

## ANALIZA PRZEPIŁYWU WODY PRZEZ GABiony

Ewa Jędryka

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań terenowych budowli gabionowych wykonane w latach 2003–2005, mające na celu: ustalenie parametrów granulometrycznych materiału wypełniającego elementy gabionowe (przebadano dwa rodzaje kamieni – łamany i otoczaki), ustalenie parametrów charakteryzujących porowatość ośrodka, określenie hydraulicznych parametrów przepływu na dwóch stopniach wykonanych z elementów gabionowych, ustalenie zmian zachodzących w konstrukcji tych stopni po kilkuletnim okresie eksploatacji. Badania wykazały, że: 1) materiał kamienny można charakteryzować według tych samych zasad co grunt naturalny, 2) porowatość gabionów wypełnionych otoczkami jest większa niż wypełnionych kamieniem łamanym tej samej wielkości, 3) współczynnik filtracji turbulენტnej gabionów wypełnionych otoczkami jest większy niż wypełnionych kamieniem łamanym, 4) udział przepływu powierzchniowego w stosunku do filtracyjnego na przelewie wykonanym z gabionów wzrasta wraz ze zwiększeniem się objętości przepływu wody dopływającej do budowli. Po trzyletnim okresie eksploatacji nie stwierdzono istotnych deformacji konstrukcji budowli gabionowych.

**Słowa kluczowe:** parametry kamieni, hydrauliczne parametry przepływu, odkształcenia konstrukcji budowli

### WSTĘP

W budownictwie wodnym konstrukcje z gabionów stanowią dość ważną grupę budowli. W chwili obecnej są one coraz częściej stosowane, gdyż uważa się, że są przyjazne środowisku wodnemu i stanowią jedno z rozwiązań technicznych zgodnych z proekologiczną zabudową koryt cieków. Pod wodą w wolnych przestrzeniach między kamieniami mogą znaleźć kryjówek zarówno skorupiaki, jak i ryby, a górne powierzchnie, często zamulone, stanowią bardzo dobre podłoże dla roślinności wodnej.

Oprócz funkcji proekologicznych budowle gabionowe posiadają zalety konstrukcyjno-hydrauliczne, gdyż tworzą konstrukcje elastyczne łatwo dopasowujące się do podło-

za, odporne na duże prędkości i falowanie wody. Takie budowle można łatwo przebudować (np. podwyższać i wydłużać) lub rozbierać.

W konstrukcjach wykonanych z gabionów na szczególną uwagę zasługują zjawiska hydrauliczne w ich obrębie. Związane są one głównie ze sposobem i drogami przepływu wody. Oprócz przepływu „powierzchniowego”, odbywającego się nad korpusem budowli (tak jak to ma miejsce na budowlach nieprzepuszczalnych), występuje tu przepływ przez ich korpus. Jest to szczególnie widoczne na budowlach nowych (bezpośrednio po ich wykonaniu) podczas niewielkich przepływów, gdy zdarza się, że płynąca woda po prostu „wsiąka”.

O ile hydrauliczne parametry przepływu na budowlach o korpusach nieprzepuszczalnych są stosunkowo dobrze poznane, o tyle wiadomości o przepływie w ośrodkach o dużej porowatości, jakimi bez wątpienia są gabiony, to ciągle jeszcze obszar dość słabo rozpoznany.

Do tej pory badania konstrukcji gabionowych wykonywane były głównie w warunkach laboratoryjnych – na modelach, i dotyczyły: określenia dopuszczalnych obciążeń elementów gabionowych, giętkości materacy siatkowo-kamiennych, deformacji przelewów tzw. schodkowych wykonanych z gabionów, szorstkości powierzchni pokrytych gabionami, stateczności umocnień gabionowych [Pilarczyk i in. 1990, van dem Berg i in. 1992, Chanson 1994, Šewčenka 1996].

W 2003 roku w Zakładzie Inżynierii Wodno Melioracyjnej IMUZ podjęto badania terenowe dwóch stopni gabionowych wykonanych w korytach małych rzek nizinnych – Wilga i Radomka. Badania rozpoczęto jeszcze na etapie budowy obiektów i miały one na celu:

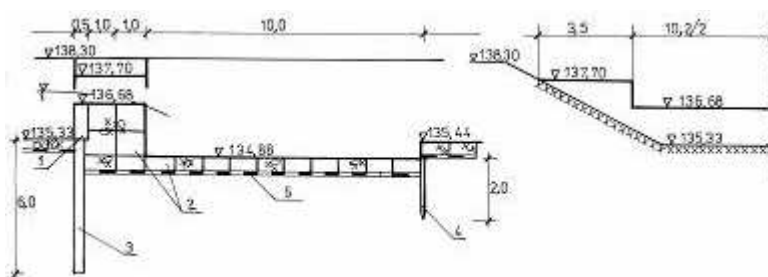
- ustalenie charakterystyk materiału kamiennego używanego do wypełnienia elementów gabionowych,
- ustalenie hydraulicznych parametrów przepływu na badanych budowlach,
- ustalenie zmian zachodzących w konstrukcji tych budowli po kilkuletnim okresie eksploatacji.

