanego z kolektora deszczowego.

Literatura

- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- LAPPO D. i inni 1988: Gidravličeskije rasčety vodosbrosnych gidrotechničeskich sooruzenij. Energoatomizdat, Moskwa.
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (DzU nr 63, poz. 735 ze zmianami).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (DzU nr 86, poz. 579).

Summary

Sediment transport trough road culverts. The main areas on water structures in which sediment gathers are headwater, hollows in construction and tailwater. The processes of accumulation of upstream and downstream positions develop according to duration of the object's exploitation. This article analyses working conditions of an elongated pipeline of culvert in Potok Służewiecki stream. These conditions were examined with the aim to evaluate the degree of discharge limitation of the object by the pipeline executed below an old construction of a road culvert under Łączyny street. The object of investigation is an old culvert under Łączyny Street to which pipeline was added. In the assembly chamber, on the route of pipeline, a rainy collector is connected to the culvert. It is characterized by high changeability of transverse sections, bed line slopes and hydraulic conditions. An old section of the culvert has the largest capacity. The trash screen is another element that considerably reduces the capacity of the object. The tendency to segregating rubble occurs in the section of culvert. The largest sediments gather in the headwater position, near the outlet – the smallest. In the stream below the object sediments have a similar material composition to the one in the upper position. The theoretical curves of longitudinal line of slope counted with formula (2) divide the area of Fig. 2 in three zones. On the left and below the curve Jn37 the accumulation zone is located, in which the movement of sediment does not occur. Above the curve Jn60 in the right the zone of intensive sediment transport appears. Among the curves Jn37 and Jn60 the transitory zone is located, corresponding to the conditions in which erosive processes begin with growing intensity of flow or accumulation processes, when flow dimini-

shes. For the flows, for which the counted gradient is larger than the gradient of water surface the difficulties with transportation of sediment through the object may occur. In the opposite situation the transportation should continue without obstacles. Exceeding this flow does not guarantee, however, that an intensive carrying out of earlier accumulated bed material happens. The appearing of rinsing flows is an accelerating factor to this process.

Author's address:

Sławomir Bajkowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa