

## Projektowanie konstrukcji niskiego stopnia kamiennego

### Abstract

#### Designing of low-head vertical stone drop.

The manner of designing of the vertical stone drop with 0,8 meter is presented in this paper. The shape of the overflow cross section, formed by Larssen's sheet pile curtain, is polygonal with triangle lower's part. The vertical drop is constructed by stones which have been lain without using concrete as a binding material. The size and weigh of stones have been fitted to the variable stream velocity in different parts of the drop construction. The filter layer with gravel and geotextil, has been used in the aim of underlying ground protection against erosion by seepage force. The project of vertical stone drop have given lower capital expenditures with comparison to the rainforced concentrate drop.

*Key words: water structures, vertical stone drop, designing*

### Wstęp

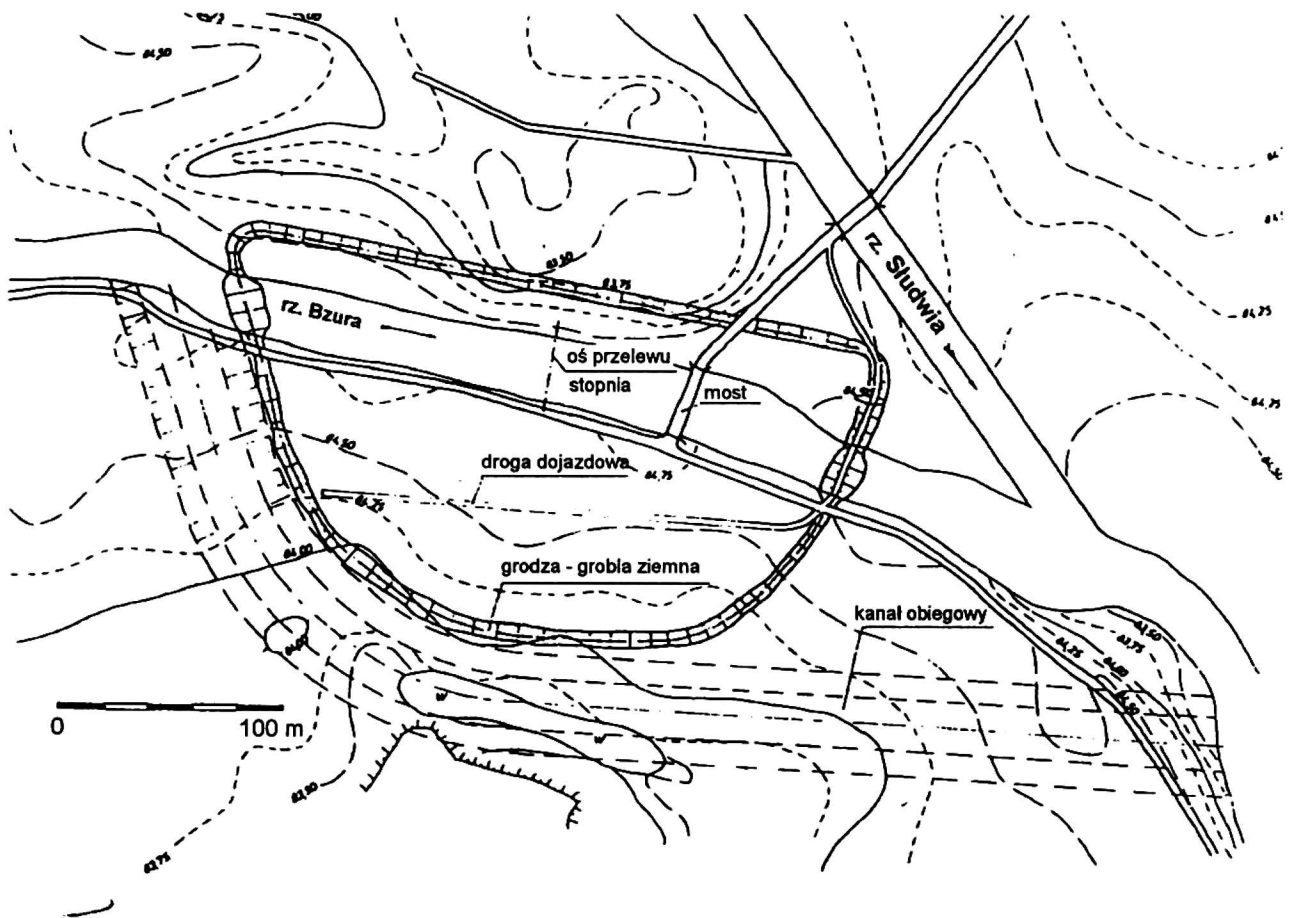
Projektowanie niskiego stopnia kamiennego omówiono na przykładzie stopnia na rzece Bzurze, zlokalizowanego powyżej ujścia jej dopływu – rzeki Słudwi. Konieczność odwodnienia użytków rolnych w dolinie Słudwi zmusiła do obniżenia poziomu wody w korycie Bzury. Dla zabezpieczenia przed erozją nie uregulowanego odcinka Bzury powyżej ujścia Słudwi przewidziano budowę oma-

wianego stopnia. Pierwotny projekt przewidywał wykonanie stopnia grzebieniowego o konstrukcji żelbetowej [CBSiPWM "BIPROMEL" 1979]. Poszukując możliwości obniżenia kosztów, inwestor zlecił Katedrze Budownictwa Wodnego SGGW opracowanie tańszego rozwiązania. Zaproponowano budowę stopnia kamiennego bez użycia betonu jako spoiwa [KBW SGGW 1991]. Konstrukcje takie są rzadko stosowane. Metoda jego wymiarowania oraz przyjęte rozwiązania konstrukcyjne są przedmiotem niniejszej pracy.