Wyniki pomiarów mających na celu ustalenie charakterystyk kamienia łamanego, użytego do wypełnienia gabionów, z których następnie wykonano badane budowle oraz wyniki obliczeń współczynników filtracji turbulენტnej i szorstkości powierzchni pokrytej gabionami, zaprezentowane zostały w artykule Jędryki i Kamińskiej [2004]. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki:

- uzupełniających pomiarów granulometrycznych wykonanych dla kamienia polnego,
- obliczeń współczynników filtracji turbulენტnej dla kamienia polnego,
- obliczeń podziału przepływu (na powierzchniowy i wgłębny) przez przelew badanych stopni,
- pomiarów zmian zachodzących w konstrukcji tych stopni.

## **CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW BADAWCZYCH**

Stopień gabionowy na rzece Wildze w km 39+700 (rys. 1) wybudowano w celu zmniejszenia spadku podłużnego dna rzeki i powstrzymania skutków erozji, które wystąpiły po likwidacji zlokalizowanego w tym miejscu piętrzenia młyńskiego. Wysokość

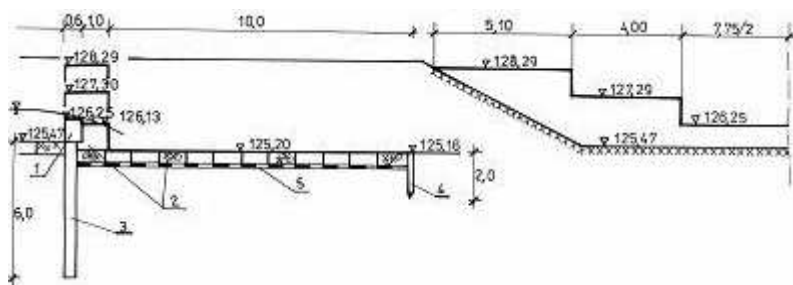


Rys. 1. Stopień z gabionów wykonany w korycie rzeki Wilgi (km 39+700): 1 – oczepek betonowy, 2 – kosze i materace siatkowo-kamienne, 3 – ścianka szczelna, 4 – palisada, 5 – geowłóknina [projekt BIPROMEL]

Fig. 1. Gabion barrage in Wilga River bed (km 39+700): 1 – concrete girt, 2 – gabions baskets and mattresses, 3 – sheet pile wall, 4 – palisade, 5 – geosynthetics [BIPROMEL project]

stopnia wynosi 1,34 m, posiada on przelew dwudzielny o przekroju prostokątnym. Światło dolnej części przelewu 10,4 m, a górnej 17,4 m. Przelew składa się z betonowego oczepu ścianki szczelnej szerokości 0,5 m i części wykonanej z gabionów (ułożonych od strony wody dolnej) szerokości 2 m. Poniżej przelewu znajduje się niecka wypadowa długości 10 m i głębokości 0,47 m, której dno i ściany boczne wykonane zostały z gabionów. Dno i skarpy koryta na długości 15 m poniżej niecki oraz 6 m powyżej przelewu zostały umocnione materacami gabionowymi ułożonymi na geowłókninie. Zabezpieczenie budowli przed skutkami filtracji stanowi ścianka szczelna wykonana z grodziec stalowych długości 6 i 4 m [Projekt budowlany..., 2002].

Stopień na rzece Radomce w km 37+965 (rys. 2) ma na celu zabezpieczenie przed utratą stateczności jazu zlokalizowanego powyżej oraz zmniejszenie spadku dna koryta rzeki na odcinku stopień-jaz. Stopień posiada przelew prostokątny o przekroju dwudzielnym. Szerokość części dolnej jest równa 7,75 m, a górnej 15,75 m. Składa się on z betonowego oczepu ścianki szczelnej szerokości 0,6 m i części wykonanej z gabionów (od strony wody dolnej) szerokości 1 m. Budowla nie posiada niecki wypadowej. Koryto rzeki na długości 25 m poniżej przelewu i 6 m powyżej zostało umocnione materacami gabionowymi ułożonymi na geowłókninie. Zabezpieczenie budowli przed filtracją stanowi, podobnie jak na Wildze, ścianka szczelna wykonana z grodziec stalowych długości 7 i 6, 4 m [Modernizacja rzeki..., 2002].



Rys. 2. Stopień z gabionów wykonany w korycie rzeki Radomki (km 37+965): 1 – oczep betonowy, 2 – kosze i materace siatkowo-kamienne, 3 – ścianka szczelna, 4 – palisada, 5 – geowłóknina [projekt BIPROMEL]

Figt. 2. Gabion barrage in Radomka River bed (km 37+965): 1 – concrete girt, 2 – gabions baskets and mattresses, 3 – sheet pile wall, 4 – palisade, 5 – geosynthetics [BIPROMEL project]

W toku badań na obu obiektach wykonano pomiary:

- ciężaru i wymiarów kamieni wypełniających elementy siatkowe,
- niwelacji poziomu zwierciadła wody na budowli (przelew, stanowisko górne i dolne) i w korycie w bezpośrednim sąsiedztwie,
- niwelacji budowli (przelew, niecka wypadowa, umocnienie górne i dolne),
- prędkości przepływu na przelewie i w korycie.

