

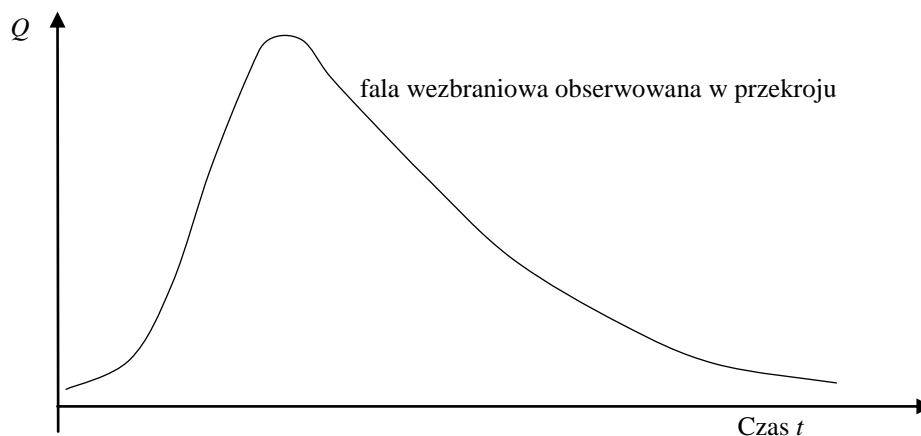
INŻYNIERIA RZECZNA

Konspekt wykładu

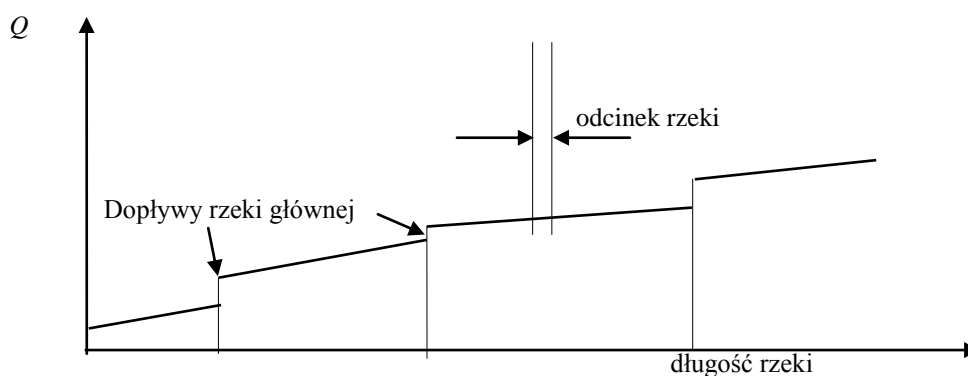
Wykład 4 – Charakterystyka przepływu wody w korytach rzecznych

Klasyfikacja ruchu wody

1. Ruch nieustalony – zmienny przepływ Q na długości rzeki i w czasie:
 - ruch fal wezbraniowych
 - ruch wody na długim odcinku rzeki (zmienność wynika ze wzrostu powierzchni zlewni – punktowe zasilanie rzeki głównej z rzek niższego rzędu, dopływ wód gruntowych na odcinku rzeki).



Zmiany Q wynikające z przyrostu zlewni



2. Ruch ustalony nierównomierny – $Q = const$, zmienna prędkość V na długości odcinka:
 - przepływ na krótkim odcinku i w krótkim przedziale czasu – poza okresem wezbrań
3. Ruch ustalony równomierny (jednostajny) – $Q = const$, zmiany prędkość V na długości odcinka są niewielkie

Opis matematyczny ruchu wody

1. Ruch nieustalony - opisuje układ równań Saint-Venanta:

$$\underbrace{\frac{\alpha}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x}}_I + \underbrace{\frac{\alpha}{g} \frac{\partial V}{\partial t}}_II + \underbrace{\frac{V^2}{C^2 R}}_III + \underbrace{\frac{qV}{gF}}_IV - \underbrace{J}_V = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Parametry zmienne na długości koryta (∂x) i w czasie (∂t):

- prędkość V
- natężenie przepływu Q
- powierzchnia przekroju poprzecznego F

Poszczególne człony w równaniu (1) oznaczają wielkości strat energii wywołane przez:

I – zmienność *V* na długości rzeki

II – zmienność *V* w czasie

III – opory ruchu

IV – rozdziałem koryta na ramiona

Straty te są bilansowane przez

V – spadek hydrauliczny *J*

Poszczególne człony w równaniu (2) oznaczają:

