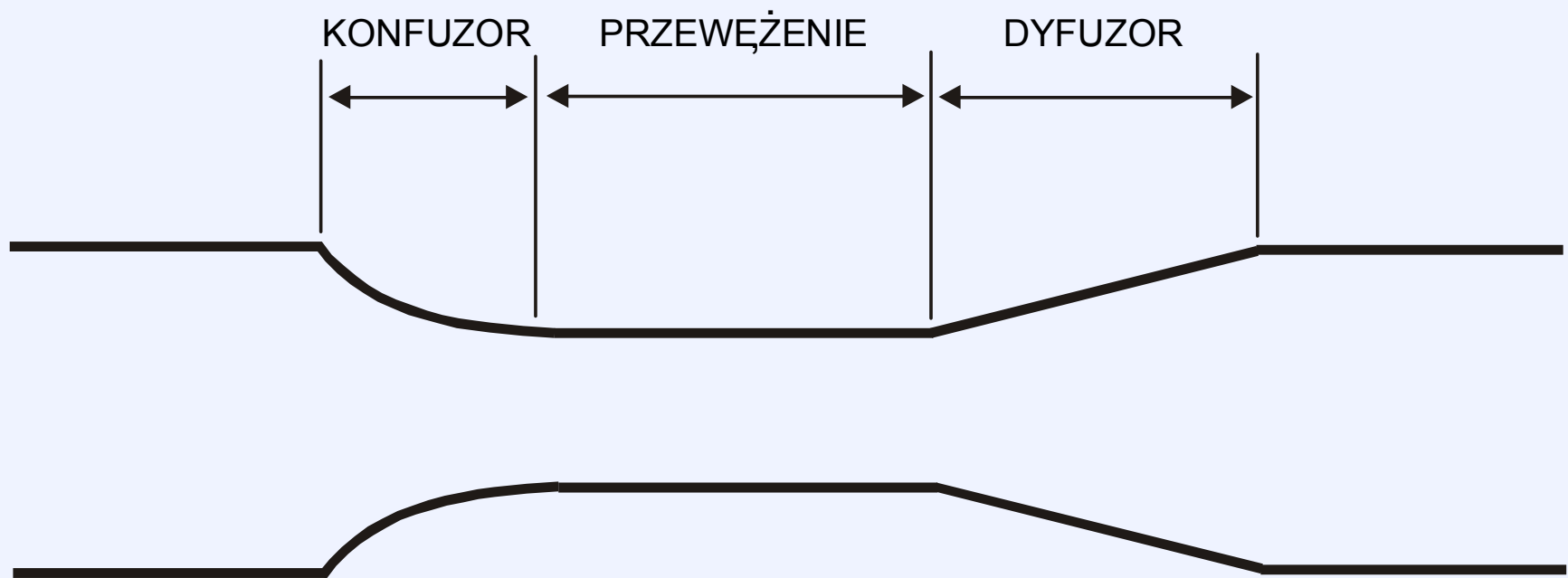
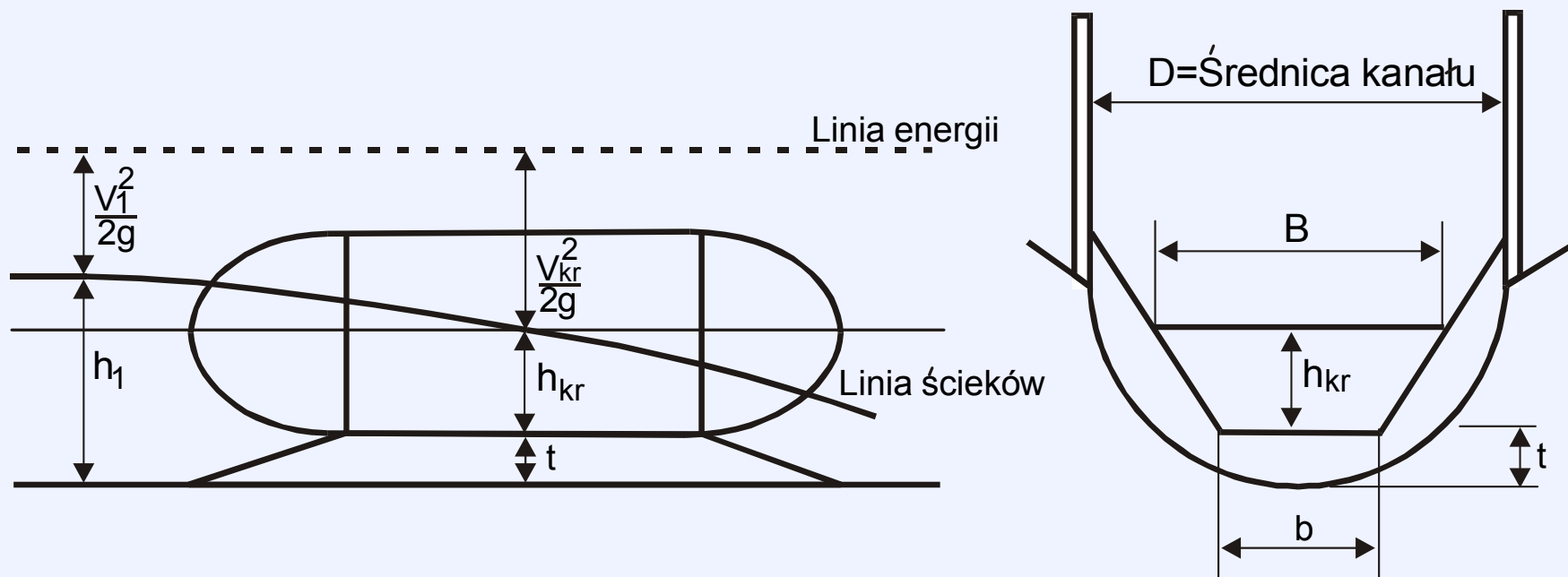


**WYZNACZANIE NATĘŻENIA PRZEPŁYWU  
ŚCIEKÓW ZA POMOCĄ KORYT ZWĘŻKOWYCH  
Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU TYCH URZĄDZEŃ  
NA WARUNKI TRANSPORTU OSADU  
W KANAŁACH DOPIŁYWOWYCH**

# Rzut z góry koryta zwężkowego



# Przekrój podłużny i poprzeczny przez koryto zwężkowe



## Teoretyczny wydatek koryta zwężkowego o przepływie rwącym – koryta prostokątne

$$Q_t = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} b_2 \left(h + \frac{v_1^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$h$  – grubość warstwy cieczy przed korytem nad poziomem dna przewężenia,

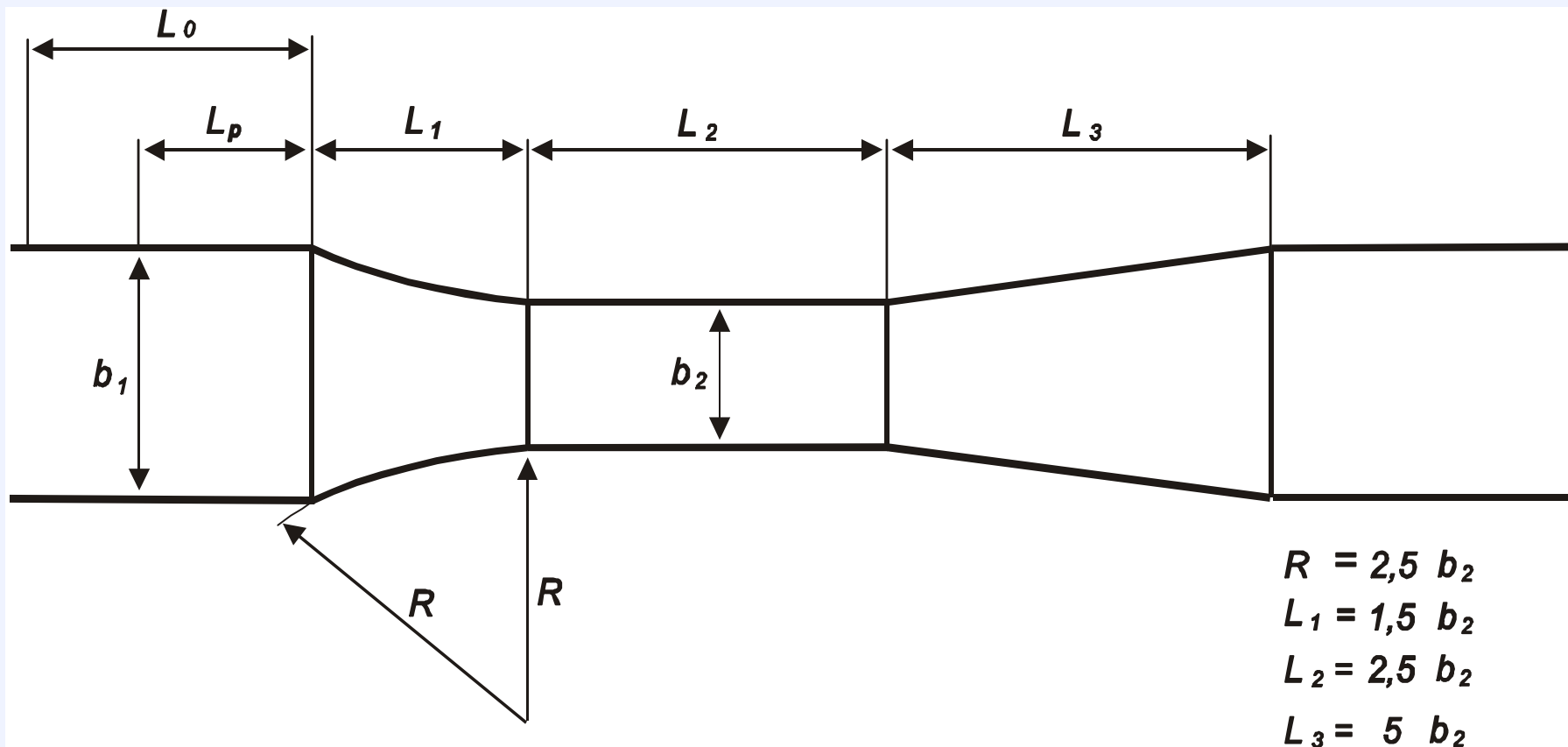
$b_2$  – szerokość przewężenia koryta,

$v_1$  – średnia w przekroju prędkość przepływu przed korytem,

$g$  – przyspieszenie ziemskie.

