

ANALIZA WPŁYWU ROŚLINNOŚCI NA WARUNKI PRZEPIYWU WODY W MIĘDZYWALU OKREŚLENIE KRYTERIÓW USTALANIA MIEJSC PRZEPROWADZANIA WYCINEK I USUWANIA NADMIARU ROŚLINNOŚCI

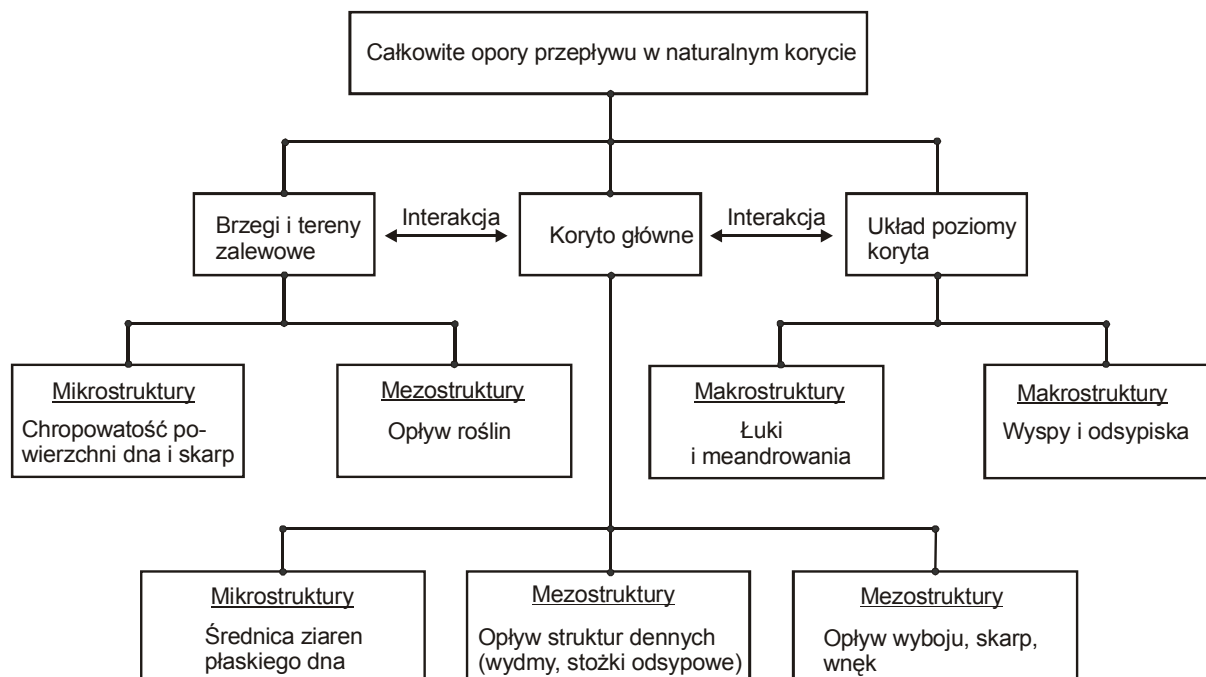
1. Analiza oddziaływania roślinności na przepustowość koryta. Kryteria podziału roślin ze względu na warunki przepływu w korycie z terenami zalewowymi.

Rzeki nizinne mają zwykle przekroje poprzeczne złożone z koryta głównego i przyległego do niego jednego lub dwu terenów zalewowych, które charakteryzują się następującymi cechami¹:

- zmiennością kształtu przekroju poprzecznego, tzn. koryta głównego i terenów zalewowych,
- zmiennością chropowatości powierzchni dna i ścian koryta,
- brakiem umocnień brzegów,
- meandrującą linią koryta (prostoliniowe odcinki koryta naturalnego w naturze występują bardzo rzadko),
- występowaniem na zalewach i w strefie przybrzeżnej (pomiędzy korytem głównym a zalewem) roślinności sztywnej, przez którą przepływa woda oraz elastycznej, nad którą przepływa woda.

Warunki przepływu wody w korycie kształtują się pod wpływem wszystkich wymienionych elementów. Ich wpływ bezpośrednio na warunki przepływu określa się mianem oporów przepływu. Dlatego analiza przepustowości koryt naturalnych winna uwzględniać opory wszystkich wymienionych wcześniej składników. Schematyczne zestawienie oporów przepływu w korycie rzek pokazano na rys. 1.1.

¹ ŻELAZO J. (1992): Roślinność w inżynierii rzecznej. Gospodarka wodna, 5, s.104-106; ŻBIKOWSKI A., ŻELAZO J. (1992): Ochrona środowiska na terenach zalewowych. Gospodarka wodna 11, s.252- 255; ŻELAZO J., POPEK Z. (2002): Podstawy renaturyzacji. Wydawnictwo SGGW.



Rys. 1.1. Schematyczne powiązanie oporów przepływu w naturalnym korycie².

Opory przepływu opisuje się współczynnikami, które występują w zależnościach do obliczania prędkości przepływu wody. Dzieli się je na wymiarowe i bezwymiarowe. Znajomość tych ostatnich stwarza możliwość oszacowania całkowitych oporów przepływu na podstawie znajomości oporów składowych.

Opory wywołane chropowatością dna i skarp koryta

Opory te są obliczane na podstawie chropowatości zastępczej piaskowej powierzchni koryta k_s i powiązanego z formą przepływu wody współczynnika oporów λ . Chropowatość definiowana jest jako własność powierzchni koryta. W hydraulice do charakteryzowania chropowatości powierzchni dna i skarp koryta wykorzystuje się:

- absolutną chropowatość k wyrażaną w [m]; jest miarą odchylenia nierówności powierzchni od linii uśrednionej – poziomej,
- zastępczą chropowatość piaskową k_s ; techniczna i naturalna chropowatość zostaje wyrażona jako zastępcza chropowatość piaskowa w turbulentnym, szorstkim przepływie.

Opory przepływu dna i skarp w korycie opisuje się bezwymiarowym współczynnikiem oporów λ , wyznaczanym z zależności Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s / 4R}{3,71} \right) \quad (1.1)$$

gdzie:

² LEHMANN B., BERNHART H., NESTMANN F. (2005): Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Universität Karlsruhe (TH) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung.

Re – liczba Reynoldsa obliczana ze związku $Re = \frac{v4R}{\nu}$ [-],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody [m^2/s],

R – promień hydrauliczny przekroju strumienia [m],

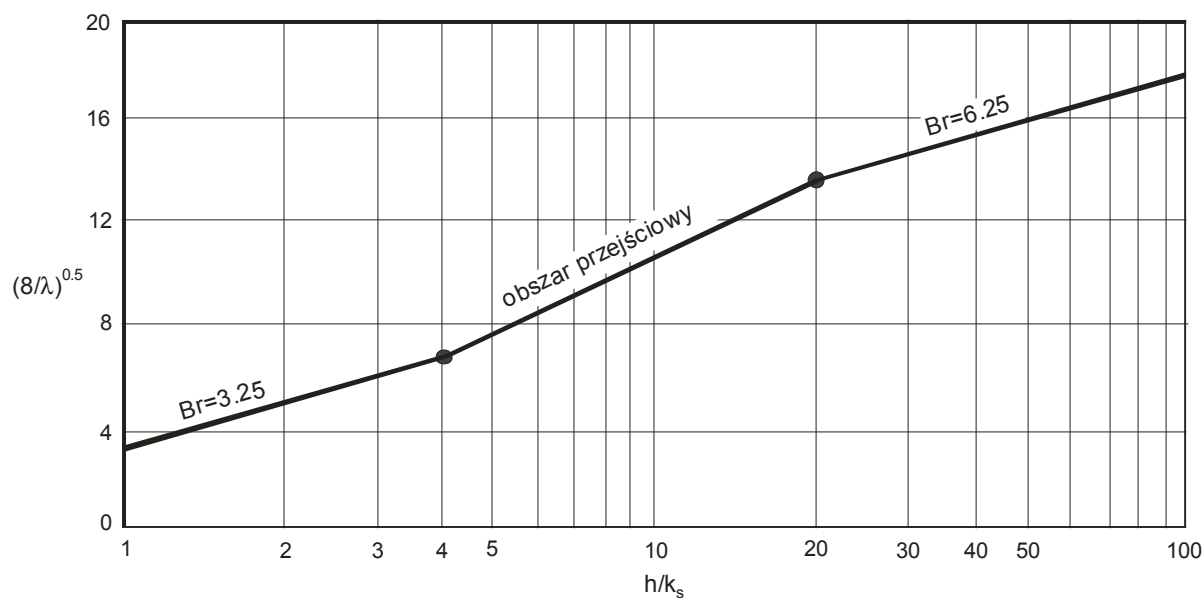
k_s – zastępcza piaskowa chropowatość powierzchni przewodu [m].

Współczesne badania wykazują, że opory dna i ścian koryta mogą być wyznaczone z zależności:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2.5 \ln\left(\frac{R}{k_s}\right) + Br \quad (1.2)$$

gdzie Br – współczynnik charakteryzujący opory przepływu w korycie, którego wartość uzależnia się od formy przepływu (rys. 1.2).

Zastępczą chropowatość piaskową określa się na podstawie charakterystycznych średnic ziaren i wysokości form dennych.



Rys. 1.2. Wartości współczynników oporów przepływu w korycie uzależnione od formy przepływu.

Przykładowe zależności do wyznaczania zastępczej chropowatości piaskowej zestawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Zależności do wyznaczania zastępczej chropowatości piaskowej³.

Autor (rok)	Wyrażenie dla k_s [mm]
Zanke (1982): - płaskie dno, jednolite uziarnienie - płaskie dno, zróżnicowane uziarnienie, brak spójności - wydmy - stożki usypowe	$k_s = d_{ch}$ $k_s = 2.5d_{50}$ lub $k_s = d_{90}$ $k_s \approx h_{wydmy}$ $k_s \approx h_{stożka}$
Garbrecht (1961)	$k_s = d_{90}$
Engelund i Hansen (1966)	$k_s = 2d_{65}$
Hey (1979)	$k_s = 3.5d_{84}$
Kamphuis (1974)	$k_s = 2d_{50}$
Mertens (1997)	$k_s = 2.5d_{50}$
Dittrich (1998)	$k_s = 3.5d_{84}$

d_{50} , d_{65} , d_{84} , d_{90} – średnice charakterystyczne / miarodajne do określania zastępczej chropowatości piaskowej.

Średnią prędkość przepływu wody w przekroju koryta oblicza się z empirycznie potwierdzonej zależności Darcy-Weisbacha:

$$v = \sqrt{\frac{8gRJ}{\lambda}} \quad (1.3)$$

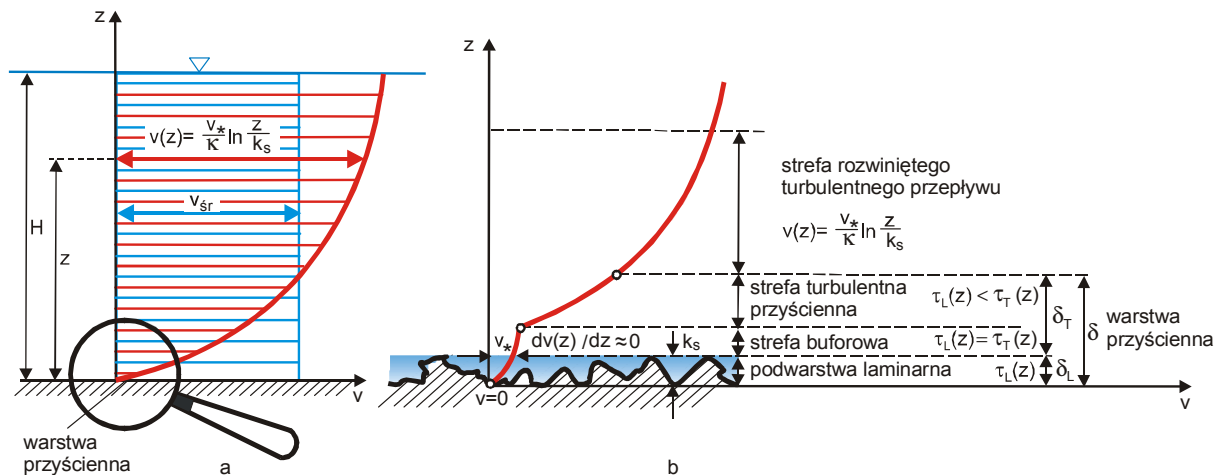
gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],

J – spadek hydrauliczny [-].