I – zmienność *Q* na długości rzeki

II – zmienność *F* w czasie (wywołane zmiennym napełnieniem koryta zależnie od zmian *Q*)

Układ równań (1) i (2) nie ma rozwiązań analitycznych – rozwiązuje się metodami numerycznymi

2. Ruch ustalony nierównomierny (*Q* = *const*):

- w równaniu (1):

$$\frac{\alpha}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} + \frac{\alpha}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V^2}{C^2 R} + \frac{qV}{gF} - J = 0$$

Jeżeli *Q* = *const* to prędkość nie zmienia się w czasie – stąd cz. *II* = 0

Jeżeli brak jest podziału rzeki na ramiona – cz. *IV* = 0

- w równaniu (2):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0$$

Jeżeli *Q* = *const* to powierzchnia przekroju przepływu nie zmienia się w czasie – stąd cz. *I* = 0 i cz. *II* = 0

- ostatecznie mamy równanie (1) w postaci:

$$\frac{\alpha}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} + \frac{V^2}{C^2 R} - J = 0$$

Równanie to rozwiązywane jest metodami numerycznymi

4. Ruch ustalony równomierny (*Q* = *const*, zmiany prędkość *V* na długości odcinka są niewielkie)

Jeżeli *Q* = *const* to prędkość nie zmienia się w czasie – stąd cz. *II* = 0

Jeżeli brak jest podziału rzeki na ramiona – cz. *IV* = 0

z równaia (1) mamy:

$$\frac{\alpha}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} + \frac{V^2}{C^2 R} - J = 0$$

ponieważ zmiany prędkości średniej *V* na długości odcinka są niewielkie – cz. *I* ≈ 0:

$$\frac{\alpha}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} \approx 0$$

ostatecznie mamy:

$$\frac{V^2}{C^2 R} = J \quad \text{a stąd} \quad \boxed{V = C \sqrt{R \cdot J}} \quad \text{- jest to wzór Chezy na średnią prędkość}$$

przepływu.

Zastępując we wzorze Chezy współczynnik prędkości *C* wyrażeniami:

Lub
$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

otrzymamy wzory pokrewne:

- wzór Manninga

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}$$

- wzór Darcy-Weisbacha

$$V = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gRJ}$$

gdzie:

- n – współczynnik szorstkości, ($m^{-1/3} s$),
- λ – współczynnik oporu, (-),
- R – promień hydrauliczny, (m),
- J – spadek hydrauliczny, (-).

Wartość współczynnika oporu λ określa tzw. ogólne prawo przepływu Colebrook'a – White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{14,84R} \right)$$

gdzie:

- Re – liczba Reynoldsa, (-),
- k_s – zastępcza szorstkość bezwzględna, (m),
- R – promień hydrauliczny, (m).

Wielkość k_s , nazywana również wysokością szorstkości, charakteryzuje chropowatość powierzchni obwodu zwilżonego.

Równanie Colebrook'a – White'a dla najczęściej w przypadku rzek występujących koryt hydraulicznie szorstkich ($Re \rightarrow \infty$) upraszcza się do postaci

- dla koryt o kształcie zbliżonym do trapezu:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log \left(\frac{12,27R}{k_s} \right)$$

- dla koryt prostokątnych

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \log \left(\frac{11,0h}{k_s} \right)$$

gdzie h – głębokość wody w przekroju

Pomiędzy poszczególnymi współczynnikami, które charakteryzują opory przepływu zachodzą następujące zależności:

- z porównania stronami wzorów:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad \text{i} \quad C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

mamy:

$$n = R^{\frac{1}{6}} \sqrt{\frac{\lambda}{8g}} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n \sqrt{8g}}$$

Współczynniki C , n i λ wyrażają wielkość oporów przepływu.

Opory ruchu kształtowane są przez następujące czynniki:

- tarcie zewnętrzne wynikające z szorstkości materiału korytowego,
- nieregularność dna i brzegów koryta,
- zmienność wymiarów i kształtów przekrojów poprzecznych,
- występowanie lokalnych przeszkód,
- roślinność korytowa,
- nieregularność i krzywizny układu poziomego.

Całkowity opór koryta jest:

- sumą oporów cząstkowych wywołanych wyżej wymienionymi czynnikami
- udział poszczególnych czynników w oporach całkowitych jest różny w zależności od stanu wody i pory roku (np. sezonowe zmiany szaty roślinnej)
- zmienia się na długości rzeki

Określanie oporów przepływu

Opory przepływu możemy określać:

- na całym rozpatrywanym odcinku,
- w poszczególnych przekrojach.