## METODYKA BADAŃ

### Charakterystyka materiału wypełniającego gabiony

Pomiary wykonano dla dwóch rodzajów kamieni – łamanego i polnego. Kamień łamany był to kwarcyt o ciężarze objętościowym  $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Napełniono nim cztery gabiony (oznaczone dalej jako nr 1–4) o objętości  $0,6 \text{ m}^3$ . Liczebność prób objętych pomiarami w poszczególnych gabionach wahała się od 324 do 386 sztuk. Materiał kamienny, z którego pobierane były próby do pomiarów, był następnie wykorzystany do budowy dwóch stopni zlokalizowanych w korytach rzek Wilga i Radomka.

W przypadku kamienia polnego badania wykonano dla dwóch prób. Próba pierwsza składała się z riolitu i granitu o ciężarze objętościowym  $2810 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Kamieniami napeł-

niono dwa gabiony (nr 5 i 6) o objętości 0,14 i 0,48 m<sup>3</sup>, używając do tego 114 i 425 sztuk kamieni. Druga próba składała się z granitu, kwarcytu i trachitu o ciężarze objętościowym 2470 kg·m<sup>-3</sup>, napełniono nimi trzy elementy siatkowe (nr 7–9) o objętości 2 × 0,51 m<sup>3</sup> i 0,53 m<sup>3</sup> (770, 132, 320 szt. kamieni).

**Uziarnienie.** Każdy kamień był ważony, a następnie mierzony w trzech płaszczyznach, tak aby uchwycić jego wymiar minimalny ( $D_1$ ), średni ( $D_2$ ) i maksymalny ( $D_3$ ). Na podstawie pomiarów wykonano obliczenia średnic: zastępczej ( $D_Z$ ) i ( $D_Z^*$ ) oraz miarodajnej ( $d_m$ ). Zakładając, że średnica zastępcza ( $D_Z$ ) jest równa średnicy kuli o objętości równej objętości kamienia, średnicę zastępczą ( $D_Z$ ) każdego kamienia określono, korzystając z zależności:

$$D_Z = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi\gamma}} \quad (1)$$

gdzie:  $M$  – ciężar kamienia [kg],  
 $\gamma$  – ciężar objętościowy skały [kg·m<sup>-3</sup>].

Znając liczbę kamieni ( $n$ ) w każdej próbie (gabionie) oraz ich sumaryczną masę ( $M^*$ ) obliczono średnicę zastępczą ( $D_Z^*$ ) dla całego gabionu. Wyniki obliczeń posłużyły do opracowania krzywych uziarnienia kamieni w każdej próbie, wykonanych oddzielnie dla wymiarów  $D_1, D_2, D_3, D_Z$ , a następnie do określenia średnic charakterystycznych i średnicy miarodajnej ( $d_m$ ). Średnicę miarodajną dla każdego gabionu określano, korzystając z zależności:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n p_i d_i}{100} \quad (2)$$

gdzie:  $d_i$  – średnia średnica ziaren dla  $i$ -tego zakresu krzywej uziarnienia,  
 $p_i$  – zawartość procentowa ziaren dla  $i$ -tego zakresu krzywej uziarnienia o średniej średnicy  $d_i$  w stosunku do całej próbki ( $\sum p_i = 100$ ).

Oprócz tego dla pełniejszego scharakteryzowania kamieni ustalono współczynnik niejednorodności ( $u$ ) obliczony jako stosunek  $d_{60}$  do  $d_{10}$  (średnice kamieni, których zawartość wagi wynosi wraz z mniejszymi odpowiednio 60 i 10%).

**Porowatość.** W celu scharakteryzowania ośrodka porowatego, jakim niewątpliwie są elementy gabionowe, wykorzystano współczynnik porowatości ( $p$ ) i wskaźnik porowatości ( $e$ ). Porowatość definiowana w wymiarze objętościowym jest to stosunek objętości wolnych przestrzeni ( $V_p$ ) do całkowitej objętości próbki ( $V$  – objętość elementu gabionowego). Wskaźnikiem porowatości określa się stosunek objętości porów ( $V_p$ ) do objętości cząstek fazy stałej ( $V_s$  – objętość kamieni w gabionie). Pomiędzy wielkościami  $p$  i  $e$  zachodzi związek [za Bajkowskim 2001]:

$$e = \frac{p}{1-p} \quad p = \frac{e}{1+e} \quad (3) \quad (4)$$

Jak podaje Dąbkowski [2001], przy charakteryzowaniu gabionów używany jest również stopień wypełnienia ( $\alpha$ ) nazywany też współczynnikiem zwartości, definiowany jako stosunek objętości kamieni wypełniających ( $V_s$ ) do objętości gabionu ( $V$ ).

### Przepływ przez budowle

**Przepływ wgłębny – filtracyjny.** Dużą część objętości gabionu stanowią wolne przestrzenie, które tworzą sieć kanalików umożliwiających ruch wody, nazywany przepływem filtracyjnym. Ruch wody w ośrodku porowatym może następować pod wpływem działania sił: bezwładności, tarcia i lepkości. W przypadku przepływu przez korpus budowli piętrzącej wykonanej z gabionów spotykamy się ze zjawiskiem turbulentnego przepływu filtracyjnego, a więc ruchu, w którym dominującą siłą jest siła bezwładności.