Określenie oporów przepływu w naturalnych korytach w praktyce utrudnia zróżnicowanie kształtu i struktury koryta. W obliczeniach hydraulicznych uwzględniać się winno ukształtowania brzegów i dna, układu koryta w planie, występowania w przekroju wysp odsypisk oraz struktur roślinnych. Opory niektórych z tych elementów nie doczekały się praktycznego opisu, np. oporów powstałych wskutek meandrowania, czy opływu wysp. Przy opisie oporów związanych z opóźnieniem / przyspieszeniem przepływu wywołanego interakcją strumieni wprowadza się umowne powierzchnie rozdziału złożonego przekroju. Prędkość wody w korycie na pozbawionej nierówności powierzchni dna wskutek sił adhezji jest równa zero, lecz szybko rośnie w obszarze o niewielkiej grubości δ . Obszar ten nazwany został przez Prandtla warstwą przyścienną (rys. 1.3).

³ KUBRAK E. (2007): Rozkłady prędkości wody w korytach otwartych z elementami symulującymi roślinność. Praca doktorska na Wydziale Inżynierii i Kształtowania Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.



Rys. 1.3. Zmiany prędkości wody wraz z głębokością przepływu nad gładkim dnem w korycie:
 a - logarytmiczny rozkład prędkości na głębokości w korycie, b - schemat zmian prędkości w warstwie przyściennej - bez zachowania skali⁴.

Prędkość cieczy tuż przy dnie jest bardzo mała i występuje tam podwarstwa laminarna. W turbulentnej warstwie przyściennej na skutek intensywnych zmian prędkości w kierunku poprzecznym do głównego kierunku ruchu występuje przeważająca część oporów ruchu. Rozkład prędkości nad dnem opisywany jest równaniem wyprowadzonym przez Prandtla, zwanym prawem logarytmicznego rozkładu prędkości na głębokości:

$$v(z) = \frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} \quad (1.4)$$

gdzie:

κ - stała Karmana,

v_* - prędkość dynamiczna (ścinająca) definiowana jako pierwiastek kwadratowy ze stosunku naprężeń stycznych przy dnie τ_0 do gęstości wody ρ :

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1.5)$$

Kryteria podziału roślin ze względu na warunki przepływu

Roślinność porastająca zwykle skarpy koryta i powierzchnię terenu zalewowego oddziałuje na warunki przepływu wody, zwiększając opory przepływu powstałe w następstwie opływu roślin. Rosną straty energii strumienia oraz następuje zmiana kierunku i rozkładu prędkości płynącej wody⁵. Wzrost strat energii strumienia wody powoduje wyraźne zmniejszenie prędkości przepływu i zdolności transportowej strumienia, co z kolei intensyfikuje proces sedymentacji rumowiska unoszonego i wleczonego.

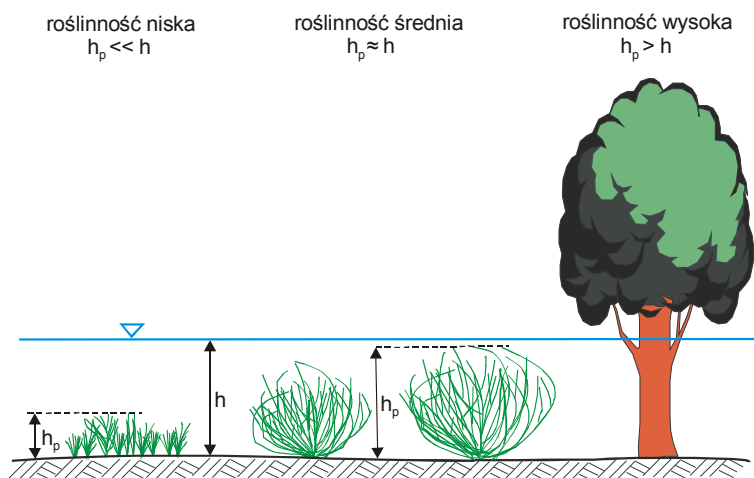
Przy opływie roślin w korycie większe znaczenie mają opory opływu bryły roślin niż chropowatości ich powierzchni. Ponadto w naturalnym przekroju poprzecznym koryta nie

⁴ Tamże.

⁵ Tamże, str. 5.

występują jednolite rozkłady prędkości, dlatego powstają dodatkowe naprężenia ścinające i opory przepływu. Dokładność metod obliczeń przepływu w korytach naturalnych zależy przede wszystkim od tego jak precyzyjnie opisane zostaną wszystkie składniki oporów przepływu pokazane na rysunku 1.1. Na opory przepływu wody wpływa rodzaj roślin, sposób ich ułożenia w przekroju, rozmieszczenie na powierzchni dna, sztywność, wysokość i gęstość roślin, średnica łodyg, a także spadek i nierówności powierzchni dna oraz głębokość przepływu wody. Istotne są także warunki opływu roślin, tzn., czy opływana roślinność jest całkowicie zatopiona, czy częściowo i jaki jest stan rozwoju opływanej roślinności.

Bretschneider i Schulz⁶ wprowadzili podział roślinności w zależności od relacji pomiędzy jej wysokością, a głębokością przepływu wody. Jako roślinność wysoką określili roślinność wyższą niż głębokość przepływu (rys. 1.4) i w niewielkim stopniu ulegającą ugięciu pod wpływem parcia dynamicznego wody. Warunek ten najlepiej spełniają drzewa i makrofity. Roślinność, której wysokość jest nieco mniejsza od głębokości wody, nazwano roślinnością średnią. Określenie to najczęściej dotyczy krzewów. Roślinność o wysokości wyraźnie mniejszej niż głębokość przepływu została określona jako niska. Ostatnie określenie stosuje się przede wszystkim do roślinności trawiastej. Zaproponowane kryterium podziału roślinności może wydawać się niejednoznaczne, gdyż w praktyce, przy naturalnej zmienności głębokości przepływu tę samą roślinność, można określać w różny sposób⁷. Jednakże u jego podstaw leży hydrauliczna analiza zjawiska przepływu wykorzystywana w opisie przepływu wody, co oznacza, że sposób opisu rozkładu prędkości na głębokości będzie uzależniony od relacji między głębokością przepływu a wysokością roślin. Każde z tych określeń można stosować do scharakteryzowania wprowadzonych uprzednio typów roślinności.



Rys. 1.4. Zaproponowana przez Bretschneidera i Schulza⁸ klasyfikacja opływanej roślinności.

Analizując zachowanie się roślin podczas przepływu wody można ją podzielić na:

- sztywną (brak ugięcia),
- sprężystą (występowanie ugięcia),
- gładką (ugięcie trwałe).

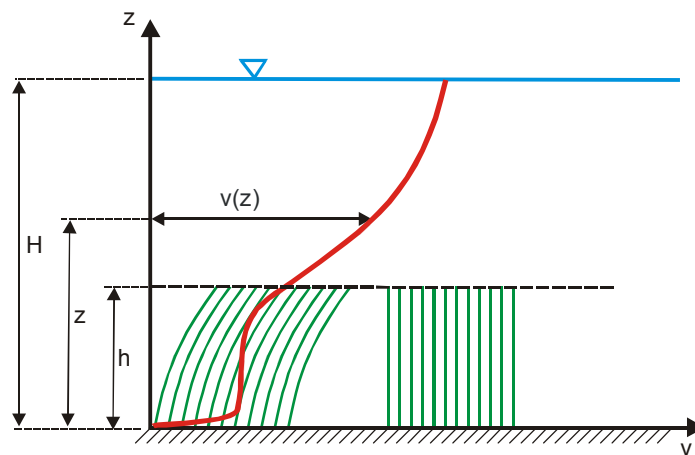
⁶ BRETSCHNEIDER H., SCHULZ A. (1985): Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerausbau. DVWK - Schriften, Heft 72.

⁷ Tamże, str. 5.

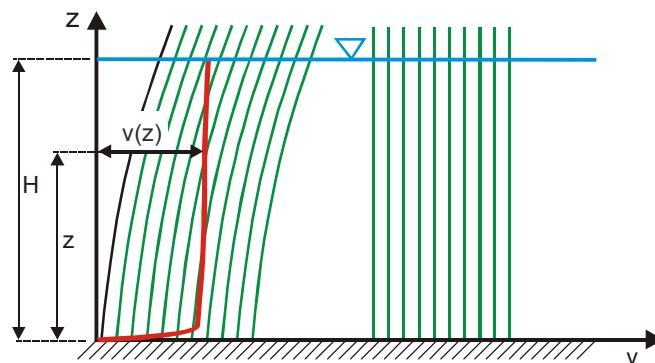
⁸ Tamże.

Opory opływu roślinności wysokiej, sztywnej i sprężystej (nie zatopionej) są w głównej mierze związane z oporami opływanej bryły roślin.

Opory przepływu przy opływie wysokiej, średniej lub niskiej roślinności (zatopionej) sprężystej i sztywnej określone są na podstawie charakterystyk bryły roślin. W przypadku roślinności niskiej gładkiej nie określa się oporów przepływu w obszarze z roślinnością, gdyż zwykle pomija się przepływ wody w obszarze z tą roślinnością. Natomiast obecność tej roślinności w korycie uwzględnia się w ocenie nierówności powierzchni przekroju utworzonej przez trwale ugięte rośliny, nad którymi odbywa się przepływ wody. Rozkład prędkości w pionie z roślinnością niską charakteryzuje się występowaniem obszaru przepływu kształtowanego przez tę roślinność i logarytmicznym rozkładem prędkości ponad nią (rys. 1.5). Rozkład prędkości na głębokości w obszarze przepływu z roślinnością wysoką nie podlega logarytmicznemu prawu rozkładu, gdyż prędkość nie zmienia się wraz z głębokością (rys. 1.6).



Rys. 1.5. Rozkład prędkości w obszarze z niską, bądź średnią roślinnością sztywną i sprężystą⁹.



Rys. 1.6. Rozkład prędkości w obszarze z wysoką roślinnością sztywną i sprężystą¹⁰.

Przyjmując przedstawiony schemat podziału roślinności, Rouvé¹¹ zaproponował hydrauliczną parametryzację geometrycznych cech roślinności średniej i wysokiej. Opiera się ona na równości sił w kierunku przepływu z uwzględnieniem różnorodnych form struktury roślinnej. Charakterystykę hydrauliczną tego typu roślinności zbudowano na potwierdzonym

⁹ Tamże, str.5.