Przy wyznaczaniu oporów przepływu możemy:

- rozpatrywać koryto całościowo – jeden współczynnik uwzględniający wszystkie czynniki (bez określania wpływu poszczególnych czynników),
- określać opory cząstkowe a następnie całkowity opór będący sumą oporów cząstkowych.

Przy wyznaczaniu oporów przepływu stosujemy następujące metody:

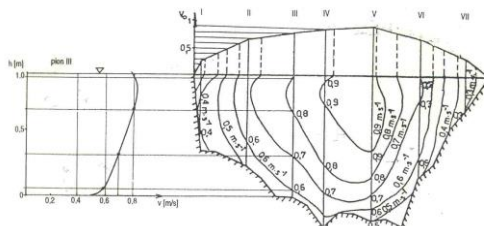
- oparte na bezpośrednich pomiarach przepływu, przekrojów poprzecznych i spadku hydraulicznego,
- przy braku pomiarów oraz dla warunków projektowanych:
 - dobór wartości współczynników z różnego rodzaju tabel i katalogów na podstawie opisu stanu koryta lub rodzaju powierzchni zwilżonej,
 - ze wzorów empirycznych.

Metoda oparta na bezpośrednich pomiarach jest najbardziej wiarygodna, gdyż:

- uwzględnia wszystkie czynniki wpływające na całkowite opory przepływu,
- pozwala określić rzeczywistą zmienność oporów przepływu (w ciągu roku, przy różnych stanach wody, na długości rzeki – w różnych przekrojach).

W celu określenia wielkości oporów przepływu metodą bezpośrednią wykonujemy:

1. pomiar hydrometryczny oraz określamy lokalny spadek hydrauliczny na podstawie niwelacji zwierciadła wody (w rzekach swobodnie płynących przyjmuje się, że spadek hydrauliczny jest równy spadkowi zw. wody). Na podstawie pomiaru hydrometrycznego określamy rozkład prędkości w pionach i w przekroju oraz określamy całkowite natężenie przepływu Q ;



2. W przekroju pomiarowym o znanym polu powierzchni przepływu F obliczamy średnią prędkość przepływu V :

$$V = \frac{Q}{F}$$

3. Z przekształconego wzoru na średnią prędkość w przekroju poprzecznym obliczamy wartość współczynnika wyrażającego wielkość oporów przepływu. Np. ze wzoru Manninga:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad n = \frac{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{V} = \frac{F \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{Q}$$

Przy braku pomiarów oraz dla warunków projektowanych dobieramy wartości współczynników z odpowiednich tabel lub korzystamy ze wzorów empirycznych.

Wzór Cowana – całkowita wartość współczynnika szorstkości n ($m^{-1/3} s$):

$$n = (n_o + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

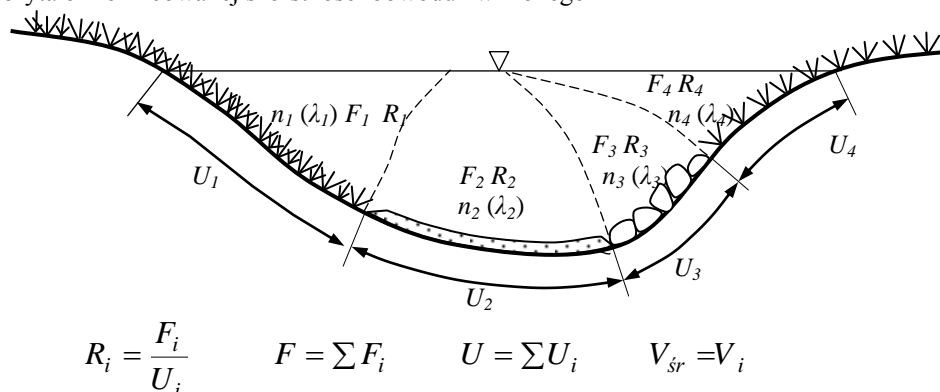
gdzie współczynniki cząstkowe wyrażają:

- n_o – szorstkość regularnego i prostego koryta (podstawowa wartość zależna od materiału korytowego)
- n_1 – nieregularność brzegów i dna,
- n_2 – zmiany kształtu i wielkości przekrojów poprzecznych,
- n_3 – lokalne przeszkody w korycie,
- n_4 – stopień zarośnięcia koryta,
- m_5 – wpływ układu poziomego (krzywizny) trasy.