# Koryta typoszeregu Uniklar 77

prostokątne koryta o zwężeniu  $b_2/b_1 = 0,5$



# Empiryczny współczynnik wydatku koryt typoszeregu Uniklar 77

$$c = \frac{Q_{rz}}{Q_t}$$

$Q_{rz}$  – natężenie przepływu zmierzone  
wycechowanym przelewem kołowym

$Q_t$  – wydatek teoretyczny

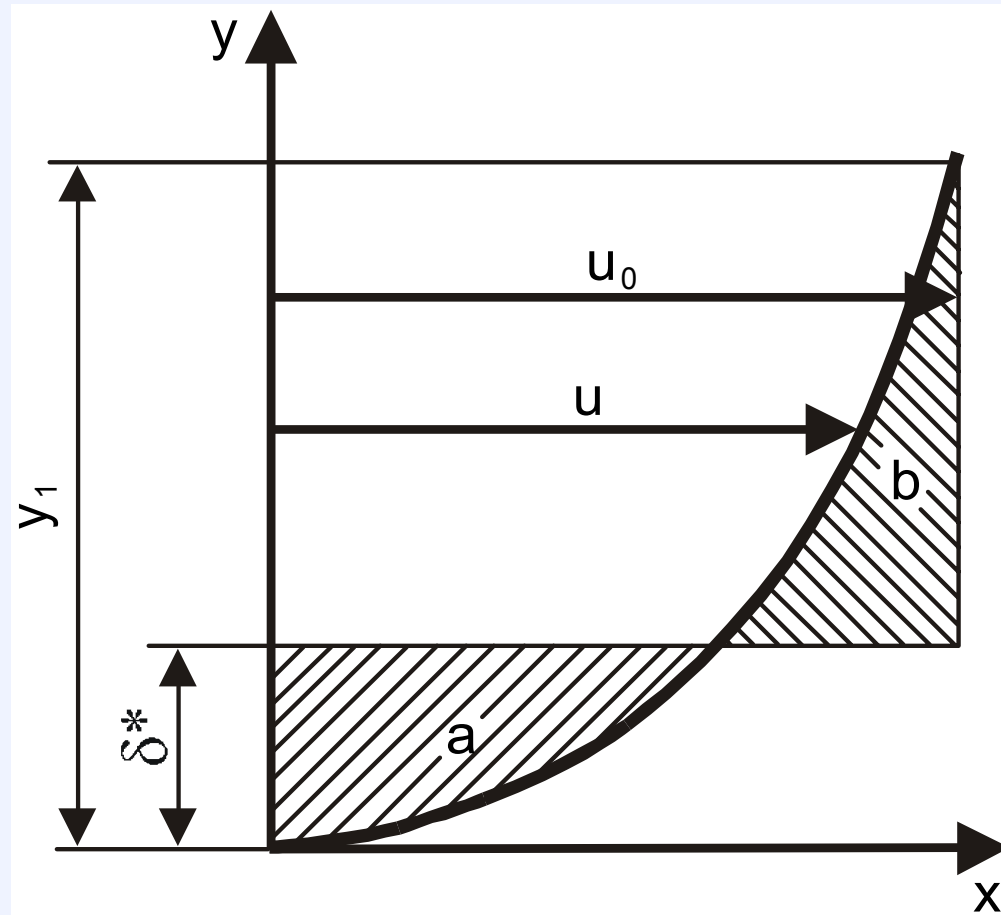
# Metoda obliczania rzeczywistego wydatku koryt zwężkowych normy ISO 4359

Metoda polegająca na uwzględnieniu w przewężeniu koryt straty wydatku w warstwie przyściennej, przy następujących założeniach:

- warstwa przyścienna bierze początek na wlotowej krawędzi przewężenia koryta (tzw. krawędź natarcia),
- przejście od laminarnej do turbulentnej warstwy przyściennej ma miejsce przy liczbie Reynoldsa  $Re=3 \cdot 10^5$
- głębokość krytyczna występuje przy końcu przewężenia koryta.

# Rozkład prędkości w warstwie przyściennej

## Odległość przesunięcia $\delta^*$



$u_0$  - prędkość przepływu potencjalnego; pole  $a = b$



## Rzeczywisty wydatek koryt zwężkowych o przepływie rwącym wg normy ISO 4359

$$b_e = b_2 - 2\delta^*$$

$$h_e = h - \delta^*$$

$$c_d = \left( \frac{b_e}{b_2} \right) \left( \frac{h_e}{h} \right)^{3/2}$$

$\delta^*$  - odległość przesunięcia

$$c_v = \left( \frac{h_e + \frac{v_1^2}{2g}}{h_e} \right)^{3/2}$$

$$Q = \left( \frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} c_v c_d b_2 h^{3/2}$$

# Cel pracy

- Jako główny cel pracy przyjęto udoskonalenie stosowanej w normie ISO 4359 metody wyznaczania charakterystyk przepływowych koryt zwężkowych oraz podanie metodyki obliczania krzywej konsumcyjnej dla koryt, które nie zostały ujęte w tej normie – jak na przykład koryto Palmera-Bowlusa.
- Dodatkowym celem była ocena warunków transportu osadu występujących w kanale dopływowym powyżej koryt zwężkowych.

# Tezy

**1.** Opisany w normie ISO 4359 sposób uwzględniania warstwy przyściennej w obliczeniach charakterystyk koryt zwężkowych ma trzy zasadnicze wady:

**a)** dotyczy miary liniowej straty wydatku w warstwie przyściennej, podczas gdy w obliczeniach korzysta się z układu równań, z których jedno opisuje bilans masy, ale drugie jest równaniem zachowania energii, a więc wymaga innej grubości całkowitej warstwy przyściennej;

**b)** przyjęto, że warstwa przyścienna bierze swój początek na wlotowej krawędzi przewężenia (gardzieli) koryta, podczas gdy krawędź natarcia jest na początku konfuzora, a więc warstwa przyścienna ma już w tym miejscu pewną grubość;

## Tezy (c.d.)

c) obliczana jest miara liniowa straty wydatku w warstwie przyściennej na końcu przewężenia koryta zwężkowego, podczas gdy korzysta się z równania Bernoulliego zapisanego dla przekroju przed korytem i w przewężeniu, w miejscu wystąpienia głębokości krytycznej.

2. Uwzględnienie miary liniowej straty wydatku w obliczeniach natężenia przepływu za pomocą równania Bernoulliego, zapisanego dla przekroju przed korytem zwężkowym i przekroju, w którym wystąpi głębokość krytyczna, poprawia dokładność wyznaczanego natężenia przepływu pod warunkiem zlokalizowania miejsca wystąpienia głębokości krytycznej, pomimo nieprawidłowości wymienionych w tezie 1a i b.

## Tezy (c.d.)

3. Równanie ruchu ustalonego wolnozmiennego jest bardzo przydatne przy lokalizacji miejsca wystąpienia głębokości krytycznej, potrzebnej do wyznaczenia charakterystyk koryt zwężkowych.
4. Równanie Bernoulliego, zapisane dla przekroju przed korytem zwężkowym i dla przekroju, w którym wystąpi głębokość krytyczna, przy uwzględnieniu warstwy przyściennej w miejscu wystąpienia głębokości krytycznej, może pozwolić na ocenę propagacji błędu pomiaru wysokości napętnienia na wyznaczoną wartość natężenia przepływu.
5. Właściwie dobrany rodzaj i wielkość koryta zwężkowego do danych warunków lokalnych pozwala zabezpieczyć kanał dopływowy przed nadmierną akumulacją osadów.

## Równanie ruchu wolnozmennego

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f + \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3}} \quad S_f = \frac{n^2 Q^2}{R_h^{4/3} A^2}$$

$dh/dx$  – spadek zwierciadła wody w odniesieniu do dna koryta,

$S_f$  – spadek linii energii wyznaczony z równania Manninga,

$n$  – współczynnik szorstkości Manninga,

$S_0$  – spadek podłużny dna koryta,

$Q$  – natężenie przepływu,

$R_h$  – promień hydrauliczny,

$A$  – pole powierzchni przekroju strumienia,

$B$  – szerokość zwierciadła cieczy,

$g$  – przyspieszenie ziemskie.

Odległość miejsca wystąpienia głębokości krytycznej od krawędzi wlotowej przewężenia  $L_{kr}$  dla koryt typu Uniklar 77

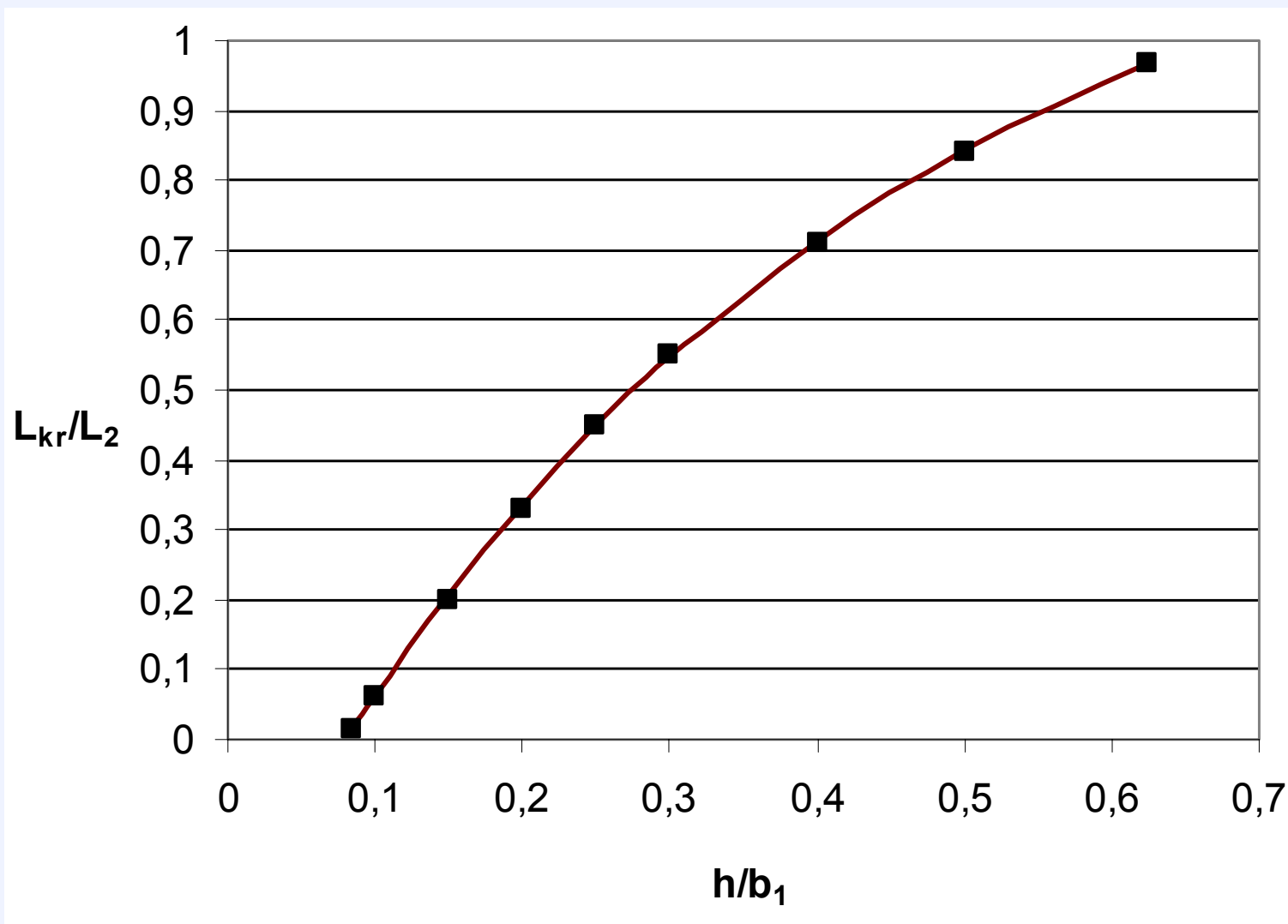
$$\frac{L_{kr}}{L_2} = -0,277 + 3,772 \frac{h}{b_1} - 3,920 \left( \frac{h}{b_1} \right)^2 + 1,715 \left( \frac{h}{b_1} \right)^3$$

$L_2$  – długość przewężenia koryta,

$h$  – wysokość napełnienia przed korytem,

$b_1$  – szerokość kanału dopływowego.