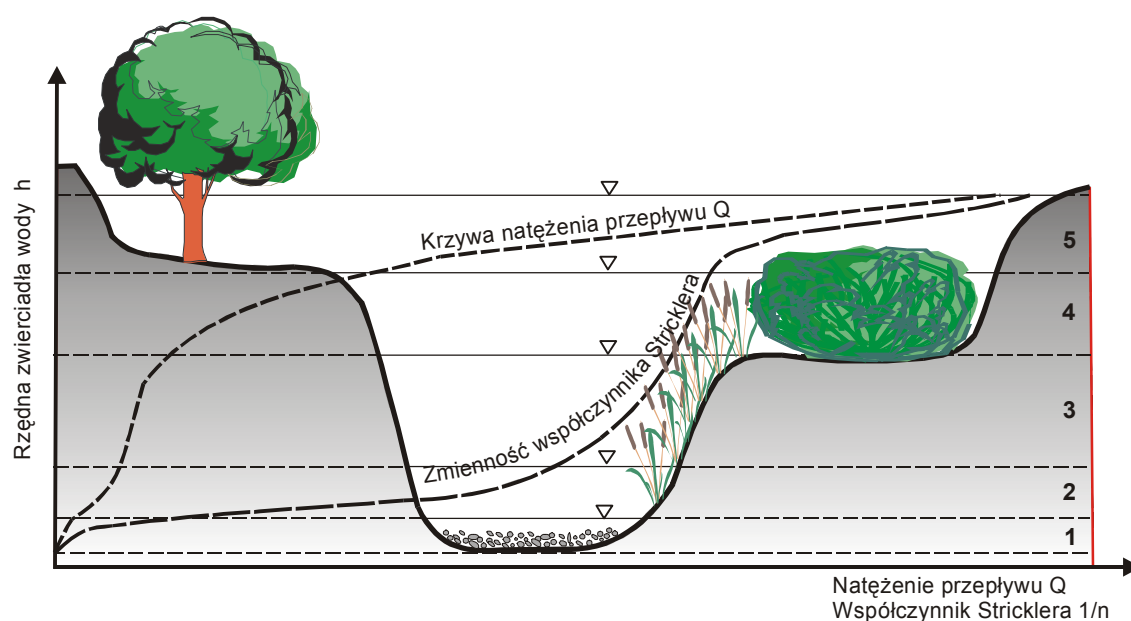
¹⁰ Tamże, str. 5.

¹¹ ROUVE G. (1987): Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Band 2.

doświadczalnie założeniu, że opory przepływu nieregularnie rozmieszczonych roślin wysokich można obliczyć w założeniu regularnie rozmieszczonych tej samej liczby roślin o uśrednionych parametrach geometrycznych Pasche¹², Kubrak, Koziol¹³. Charakterystyczne parametry roślinności określa się na podstawie inwentaryzacji i bezpośrednich pomiarów z uwzględnieniem etapu rozwoju roślin. Przy zróżnicowanych strukturach roślinnych podanie charakterystycznych parametrów roślinności związane jest z problemami natury metodycznej. Dlatego w praktyce zaleca się typizację roślinności o wymienione kryterium głębokości przepływu i wysokości rośliny.

Opis przepływu wody w korycie o złożonym przekroju

Zmienność przepustowości i oporów przepływu w przekroju naturalnego koryta charakteryzowanych współczynnikiem Stricklera (odwrotność współczynnika Manninga) pokazano na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Zmienność przepustowości i oporów przepływu w przekroju naturalnego koryta charakteryzowanych współczynnikiem Stricklera¹⁴.

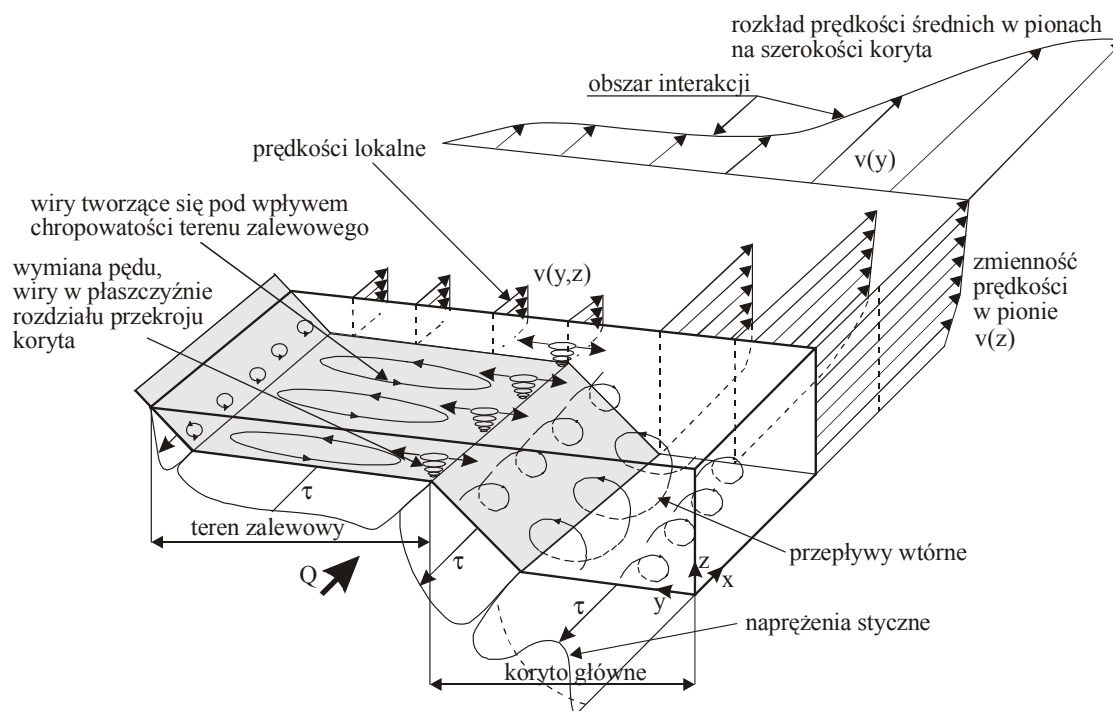
Przepływ wody w obszarze z roślinnością ma charakter trójwymiarowy (rys. 1.8). Zbudowanie trójwymiarowego opisu przepływu wody w warunkach ruchu turbulentnego opartego na równaniach Naviera-Stoksa jest możliwe, lecz jego wykorzystywanie w praktyce nie jest ekonomicznie uzasadnione, głównie ze względu na konieczność użycia komputerów o odpowiednio dużej mocy obliczeniowej¹⁵. Z tego powodu do opisu przepływu nadal wykorzystuje się jednowymiarowe równania, ustalonego przepływu wody z uwzględnieniem występującej roślinności w obszarze przepływu i charakterystyk hydraulicznych koryta.

¹² PASCHE E. (1984): Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematischen Erfassung. Mitteilungen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 52.

¹³ KUBRAK J., KOZIOL A., (2001): Wyniki obliczeń prędkości w przekroju dwudzielnym z drzewami w terenie zalewowym. Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska, z.23, s.3-11.

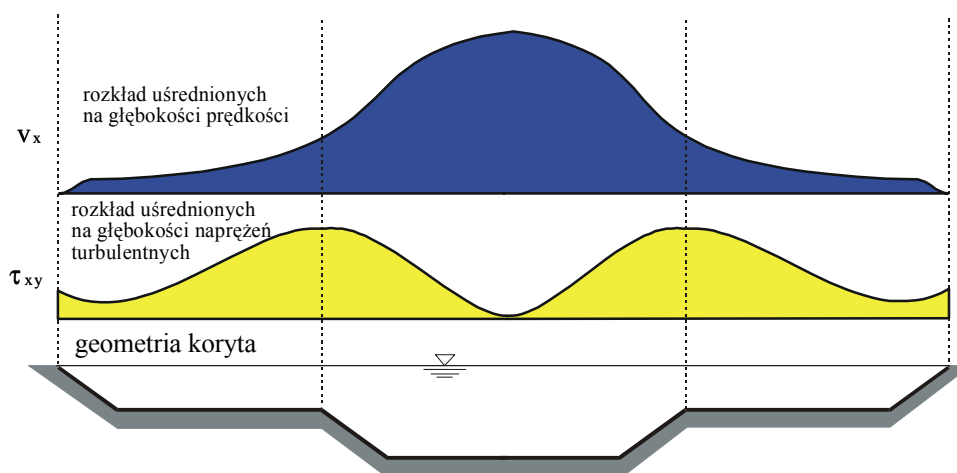
¹⁴ Tamże, str. 3.

¹⁵ MOIN P., KIM J. (1997): Superkomputery zmagają się z turbulencją. Świat Nauki, s.48-54.



Rys. 1.8. Struktura strumienia w korycie o złożonym przekroju poprzecznym¹⁶.

Dla uproszczonego opisu turbulentnego przepływu wody w złożonym przekroju i uniknięcia konieczności stosowania modeli turbulencji dla wyrażenia naprężeń Reynoldsa, dzieli się poprzeczny przekrój strumienia na podobszary, na granicy których określa się naprężenia turbulentne, jako tzw. naprężenia pozorne (rys. 1.9). Oznacza to, że opis procesu przepływu strumienia w korycie o złożonym przekroju i zmiennej chropowatości powierzchni dna i skarp nie odnosi się do całego przekroju strumienia, lecz jest tworzony dla każdego z podobszarów przekroju. Jednakże procesy przepływu w każdej takiej części są od siebie wzajemnie uzależnione, więc fakt ten, musi być uwzględniony w wyprowadzanych zależnościach.



Rys. 1.9. Rozkład prędkości i naprężeń turbulentnych w złożonym przekroju poprzecznym koryta¹⁷.

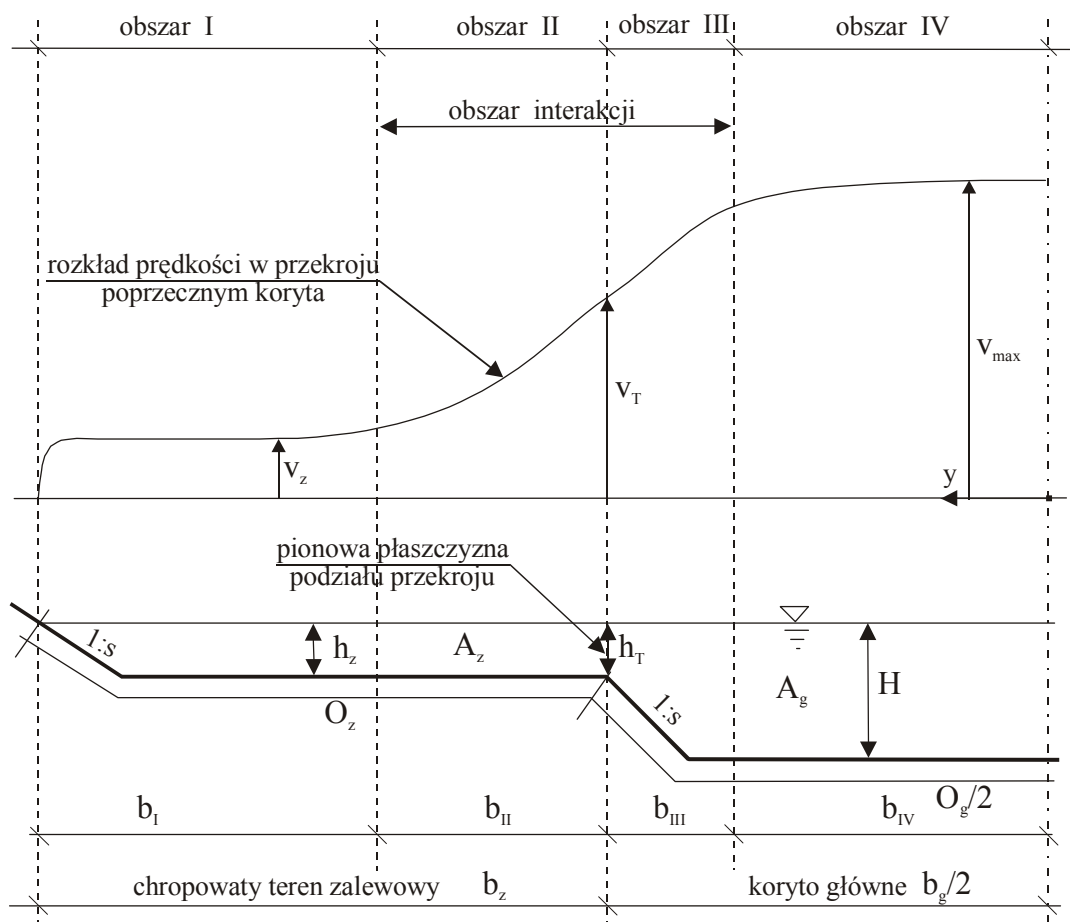
¹⁶ SHIONO K., KNIGHT D.W. (1991): Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 222, s.617-646.