Wartości współczynników cząstkowych od n_o do m_5 dobieramy z tablic na podstawie charakterystyki koryta.

Przy wyznaczaniu oporów przepływu w przekroju o zróżnicowanej szorstkości określamy średnią wartość współczynnika (tzw. wartość zastępczą albo średnią ważoną).

Schemat koryta o zróżnicowanej szorstkości obwodu zwilżonego



Oznaczenia:

- U_i – długości obwodów cząstkowych o jednorodnej chropowatości, charakteryzowanej przez n_i lub λ_i , (m),
- U – całkowity obwód zwilżony koryta, (m),
- R_i – wartości promieni hydraulicznych odnoszących się do poszczególnych odcinków obwodu zwilżonego, (m),
- R – promień hydrauliczny dla całego przekroju, (m),
- n_i, λ_i – współczynniki szorstkości i oporu dla obwodów cząstkowych.

- wartość zastępczą współczynnika szorstkości n_z (jest to wartość średnia ważona) można obliczyć ze wzoru Hortona:

$$n_z = \left(\frac{\sum_{i=1}^N U_i \cdot n_i^3}{U} \right)^{\frac{2}{3}}$$

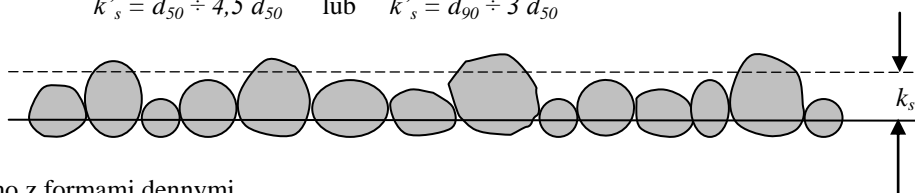
- zastępczą wartość λ_z obliczamy według wzoru:

$$\lambda_z = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \cdot \lambda_i}{U}$$

Opory ruchu na dnie koryt aluwialnych

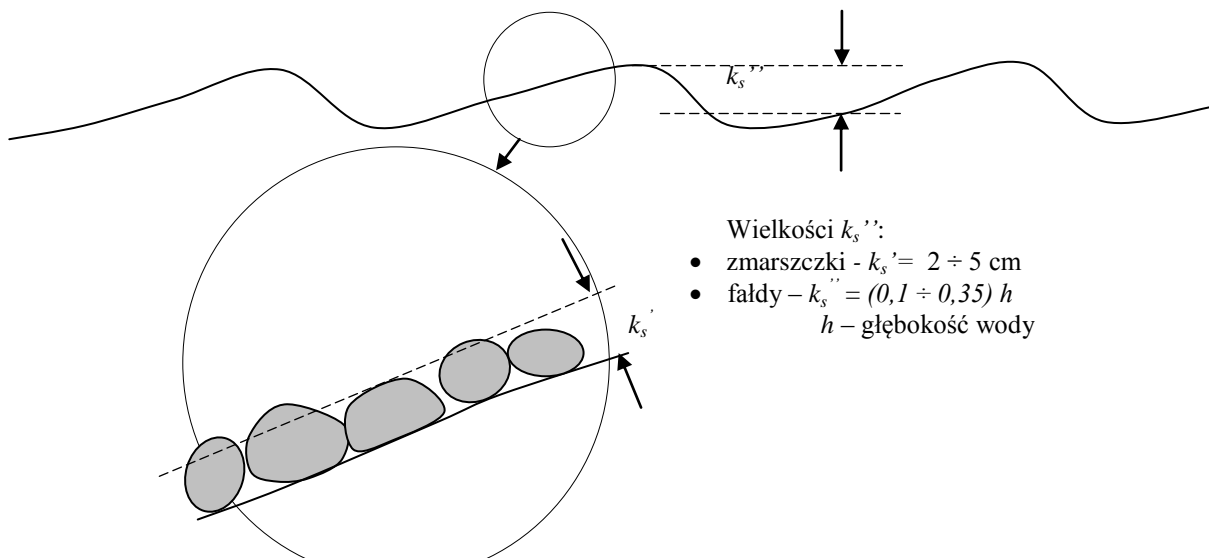
1. dno płaskie

- wsp. oporu dna $\lambda = \lambda' (\lambda' \rightarrow k'_s)$
 $k'_s = d_{50} \div 4,5 d_{50}$ lub $k'_s = d_{90} \div 3 d_{50}$