## Położenie głębokości krytycznej w korytach typu Uniklar 77

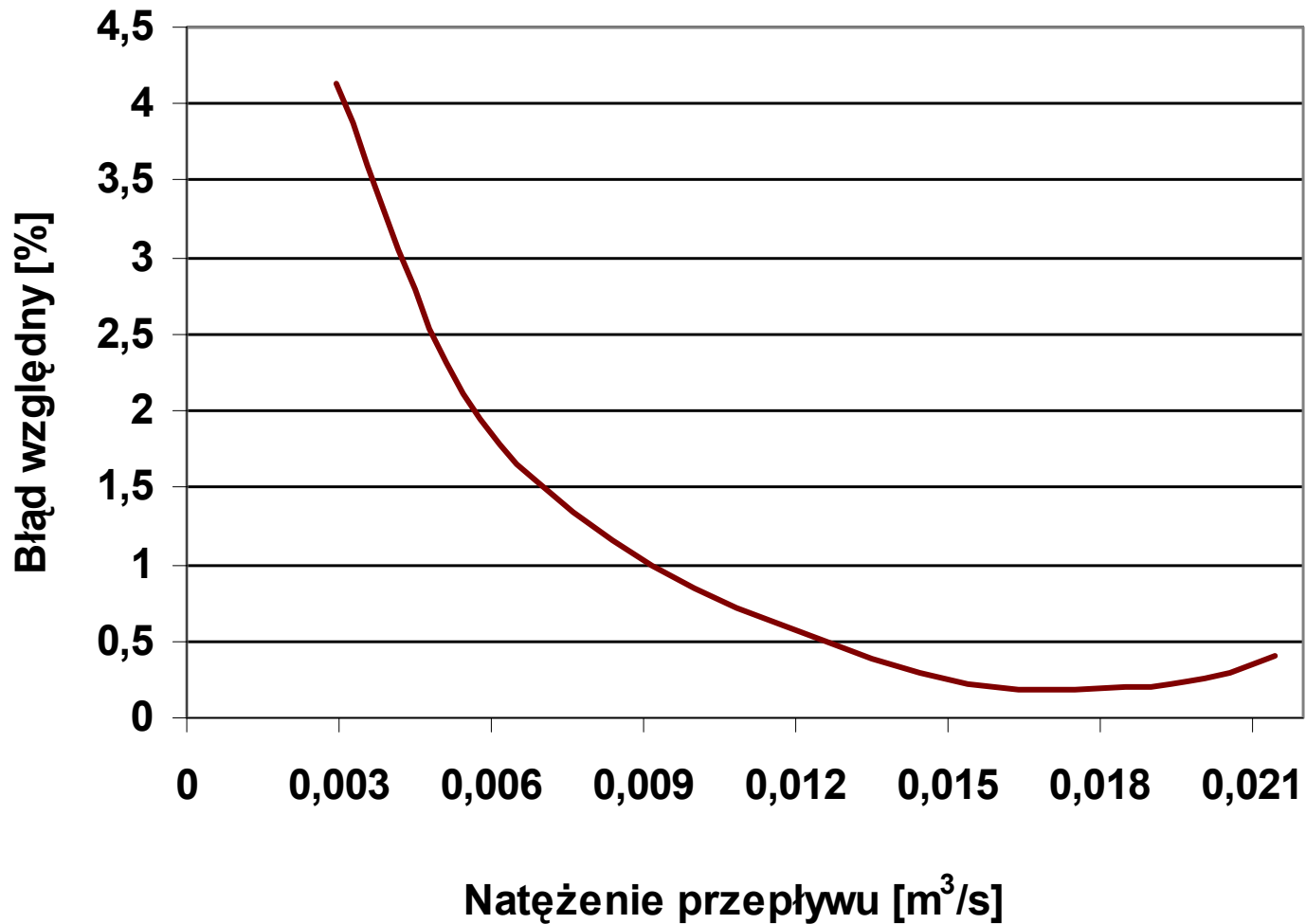




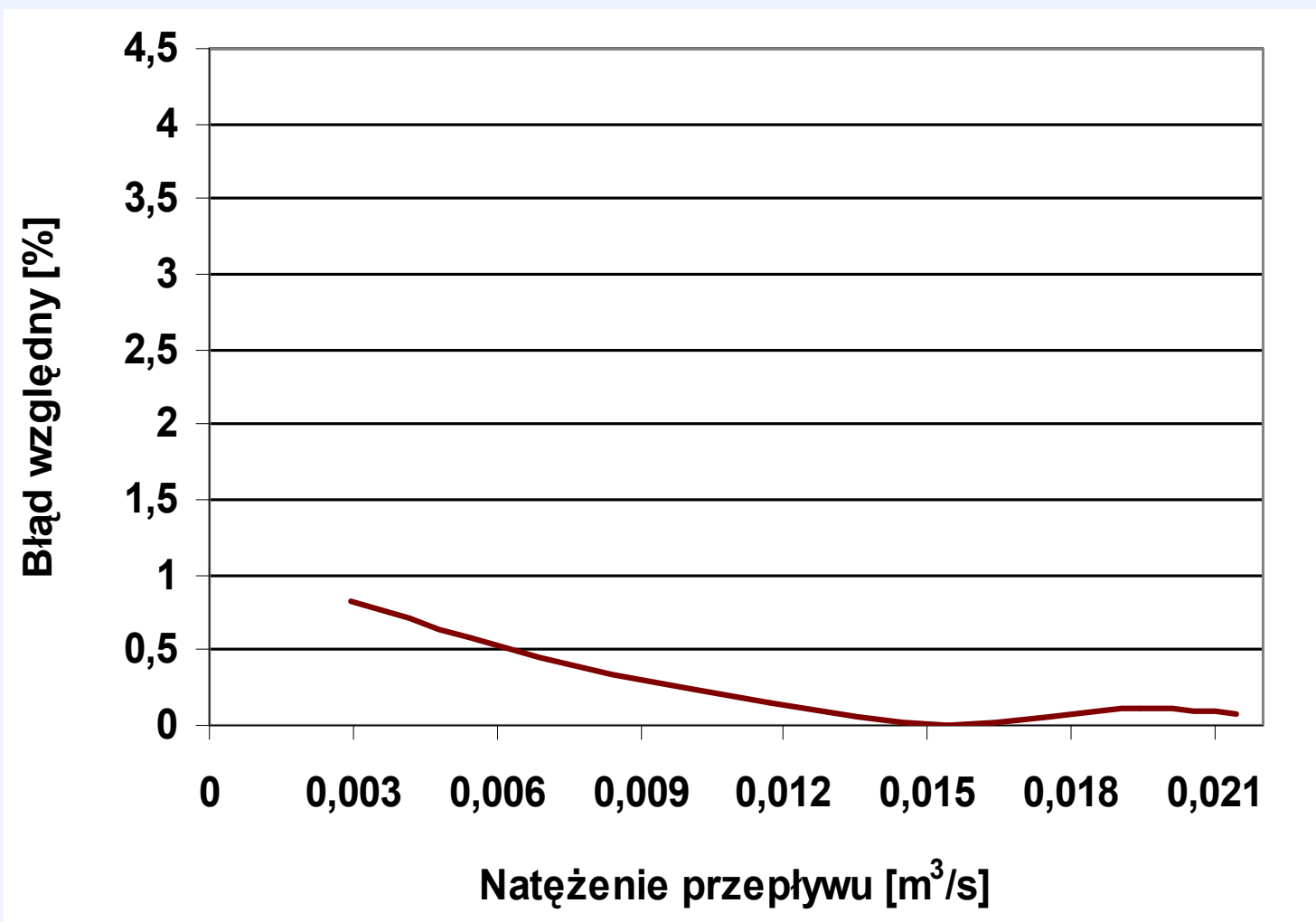
Błąd względny obliczeń natężenia przepływu  
wykonanych ściśle według normy ISO oraz z  
modyfikacją  $L_{kr}$  dla koryt typu Uniklar 77  
w zakresie pomiarowym zalecanym przez normę ISO