### Lokalizacja stopnia i dane hydrologiczne profilu budowy

Pierwotnie projektowany stopień żelbetowy przewidywano zlokalizować w odległości 330 m w górę od drewnianego mostu na Bzurze leżącego około 190 m powyżej ujścia Słudwi (rys. 1). Pogłębienie dna rzeki prawie o 1 m i możliwe wystąpienie wstecznej erozji koryta po wybudowaniu stopnia poważnie zagroziłoby stateczności drewnianych podpór palowych tego mostu. W nowym projekcie zmieniono lokalizację stopnia umieszczając go w odległości 90 m poniżej mostu i

\* Katedra Budownictwa Wodnego SGGW, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.



Rys. 1. Lokalizacja stopnia według projektu BIPROMEL-u (1979)

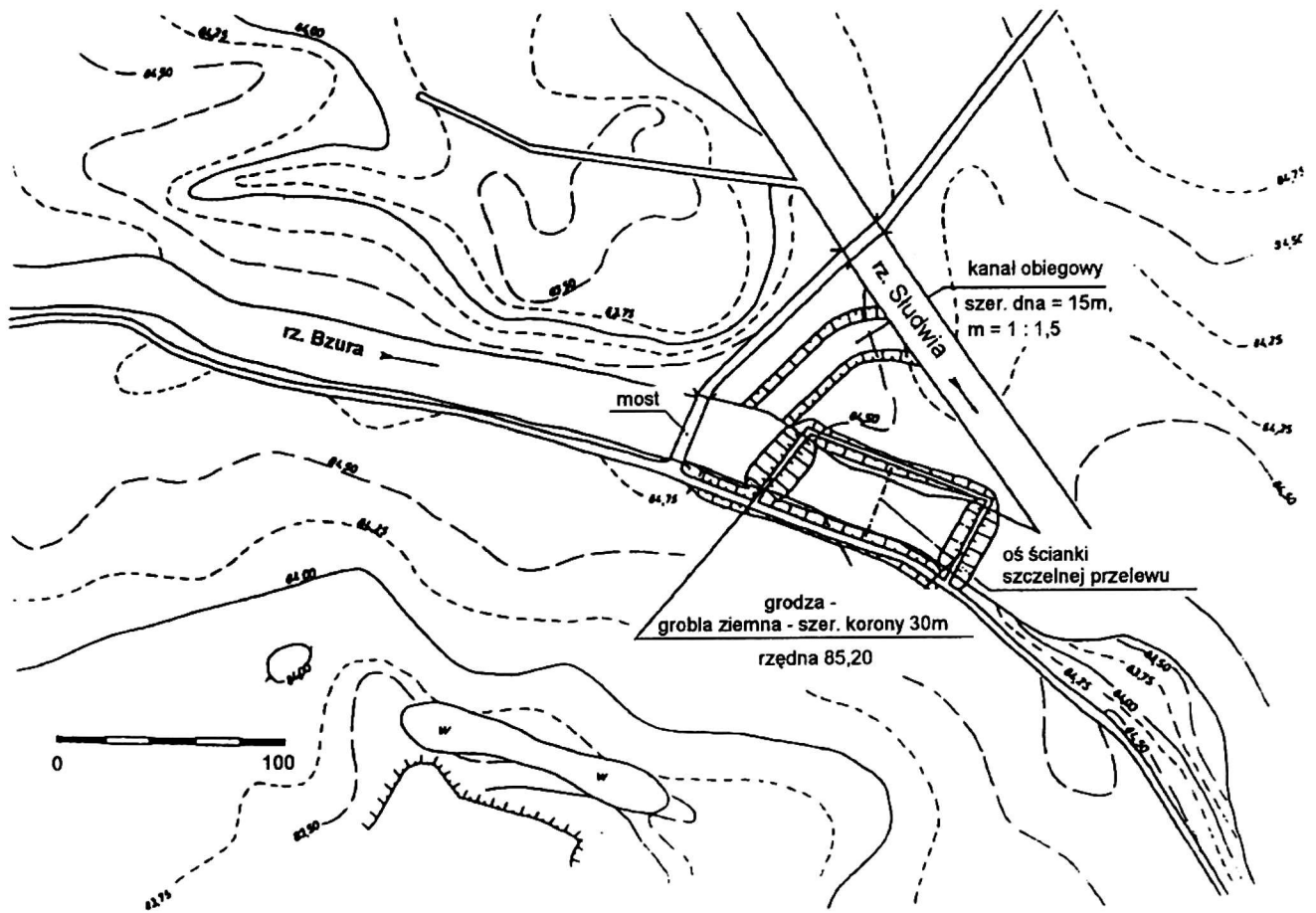
100 m powyżej ujścia Słudwi (rys. 2). Most znalazł się więc w górnym stanowisku stopnia, co jest mniej groźne dla jego podpór.

Rzeka Bzura w przekroju Łowicz (kontrolowanym przez IMGW) ma zlewnię  $3448,5 \text{ km}^2$ , a w przekroju projektowanego stopnia –  $2448,3 \text{ km}^2$ . Przepływy charakterystyczne z wielolecia 1951–1979 dla profilów Łowicz i powyżej ujścia Słudwi zawiera tabela.