¹⁷ Tamże, str. 10.

Analizując zmianę uśrednionej na głębokości składowej prędkości w kierunku przepływu w złożonym przekroju poprzecznym koryta wydzieliła się zwykle obszary pokazane na rys. 1.10¹⁸:

- obszar I – przepływ w terenie zalewowym niezakłócony przez przepływ w korycie głównym,
- obszar II – przepływ w terenie zalewowym przyspieszony przez przepływ w korycie głównym,
- obszar III – przepływ w korycie głównym opóźniony przez przepływ w terenie zalewowym,
- obszar IV – przepływ w korycie głównym niezakłócony przez przepływ w terenie zalewowym.

Szerokość obszaru II i III nazywa się zasięgiem występowania interakcji przepływu w terenie zalewowym i korycie głównym.



Rys. 1.10. Rozkład prędkości wody w złożonym przekroju poprzecznym koryta.

¹⁸ NUDING A. (1991): Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch. Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt, Heft 35.

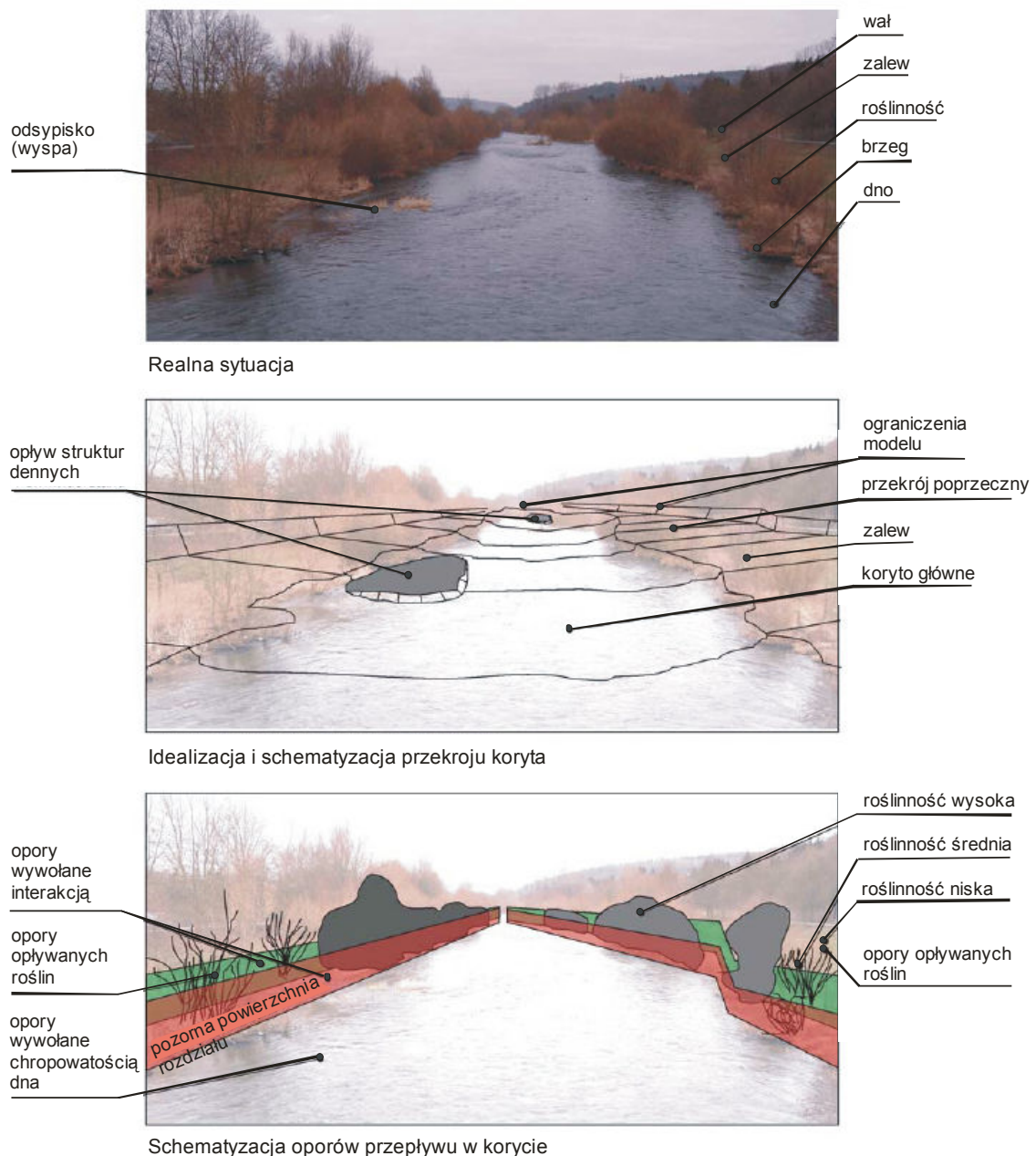
2. Jednowymiarowe modele prowadzenia obliczeń przepustowości koryta uwzględniające wpływ typu roślin na przepustowość koryta.

Podstawą jednowymiarowych metod obliczania przepustowości są zależności na prędkość przepływu wody uzupełnione o fizyczne, bądź półempiryczne zależności do określania hydraulicznych parametrów strumienia. Zdefiniowane zostały granice ważności tych zależności oraz wskazano na możliwość ich stosowania w warunkach idealizacji i schematyzacji rzeczywistego obszaru przepływu. Wskutek idealizacji obszaru przepływu w złożonym korycie z roślinnością tworzy się abstrakcyjny obszar przepływu z regularnie rozmieszczonymi cylindrycznymi elementami symulującymi roślinność w obszarze przepływu. Obliczenia przepustowości złożonego przekroju koryta porośniętego roślinnością przeprowadza się w 3 krokach:

- idealizacja i schematyzacja przekroju do jednowymiarowego przepływu,
- opis oporów przepływu,
- obliczenie przepustowości.

Idealizacje przepływu w korytach do obliczeń jednowymiarowych prowadzi się poprzez przygotowanie danych geometrycznych, tzn. przekrojów poprzecznych koryta dobranych w taki sposób, aby ich powierzchnia i odległości między nimi pozwalały obliczyć objętość naturalnego koryta. Przykład idealizacji i schematyzacji naturalnego koryta pokazano na rysunku 2.1.

Schematyzację oporów przepływu prowadzi się poprzez określenie oporów powierzchni dna i skarp koryta. Współczynniki oporów powierzchni dna i skarp oblicza się na podstawie zastępczej chropowatości piaskowej. W przypadku gładkiego dna chropowatość jego powierzchni ustala się na podstawie analizy sitowej gruntu. W przypadku opancerzenia dna lub występowania form dennych ustalenie takie może być dość trudne.



Rys. 2.1. Idealizacja i schematyzacja koryta i oporów przepływu w korycie¹⁹.

Przepływ wody w częściach złożonego przekroju koryta

Natężenie przepływu wody w korycie określić można na podstawie bezpośrednich pomiarów lub obliczeń prowadzonych w założeniu ustalonego jednostajnego przepływu w korycie. Ten drugi sposób ma szczególne znaczenie w praktyce projektowej. W wydzielonych częściach złożonego przekroju koryta do obliczania prędkości wykorzystuje się zależność na prędkość przepływu wody jak w korytach o zwartym przekroju poprzecznym. Obliczenia średniej prędkości przepływu w korytach prowadzi się zwykle zależnościami potęgowymi lub na podstawie uniwersalnego prawa przepływu.

¹⁹ Tamże, str. 3.

Wykorzystywanie zależności potęgowych do obliczania średniej prędkości przepływu w korytach otwartych ma swoją długą tradycję^{20,21}. Cechą wspólną wspomnianych zależności jest empiryczny charakter i prosta struktura, co bardzo ułatwia obliczenia. Współcześnie wykorzystywana jest przez inżynierów do obliczania prędkości przepływu wody, obok już wspomnianej zależności Darcy, zależność Gaucklera – Manninga – Stricklera zapisywana w postaci:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{RJ} \quad (2.1)$$

$$v = k_{St} R^{2/3} J^{1/2} \quad (2.2)$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (2.3)$$

gdzie:

R – promień hydrauliczny przekroju strumienia w korycie [m],

k_{St} – współczynnik szorstkości koryta wprowadzony przez Stricklera [$m^{1/3}/s$],

n – współczynnik szorstkości koryta wprowadzony przez Manninga [$m^{-1/3}s$],

J – spadek linii energii przyjmowany jako równy spadkowi dna i w warunkach ustalonego jednostajnego przepływu $J = i$ [-],

v – średnia prędkość przepływu [m/s].

Współczynnik szorstkości koryta wprowadzony przez Stricklera wyrażony jest zależnością:

$$k_{St} = \frac{26}{k_s^{1/6}} \quad (2.4)$$

gdzie k_s jest zastępczą chropowatością piaskową powierzchni koryta [m].

W krajach anglojęzycznych stosuje się w miejsce współczynnika szorstkości Stricklera współczynnik szorstkości Manninga. Oba współczynniki powiązane są zależnością:

$$k_{St} = \frac{1}{n} \quad (2.5)$$

n – współczynnik szorstkości koryta do wzoru Manninga [$m^{-1/3}s$].

Związek między bezwymiarowym współczynnikiem oporów λ , a współczynnikiem Manninga ma postać:

²⁰ HAGER W.H., (1992): Fließformeln in Rauherinnen. Wasserwirtschaft, Wassertechnik, Dez. 1992, s.381-384.

²¹ KUBRAK J. (1998): Hydraulika techniczna. Wydawnictwo SGGW w Warszawie, s.378.

$$\lambda = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \quad (2.6)$$

Wykorzystując zależności (2.2) - (2.3) Gaucklera –Manninga – Stricklera do obliczeń średniej prędkości przepływu w korytach należy pamiętać o ich ograniczeniach²²:

- wprowadzone współczynniki szorstkości nie uwzględniają lepkości wody, więc zależności (2.2) – (2.3) są ważne jedynie w strefie hydraulicznie szorstkiego przepływu,
- współczynniki szorstkości nie uwzględniają relacji pomiędzy chropowatością powierzchni koryta i głębokością przepływu w korycie, tzw. chropowatości względnej koryta,
- współczynniki szorstkości k_{st} oraz n nie są bezwymiarowe i są wyznaczone dla jednego określonego napełnienia w korycie,
- promień hydrauliczny nie jest wystarczającą charakterystyką kształtu przekroju strumienia, więc wyznaczone współczynniki szorstkości odnoszą się do określonego kształtu przekroju koryta.