Wielkość oporów przepływu w ośrodku o dużej porowatości charakteryzowana jest za pomocą współczynnika filtracji turbulentnej. Wielkość tego współczynnika dla ośrodków porowatych ustalić można np. ze wzorów:

- Isbasha i Khaldrea [za Bajkowskim 2001]

$$k_T = p \left( 20 - \frac{\alpha}{D_Z} \right) \sqrt{D_Z} \quad (5)$$

gdzie:  $D_Z$  – średnica zastępcza cząstek [cm],

$p$  – porowatość [–],

$\alpha$  – współczynnik kształtu materiału użytego do budowy korpusu budowli (dla otoczków  $\alpha = 14$ , dla kamienia łamanego  $\alpha = 5$ ),

- Martinsa [za Bajkowskim 2001]

$$k_T = \frac{pK}{u} \sqrt{2ge} \sqrt{D_Z} \quad (6)$$

gdzie:  $u$  – współczynnik niejednorodności cząstek [–],

$K$  – bezwymiarowy współczynnik zależny od kształtu cząstek (dla otoczków  $K = 0,75$ , dla kamienia łamanego  $K = 0,56$ ),

$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,

$e$  – wskaźnik porowatości określony według wzoru (3).

**Przepływ powierzchniowy** odbywa się nad korpusem przelewu budowli gabionowej. Zmiany wielkości przepływu powierzchniowego na szerokości przelewu badanych stopni określono na podstawie pomiarów hydrometrycznych. Pomiaru wykonano:

- na obiekcie Wilga w przekroju wlotowym budowli, to znaczy na oczepie od strony wody dopływającej oraz w odległości 1,5 m (na połączeniu dwóch rzędów gabionów tworzących przelew) i 2,3 m od przekroju wlotowego (0,2 m od końca przelewu),
- na obiekcie Radomka na krawędzi wlotowej oczepu oraz w przekroju położonym w odległości 1,4 m od niej (0,2 m od końca przelewu).

## Zmiany zachodzące w konstrukcji budowli gabionowych

Zmiany te określono na podstawie wykonywanych co roku pomiarów niwelacyjnych. Przekroje pomiarowe zlokalizowano na wykonanej z gabionów części przelewu, w niecce wypadowej oraz na umocnieniu górnym i dolnym obydwu badanych stopni. Rozmieszczenie przekrojów pomiarowych pokazano na schemacie zamieszczonym w tabeli 6. Oprócz tego dokonano przeglądu stanu siatek widocznych części konstrukcji, ze zwróceniem szczególnej uwagi na przelew i nieckę wypadową, to znaczy na miejsca, w których budowla jest szczególnie narażona na uszkodzenia przez płynącą krę.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

### Charakterystyka materiału kamiennego

Zbiorcze zestawienie wartości średnic charakterystycznych oraz współczynników niejednorodności ustalone dla czterech prób kamienia łamanego i pięciu prób kamienia polnego zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka kamieni w badanych gabionach  
Table 1. Characteristics of stone in gabions

| Numer gabionu<br>Gabion number   | Wymiar<br>Dimension | Średnica charakterystyczna [mm]<br>Characteristics diameter |          |          |          |                     |       |         |
|----------------------------------|---------------------|---|----------|----------|----------|---------------------|-------|---------|
|                                  |                     | $d_{10}$  | $d_{50}$ | $d_{60}$ | $d_{90}$ | $u = d_{60}/d_{10}$ | $d_m$ | $D_z^*$ |
| 1                                | 2                   | 3   | 4        | 5        | 6        | 7                   | 8     | 9       |
| kamień łamany – crushed stones   |                     |   |          |          |          |                     |       |         |
| 1                                | $D_1$               | 56  | 89       | 94       | 125      | 1,7                 |       |         |
|                                  | $D_2$               | 90  | 130      | 140      | 160      | 1,55                |       |         |
|                                  | $D_3$               | 130   | 175      | 180      | 220      | 1,38                |       | 127     |
|                                  | $D_z$               | 120   | 140      | 145      | 165      | 1,21                | 136   |         |
| 2                                | $D_1$               | 60  | 85       | 90       | 120      | 1,50                |       |         |
|                                  | $D_2$               | 94  | 125      | 130      | 160      | 1,38                |       |         |
|                                  | $D_3$               | 145   | 175      | 180      | 225      | 1,24                |       | 134     |
|                                  | $D_z$               | 125   | 145      | 150      | 175      | 1,20                | 146   |         |
| 3                                | $D_1$               | 55  | 83       | 90       | 120      | 1,64                |       |         |
|                                  | $D_2$               | 75  | 105      | 110      | 145      | 1,46                |       |         |
|                                  | $D_3$               | 130   | 160      | 165      | 220      | 1,27                |       | 127     |
|                                  | $D_z$               | 120   | 140      | 150      | 160      | 1,25                | 138   |         |
| 4                                | $D_1$               | 52  | 85       | 90       | 135      | 1,73                |       |         |
|                                  | $D_2$               | 80  | 130      | 145      | 175      | 1,80                |       |         |
|                                  | $D_3$               | 110   | 170      | 180      | 225      | 1,63                |       | 129     |
|                                  | $D_z$               | 110   | 130      | 160      | 190      | 1,45                | 148   |         |
| kamień polny (otoczaki) – cobble |                     |   |          |          |          |                     |       |         |
| 5                                | $D_1$               | 80  | 140      | 150      | 175      | 1,88                |       |         |
|                                  | $D_2$               | 130   | 160      | 170      | 175      | 1,31                |       |         |
|                                  | $D_3$               | 162   | 185      | 200      | 225      | 1,23                |       | 118     |
|                                  | $D_z$               | 125   | 150      | 155      | 180      | 1,24                | 129   |         |