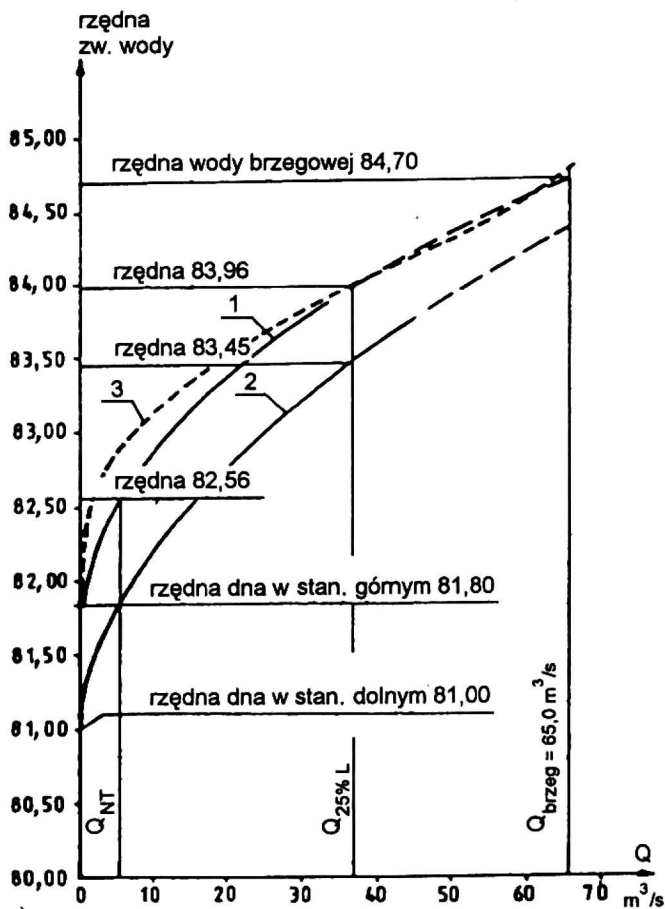
Za przepływ miarodajny do obliczeń stopnia (IV klasa ważności) przyjęto przepływ brzegowy o natężeniu  $65,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (w projekcie BIPROMEL-u przepływ ten określono na  $88,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Krzywe konsumpcyjne koryta Bzury przedstawiono na rysunku 3. Przyjęto, że krzywa 1 jest miarodajna dla określenia wymiarów przelewu stopnia, a krzywa 2 odnosi się do dolnego stanowiska stopnia.

Tabela. Przepływy charakterystyczne z lat 1951–1970 [IMGW 1980]

Oznaczenie przepływu	Przepływ $Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	
	Łowicz $A = 3448,5 \text{ km}^2$	powyżej ujścia Słudwi $A = 2448,3 \text{ km}^2$
Najwyższy z maksymalnych	188	141
Średni z maksymalnych	82,2	61,6
Średni	11,2	7,95
Średni z minimalnych	2,18	155
Najniższy z minimalnych	1,27	0,90



Rys. 2. Lokalizacja stopnia według projektu KBW (1991)



Rys. 3. Krzywe przepustowości koryta i stopnia; 1 – dla koryta w stanowisku górnym, 2 – dla koryta w stanowisku dolnym, 3 – krzywa przepustowości stopnia

Dolina Bzury w rejonie stopnia jest szeroka, a wielkie wody wychodzą na zalewy już powyżej drewnianego mostu, płynąc obniżeniami terenów zalewowych, głównie prawobrzeżnych. Naturalne ukształtowanie doliny i brzegów sprawia, że w czasie opadania stanów napływ wody z zalewów do koryta rzeki nie odbywa się bezpośrednio poniżej stopnia i nie zagraża jego bezpieczeństwu.

Rzędna dna 81,80 m n.Kr. w górnym stanowisku projektowanego stopnia przyjęto z przekrojów poprzecznych pomierzonych w rejonie mostu w latach 1978 i 1986. Rzędna dna 81,00 m n.Kr. w dolnym stanowisku stopnia przyjęto według zmodyfikowanego projektu regulacji rzeki [KBW SGGW 1987].

Wyniki badań geologicznych [CBSiPWM "BIPROMEL" 1979; KBW SGGW 1991] wykazały, że:

- strop utworów aluwialnych do głębokości około 4 m budują piaski drobne próchniczne oraz torfy, przy czym w warstwie przypowierzchniowej o grubości do 3 m występuje pakiet gruntów słabonośnych (torfy oraz namuły organiczne) o konsystencji miękkoplastycznej, przykrytych w stropie piaskami drobnymi; pod nim do głębokości 10–12 m zalegają piaski średnie i drobne średnio zagęszczone, podścielone gruntami gruboziarnistymi – pospółką i piaskiem grubym. Głębiej zalegają pyły piaszczyste, a ich strop układa się na głębokości 5,3–5,9 m poniżej powierzchni terenu. Odpowiada to rzędnej 77,40–77,70 m n.Kr. w pobliżu koryta rzeki Bzury i 79,30 m n.Kr. w pobliżu koryta Słudwi. Warstwa pyłów piaszczystych ma konsystencję plastyczną i twardoplastyczną.
  - w pobliżu koryta rzeki, gdzie wykonano wiercenia, występuje jeden poziom wodonośny o rzędnej lustra wody 83,10–83,13 m n.Kr., pomierzony w czasie wierceń w 1971 r. przy średnich stanach wody w rzece, i 81,60–81,70 m n.Kr., pomierzony w czasie drugich wierceń przy stanach niskich. Poziom wodonośny jest ściśle związany z lustrem wody w korycie rzeki;
  - warstwa wodonośna to głównie piaski drobne i średnie oraz pospółka;
  - woda z otworów wykonanych bezpośrednio przy rzece oraz z rzeki wykazywała silną agresywność kwasową i siarczanową w stosunku do betonu;
- Porównując wyniki wierceń wykonanych dla pierwotnej i nowej lokalizacji stopnia, odległych od siebie prawie o 80

m, można stwierdzić, że na prawym brzegu koryta Bzury, w obu miejscach, uwarstwienia i rodzaje utworów są podobne. Bliżej ujścia Słudwi grubość warstwy namułów wzrasta z około 0,5 m w przekroju pierwotnej lokalizacji do około 1,0–1,5 m w przekroju nowej lokalizacji, a strop warstwy pyłów piaszczystych ulega wypłyceniu.