2. dno z formami dennymi

- formy dennie powstają przy średnicach materiału korytowego $0,1 \div 10$ mm
- wsp. oporu dna $\lambda = \lambda' + \lambda''$ (wartość λ' zależy od k'_s ; $\lambda'' \rightarrow$ od k_s'')



Opory ruchu wywołane zarastaniem koryta

Wpływ roślinności na opory przepływu zależy od:

- rodzaju roślinności (wodna, szuwarowa, na brzegach i terenie zalewowym),
- pory roku (w okresie zimowym zanika roślinność wodna, rośliny lądowe tracą liście),

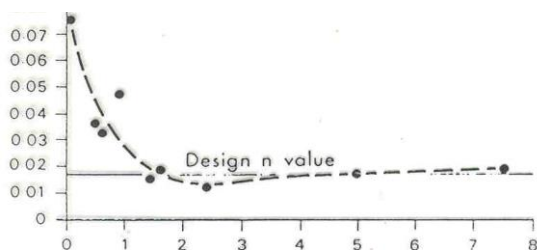
Podział roślinności ze względu na wysokość w stosunku do głębokości wody oraz sztywność łodyg (pni, gałęzi):

- roślinność niska (wysokość roślin znacznie niższa od głębokości wody) – do niej zaliczamy roślinność wodną, oraz trawiastą i zielną o elastycznych łodygach;
- roślinność średnia (głębokość wody porównywalna z wysokością roślin) – do niej zaliczamy krzewy, wysokie trzciny oraz młode drzewka,
- roślinność wysoka – drzewa i krzewy wystające ponad poziomem zwierciadła wody.

Zmienność oporów przepływu

- Opory przepływu zmieniają się w zależności od natężenia przepływu Q (stanu wody) – przykładowa zmienność wsp. szorstkości n w niewielkiej rzece:

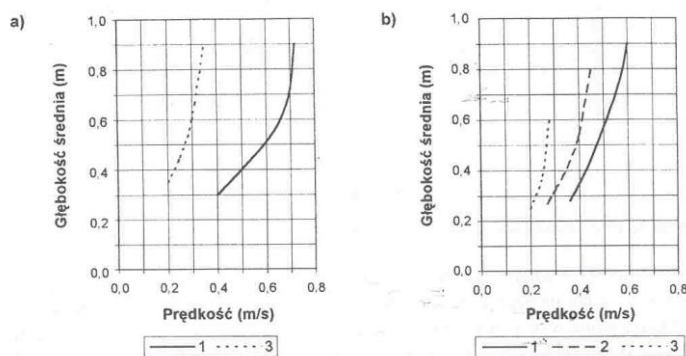
Wsp. szorstk. n



Natężenie przepływu Q

Wraz ze wzrostem natężenia przepływu (i stanu wody) opory przepływu maleją (maleje wsp. szorstkości), a następnie opory wzrastają. Minimalna wartość n występuje w strefie przepływów średnich (SSQ , NTQ , ZQ).

- Duży wpływ na wielkość i zmienność roczną oporów przepływu ma zarastanie koryt rzecznych – przykłady:



Rysunek 9.1. Zależność prędkości od głębokości średniej (Żelazo 1992): a) w korycie Liwy, b) w korycie Goidapy; 1 – koryto bez zarastania, 2 – koryto z roślinnością (VI i IX), 3 – koryto z roślinnością (VII i VIII)

Przepustowość koryt rzecznych

Charakterystyka przepustowości koryta rzecznego jest potrzebna do:

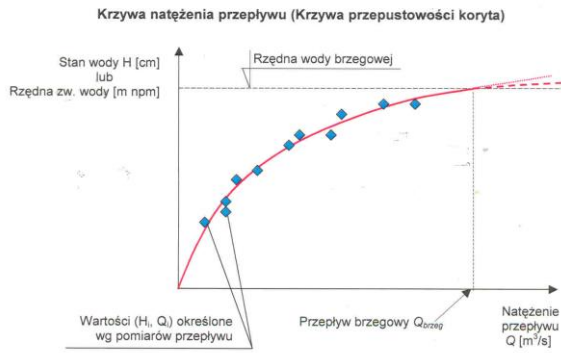
- prognozowania przebiegu zjawisk morfologicznych,
- analizy możliwości i warunków gospodarczego wykorzystania rzeki,
- analizy ryzyka powodzi,
- właściwego utrzymania rzeki, stosowania odpowiednich zabezpieczeń, projektowania budowli hydrotechnicznych.