$$\left( \frac{Q_{Uniklar} - Q_{ISO}}{Q_{Uniklar}} \times 100 \right)$$

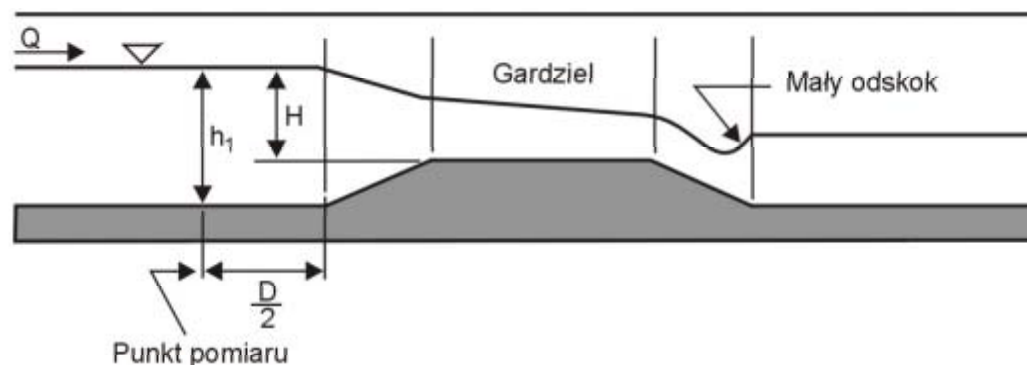
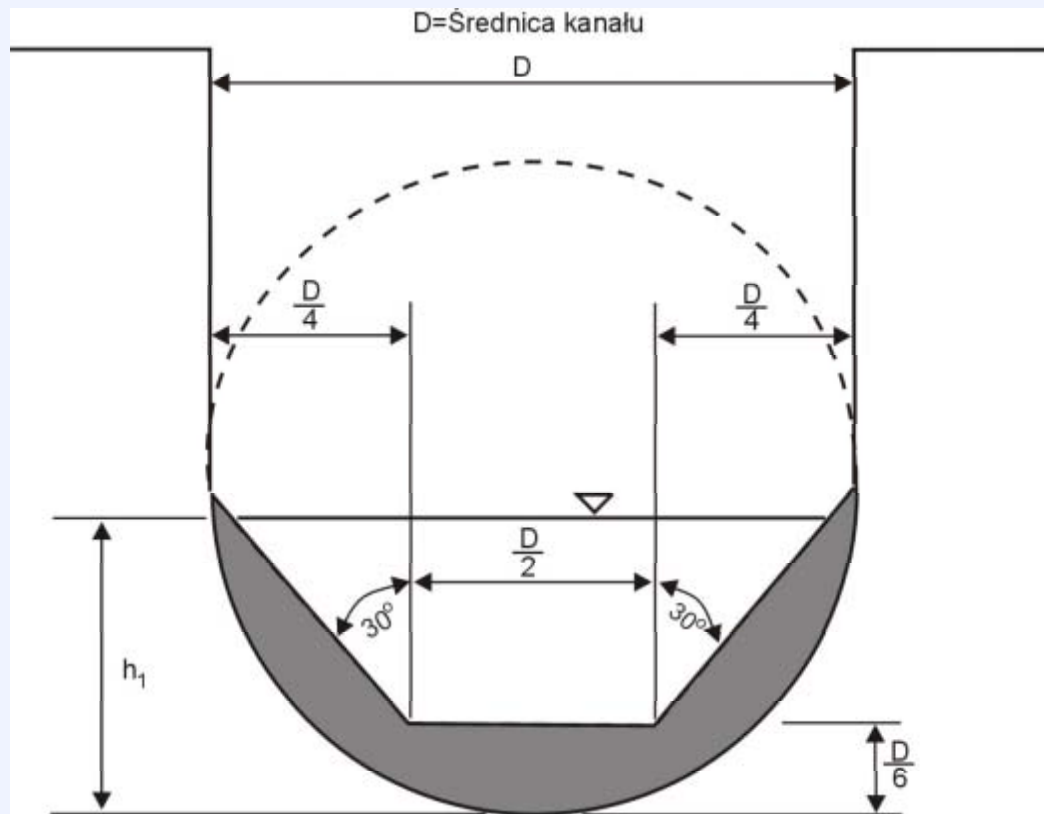
## Obliczenia ściśle wg normy ISO dla koryta $b_1 = 0,3 \text{ m}$



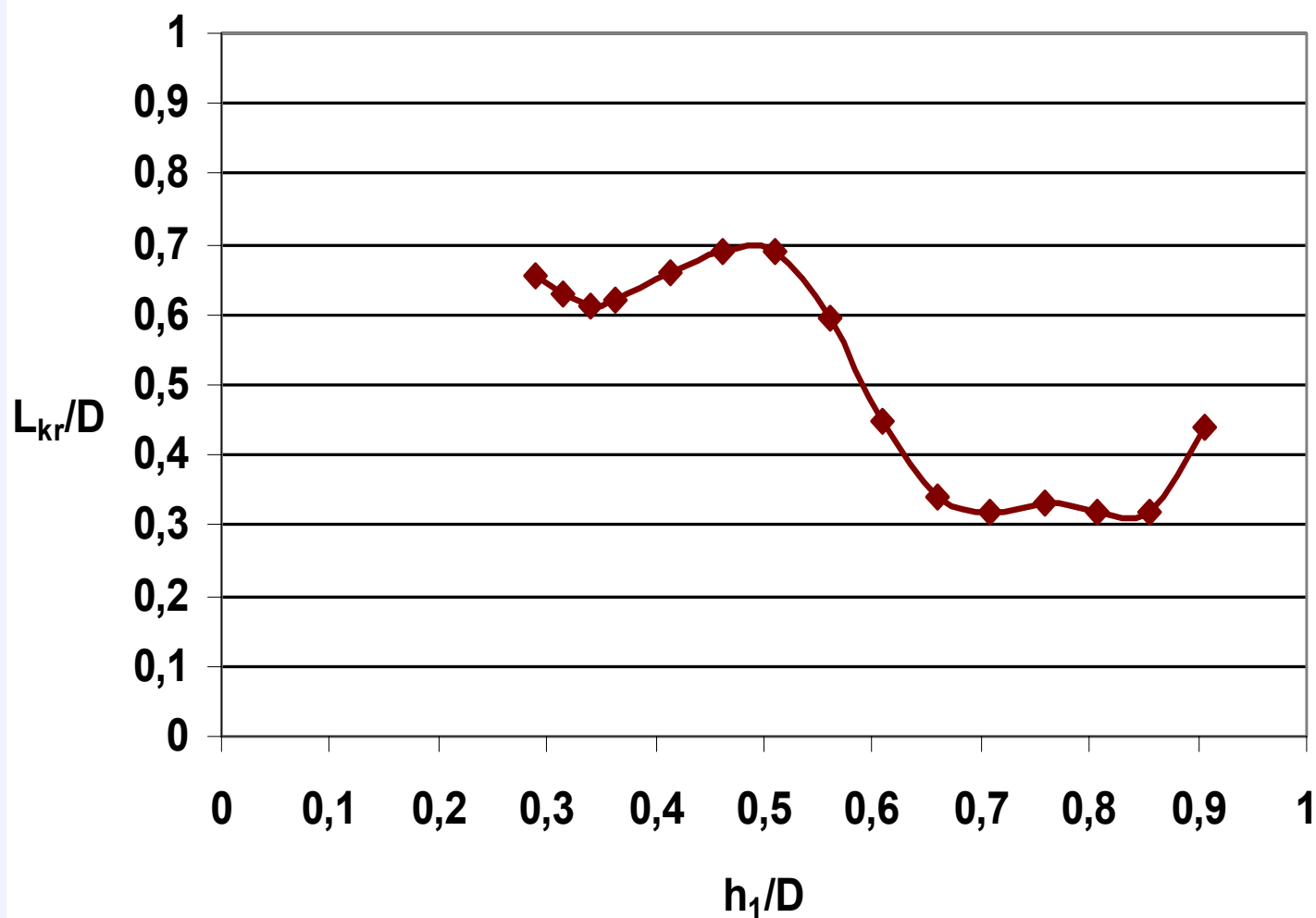
## Obliczenia z modyfikacją $L_{kr}$ dla koryta $b_1 = 0,3$ m



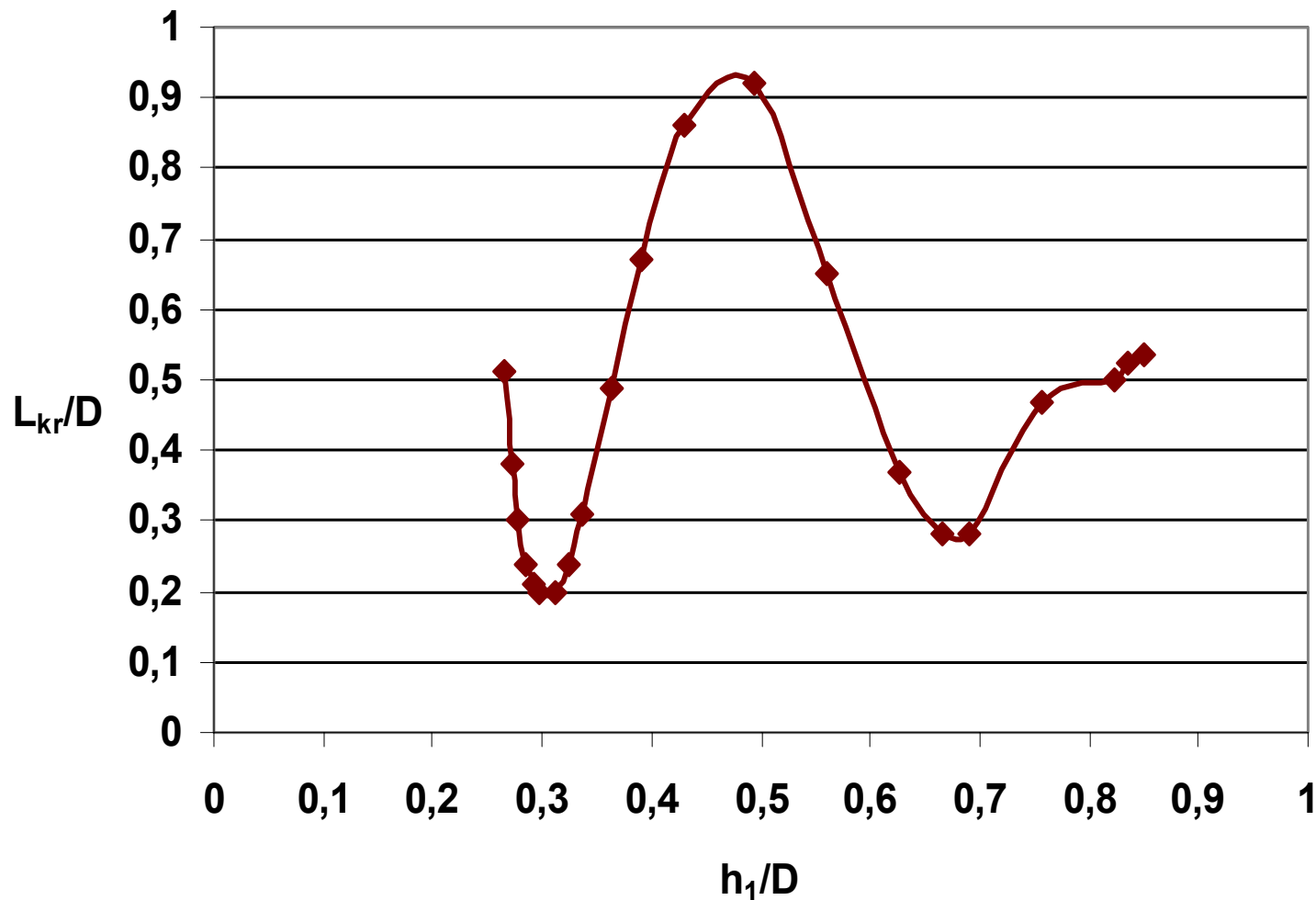
# Koryto Palmera-Bowlusa



# Położenie głębokości krytycznej w korycie Palmera-Bowlusa 0,203 m



# Położenie głębokości krytycznej w korycie Palmera-Bowlusa 0,762 m



## Obliczanie natężenia przepływu dla koryt Palmera-Bowlusa

$$h_1 = t + \delta^* + h_{kr} + \left(A/2B\right)_{kr} - Q^2 / \left(A_1^2 2g\right)$$