### **Kształt, wymiary i przepustowość stopnia**

Za wysokość stopnia przyjęto różnicę rzędnych dna przekrojów poprzecznych koryta rzeki w górnym i dolnym stanowisku stopnia wynoszącą 0,8 m. Różnica rzędnej progu stopnia i dna wypadu wynosi:  $82,00 - 80,70 = 1,30$  m. Przyjęto, że przekrój poprzeczny koryta Bzury poniżej stopnia zostaje doprowadzony do kształtu trapezowego o szerokości dna 18 m i nachyleniu skarp 1:2. Odpowiada to wymiarom przyjętym w projekcie regulacji rzeki. W górnym stanowisku stopnia przyjęto trapezowy przekrój koryta o istniejącej średniej szerokości dna 22 m i nachyleniu skarp 1:1,5.

Dostępność grubego kamienia w rejonie budowy stopnia i niski koszt jego zakupu zadecydowały, że stał się on podstawowym budulcem, którego cechy przesądziły o tym, że stopień powinien mieć szeroką koronę. Szerokość korony  $\delta$  wynika z warunku  $2,5 h < \delta \leq (12-15) h$ , gdzie  $h$  jest grubością warstwy przelewowej. Wartość  $\delta$  przyjęto jako równą dwupółkrotnej grubości warstwy przelewowej przy przepływie brzegowym.

Wstępne analizy i obliczenia sprawdzające wykazały, że do bardziej szczegółowego opracowania można było

wybrać trzy formy otworu przelewowego w zadowalającym stopniu przybliżające krzywą przepustowości stopnia do krzywej przepływu koryta w jego górnym stanowisku (rys. 3). Były to otwory:

- trapezowy dwudzielny,
- dwudzielny z najniższą częścią podzieloną "groblą" kamienną na dwa otwory trapezowe,
- o kształcie wielobocznym, z trójkątną częścią dolną.

Dalsze analizy przepustowości stopnia oraz głębokości i prędkości nad koroną progu wykazały celowość wyeliminowania dwóch pierwszych rozwiązań, gdyż:

- w przypadku a) grubość warstwy przelewowej przy przepływach średnich i niższych wynosiła zaledwie kilka centymetrów, co groziłoby (po ożywieniu środowiska wodnego Bzury) utrudnieniem wędrówek ryb i sprawiałoby wrażenie zaniku rzeki nad koroną przelewu stopnia,
- w przypadku b) w obu "wycięciach" trapezowych prędkości wody przy większych przepływach dochodziłyby do 6 m/s, co oznacza trudności w zachowaniu stabilności kamieni tworzących koronę przelewu.

Ostatecznie przyjęto przypadek c), czyli wieloboczny otwór przelewowy z trójkątną częścią dolną (rys. 4). Wierzchołek tego trójkąta, stanowiący najniższy punkt

teoretycznej krawędzi przelewu, przyjęto na rzędnej 82,00 m n.Kr.

Natężenia przepływu przez przelew o trójkątnym wycięciu i szerokiej koronie obliczono według wzoru [Bos 1976]:

$$Q = C_d \cdot C_v \cdot \frac{16}{25} \cdot \left(\frac{2}{5} g\right)^{0,5} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \cdot h^{2,5} \quad (1)$$

gdy napętnienie przelewu  $h \leq 1,25 H_b$ , oraz ze wzoru:

$$Q = C_d \cdot C_v \cdot \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{2}{5} g\right)^{0,5} \times \times B_T \cdot \left(h - \frac{1}{2} H_b\right)^{2,5} \quad (2)$$

gdy  $h > 1,25 H_b$ , a przelew ma otwór opisany na rysunku 4 punktami ABCDE,

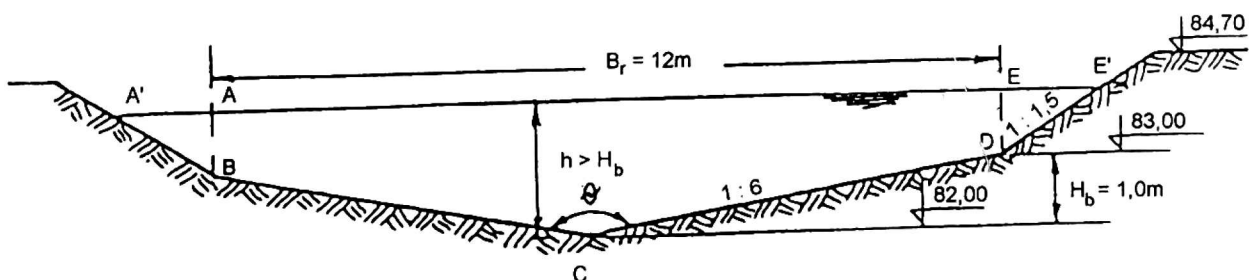
gdzie:

$h$  – głębokość wody w otworze przelewu,  
 $H_b$  – głębokość trójkątnej części otworu przelewu,

$\theta$  – kąt wierzchołkowy otworu trójkątnego,

$B_T$  – szerokość trójkątnej części przelewu (rys. 4),

$C_d$  – współczynnik wydatku przelewu określany z wykresu podanego w pracy Bosa (1976), przyjmowany w za-



Rys. 4. Kształt otworu przelewowego stopnia

leżności od wartości stosunku  $h/L$ , gdzie  $L$  jest szerokością korony przelewu (w projekcie  $L = 5$  m),

$C_v$  – współczynnik poprawkowy uwzględniający wysokość prędkości na dopływie wody do przelewu. Ze względu na jego wartość niewiele przekraczającą 1,0 przyjęto  $C_v = 1$ .

Należy podkreślić, że istniejące metody obliczeń przelewów nie obejmują bezpośrednio przypadku otworu opisanego punktami A'BCDE' (rys. 4). Dlatego zdecydowano przyjąć, że przepustowość takiego przelewu przy  $h > H_b$  będzie sumą przepustowości otworu ABCDE oraz otworu trójkątnego złożonego z części A'AB i EE'D.