Z wyżej wymienionych względów do obliczania średniej prędkości przepływu w korytach zostało zapożyczony z hydrauliki przewodów zamkniętych uniwersalne prawo przepływu. Wyprowadzono je na podstawie teorii Prandtla o tzw. drodze mieszania. Hydrauliczne warunki przepływu w przewodach scharakteryzowano bezwymiarowym współczynnikiem oporów λ wyznaczanym z zależności podanej przez Colebrooka i White'a²³:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s / 4R}{3,71} \right) \quad (2.7)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa obliczana ze wzoru $\text{Re} = \frac{v4R}{\nu}$ [-],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody [m^2/s],

k_s – bezwzględna chropowatość powierzchni przewodu, odpowiadająca zastępczej chropowatości piaskowej [m].

Z zależności (2.7) wynika, że współczynnik oporów λ w przewodach zamkniętych jest uzależniony od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej ich powierzchni $k_s/4R$. Opory w hydraulicznie gładkim obszarze przepływu ($k_s \approx 0$) zależą od lepkości cieczy i dlatego w zależności (2.7) pomijany jest składnik $\frac{k_s / 4R}{3,71}$:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.7a)$$

²² NAUDASCHER E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. Springer-Verlag, Wien, 2. Aufl.

²³ Tamże.

Opory w hydraulicznie szorstkim obszarze przepływu uzależnione są przede wszystkim od chropowatości względnej powierzchni koryta ($Re \rightarrow \infty$, więc składnik $\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \approx 0$) i zależność

(2.4) upraszcza się do postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k_s / 4R}{3.71} \right) \quad (2.7b)$$

Zależności (2.1) i (2.7) nazywane są uniwersalnym prawem przepływu. Wyznaczane z zależności (2.7) współczynniki oporów przepływu w korycie wymagają jednak powiązania z kształtem przekroju i strukturą chropowatości powierzchni koryta. Wpływ tych dwóch czynników nie został uwzględniony w pełni w zależności Colebrooka–White’a. Pomimo tych niedoskonałości, uniwersalne prawo przepływu jest stosowane także w hydraulice koryt otwartych, gdyż:

- współczynniki oporów λ wyrażone zależnością (2.7) uwzględniają wpływ lepkości wody i chropowatości ścian,
- współczynniki oporów λ są bezwymiarowe i umożliwiają poprzez ich sumowanie uwzględnienie dodatkowych oporów wywołanych np. roślinami porastającymi koryto i opisanych dodatkowymi modelami.

Porównanie obliczanych współczynników oporu i prędkości przepływu w korytach (strefa hydraulicznie szorstkiego przepływu)

Przyczyną rozbieżności w obliczanych wartościach prędkości są różnice w wartościach współczynników oporu/szorstkości. W celu znalezienia zależności pomiędzy współczynnikami szorstkości ze wzoru Stricklera i współczynnikami oporów w strefie przepływu hydraulicznie szorstkiego przekształcono zależność Stricklera (2.2), (2.4) do postaci:

$$\begin{aligned} v_{St} &= \frac{26}{k_s^{1/6}} R^{2/3} J^{1/2} = 26 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/6} R^{1/2} J^{1/2} = \frac{26}{4^{1/6} (8g)^{1/2}} \left(\frac{4R}{k_s} \right)^{1/6} (8g)^{1/2} R^{1/2} J^{1/2} = \\ &= \frac{2.33}{(k_s / 4R)^{1/6}} \sqrt{8gRJ} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Przez porównanie zależności (2.1) i (2.8) wyrażono współczynnik oporów w funkcji chropowatości względnej powierzchni koryta według wzoru Stricklera:

$$\frac{2.33}{(k_s / 4R)^{1/6}} = \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (2.9)$$

to znaczy:

$$\lambda_{St} = 0.184 \left(\frac{k_s}{4R} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

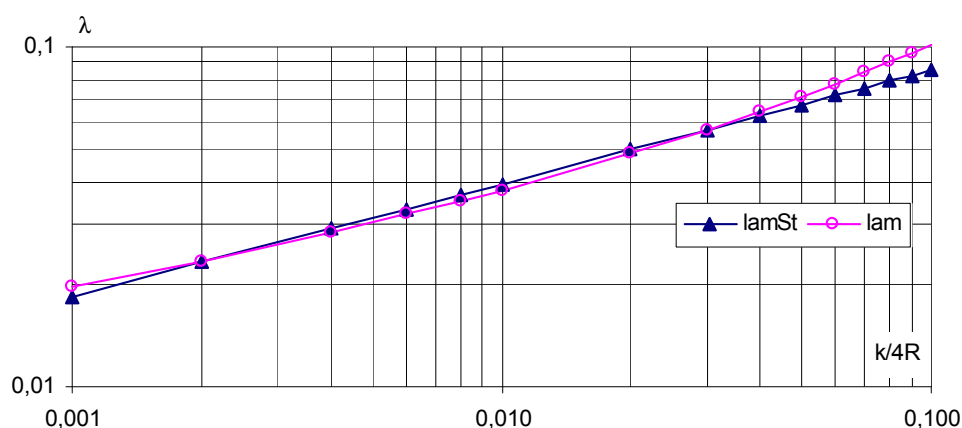
Natomiast współczynnik oporów λ do wzoru Darcy-Weisbacha wyznaczono w obszarze hydraulicznie szorstkiego przepływu z zależności (2.7b):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k_s / 4R}{3.71} \right) \quad (2.7b)$$

skąd wyznaczono:

$$\lambda = \frac{1}{\left[-2 \lg \left(\frac{k_s / 4R}{3.71} \right) \right]^2} \quad (2.11)$$

Wartości współczynników oporów obliczone z zależności (2.10) i (2.11) przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Współczynniki oporów w strefie hydraulicznie szorstkiego przepływu obliczone ze wzoru Stricklera (lamSt) i zależności Colebrooka-White'a (lam) wyrażone w funkcji chropowatości względnej koryta - $k_s/4R$ ²⁴.

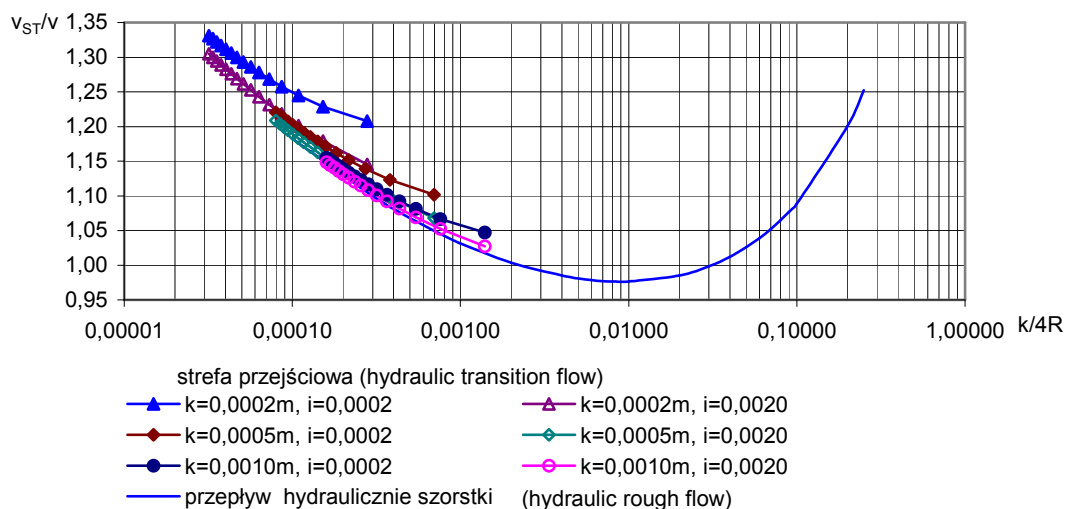
Jak wynika z rys. 2.2 wartości współczynników oporów obliczane ze wzoru Colebrooka-White'a są w strefie hydraulicznie szorstkiego przepływu wyższe od wartości współczynników oporu, odpowiadających wartościom szorstkości we wzorze Stricklera dla $k_s / 4R < 0.002$ lub $k_s / 4R > 0.030$. Natomiast współczynniki oporów obliczone z obu wzorów są zbliżone dla chropowatości względnych $k_s / 4R \in < 0.002; 0.030 >$.

Ogólna analiza porównawcza wartości prędkości oraz współczynników oporu obliczanych w korycie ze wzoru Stricklera i z uniwersalnego prawa przepływu jest możliwa jedynie w obszarze hydraulicznie szorstkiego przepływu. Stosunek prędkości średnich obliczanych wzorem Stricklera (2.2), (2.4) – v_{st} i Darcy-Weisbacha (2.1), (2.11) – v można wrazić w postaci:

²⁴ KUBRAK E. (2005): O obliczaniu przepustowości koryt. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Nr 1 (31), s. 29-38.

$$\frac{v_{St}}{v} = \frac{\frac{26}{(k_s/R)^{1/6}} \sqrt{RJ}}{2 \lg \frac{14.84}{k_s/R} (8g)^{1/2} \sqrt{RJ}} = \frac{1.467}{\left(\frac{k_s}{R}\right)^{1/6} \lg \frac{14.84}{k_s/R}} \quad (2.13)$$

Zmienność stosunku prędkości średnich wyrażonych wzorem Stricklera i Darcy-Weisbacha w strefie hydraulicznie szorstkiego przepływu w zależności od chropowatości względnej $k_s/4R$ pokazano na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Stosunek prędkości średniej obliczonej wzorem Stricklera v_{St} i Darcy-Weisbacha v w funkcji chropowatości względnej powierzchni koryta $k_s/4R$ w obszarze przepływu przejściowego i hydraulicznie szorstkiego²⁵.

Z rys. 2.3 wynika, że w strefie przepływu hydraulicznie szorstkiego, dla chropowatości względnych $k_s/4R \in (0.002; 0.030)$ wartości prędkości średnich obliczone wzorem Stricklera są do ok. 3 % mniejsze od otrzymanych z zależności Darcy-Weisbacha. Relacja pomiędzy obliczonymi prędkościami zmienia się dla chropowatości względnych powierzchni przy $k_s/4R < 0.002$ lub $k_s/4R > 0.030$. Prędkości średnie obliczone wtedy wzorem Stricklera są większe od wartości otrzymanych ze wzoru Darcy-Weisbacha, a maksymalne różnice mogą przekraczać nawet 20%. Podsumowując można stwierdzić, że w strefie przepływu hydraulicznie szorstkiego dla $0.001 < k_s/4R < 0.050$ różnice w obliczonych wartościach prędkości wahają się w przedziale $-3\% < v_{St}/v < 3\%$.