$$A_{kr} = h_{kr} (b - 2\delta^*) + m(h_{kr} + \delta^*)^2 - m\delta^{*2}$$

$$B_{kr} = b + 2m(h_{kr} + \delta^*) - 2\delta^*$$

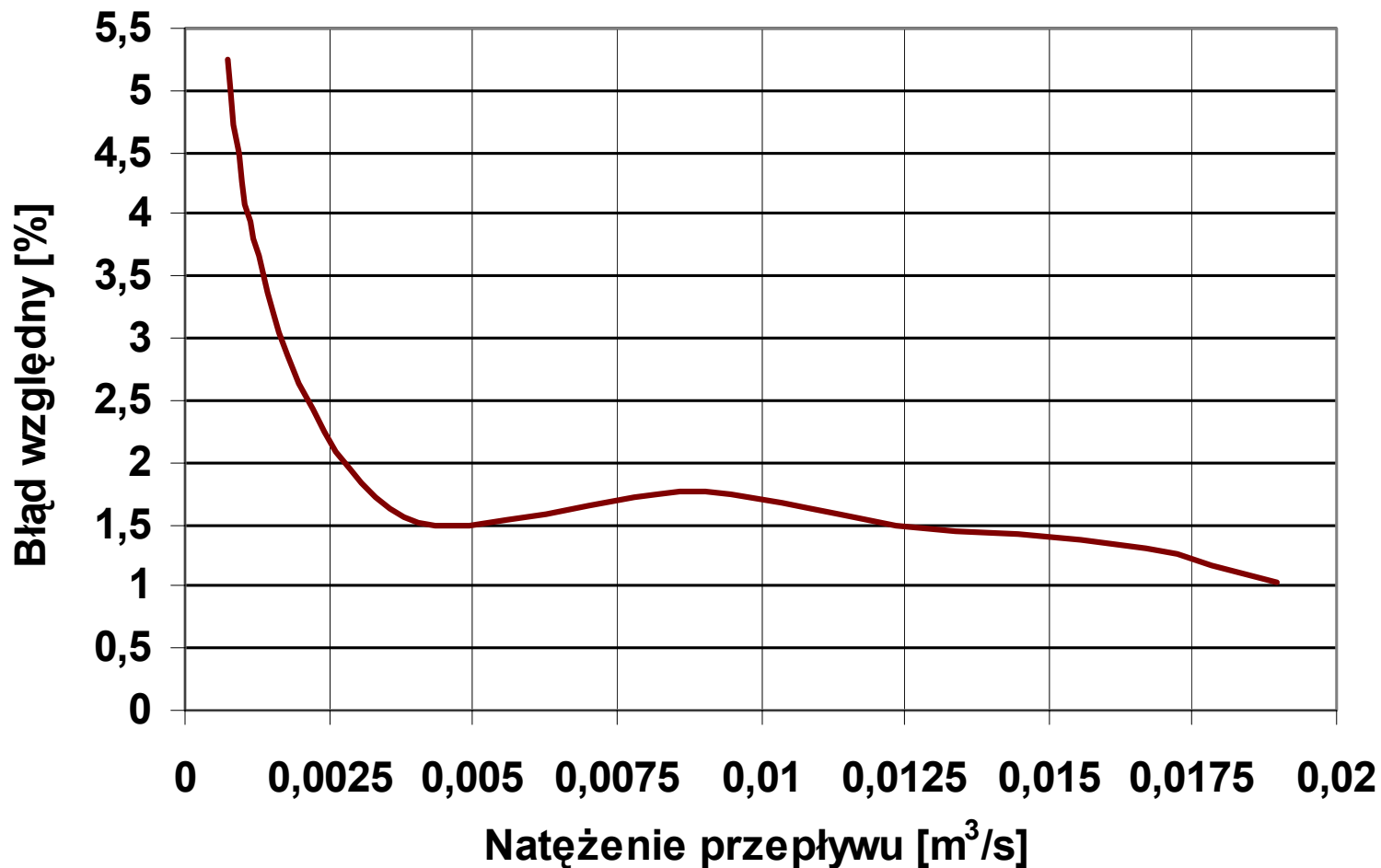
$$Q^2 = \frac{gA_{kr}^3}{B_{kr}}$$



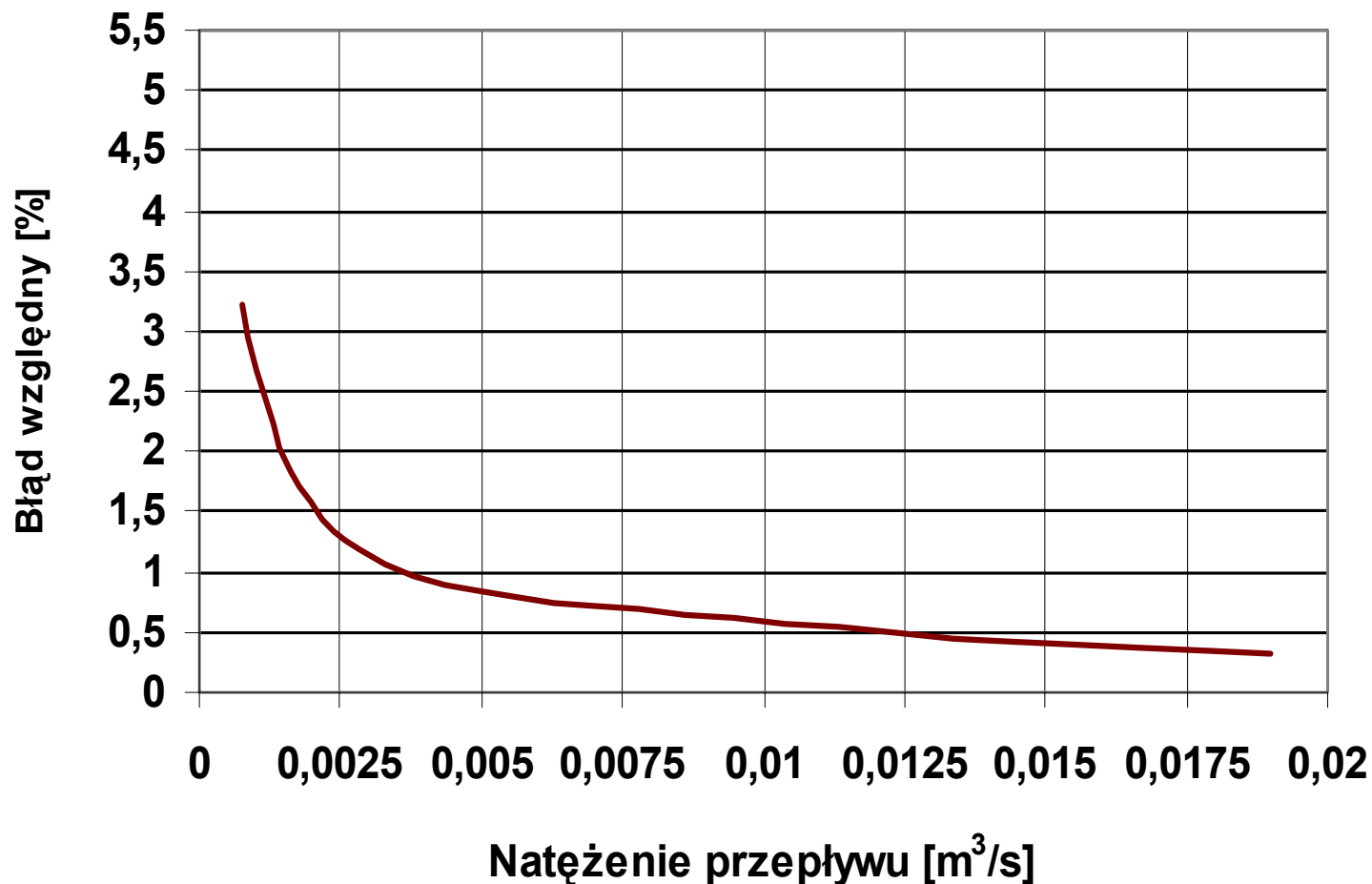
Błąd względny obliczeń natężenia przepływu wykonanych zgodnie z założeniami normy ISO oraz z modyfikacją  $L_{kr}$  dla koryt Polmera-Bowlusa w zakresie pomiarowym firmy „Plasti-Fab”

$$\left( \frac{Q_{PF} - Q}{Q_{PF}} \times 100 \right)$$

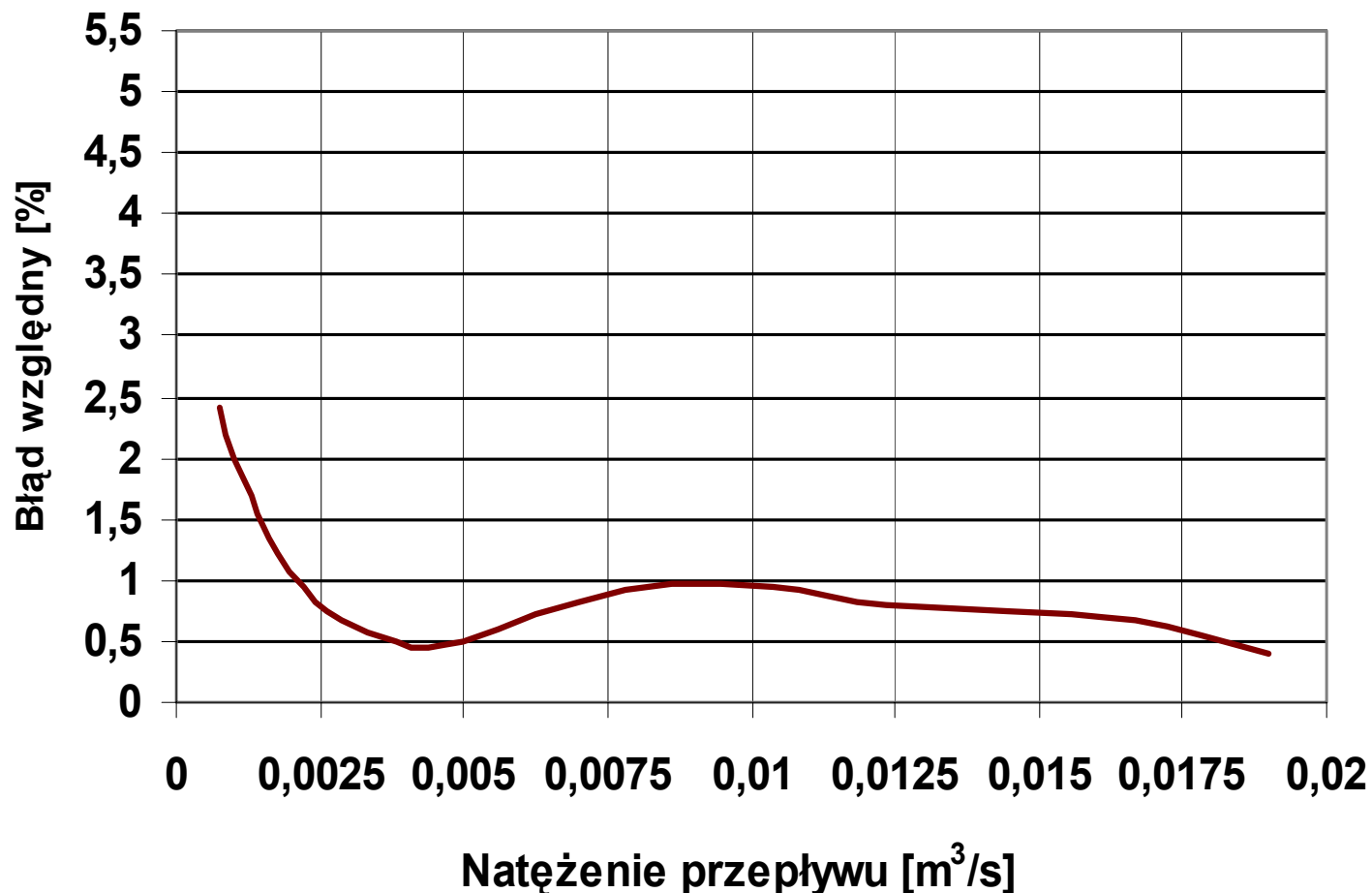
# Obliczenia zgodnie z założeniami normy ISO dla koryta Palmera-Bowlusa 0,203 m