Tabela 1 cd.  
Table 1 cont.

| 1 | 2        | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    | 8   | 9   |
|---|----------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 6 | $D_1$    | 70  | 100 | 110 | 135 | 1,57 |     |     |
|   | $D_2$    | 95  | 120 | 125 | 130 | 1,32 |     |     |
|   | $D_3$    | 150 | 180 | 185 | 200 | 1,23 |     | 108 |
|   | $D_{Z.}$ | 100 | 130 | 135 | 170 | 1,35 | 118 |     |
| 7 | $D_1$    | 68  | 84  | 89  | 110 | 1,31 |     |     |
|   | $D_2$    | 85  | 105 | 110 | 130 | 1,29 |     |     |
|   | $D_3$    | 105 | 130 | 135 | 160 | 1,29 |     | 96  |
|   | $D_{Z.}$ | 94  | 110 | 115 | 130 | 1,22 | 100 |     |
| 8 | $D_1$    | 145 | 170 | 180 | 200 | 1,24 |     |     |
|   | $D_2$    | 150 | 200 | 210 | 250 | 1,40 |     |     |
|   | $D_3$    | 180 | 240 | 250 | 300 | 1,39 |     | 169 |
|   | $D_{Z.}$ | 165 | 200 | 210 | 240 | 1,27 | 180 |     |
| 9 | $D_1$    | 80  | 130 | 145 | 185 | 1,81 |     |     |
|   | $D_2$    | 115 | 160 | 175 | 220 | 1,52 |     |     |
|   | $D_3$    | 135 | 185 | 200 | 280 | 1,48 |     | 124 |
|   | $D_{Z.}$ | 120 | 165 | 175 | 203 | 1,46 | 147 |     |

Wykorzystując wyniki pomiarów granulometrycznych zamieszczone w tabeli 1, obliczono porowatość ( $p$ ), wskaźnik porowatości ( $e$ ) oraz współczynnik zwartości ( $a$ ) dla gabionów objętych pomiarami (tab. 2).

Tabela 2. Parametry charakteryzujące porowatość  
Table 2. Parameters characteristic of gabions porosity

| Numer gabionu<br>Gabion number   | $D_Z^*$<br>[m] | $V$<br>[m <sup>3</sup> ] | $V_S$<br>[m <sup>3</sup> ] | $p$<br>[-] | $e$<br>[-] | $a$<br>[-] |
|----------------------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|
| kamień łamany – crushes stones   |                |                          |                            |            |            |            |
| 1                                | 0,127          | 0,6                      | 0,415                      | 0,308      | 0,446      | 0,692      |
| 2                                | 0,134          | 0,6                      | 0,411                      | 0,315      | 0,460      | 0,685      |
| 3                                | 0,127          | 0,6                      | 0,422                      | 0,297      | 0,422      | 0,703      |
| 4                                | 0,129          | 0,6                      | 0,408                      | 0,320      | 0,471      | 0,680      |
| otoczaki próba 1 – cobble test 1 |                |                          |                            |            |            |            |
| 5                                | 0,118          | 0,144                    | 0,096                      | 0,333      | 0,500      | 0,666      |
| 6                                | 0,108          | 0,434                    | 0,284                      | 0,346      | 0,528      | 0,654      |
| otoczaki próba 2 – cobble test 2 |                |                          |                            |            |            |            |
| 7                                | 0,096          | 0,514                    | 0,360                      | 0,300      | 0,428      | 0,700      |
| 8                                | 0,169          | 0,507                    | 0,312                      | 0,385      | 0,625      | 0,615      |
| 9                                | 0,124          | 0,527                    | 0,327                      | 0,380      | 0,612      | 0,620      |

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczeń ustalono, że:

1. Dla gabionów wypełnionych ręcznie kamieniem łamanym o średnicy zastępczej (ustalanej dla całego gabionu)  $127 \leq D_Z^* \leq 134$  mm i współczynnika nierównomierności uziarnienia  $1,20 \leq u \leq 1,45$  porowatość ( $p$ ) waha się od 0,297 do 0,320, a wskaźnik porowatości ( $e$ ) od 0,422 do 0,471.