Przepływ wody w korycie z terenami zalewowymi porośniętym drzewami

U podstaw obliczeń przepustowości koryt o przekrojach złożonych i terenach zalewowych porośniętych roślinnością wysoką leży analiza warunków przepływu w przekroju poprzecznym koryta i wydzielenie obszarów przepływu kształtowanych pod dominującym wpływem szorstkości skarp i dna koryta, oporów opływu roślinności wysokiej i obszarów przejściowych pomiędzy nimi. Złożony przekrój poprzeczny koryta zostaje podzielony pionowymi płaszczyznami rozdziału na koryto główne i tereny zalewowe. Wysokość

²⁵ Tamże.

plaszczynn rozdziału uwzględnia się w obwodzie zwilżonym koryta głównego. Średnią prędkość przepływu w każdym obszarze oblicza się z równania Darcy-Weisbacha (2.1). Opory przepływu wywołane chropowatością skarp i dna koryta oblicza się ze wzoru (2.7) podanego przez Colebrooka-White'a. Jak wynika z prawa Colebrooka-White'a, współczynniki oporów przepływu λ_s zależą od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej k_s/R . Wpływ liczby Reynoldsa na współczynniki oporów zmniejsza się wraz ze wzrostem jej wartości i chropowatości względnej poboczniczy koryta. W korytach naturalnych względna chropowatość jest tak duża, że wpływ liczby Reynoldsa można pominąć bez uszczerbku dla dokładności obliczeń. Dlatego Rickert²⁶ zaleca stosować ostatnie równanie w obliczeniach praktycznych w postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_s}} = -2.03 \lg \left(\frac{k_s}{14.84 R_{hy}} \right) \quad (2.7b)$$

Współczynnik oporów skarp i dna koryta o chropowatości k_s oblicza się wtedy z przekształconego wzoru (2.7b).

W porośniętych roślinnością częściach przekroju koryta opory przepływu uzależnione są zarówno od roślinności jak i chropowatości dna. Współczynnik oporów w tym obszarze, zgodnie z koncepcją Einsteina i Banksa, jest sumą, tzn.:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_v \quad (2.14)$$

gdzie:

λ – średni współczynnik oporów w części przekroju koryta [-],

λ_s – współczynnik oporów wywołany chropowatością dna koryta [-],

λ_v – współczynnik oporów wywołany opływem roślinności wysokiej [-].

Oznaczenia i symbole przyjęto jak w oryginalnych opracowaniach dotyczących omawianych zagadnień. Współczynniki oporów dla roślinności wysokiej λ_v były przedmiotem m.in. badań Kaisera²⁷, Lindnera²⁸ i Pasche²⁹. W obszarze z drzewami λ_v oblicza się na podstawie oporów powstałych przy opływie drzew odniesionych do powierzchni całego zalewu koryta w planie:

$$\lambda_v = \frac{4h_p d_p}{a_x a_y} C_{WR} \cos \alpha \quad (2.15)$$

gdzie:

²⁶ RICKERT K. (1986): Der Einfluss von Gehölzen auf das Abflussverhalten in Fliessgewässern. Mitteilungen, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 61.

²⁷ KAISER W. (1984): Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten UFERGEHÖLZEN, Wasserbau - Mitteilungen der TH Darmstadt.

²⁸ LINDNER K. (1982): Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Mitteilungen Leichtweiss - Institut für Wasserbau, Heft 75, Technische Universität Braunschweig.

²⁹ PASCHE E., dz. cyt.

h_p – wysokość zanurzonej części drzew [m],

d_p – średnica drzew [m],

α – kąt nachylenia dna w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu,

a_x – odległość między drzewami w kierunku przepływu,

a_y – odległość między drzewami w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu,

C_{WR} – bezwymiarowy współczynnik oporów dla opływu drzew.

Współczynnik oporów C_{WR} jest zależny od stosunku prędkości dopływającej V_i do średniej prędkości przepływu w obszarze z drzewami V_v , jak i wysokości fal powstałych na powierzchni wody przy opływie drzew:

$$C_{WR} = \left(1.1 + 2.3 \frac{d_p}{a_y} \right) \left(\frac{V_i}{V_v} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{1 - d_p / a_y} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Pasche³⁰ podał empiryczną zależność na względną prędkość dopływającej wody do drzewa, którą Rickert³¹ uprościł do postaci:

$$\left(\frac{V_i}{V_v} \right)^2 = 0.6 + 0.5 \lg \left(\frac{a_x}{a_z} \right) \quad (2.17)$$

Obliczanie natężenia przepływu w terenie zalewowym wymaga określenia szerokości tego obszaru. W tym celu oblicza się długość a_{NL} i szerokość a_{NB} ścieżki Karmana przy opływie pojedynczego drzewa:

$$a_{NL} = 128.87 C_{W\infty} d_p \left(1 + \frac{g a_{NL} J}{V_T^2 / 2} \right)^{-2.143} \quad (2.18)$$

$$a_{NB} = 0.24 a_{NL}^{0.59} (C_{W\infty} d_p)^{0.41} \quad (2.19)$$

gdzie:

a_{NL} – długość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczej rośliny / drzewa [m],

a_{NB} – szerokość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczej rośliny / drzewa [m],

J – spadek hydrauliczny.

³⁰ PASCHE E., dz. cyt.

³¹ RICKERT K. (1986): Der Einfluss von Gehölzen auf das Abflussverhalten in Fließgewässern. Mitteilungen, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 61.

Współczynnik oporu $C_{W\infty}$ wyznaczany jest dla pojedynczego drzewa przy idealnie dwuwymiarowym przepływie. Jego zmienność dla różnych form turbulentnego przepływu podał Lindner³² w postaci równań:

$$C_{W\infty} = 3.07 \text{Re}_p^{-0.1680} \quad \text{dla } \text{Re}_p = \frac{V_v d_p}{\nu} < 800 \quad (2.20)$$

$$C_{W\infty} = 1.0 \quad \text{dla } 800 \leq \text{Re}_p \leq 8000 \quad (2.21)$$

$$C_{W\infty} = 1.2 \quad \text{dla } 8000 < \text{Re}_p < 10^5 \quad (2.22)$$

gdzie:

Re_p – liczba Reynoldsa dla pojedynczej rośliny [-],

ν – współczynnik lepkości kinematycznej [m^2/s].

Ze względu na występowanie we wzorze (2.18) prędkości V_T w płaszczyźnie rozdziału złożonego przekroju obliczenia prowadzi się zakładając wartość V_T , przy czym $V_T > V_v$, a następnie oblicza się współczynnik porośnięcia:

$$\Omega = \left(0.07 \frac{a_{NL}}{a_x} \right)^{3.29} + \left(\frac{a_{NB}}{a_y} \right)^{0.95} \quad (2.23)$$

Bezwymiarową prędkość w płaszczyźnie rozdziału oblicza się ze wzoru:

$$C_T = -3.27 \lg \Omega + 2.85 \quad (2.24)$$

Szerokość strefy oddziaływania przepływu w korycie głównym na przepływ w terenie zalewowym oblicza się z zależności:

$$b_m = \frac{h_T}{\lambda_v (0.068 e^{0.56 C_T} - 0.056)} \quad (2.25)$$

gdzie:

h_T – głębokość w płaszczyźnie rozdziału terenu zalewu od głównego przekroju koryta [m],

C_T – bezwymiarowa prędkość w płaszczyźnie rozdziału.

Przy obliczaniu przepływu w korycie głównym traktuje się płaszczyznę rozdziału terenu zalewu od koryta głównego jak szorstką ścianę o chropowatości koryta k_T i współczynnika oporów λ_T . W rzeczywistości opory te wywołane są intensywnymi cyklicznymi impulsami masy i pędu w kierunku poprzecznym do głównego kierunku przepływu i towarzyszącymi im wysokimi naprężeniami turbulentnymi oraz zawirowaniami na powierzchni wody przy opływie drzew. Chropowatość w płaszczyźnie rozdziału oblicza się ze wzoru:

³² Tamże.

$$k_T = 0.854 R_{y,T} \Omega \left(1.7 \frac{2b_m}{b_k} \right)^{1.07} \quad (2.26)$$

gdzie:

$R_{y,T}$ – promień hydrauliczny odnoszący się do oporu stawianego przez płaszczyznę rozdziału [m],

b_m – szerokość strefy oddziaływania obszaru z drzewami na obszar bez drzew [m],

b_k – szerokość koryta głównego [m].

Występowanie różnych chropowatości i współczynników oporu w korycie głównym wymaga obliczenia średniego współczynnika oporów i rozdziału promienia hydraulicznego koryta głównego według koncepcji Einsteina zakładającej równość prędkości średniej w każdym podobszarze koryta głównego:

$$R_{y,i} = \frac{\lambda_i}{\lambda} R_{y,F} \quad (2.27)$$

gdzie:

λ_i – współczynnik oporów części przekroju o promieniu hydraulicznym R_i ,

$R_{y,F}$ – promień hydrauliczny koryta głównego liczony z uwzględnieniem długości płaszczyzn rozdziału h_T w obwodzie zwilżonym.

Obliczanie promienia hydraulicznego przypadającego dla różnych chropowatości w przekroju prowadzi się metodą kolejnych iteracji. Z zależności (2.27) oblicza się promień hydrauliczny w płaszczyźnie rozdziału $R_{y,T}$, a następnie zastępczą wysokość chropowatości w płaszczyźnie rozdziału k_T ze wzoru (2.26) i współczynnik oporów λ_T ze wzoru (2.7b). Średni współczynnik oporów w całym korycie głównym λ oblicza się uwzględniając współczynnik oporów przepływu dna λ_s i λ_T w płaszczyźnie rozdziału przekroju:

$$\lambda = \frac{2\lambda_T h_T + 2\lambda_s l_s}{2h_T + l_s} \quad (2.28)$$

gdzie:

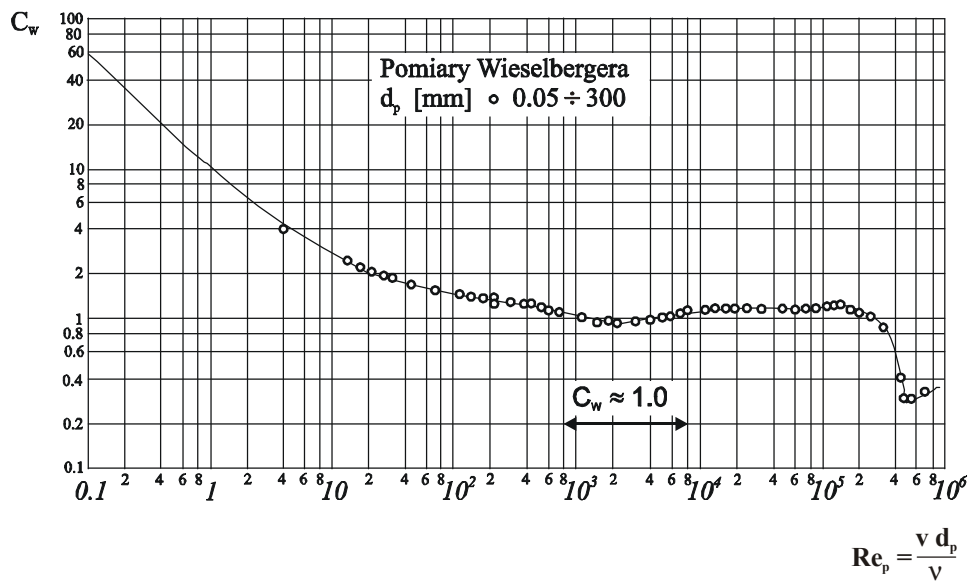
l_s – obwód zwilżony koryta głównego,

λ_s – współczynnik oporów dna i skarp koryta.