# Obliczenia z modyfikacją $L_{kr}$ dla koryta Palmera-Bowlusa 0,203 m



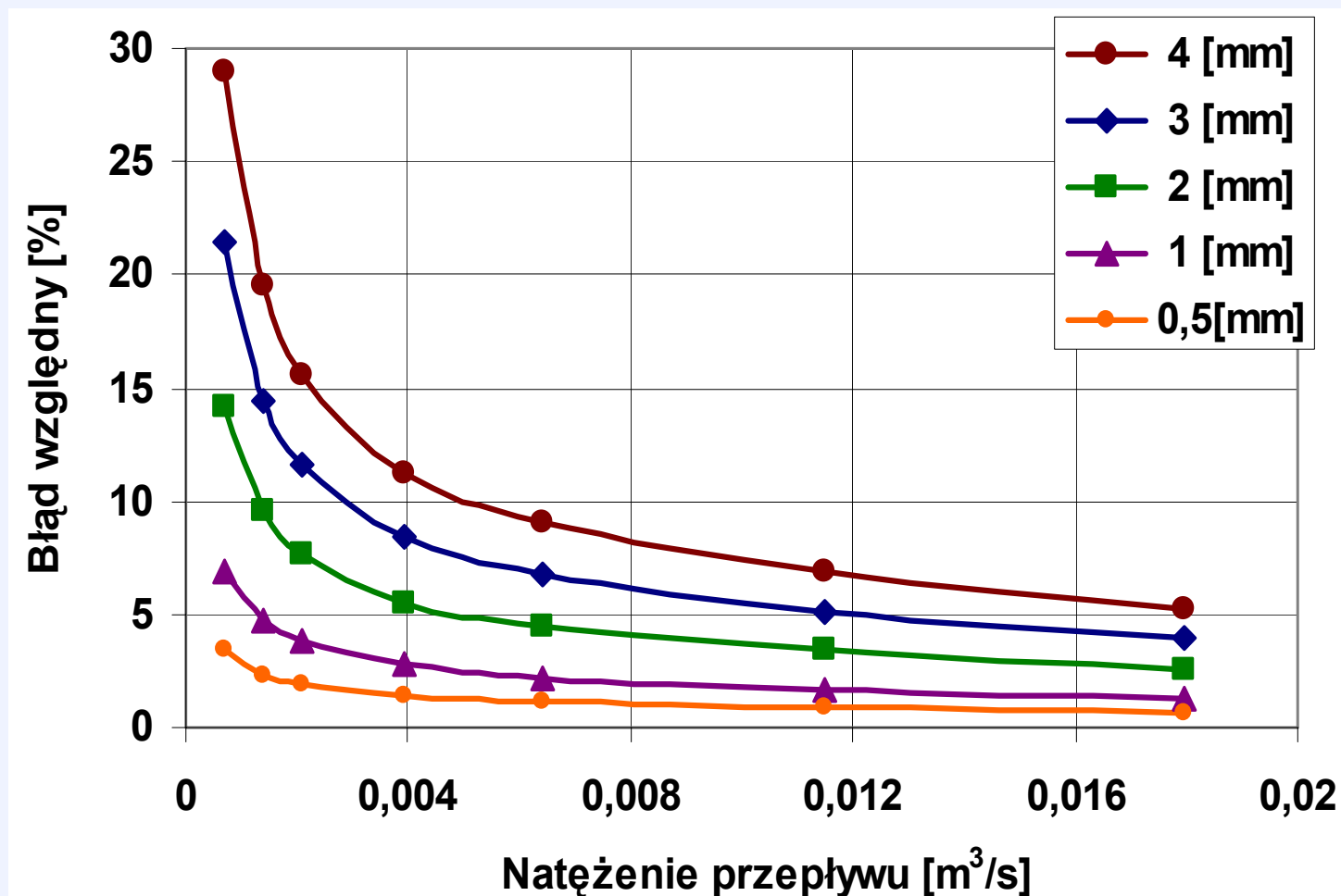
Obliczenia przy założeniu, że  $h_{kr}$  wystąpi w połowie przewężenia koryta Palmera-Bowlusa 0,203 m



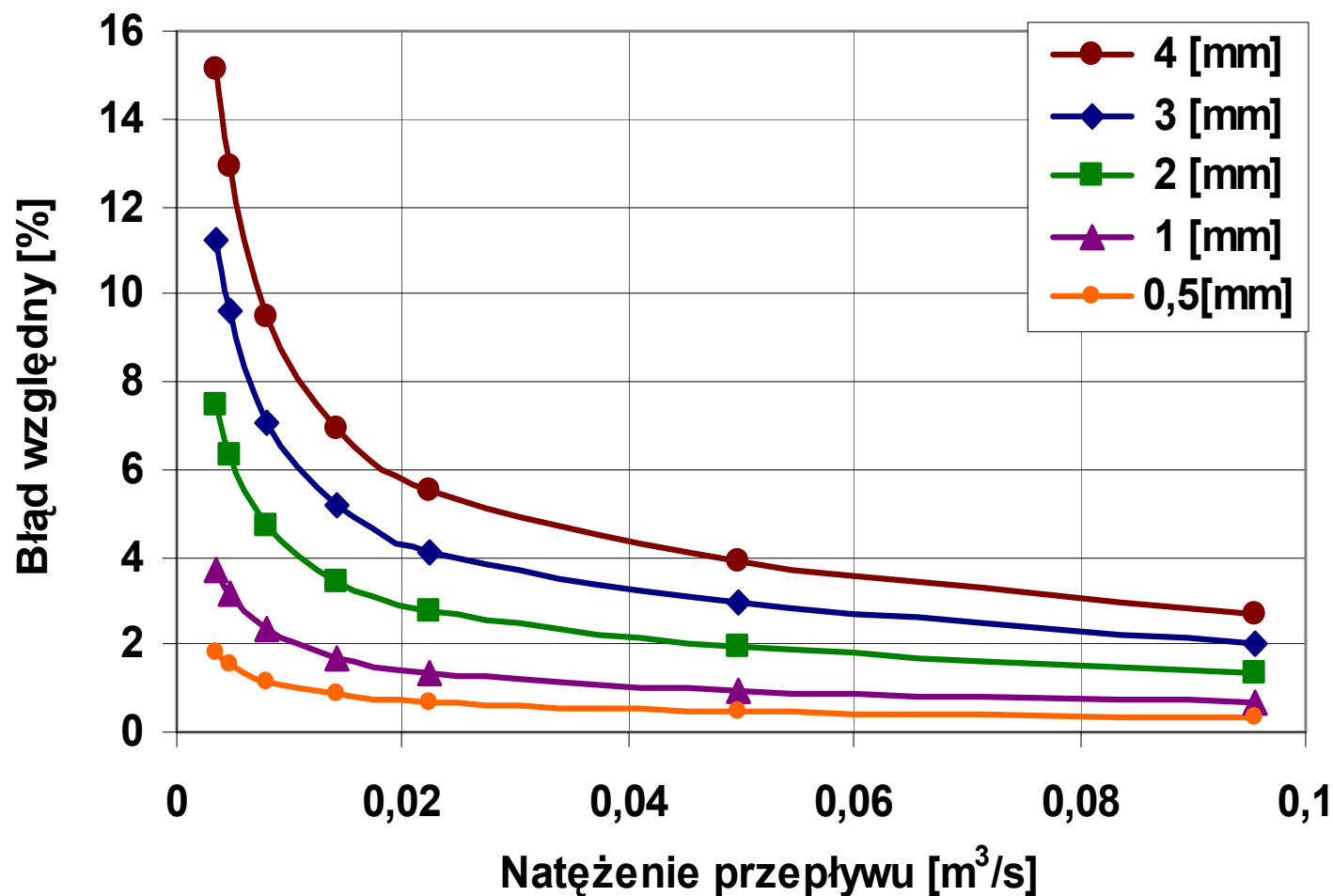
Wpływ błędu pomiaru wysokości napełnienia na wartość wyznaczanego natężenia przepływu na przykładzie koryt Palmera-Bowlusa

$$\Delta Q_h = \frac{|Q(h_1 \pm \Delta h) - Q(h_1)|}{Q(h_1)} 100\%$$

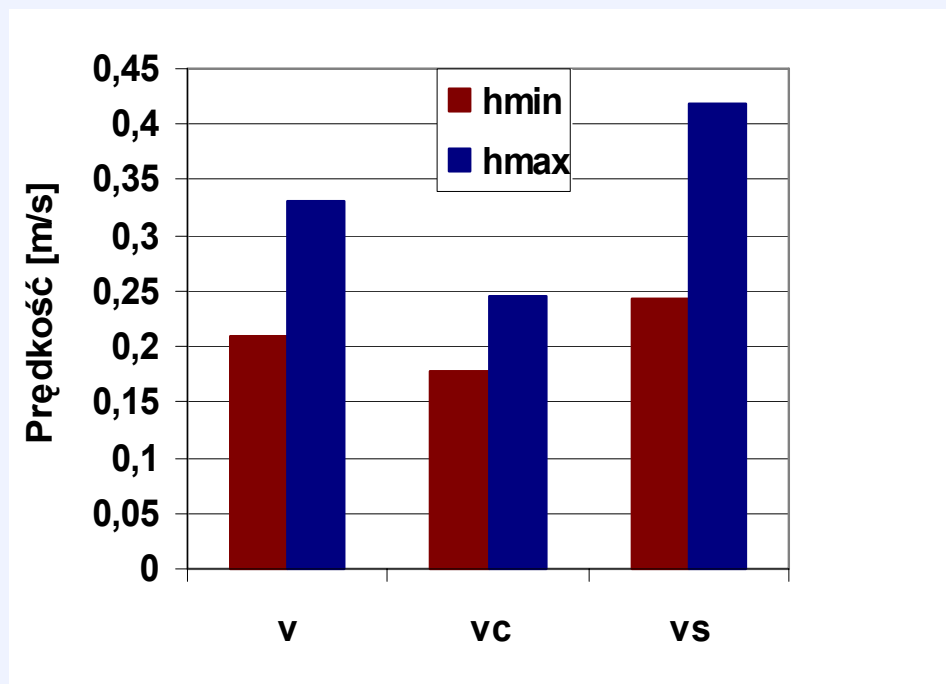
# Błąd wynikający z niedokładności pomiaru wysokości napętnienia dla koryta Palmera-Bowlusa 0,2 m