2. Dla gabionów wypełnionych okrągłakami o średnicy zastępczej  $96 \leq D_Z^* \leq 169$  mm i współczynnika nierównomierności uziarnienia  $1,22 \leq u \leq 1,46$  porowatość ( $p$ ) waha się od 0,300 do 0,385, a wskaźnik porowatości ( $e$ ) od 0,500 do 0,612.

3. Porowatość gabionu (nr 4) wypełnionego kamieniem łamanym o średnicy zastępczej  $D_Z^* = 129$  mm i współczynnika nierównomierności uziarnienia  $u = 1,45$  i gabionu (nr 9) wypełnionego otoczkami o zbliżonych parametrach granulometrycznych, tzn.  $D_Z^* = 124$  mm i współczynnika nierównomierności uziarnienia  $u = 1,46$  jest równa odpowiednio 0,320 i 0,380.

Jak więc widać, elementy siatkowe wypełnione kamieniem pełnym charakteryzują się większą porowatością niż wypełnione kamieniem łamanym.

### Przepływ filtracyjny

Wartości współczynnika filtracji turbulენტnej obliczone ze wzorów (5) i (6) zamieszczono w tabeli 3. Obliczenia wykazały, że wartości liczbowe tego współczynnika dla kamienia łamanego zmieniają się odpowiednio od 0,208 do 0,226  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  i od 0,135 do 0,162  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a dla kamienia pełnego od 0,172 do 0,303  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  i od 0,165 do 0,327  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Widać więc, że dla obydwu rodzajów kamieni współczynnik filtracji turbulენტnej zwiększa się wraz ze zwiększeniem porowatości ( $p$ ) i średnicą ( $D_Z^*$ ).

Tabela 3. Współczynnik filtracji turbulენტnej  
Table 3. Coefficient of turbulent filtration

| Numer gabionu<br>Gabion number   | $D_Z^*$<br>[m] | $p$<br>[-] | U<br>[-] | $k_T$ wg wzoru (5) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] dla | $k_T$ wg wzoru (6) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] dla |
|----------------------------------|----------------|------------|----------|---|---|
|                                  |                |            |          | $a = 5$<br>$k_T$ by formula (5) for $a = 5$             | $K = 0,56$<br>$k_T$ by formula (6) for $K = 0.56$       |
| kamień łamany – crushed stones   |                |            |          |   |   |
| 1                                | 0,127          | 0,308      | 1,21     | 0,215   | 0,140   |
| 2                                | 0,134          | 0,315      | 1,20     | 0,226   | 0,162   |
| 3                                | 0,127          | 0,297      | 1,25     | 0,208   | 0,136   |
| 4                                | 0,129          | 0,320      | 1,45     | 0,225   | 0,135   |
| Numer gabionu<br>Gabion number   | $D_Z^*$<br>[m] | $p$<br>[-] | U<br>[-] | $k_T$ wg wzoru (5) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] dla | $k_T$ wg wzoru (6) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] dla |
|                                  |                |            |          | $a = 14$<br>$k_T$ by formula (5) for $a = 14$           | $K = 0,75$<br>$k_T$ by formula (6) for $K = 0.75$       |
| kamień pełny (otoczaki) – cobble |                |            |          |   |   |
| 5                                | 0,118          | 0,333      | 1,24     | 0,215   | 0,216   |
| 6                                | 0,108          | 0,346      | 1,35     | 0,213   | 0,203   |
| 7                                | 0,096          | 0,300      | 1,22     | 0,172   | 0,165   |
| 8                                | 0,169          | 0,385      | 1,27     | 0,303   | 0,327   |
| 9                                | 0,124          | 0,390      | 1,46     | 0,259   | 0,244   |

### Przepływ powierzchniowy

Wyniki pomiarów hydrometrycznych wykonane w przekrojach pomiarowych zlokalizowanych na przelewach badanych budowli zamieszczono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Wielkości przepływów na przelewie stopnia na rzece Wildze  
Table 4. Overflow on barrages discharge in the Wilga River

| Lp.<br>No | Data<br>Data | Przepływ – Flow   |                                      |                                |
|-----------|--------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|
|           |              | oczep [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] / [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]<br>girt | połączenie gabionów<br>joint gabions | koniec gabionów<br>end gabions |
| 1         | 30.06.2003   | 0,24/0,02   | 0                                    | 0 (0%)                         |
| 2         | 25.09.2003   | 0,24/0,02   | 0                                    | 0 (0%)                         |
| 3         | 23.03.2004   | 2,58/0,25   | brak pomiaru                         | 2,53 (98%)                     |
| 4         | 23.06.2004   | 0,47/0,04   | brak pomiaru                         | 0,04 (8%)                      |
| 5         | 10.08.2004   | 0,39/0,04   | 0,36                                 | 0,03 (8%)                      |
| 6         | 21.04.2005   | 1,00/0,10   | 0,93                                 | 0,59 (59%)                     |
| 7         | 23.08.2005   | 0,33/0,03   | 0,32                                 | 0,08 (24%)                     |