Wyniki obliczeń przepustowości przelewu stopnia o wymiarach jak na rysunku 4 przedstawia krzywa 3 na rysunku 3. W trakcie obliczeń określano też średnie prędkości przepływu wody nad koroną przelewu stopnia oraz wysokość energii strumienia nad dnem wypadu. Przyjęto, że wypad stanowi obniżenie dna koryta, tworzące nieckę głębokości 0,3 m (rzędna 80,70 m n.Kr.).

Ze względu na trójkątny kształt otworu przelewowego, rozkład przepływów jednostkowych na wypadzie jest nierównomierny, osiągając największe wartości w osi otworu. Obliczenie warunków rozpraszania energii dla takiego przypadku napotyka duże trudności teoretyczne. Mało też jest badań tego rodzaju wypadu. W związku z powyższym, obliczenia przeprowadzono w sposób uproszczony, sprowadzając przypadek do znanych schematów hydraulicznych działania wypadu. Przyjęto następujące założenia:

- Przy danym napełnieniu przelewu trójkątnego  $h \leq 1,25 H_b$  i odpowiadającej mu przepustowości  $Q$ , jednostkowe natężenie przepływu spadającego na wypad jest równe:

$$q = Q/B_s \quad (3)$$

gdzie:

$B_s = 0,8 \cdot m_p \cdot h$  jest zastępczą szerokością strumienia przelewowego,

$m_p$  – nachylenie boków trójkątnego otworu przelewowego.

W projekcie dla  $m_p = 6$  mamy

$$B_s = 4,8 \cdot h.$$

- Przy  $h > 1,25 H_b$  zastępczą szerokość  $B_s$  obliczano ze wzoru:

$$B_s = 0,8 m_p (1,25 H_b) + 0,8 m (h - H_b) \quad (4)$$

gdzie:

$m = 1,5$  jest nachyleniem ścian bocznych górnej części otworu przelewowego.

Dla przypadku projektowego ( $H_b = 1,0$  m) mamy

$$B_s = 6 + 1,2 (h - 1,0) = 4,8 + 1,2 h.$$

- W obliczeniach zatopienia odskoku hydraulicznego zakładano odskok płaski o szerokości strumienia równej  $B_s$ ; jest to założenie dające pewien zapas bezpieczeństwa.

Po przyjęciu głębokości niecki 0,3 m – współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego obliczano ze wzoru:

$$n = \frac{t_d + 0,3}{h_2} \quad (5)$$

gdzie:

$t_d$  – napełnienie koryta w dolnym stanowisku stopnia odpowiadające danej wartości  $Q$ ,

$h_2$  – druga głębokość sprzężona.

Obliczenia współczynnika zatopienia odskoku wykazały, że najmniej korzystne warunki występują przy przepływach  $Q$  w przedziale 2–7 m<sup>3</sup>/s. Przy założeniu płaskiego odskoku i bez uwzględnienia wysokości prędkości, współczynnik zatopienia osiąga wartość  $n = 1,0$ , a więc przyjętą głębokość niecki wypadowej  $d = 0,3$  m uznano za wystarczającą.

Wartości prędkości średniej  $V_l$  w przekroju występowania pierwszej głębokości sprzężonej obliczano ze związku  $V_l = q/h_l$ .

Istniejące wzory do obliczeń długości niecki wypadowej dotyczą przelewów (lub wypływu spod zasuwy), dla których przepływ jednostkowy jest stały na szerokości wypadu. W omawianym przypadku przepływy jednostkowe maleją od osi przelewu ku jego brzegom, a więc warunki hydrauliczne są odmienne. Stosowane wzory mogą zatem dać jedynie wynik przybliżony.

Przy założeniu, że nad koroną przelewu panuje ruch spokojny, odległość spadania strumienia oblicza się ze wzoru:

$$l_s = 2 \cdot \sqrt{h_k (p + 0,5h_k)} \quad (6)$$

gdzie:

$h_k$  – głębokość krytyczna w otworze przelewu; dla otworu trójkątnego  $h_k = 0,8 H_0$ , gdzie  $H_0$  jest wysokością

energii strumienia nad koroną przelewu,

$p$  – wysokość stopnia nad dnem wypadu równa 1,3 m.

Przy przepływie odpowiadającym poziomowi brzegów mamy:  $H_0 = 3,0$  m,  $h_k = 2,4$  m i ze wzoru (6)  $l_s = 4,9$  m.

Według Čugajeva [Bošakov 1984] odległość spadania strumienia z przelewu o szerokim progu wyraża się równaniem:

$$l_s = V_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}} \quad (7)$$

gdzie:

$V_p$  – prędkość przepływu nad koroną przelewu,

$y = p + 0,5 h$ , gdzie  $h = 0,5 H_0$ , a  $p$  jak poprzednio.

Dla  $H_0 = 3,0$  m i  $V_p = 2,42$  m/s ze wzoru (7) mamy  $l_s = 1,56$  m.

Długość walca wodnego  $l_o$  obliczono ze wzorów:

- Pawłowskiego

$$l_o = 2,5(1,9 h_2 - h_1) \quad (8)$$

- Safraneca

$$l_o = 4,5 h_2 \quad (9)$$

Dla warunków obliczeniowych, ze wzoru (8), mamy  $l_o = 10,5$  m, natomiast ze wzoru (9) mamy  $l_o = 11,25$  m. Długość niecki wypadowej równą  $l_n = l_s + l_o$  dla mniej korzystnej wartości  $l_o = 11,25$  m można oceniać na:  $l_n = 1,56 + 11,25 \cong 12,8$  m lub  $l_n = 4,9 + 11,25 = 16,15$  m. Ostatecznie przyjęto nieckę długości  $l_n = 15$  m.