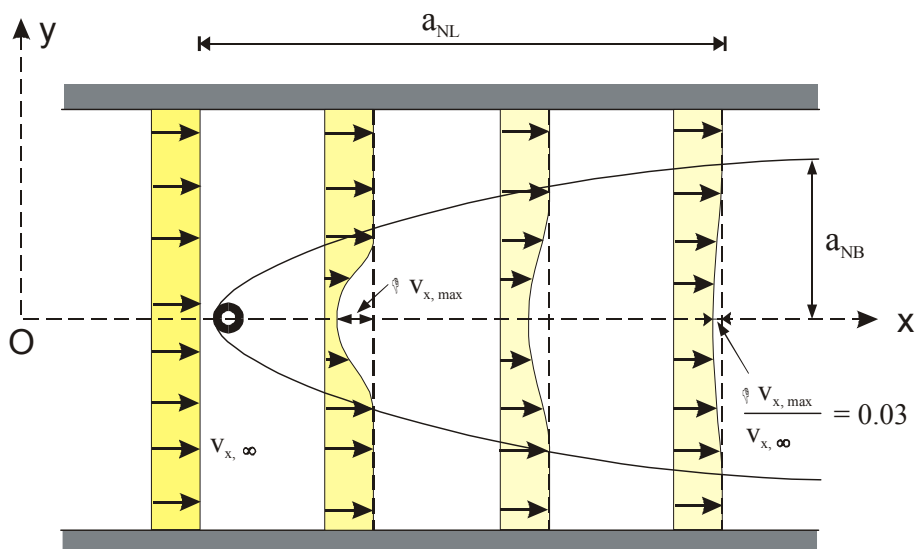
Średnią prędkość przepływu V_F w korycie głównym oblicza się ze wzoru Darcy-Weisbacha (2.1), zaś prędkość V_T w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego z zależności:

$$V_T = C_T \sqrt{\frac{\lambda_v}{8}} V_F \quad (2.29)$$

Prędkość V_T obliczona ze wzoru (2.29) jest zwykle różna od założonej na początku do obliczania a_{NL} (2.18), toteż całość obliczeń należy powtórzyć, przyjmując obliczoną wartość V_T wg wzoru (2.29) za kolejne przybliżenie.



Rys. 2.4. Zmienność współczynników oporów wyznaczonych dla opływu walca przy różnych liczbach Reynoldsa.



Rys. 2.5. Długość i szerokość ścieżki Karmana powstałej przy opływie drzewa³³.

gdzie:

a_{NL} – długość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczego drzewa (rys. 2.5),

a_{NB} – szerokość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczego drzewa,

J – spadek hydrauliczny

Współczynnik oporów w obszarze przepływu z drzewami jest sumą współczynnika oporu drzew λ_v i dna koryta λ_s :

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_s \quad (2.30)$$

Słuszność koncepcji sumowania współczynników oporu dna i drzew w obszarze przepływu z drzewami została potwierdzona licznymi badaniami Kaisera³⁴ i Nudinga³⁵ (1991).

Metodyka określania parametrów krzewów i drzew w obliczeniach przepustowości koryt

³³ DVWK – MERKBLÄTTER 220 (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern, DK 551.51/54 Fließgewässer, DK 532.543 Hydraulik, DVWK - Merkblätter 220/1991, Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

³⁴ KAISER W. dz. cyt.

³⁵ NUDING A. dz. cyt.

W wytycznych opracowanych dla inżynierów niemieckich³⁶ podaje się trzy różne struktury roślinności średniej i wysokiej, porastającej przekroje koryt naturalnych:

- zwarta grupa drzew lub krzewów (rys. 2.6),
- pojedyncze krzewy lub drzewa (rys. 2.7),
- mieszane skupiska drzew i krzewów (rys. 2.8).

Opory przepływu przy opływie roślinności średniej i wysokiej obliczane są na podstawie zastępczej średnicy skupisk roślin d_p oraz zastępczych odległości między roślinami w kierunku przepływu a_x i poprzecznym do niego a_y . Opory roślinności niskiej w tym całkowicie zatopionych krzaków obliczane są z zależności Colebrooka-White'a na podstawie wyznaczonej chropowatości bezwzględnej k_s .

Zwarta grupa drzew lub krzewów

Zwarte grupy drzew lub krzewów występują najczęściej w pasach brzegowych koryt. Przy występowaniu tylko drzew lub tylko krzewów, oblicza się ich zastępczą średnicę i średnie odległości między roślinami. Do badań inwentaryzacyjnych wybiera się powierzchnię zbliżoną w planie do prostokąta o długości boków ok. 10 - 20 m i porośniętą drzewami A_{pro} . Powierzchnia do inwentaryzacji krzewów nie powinna przekraczać kilku metrów kwadratowych (rys. 2.6). Zastępczą średnicę drzew lub gałęzi krzewów oblicza się jako średnią arytmetyczną z pomierzonych średnic na wysokości 1.0 – 1.3 m:

$$d_p = \frac{\sum d_i}{N_i} \quad (2.31)$$

gdzie:

d_p – zastępcza średnica roślin,

d_i – średnica rośliny,

N_i – liczba roślin porastających powierzchnię wybraną do inwentaryzacji.

Zastępczą odległość między roślinami w kierunku przepływu – a_x i poprzecznym do niego – a_y oblicza się w założeniu równości obu odległości ($a_x = a_y$) z zależności:

$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{pro}}{N_i}} \quad (2.32)$$

Gdy odległości te nie są równe ($a_x \neq a_y$), wtedy oblicza się na podstawie pomiarów terenowych powierzchnię przypadającą na jedną roślinę $a_x a_y = \frac{A_{pro}}{N_i}$, średnią wartość

stosunku odległości $\frac{a_y}{a_x} = C$, i po podstawieniu $a_y = C a_x$ odległość $a_x = \sqrt{\frac{A_{pro}}{C}}$.

Pojedyncze krzewy i drzewa

³⁶ DVWK – MERKBLÄTTER dz. cyt.

Powierzchnię do inwentaryzacji określa się według takich samych zasad jak omówione wcześniej. Następnie wykonuje się pomiar średnic kolejnych drzew i oblicza się powierzchnię przekroju roślin $A_{PR,i}$ oraz średnią powierzchnię przekroju rośliny z zależności:

$$A_{PR} = \frac{\sum A_{PR,i}}{N} \quad (2.33)$$

gdzie N jest liczbą roślin.

W następnej kolejności oblicza się zastępczą średnicę rośliny d_p z wzoru:

$$d_p = \sqrt{\frac{4A_{PR}}{\pi}} \quad (2.34)$$

Zastępcze odległości między roślinami w kierunku przepływu – a_x i poprzecznym do niego – a_y określa się jak wyżej.

Mieszane skupiska drzew i krzewów

W przypadku mieszanych skupisk drzew i krzewów zaleca się określanie parametrów zastępczych łącznie dla obu typów roślin. Wstępnie wykonuje się inwentaryzację roślin na powierzchni wytypowanej do badań, a następnie oblicza zastępczą średnicę roślin z zależności:

$$d_p = \frac{d_k \cdot N_k + d_d \cdot N_d}{N_k + N_d} \quad (2.35)$$

gdzie:

N_k – liczba gałęzi krzewów,

N_d – liczba drzew.

Oporo przepływu zatopionej roślinności średniej można scharakteryzować zastępczą chropowatością piaskową k_s . W takich przypadkach zwykle nie uwzględnia się chropowatości powierzchni terenu zalewowego. Istniejące różnice w otrzymywanych przez różnych autorów badań wartościach współczynników tłumaczy się okresową zmiennością oporów przepływu w czasie okresu wegetacji oraz czynników działających bezpośrednio na rośliny (np. czasu trwania zalewu, pochylenie się roślin pod wpływem siły strumienia wody). W literaturze niezwykle rzadko spotyka się stabelaryzowane wartości zastępczych chropowatości piaskowych dla terenów pokrytych roślinnością średnią. Tym większe znaczenie mają wartości zastępczej chropowatości podane przez Ritterbacha³⁷ dla różnych typów roślinności terenów zalewowych rzeki Wupper w Niemczech (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Zestawienie zastępczych chropowatości piaskowych³⁸.

Typ roślinności	Zastępcza chropowatość piaskowa k_s [m]
-----------------	---

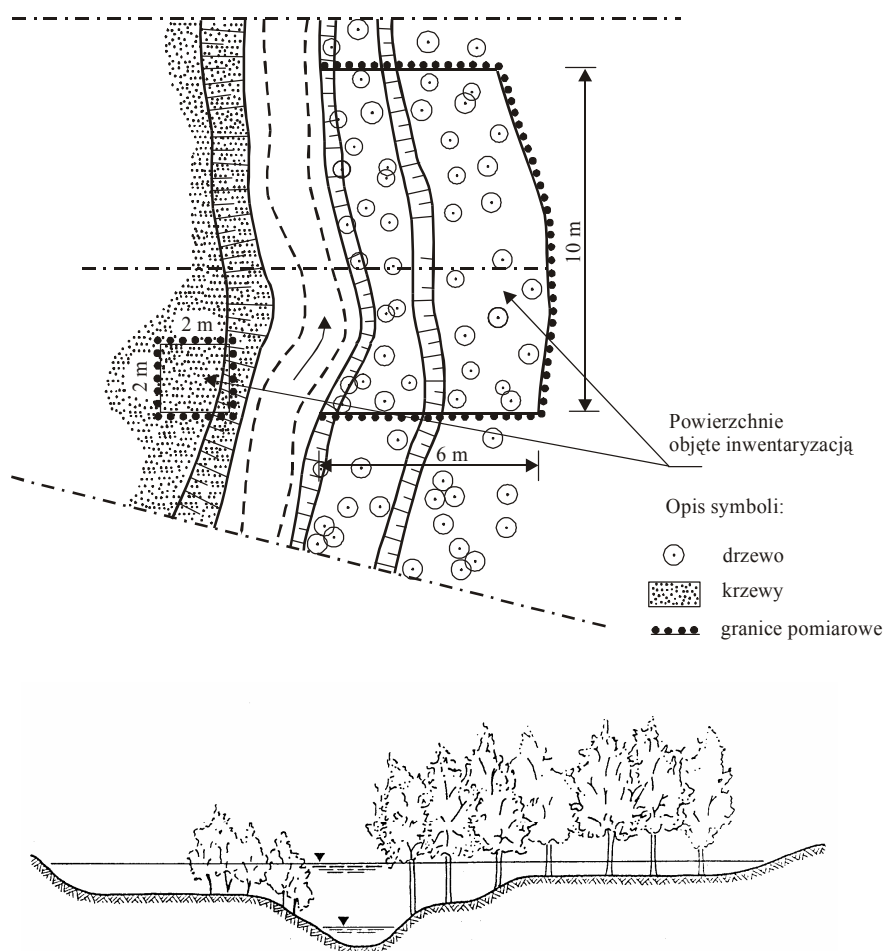
³⁷ RITTERBACH E. (1991): Wechselwirkungen zwischen Auenökologie und Fließgewässerhydraulik und Möglichkeiten der integrierenden computergestützten Planung. Mitteilungen für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

³⁸ Tamże.

Podszyt leśny	0.16 – 0.32
Gęsty podszyt leśny	0.40
Zioła, pnącza	0.50 – 0.70
Dzika roślinność, słabe trzcinowiska	0.60 – 1.20
Dzika roślinność, podszyt	0.80 – 1.60
Narzut kamienny z roślinnością zielną	0.70
Narzut kamienny z wikliną	1.00

Przykład obliczeń wartości parametrów zwartej grupy drzew

Dla koryta wielkiej wody pokazanego na rysunku 2.6, wybrano do inwentaryzacji prostokątną powierzchnię $A_{pro} = 10\text{ m} \times 6\text{ m} = 60\text{ m}^2$, porośniętą drzewami $N_d = 40$ sztuk, dla których ze zmodyfikowanego wzoru (2.34) obliczono średnią średnicę drzew $d_{pd} = 0.25\text{ m}$.



Rys. 2.6. Powierzchnie objęte inwentaryzacją porośnięte drzewami lub krzewami.