Tabela 5. Wielkości przepływów na przelewie stopnia na rzece Radomce  
Table 5. Overflow on barrages discharge in the Radomka river

| Lp.<br>No | Data<br>Data | Przepływ – Flow   |                                |
|-----------|--------------|---|--------------------------------|
|           |              | oczep [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] / [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]<br>girt | koniec gabionów<br>end gabions |
| 1         | 8.08.2003    | 0,27/0,04   | 0                              |
| 2         | 26.09.2003   | 0,34/0,04   | 0                              |
| 3         | 24.03.2004   | 17,35/2,24  | 16 (92%)                       |
| 4         | 22.06.2004   | 0,07/0,01   | 0                              |
| 5         | 11.08.2004   | 0,21/0,03   | 0                              |
| 6         | 20.04.2005   | 1,63/0,21   | 0,26 (16%)                     |
| 7         | 24.08.2005   | 0,14/0,02   | 0                              |

Na podstawie tych wyników ustalono, że procentowy udział przepływu powierzchniowego i wgłębego na przelewach badanych stopni zmienia się wraz ze zmianami ilości wody dopływającej do budowli.

Na obiekcie Wilga, przy przepływie jednostkowym (na 1 m szerokości przelewu):

- $q < 0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , woda płynie tylko na betonowej części oczepu, a następnie wsiąka w część wykonaną z gabionów, nie osiągając krawędzi przelewu od strony wody dolnej,
- $0,03 < q < 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , przepływ powierzchniowy stanowi 8–24% ilości wody dopływającej,
- $q \approx 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , po powierzchni przelewowej płynie około 60% wody dopływającej,
- $q \approx 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , przepływ powierzchniowy stanowi około 98%.

Na obiekcie Radomka, przy przepływie jednostkowym:

- $q \leq 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , cały przepływ odbywa się przez gabiony,
- $q \approx 0,21 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , przepływ powierzchniowy stanowi około 16%,
- $q \approx 2,24 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , przepływ powierzchniowy stanowi około 92%.

Ze względu na to, że badane stopnie różnią się wysokością, a ich przelewy mają różną szerokość części wykonanej z gabionów (Wilga – 2 m, Radomka – 1 m), trudno jest

na podstawie zebranego materiału pomiarowego wyciągnąć wnioski ogólne, dotyczące podziału przepływu na powierzchniowy i filtracyjny.

### Zmiany zachodzące w konstrukcji budowli gabionowych

Wyniki obliczeń wielkości zmian wysokościowego położenia dna w przekrojach pomiarowych przedstawiono w tabeli 6. Jak wynika z tych danych, konstrukcje badanych budowli w ciągu trzyletniego okresu eksploatacji uległy tylko niewielkim deformacjom, z wyjątkiem przekroju założonego na umocnieniu dolnym stopnia na rzece Radomce. Przyczyną tych deformacji było najprawdopodobniej złe wypoziomowanie betonowej części przelewu (oczepu), powodujące odchylenie przelewającego się strumienia wody w kierunku jednego brzegu, oraz brak (przewidzianej w projekcie) niecki wypadowej.

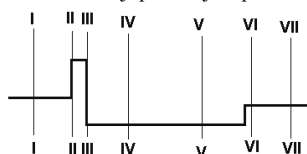
Tabela 6. Zakres zmian wysokościowego położenia dna w przekrojach pomiarowych na obiektach Wilga i Radomka

Table 6. Range of bed river height changes in cross sections on Wilga and Radomka objects

| Lokalizacja przekroju<br>Location cross                   | Wilga   |               | Radomka   |               |
|---|---|---------------|---|---------------|
|   | Różnica rzędnych dna w latach<br>Difference ordinate bottom made in |               | Różnica rzędnych dna w latach<br>Difference ordinate bottom made in |               |
|   | 2003–2004   | 2003–2005     | 2003–2004   | 2003–2005     |
| Koniec umocnienia górnego I–I<br>End higher strengthen    | –0,08 – +0,40   | brak pomiaru  | –0,01 – +0,31   | +0,01 – +0,50 |
| Przelew część wlotowa II–II<br>Front overflow II–II       | –0,05 – –0,08   | –0,06 – +0,01 | –0,06 – +0,08   | brak pomiaru  |
| Przelew część wylotowa III–III<br>Outlet overflow III–III | –0,05 – –0,08   | +0,01 – +0,05 | –0,10 – +0,06   | –0,10 – +0,02 |
| Niecka IV–IV<br>Basin IV–IV                               | –0,21 – +0,08   | –0,14 – +0,19 | –0,23 – +0,07   | –0,10 – +0,02 |
| Niecka V–V<br>Basin V–V                                   | –0,10 – +0,10   | –0,14 – +0,31 | –0,09 – +0,13   | –0,14 – +0,15 |
| Umocnienie dolne VI–VI<br>Lower strengthen IV–IV          | –0,09 – +0,18   | –0,11 – +0,05 | –0,21 – +0,08   | –0,18 – +0,10 |
| Umocnienie dolne VII–VII<br>Lower part strengthen VII–VII | –0,13 – +0,03   | –0,13 – +0,04 | –0,56 – +0,17   | –0,03 – +0,67 |

Liczby ze znakiem „+” oznaczają wypiętrzenie elementu (lub jego zamulenie) względem poziomu istniejącego bezpośrednio po wykonaniu, a „–” obniżenie.