## Kamień budowlany, warstwy ochronne i jakość robót

Z braku sprawdzonych metod obliczeń, wielkości sił działających na kamienie tworzące koronę przelewu trójkątnego można oceniać tylko pośrednio i w sposób przybliżony. Przy doborze średnicy kamieni wykorzystano kryterium prędkości dopuszczalnej (średnia prędkość przepływu  $V \leq V_{dop}$  – prędkość dopuszczalna dla kamieni). Prędkość przepływu nad koroną przelewu trójkątnego jest jednak także trudna do ustalenia. Obliczenia hydrauliczne wykazały, że średnia jej wartość dochodzi do 2,5 m/s. Prędkość w najgłębszej części przelewu jest większa i można ją oceniać na 3,2 m/s. Jeśli założyć, że nad koroną przelewu panuje ruch krytyczny, to średnia prędkość miałaby wartość 2,9 m/s, a prędkość największa 3,8 m/s. Biorąc pod uwagę depresję nad koroną przelewu, szacunkowy charakter oceny prędkości przepływu i potrzebny zapas bezpieczeństwa, można przyjąć prędkość dopuszczalną równą 5,0 m/s. Przy takiej prędkości przepływu i głębokości do 3,0 m, luźno ułożone kamienie mogą być stabilne, gdy mają średnice zastępcze 400–500 mm lub masę 180–200 kg [Boľšakov 1984].

W niecce wypadowej prędkości przepływu w miejscu wystąpienia pierwszej głębokości sprzężonej mogą przekraczać 8,0 m/s. Przy takich prędkościach stabilne mogą być kamienie o średnicach zastępczych 700–800 mm i masie około 480 kg.

Stabilność kamieni wzrasta, jeśli są one ułożone ciasno jeden obok drugiego, tak by się wzajemnie klinowały. Wymaga to dużej staranności wykonania prac, a przy tak dużych średnicach i ciężarach

kamieni – odpowiedniego sprzętu do ich przenoszenia. Kamienie należy ustawić największym wymiarem w pionie, ściśle obok siebie. Duże szczeliny u ich podstaw trzeba, w miarę dostawiania kolejnych dużych kamieni, wypełniać mniejszymi kamieniami – dopasowanymi do rozmiarów tych szczelin. Kamienie wypełniające szczeliny nie powinny mieć luzów, aby nie były wyrywane przez pulsacje ciśnień i prędkości. Z tego względu na koronie przelewu i na dnie wypadu, gdzie pulsacje te są największe, pod warstwami kamieni zastosowano warstwy przejściowe chroniące grunt przed erozją i sufozją.

Warstwa ochronna, jednakowa na całej powierzchni stopnia, składa się (wymieniając od dołu) z następujących elementów:

- warstwy włókniny ułożonej na wyrównanym i zagęszczonym dnie wykopu,
- zagęszczonej warstwy pospółki o grubości 30 cm,
- dwóch warstw włókniny przykrywającej pospółkę.

Boczne krawędzie warstwy pospółki są chronione włókniną ułożoną na dnie wykopu, której wywinięte krawędzie o szerokości 0,5 m połączone są z górną warstwą włókniny (drugą od wierzchu) przykrywającą pospółkę.

Ze względu na duże ciężary kamieni i duże siły działające na włókninę w miejscach styku z kamieniami, na możliwość upadku kamieni przy ich układaniu oraz na możliwość osiadania podłoża, na włókninę mogą działać naprężenia rozciągające powodujące nieprzewidziane przemieszczenia i odkształcenia włókniny. Aby temu zapobiec, płaty włókniny



łączono na zakład o szerokości minimalnej 10 cm i połączenia zszywano.

Trudne warunki gruntowe i duże obciążenia włókniny pod przelewem i na wypadzie wymagały zastosowania włókniny polietylenowej, igłowej i wykurczanej o grubości 6,16 mm lub 6,87 mm i masie powierzchniowej 1,464 kg/m<sup>2</sup>. Pod narzutami kamiennymi ubezpieczającymi skarpy koryta przewidziano geowłókninę GO 350/360 (PE).

## Konstrukcja stopnia

Zastąpienie betonowej, monolitycznej konstrukcji stopnia na rzecz konstrukcji układanej z kamienia wymagała takiego zaprojektowania i wykonania górnego i dolnego stanowiska stopnia, aby zapewnione zostały:

- stateczność kamieni,
- ochrona podłoża przed erozją i sufozją,
- ochrona konstrukcji przed deformacją.

Ponadto, konstrukcja stopnia powinna uwzględniać sposób i warunki wykonania oraz odwodnienia wykopu fundamentowego.

O stateczności kamieni w płynącej wodzie decyduje ich masa, sposób ułożenia i kształt oraz brak deformacji podłoża pod wpływem obciążenia. Dlatego poświęcono szczególnie dużo uwagi dobrowi kamieni i jakości ich ułożenia oraz wymienionym wyżej zagadnieniom związanym z bezpieczeństwem budowli.

Jako element przedłużający drogę filtracji wody w podłożu i obok stopnia, a jednocześnie podpierający kamienie i grunt formujące górne stanowisko stopnia, zastosowano stalową ściankę

szczelną typu Larssena o długości brusów 6 m. Głębokość wbicia poszczególnych brusów była zróżnicowana w ten sposób, aby górne krawędzie brusów tworzyły zaprojektowaną formę przekroju otworu przelewowego. Zagłębiona w grunt długość ścianki szczelnej musi spełniać warunek Lane'a  $L_{\min} = C \cdot H$ . Dla współczynnika  $C = 6$ , przyjętego jak dla piasku średniego, oraz  $H = 1,1$  m – tzn. największej różnicy poziomów wody górnej i dolnej,  $L_{\min} = 6,6$  m. Tak więc zagłębienie ścianki szczelnej w nienaruszony grunt pod dnem wypadu stopnia nie może być mniejsze niż 3,3 m. W projekcie przyjęto zagłębienie ścianki na 3,5 m.