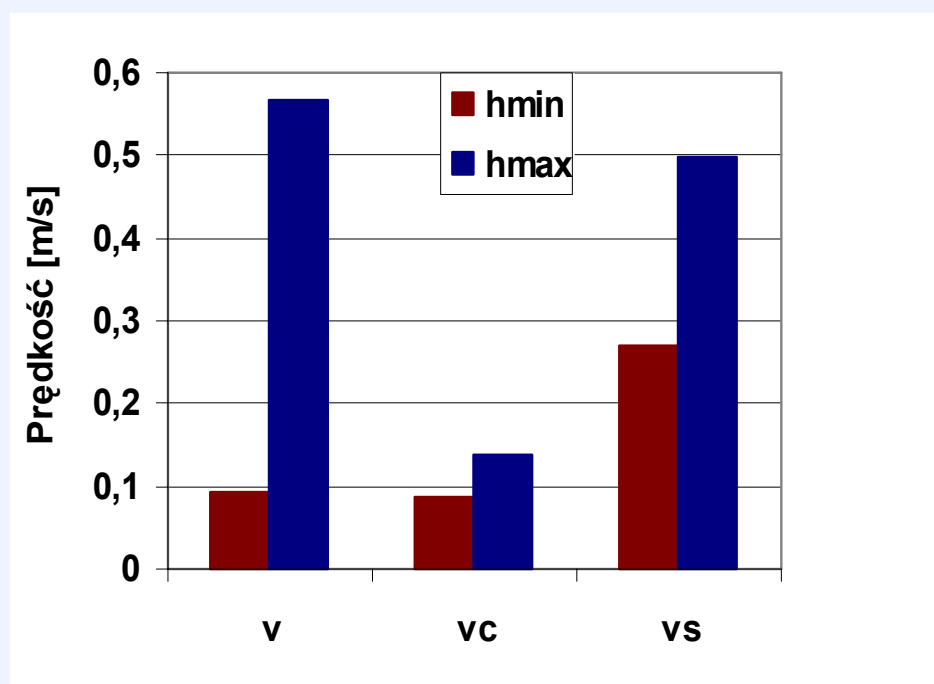
# Błąd wynikający z niedokładności pomiaru wysokości napętnienia dla koryta Palmera-Bowlusa 0,4 m



Prędkość przepływu –  $v$ , prędkość graniczna –  $v_c$ ,  
prędkość samooczyszczania –  $v_s$ ,  
w przekroju pomiarowym o szerokości lub średnicy 0,2 m



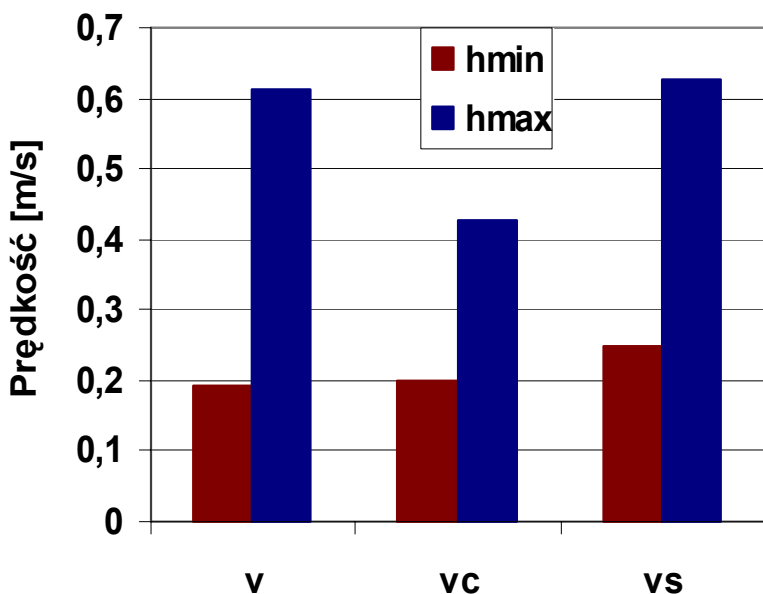
**Koryto typu Uniklar 77**



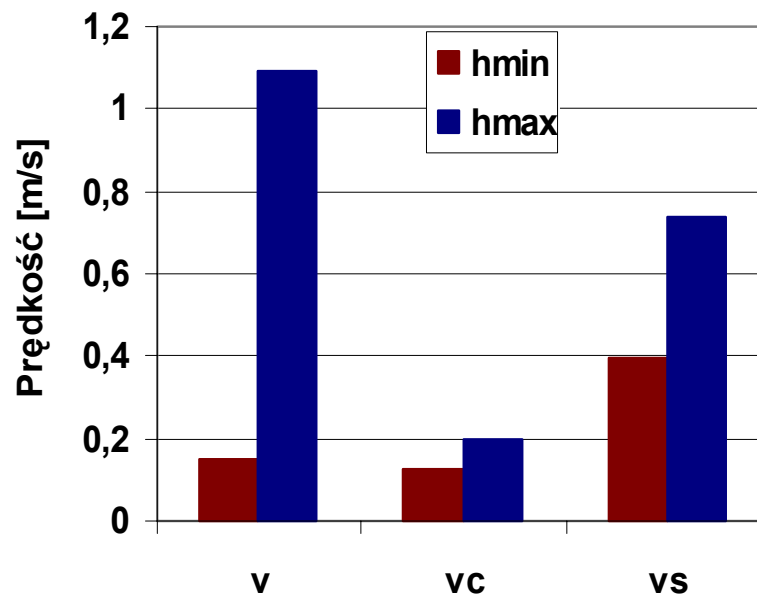
**Koryto Palmera-Bowlusa**



Prędkość przepływu –  $v$ , prędkość graniczna –  $v_c$ ,  
prędkość samooczyszczania –  $v_s$ ,  
w przekroju pomiarowym o szerokości lub średnicy 0,8 m



**Koryto typu Uniklar 77**



**Koryto Palmera-Bowlusa**

# Wnioski

- Modyfikacja obliczeń, według normy ISO 4359, natężenia przepływu przez koryta zwężkowe, polegająca na uwzględnieniu grubości warstwy przyściennej (ściślej odległości przesunięcia  $\delta^*$ ) nie na końcu gardzieli tylko w przekroju, w którym występuje głębokość krytyczna, pozwala na znaczne zwiększenie dokładności obliczeń, pomimo dwóch pozostałych nieścisłości.
- Miejsce wystąpienia głębokości krytycznej w korytach zwężkowych można wyznaczyć przy pomocy równania ruchu wolnozmiennego, pod warunkiem przyjęcia do obliczeń odpowiednich wartości współczynnika de Saint-Venanta i współczynnika szorstkości w równaniu Manninga, co może jednak sprawiać pewne trudności.

## Wnioski (c.d.)

- Dla prostokątnych koryt typu Uniklar 77 położenie przekroju, w którym występuje głębokość krytyczna, może być z dużą dokładnością opisane wyznaczonym przez autora równaniem.
- Położenie przekroju, w którym występuje głębokość krytyczna w przewężeniu koryt Palmera-Bowlusa, wyrażone wartością ilorazu  $L_{kr}/D$  w funkcji wartości ilorazu  $h_1/D$ , jest opisane różnymi funkcjami w zależności od średnicy kanału, w który wbudowane jest koryto zwężkowe.
- Zakresy pomiarowe koryt zwężkowych zamieszczonych w katalogu Uniklar 77, jak również warunki ich prawidłowego montażu i charakterystyki przepływowe różnią się niekiedy znacznie od analogicznych informacji podanych w normie ISO.

## Wnioski (c.d.)

- Małe koryta ( $b_1 \leq 0,2$  m) o małym stosunku zwężenia ( $b_2/b_1 = 0,5$ ), jak wykazały badania przeprowadzone na Politechnice Gdańskiej dla koryt typoszeregu Uniklar 77, mają przepływ rzeczywisty większy od teoretycznego, co jednak jest sprzeczne z normą ISO 4359. Stąd należałoby, zdaniem autorki, dokonać empirycznej weryfikacji charakterystyk przepływowych małych koryt.
- Błąd pomiaru natężenia przepływu wynikający wyłącznie z niedokładności pomiaru wysokości napełnienia w przekroju pomiarowym zmniejsza się prawie dwukrotnie, jeśli zwiększy się rozmiar koryta też dwukrotnie. Z tego względu im mniejsze koryto, tym wymagane jest bardziej precyzyjne oprzyrządowanie.

## Wnioski (c.d.)

- Powyżej koryt Palmera-Bowlusa istnieją lepsze warunki transportu osadu niż przed korytami prostokątnymi typu Uniklar 77 przy tej samej szerokości kanału prostokątnego, co średnica kanału kołowego.
- Koryta powinny być tak dobierane, aby stosunkowo często pracowały w górnym zakresie pomiarowym, gdyż jest to ważne zarówno ze względu na zachowanie warunków samooczyszczania kanału dopływowego, jak i na dokładność przeprowadzanych pomiarów.
- Powyżej małych prostokątnych koryt zwężkowych, nawet przy maksymalnym napełnieniu, prędkość przepływu może nie osiągać prędkości samooczyszczania.