Schemat lokalizacji przekrojów pomiarowych



Przekroje zlokalizowane na przelewie na obydwu obiektach uległy jedynie niewielkim odkształceniom (5–0 cm), prawdopodobnie na skutek przemieszczenia się kamieni (wypłukania mniejszych niż wymiary oczek siatki lub na skutek „zagęszczenia” i likwidacji wolnych przestrzeni pomiędzy kamieniami).

Dno koryta w przekrojach zlokalizowanych na końcu umocnienia górnego uległo zamuleniu, lecz jest to zjawisko typowe dla budowli posiadających zwężony przekrój przelewu i próg.

Przekroje zlokalizowane w niecce wypadowej i na umocnieniu dolnym stopnia na rzece Wildze oraz w niecce na rzece Radomce uległy nieznacznym odkształceniom (2–31 cm).

W okresie badawczym nie stwierdzono uszkodzeń siatek wywołanych przepływem zanieczyszczeń i kry przez budowle.

## WNIOSKI

Przepływ wody przez gabiony zależy nie tylko od ich wymiarów i kształtów, ale również od materiału, jaki został użyty do wypełnienia elementów siatkowych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów materiału wypełniającego oraz badań dwu stopni gabionowych ustalono, że:

1. Materiał kamienny można charakteryzować według tych samych zasad co grunty naturalne, natomiast wielkość jest określana przez pomiar poszczególnych pojedynczych kamieni.

2. Porowatość gabionów wypełnionych kamieniem polnym jest większa niż wypełnionych kamieniem łamanym o podobnej granulacji.

3. Współczynniki filtracji turbulენტnej obliczone z zależności podanych przez Isbasha i Khaldrea oraz Martinsa są większe dla gabionów wypełnionych otoczkami niż dla wypełnionych kamieniem łamanym.

4. Na przelewie wykonanym z gabionów udział przepływu powierzchniowego w stosunku do filtracyjnego wzrasta wraz ze zwiększeniem się objętości wody dopływającej do budowli.

5. Po trzyletnim okresie eksploatacji budowli wykonanych z elementów siatkowo-kamiennych nie stwierdzono istotnych deformacji ich konstrukcji jak również wyraźnych uszkodzeń siatek gabionowych na części przelewowej (szczególnie narażonej na uderzenia kry) i w niecce wypadowej.

## PIŚMIENNICTWO

- Bajkowski S., 2001. Współczynnik filtracji turbulენტnej jazów przepuszczalnych. Mat. konf. „Gabiony w kształtowaniu i ochronie środowiska naturalnego”. Wyd. Inż. Środ., 39–57.
- Chanson H., 1994. Hydraulic design of stepped cascades, channels weirs and spillways. Pergamon.
- Dąbkowski L.Sz., 2001. Korzyści i warunki stosowania gabionów w budownictwie wodnym. Wiad. Mel. i Łąkarskie 3, 113–120.
- Jędryka E., Kamińska A., 2004. Badania wybranych parametrów gabionów (obiekty Wilga i Radomka). Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 3 (1), 67–75.
- Martins R., 1990. Turbulent Seepage Flow Through Rockfill Structures. Water Power and Dam Constructions. March, S, 41–45.
- Modernizacja rzeki Radomki w km 37+630 – 38+230 gm. Jedlińsk, 2002. Biuro Studiów i Projektów Gospodarki Wodnej Rolnictwa BIPROMEL.

- Pilarczyk K.W., Havinga H., Klaasen G.J., Verhey H.J., Masselman E., Leemans J. A., 1990. Control of bank erosion in the Netherlands. State of the art. 442. Delft Hydraulics, 29.
- Projekt budowlany, stopień na rz. Wildze km 39+700 w miejscowości Łętów, 2002. Biuro Studiów i Projektów Gospodarki Wodnej Rolnictwa BIPROMEL.
- Ševčenko K.I., 1996. Gabiony – nadeižnaja zaščita gruntov ot erozji. Gidrot. Stroit. 6.
- van dem Berg E.J.F. i in., 1992. Schanskorven aan zee. Final thesis. Delft Univ. of Technology. Mat. techn.

## **ANALYSIS OF WATER FLOW BY GABIONS**

**Abstract.** The article presents the results of site surveys made in 2003–2005. The main purpose of the investigation was to determine: grain size distribution of the material that fits the grid elements (it was investigated two type of stones: crushed stones and cobble), porosity of the medium, parameters of hydraulic flow on two stages made from the gabion elements, changes in the construction of gabions structure after several years of its operating. The results show: 1) stones can be characterized by the same rules such as mineral ground, 2) porosity of gabions filled witch cobble is larger in comparison witch gabions of the same size but filled witch crushed stones, 3) coefficient of turbulence filtration of gabions filled witch cobble is larger in comparison witch the gabions filled witch crushed stones, 4) the surface flow in comparison witch filtration on wire built with gabions is increasing follow increasing volume of inflow water to the construction. There was not any essential deformation of the gabions construction after three years of their using

**Key words:** stones parameters, hydraulic flow parameters, structures deformation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.02.2007