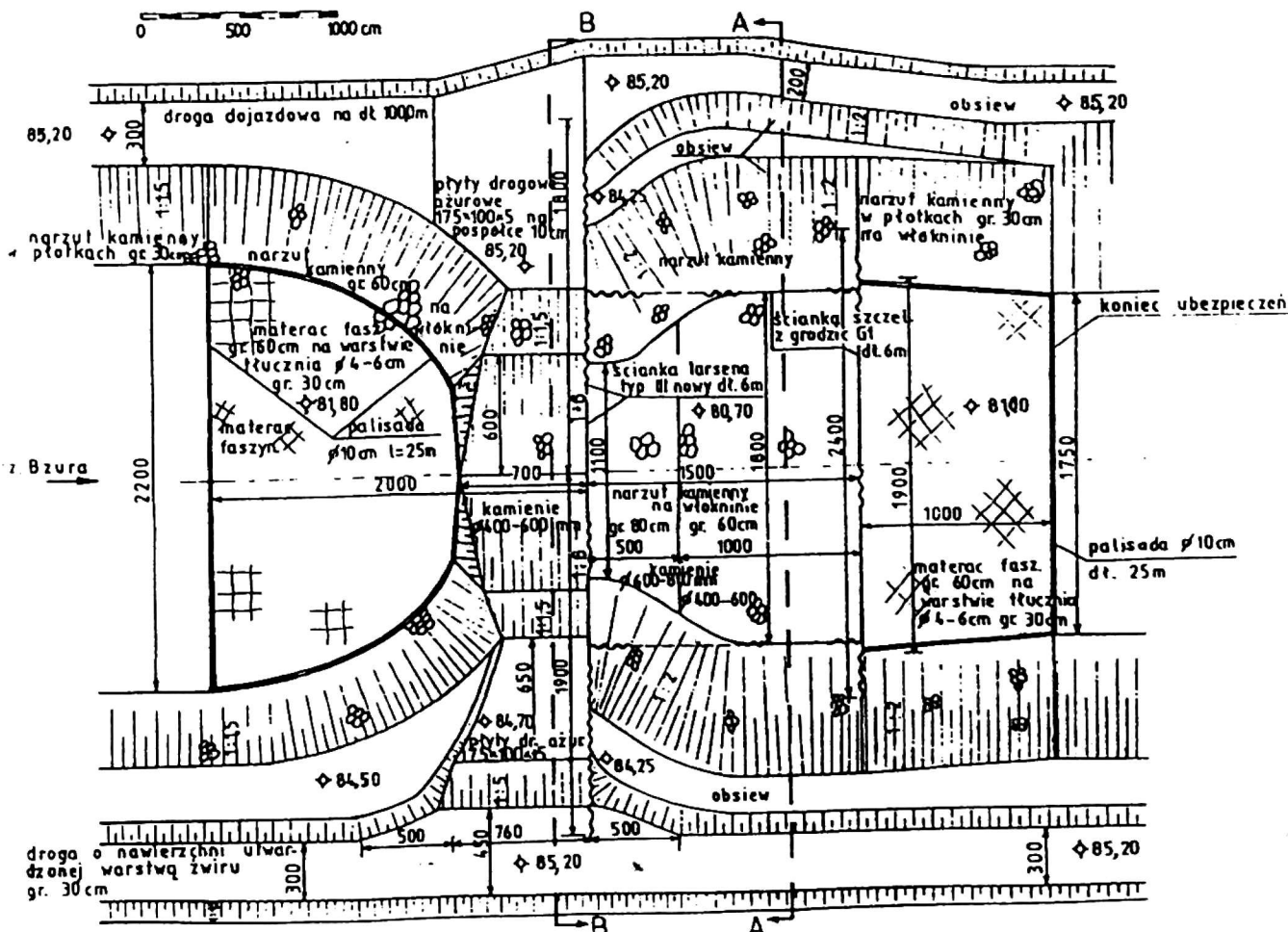
Szerokość ścianki szczelnej, zapewniającą ochronę przed bocznym opływem stopnia, przyjęto równą 37 m.

Dla usztywnienia korony ścianki szczelnej podpierającej przelew kamienny oraz ze względów estetycznych wykonano oczep z elementu profilu Larssena.

Część przelewowa stopnia zbudowana jest z warstwy o grubości 80 cm wykonanej z kamienia układanego na sucho na warstwie filtracyjnej chroniącej podłoże przed erozją i sufozją.

Niecka wypadowa o trapezowym przekroju poprzecznym, ukształtowana bezpośrednio poniżej przelewu, otoczona jest wokół ścianką szczelną z grodziec CI o długości 6 m. Odcinki tej ścianki, równoległe do osi stopnia, podpierają narzuty skarpy koryta na długości wypadu. Jednocześnie ścianka, otaczając najgłębszą część wykopu budowlanego, miała zmniejszyć napływ wód gruntowych do wykopu i ułatwić jego odwodnienie.

Dno i skarpy niecki wypadowej wykonane są z kamieni układanych na sucho na warstwie ochronnej o konstrukcji jak w stanowisku górnym pod częścią prze-



Rys. 5. Widok stopnia w planie

lewową stopnia. Grubość warstwy kamiennej na skarpach niecki wynosi 60 cm, natomiast na dnie grubość tej warstwy jest zmienna i wynosi 80 cm na odcinku długości 5,0 m tuż poniżej przelewu i 60 cm dalej do końca niecki.