## Całkowity błąd pomiaru natężenia przepływu według ISO 4359

$$X_Q = \sqrt{X_c^2 + (100\Delta b_2 / b_2)^2 + 1,5^2 (100\Delta h / h)^2}$$

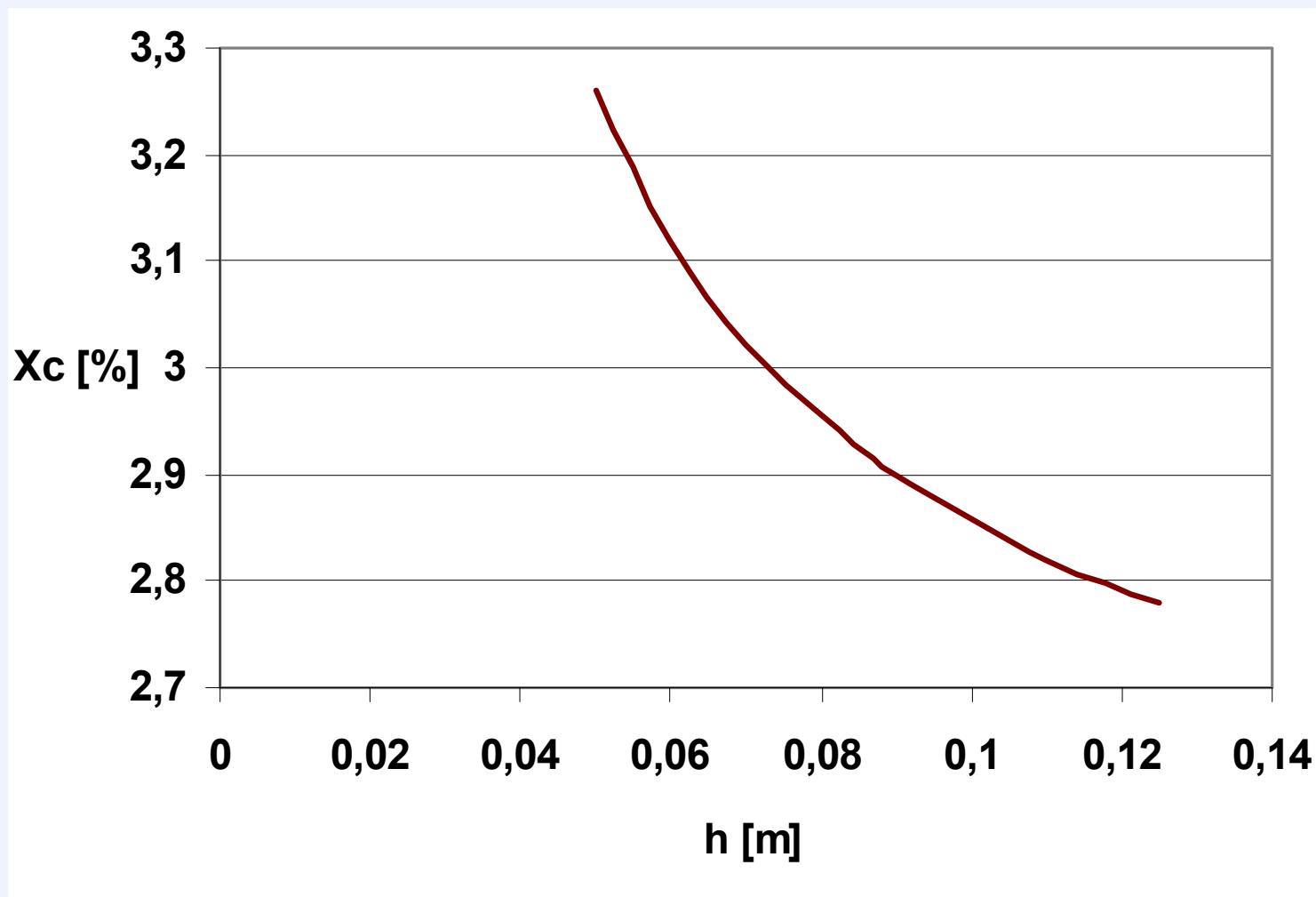
$$X_c = \pm [1 + 20(c_v - c_d)]$$

$X_c$  – błąd wartości współczynników  $c_v$  i  $c_d$

$\Delta b_2$  – błąd pomiaru szerokości przewężenia  $b_2$

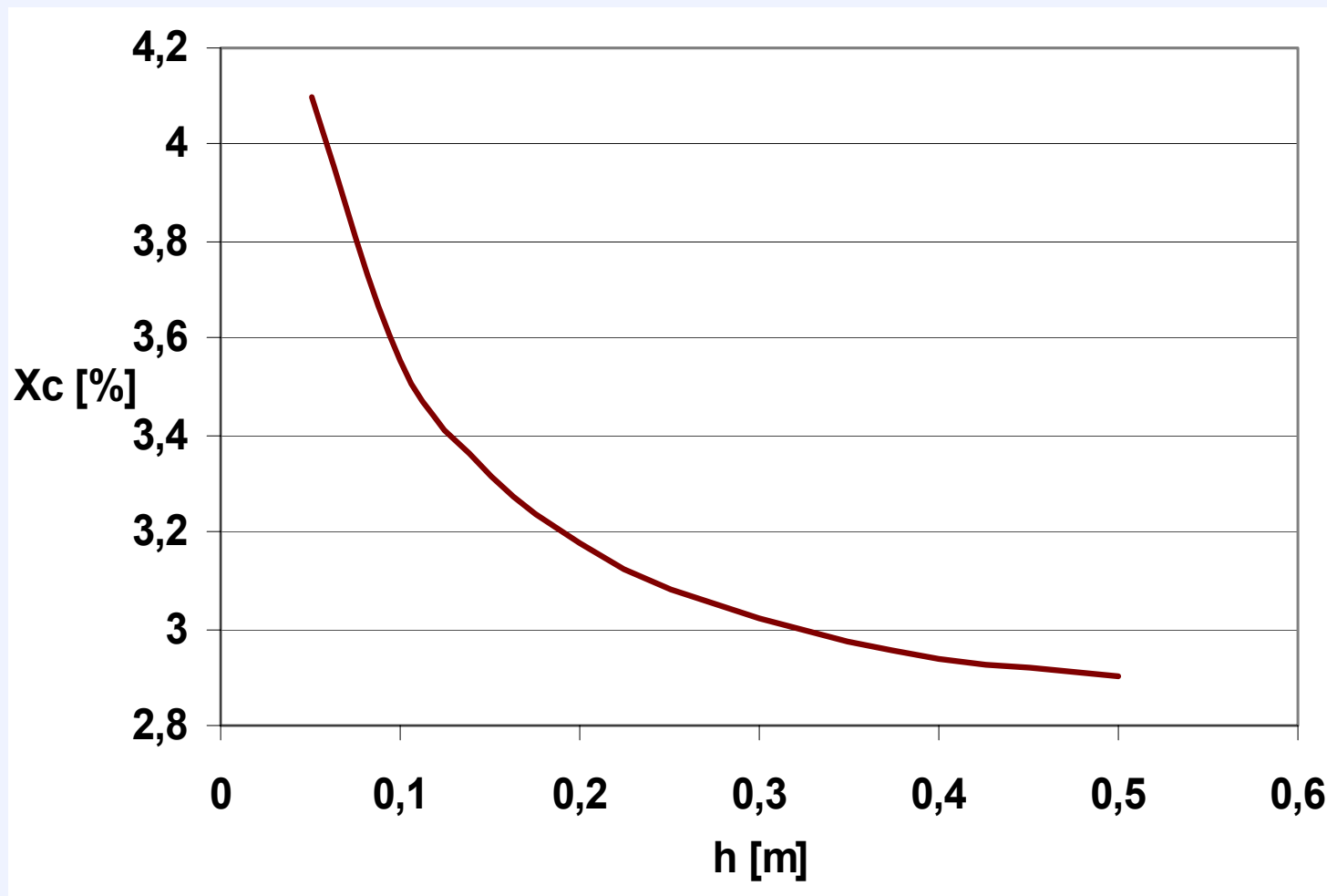
$\Delta h$  – błąd pomiaru wysokości napętnienia  $h$

## Błąd współczynników $X_c$ w zależności od wysokości napętnienia dla koryta o szerokości $b_1 = 0,2$ m

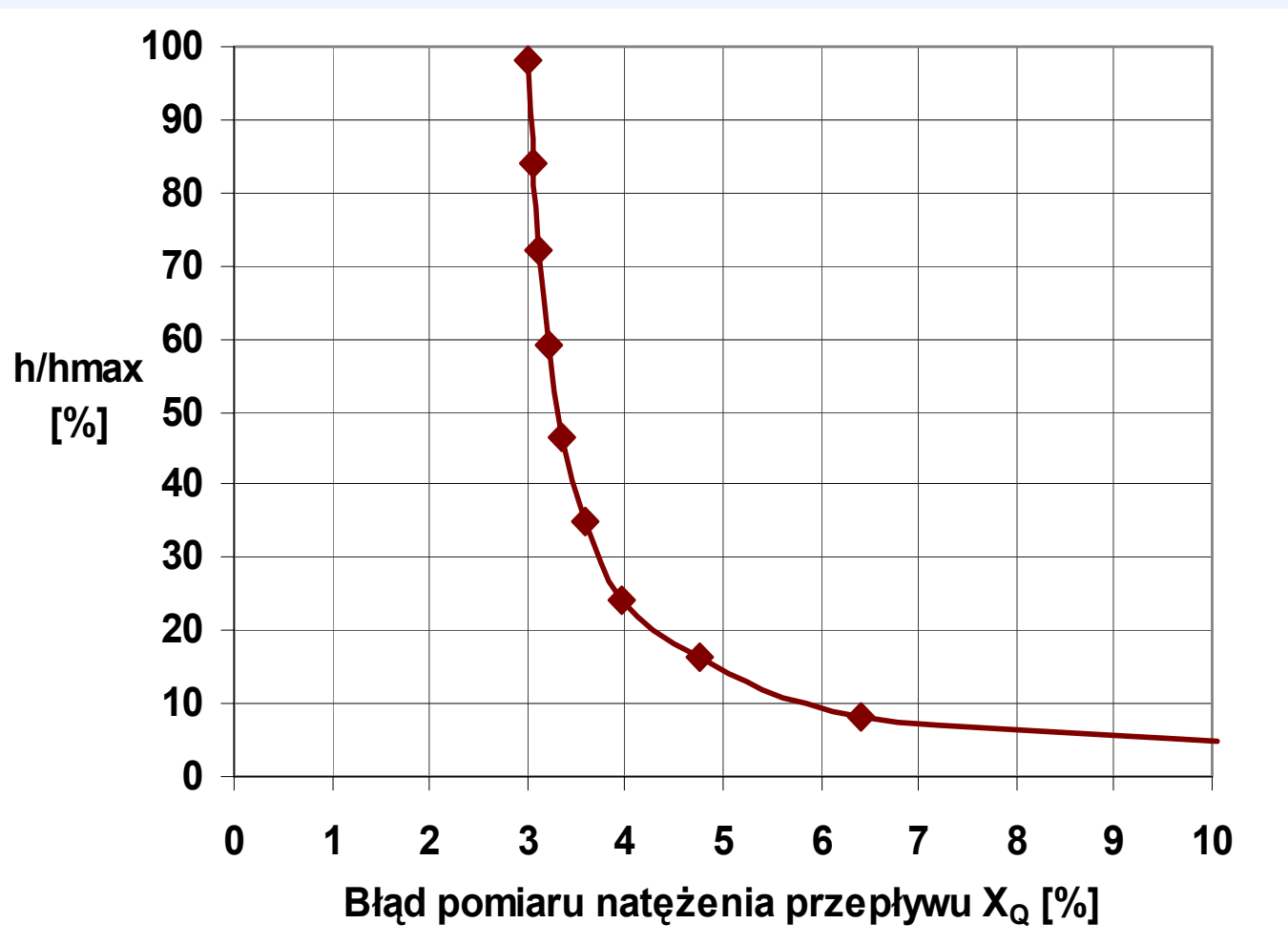




# Błąd współczynników $X_c$ w zależności od wysokości napętnienia dla koryta o szerokości $b_1 = 0,8$ m



# Całkowity błąd pomiaru natężenia przepływu dla koryt prostokątnych zgodnych z ISO 4359





## Błąd wysokości napełnienia

$$\Delta h = \pm \left( {}_1\varepsilon_h^2 + {}_2\varepsilon_h^2 + \dots + (2S_{\bar{h}})^2 \right)^{1/2}$$

$$S_{\bar{h}} = \frac{S_h}{\sqrt{n}} \qquad S_h = \left( \frac{\sum_1^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1} \right)^{1/2}$$