Przepustowość koryta charakteryzuje krzywa natężenia przepływu (krzywa przepustowości koryta), czyli zależność pomiędzy:

- - stanem wody H (w przekroju wodowskazowym),
 - - rzędną zw. wody lub głębokością wody h (napętnieniem koryta),
- a natężeniem przepływu Q .

Krzywą przepustowości koryta wyznacza się:

- na podstawie pomiarów przepływu, wykonywanych głównie w przekrojach wodowskazowych przy różnych stanach wody i w różnych porach roku;
- w dowolnych przekrojach (poza przekrojami wodowskazowymi) najczęściej dla celów projektowych krzywą wyznacza się na podstawie obliczeń hydraulicznych (zwykle ze względu na czas i koszty nie mamy możliwości prowadzenia długotrwałych obserwacji hydrologicznych w interesujących nas przekrojach).

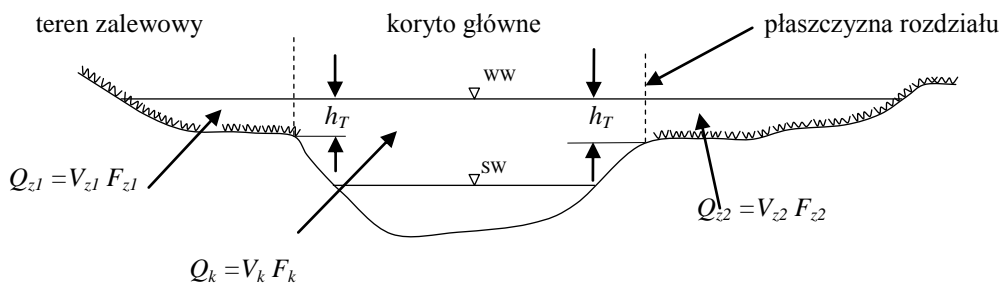


Przepustowość koryta dwudzielnego

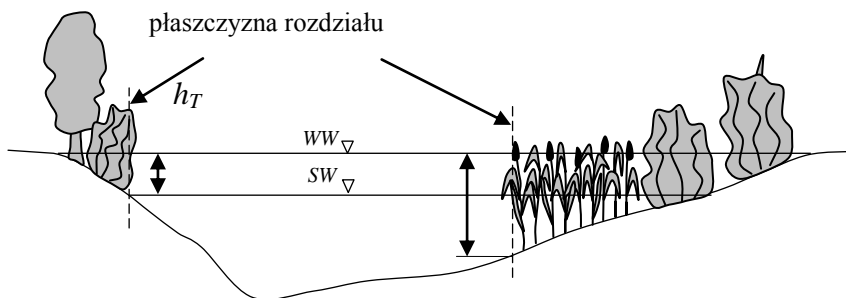
Określa się oddzielnie przepustowość koryta głównego i terenów zalewowych (doliny zalewowej lub międzywała):

koryto wód wielkich = koryto główne + tereny zalewowe

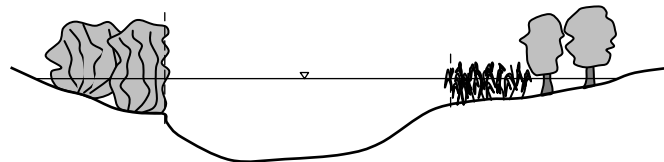
$$Q = Q_k + Q_{z1} + Q_{z2}$$



Koryto główne porośnięte roślinnością wysoką



Koryto dwudzielne porośnięte roślinnością wysoką



Prędkości średnie określamy oddzielnie dla części wolnej od roślinności i zarośniętej roślinnością wysoką. Dla przekroju (części przekroju) porośniętego roślinnością wysoką wsp. oporu jest równy:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_o + \lambda_r}}$$

λ_o - wsp. oporu powierzchni (grunt, roślinność niska)

λ_r - wsp. oporu roślinności wysokiej (krzewy, drzewa)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\frac{a_x \cdot a_z}{4 \cdot d_p \cdot h \cdot C_{WR}}}$$

a_x, a_z - odległości między drzewami (krzewami)

d_p - średnica pnia (krzewu)

h - głębokość wody

C_{WR} - wsp. opływu pni przez strugi ($C_{WR} \approx 1,7$)