Konstrukcję stopnia przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

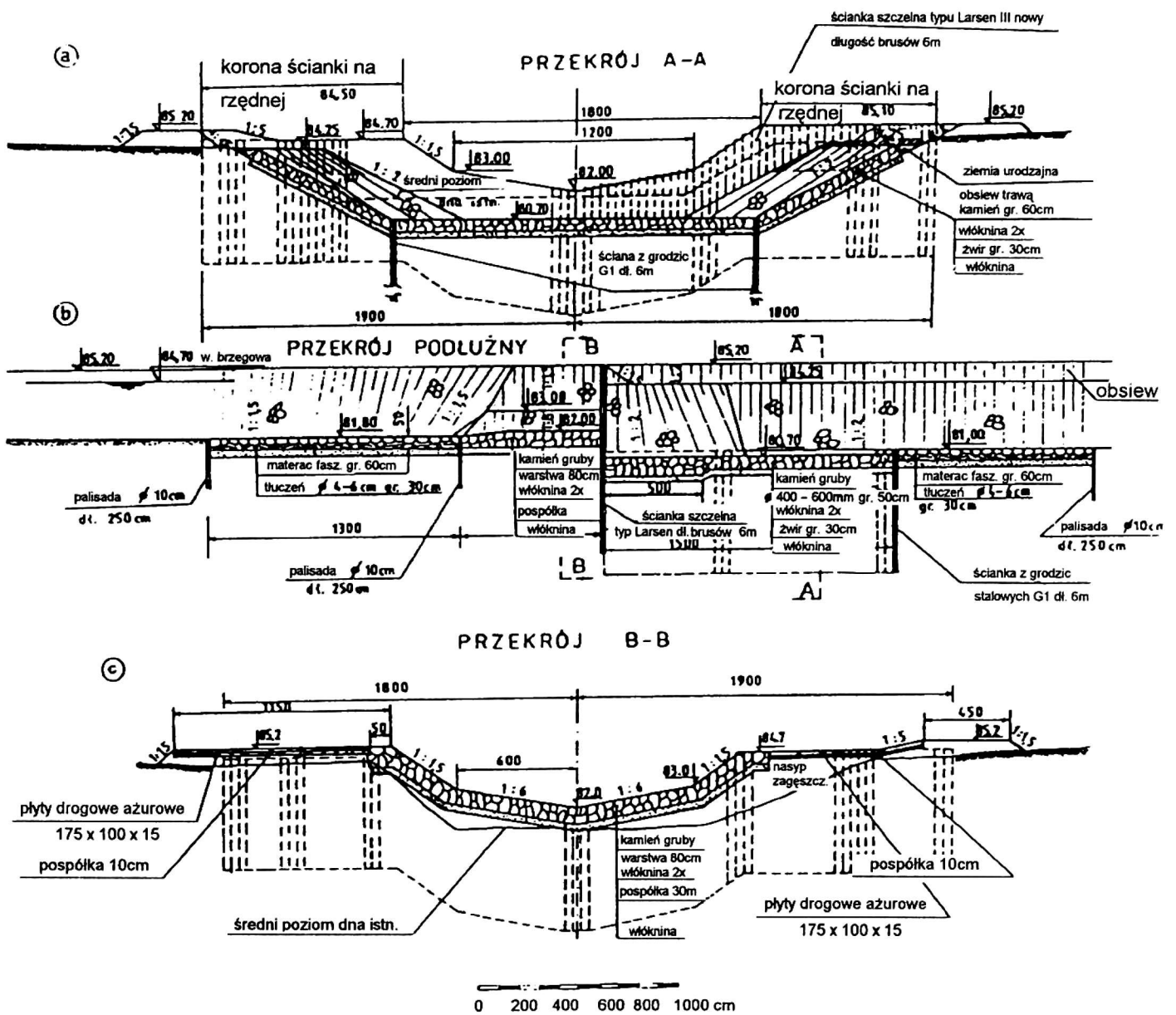
## Uwagi końcowe

Zmiana lokalizacji i konstrukcji stopnia pozwoliła ograniczyć ilość robót i skrócić czas realizacji projektu do jednego sezonu budowlanego. To nietypowe rozwiązanie konstrukcyjne wymagało zastosowania innej organizacji robót oraz specjalnego sprzętu budowlanego. Wyeliminowanie robót betonowych i żelbe-

towych znacznie obniżyło koszt inwestycji, gdyż nowa konstrukcja nie wymagała szalunków, długotrwałego odwadniania dużej powierzchni dna dołu fundamentowego itd. Podczas budowy stopnia wystarczające okazało się odwodnienie powierzchniowe. Podobnie korzystne było skrócenie długości kanału obiegowego i wykorzystanie koryta Słudwi do przeprowadzenia wód Bzury w okresie budowy.

## Literatura

- BOLŠAKOV V.A. 1984: *Spravočnik po gidravlike*. Kijew.
- BOS M.G. 1976: *Discharge measurement structures*. Working group on small hydraulic structures. I.I.R.I, Wageningen.
- CBSiPwM "BIPROMEL" 1977: *Opinia z technicznych badań podłoża gruntowego pod stopień*



Rys. 6. Przekroje stopnia: a i c – przekroje poprzeczne, b – przekrój podłużny

*i regulację rzeki Bzury. Modernizacja rz. Bzury dla potrzeb Słudwi. Warszawa.*

*CBSiPwM "BIPROMEL" 1979: Projekt techniczny stopnia na rz. Bzurze w km 11+700. Modernizacja rz. Bzury dla potrzeb Słudwi. Warszawa.*

*IMGW 1980: Przepływy charakterystyczne rzek polskich w latach 1951–1970. Wyd. Kom. i Łączności, Warszawa.*

*KBW SGGW 1987: Badania koryta i środowiska rzeki Bzury oraz opracowanie koncepcji niesystematycznej regulacji odcinka Bednary – ujście Słudwi. Maszynopis, Warszawa.*

*KBW SGGW 1991: Projekt techniczny stopnia kamiennego na Bzurze powyżej Słudwi (km 11+700). Opracowanie na zlecenie WZIR w Skierniewicach. Warszawa.*