Rozstawę między drzewami w kierunku przepływu a_x i poprzecznym do niego a_y obliczono z zależności:

$$a_x a_y = \frac{A_{pro}}{N_d} = \frac{60 \text{ m}^2}{40} = 1.5 \text{ m}^2$$

Przyjmując $a_x = a_y$ obliczono $a_x = a_y = \sqrt{1.5 \text{ m}^2} = 1.23 \text{ m}$.

Dla $a_x \neq a_y$ wyznaczono z pomiarów $C = 1.5$, a następnie obliczono $a_y = \sqrt{\frac{1.5 \text{ m}^2}{1.5}} = 1.0 \text{ m}$ i

$$a_x = 1.5 \times 1.0 = 1.5 \text{ m}$$

Przykład obliczeń parametrów roślin zwartej grupy krzewów

Dla krzewów pokazanych na rysunku 2.6 wybrano prostokątną powierzchnię inwentaryzacyjną $A_{pro} = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$, porośniętą krzewami w ilości $N_k = 69$ sztuk, dla których obliczono ze wzoru (2.35) średnią zastępczą średnicę krzewów $d_{pk} = 0.04 \text{ m}$. Zastępczą rozstawę między krzewami w kierunku przepływu a_x i poprzecznym do niego a_y obliczono przy założeniu równości obu odległości z zależności:

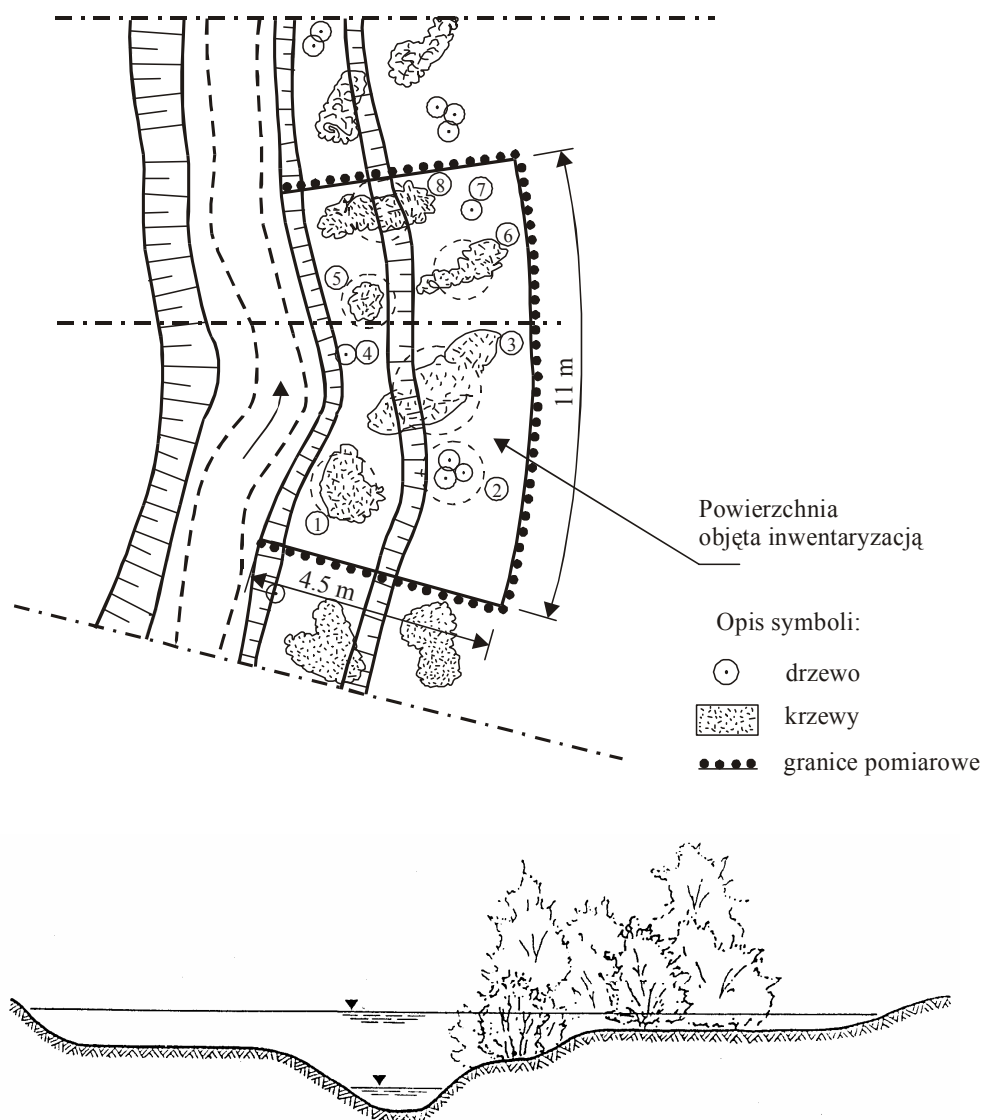
$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{pro}}{N_k}} = \sqrt{\frac{4 \text{ m}^2}{69}} = 0.24 \text{ m}$$

Przykład obliczeń wartości parametrów roślin dla terenu zalewowego porośniętego pojedynczymi krzewami i drzewami

Dla terenu zalewowego porośniętego pojedynczymi krzewami i drzewami pokazanego na rysunku 2.7 wybrano prostokątną powierzchnię inwentaryzacyjną $A_{pro} = 4.5 \text{ m} \times 11 \text{ m} = 49.5 \text{ m}^2$.

Na powierzchni tej znajduje się $N = 8$ skupisk roślin o określonych na podstawie pomiarów powierzchniach przekroju w planie:

- 1) 1.05 m^2 ,
- 2) 0.70 m^2 ,
- 3) 2.80 m^2 ,
- 4) 0.20 m^2 ,
- 5) 0.35 m^2 ,
- 6) 0.95 m^2 ,
- 7) 0.15 m^2 ,
- 8) 2.10 m^2 .



Rys. 2.7 Powierzchnia objęta inwentaryzacją porośnięta drzewami i krzewami.

Sumaryczna powierzchnia przekroju roślin jest równa $\sum A_{PR,i} = 8.3 \text{ m}^2$, a średnia powierzchnia przekroju rośliny $A_{PR} = 8.3/8 = 1.04 \text{ m}^2$.

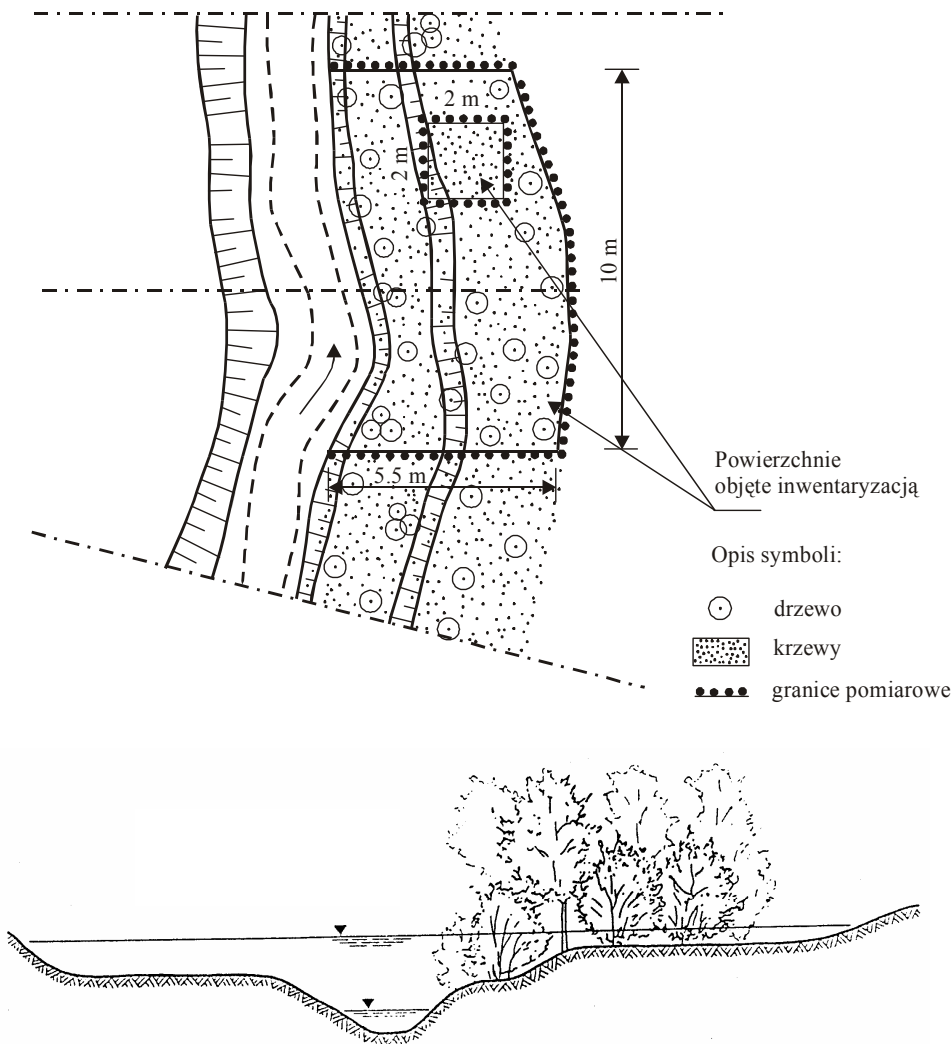
Zastępczą średnicę skupiska roślin obliczono z zależności $\frac{\pi d_p^2}{4} = 1.04 \text{ m}^2$, skąd wyznaczono

$$d_p = \sqrt{\frac{1.04 \cdot 4}{3.14}} = 1.15 \text{ m}.$$

Zastępczą rozstaw między roślinami w kierunku przepływu a_x i poprzecznym do niego a_y obliczono z zależności: $a_x a_y = \frac{A_{pro}}{N} = 6.19 \text{ m}^2$ a na podstawie ustalonej w pomiarach wartości $C = 1.3$ wyznaczono $a_x = 2.18 \text{ m}$ i $a_y = 2.84 \text{ m}$.

Przykład obliczeń wartości parametrów roślin dla mieszanych skupisk drzew i krzewów

Dla terenu zalewowego porośniętego krzewami i drzewami pokazanego na rysunku 2.8 wybrano powierzchnie inwentaryzacyjne dla drzew i krzewów.



Rys. 2.8. Powierzchnie objęte inwentaryzacją porośnięte sku-piskami drzew i krzewów.

Na prostokątnej powierzchni inwentaryzacyjnej drzew $A_{prod} = 5.5\text{ m} \times 10\text{ m} = 55\text{ m}^2$ znajdują się $N_d = 24$ drzewa. Na powierzchni inwentaryzacyjnej krzewów $A_{prok} = 2\text{ m} \times 2\text{ m} = 4\text{ m}^2$ znajduje się 68 gałęzi krzewów. Liczbę gałęzi krzewów na powierzchni 55 m^2 obliczono na podstawie średniej liczby krzaków na powierzchni $A_{prok} = 4\text{ m}^2$ z zależności $N_k = \frac{68}{4\text{ m}^2} \cdot 55\text{ m}^2 = 935$ gałęzi krzewów. Sumaryczna liczba roślin na powierzchni 55 m^2 jest równa $N = 24 + 935 = 959$. Następnie obliczono zastępczą średnicę drzew $d_d = 0.25\text{ m}$ i gałęzi krzewów $d_k = 0.04\text{ m}$. Zastępczą średnicę roślin obliczono z zależności (2.35):

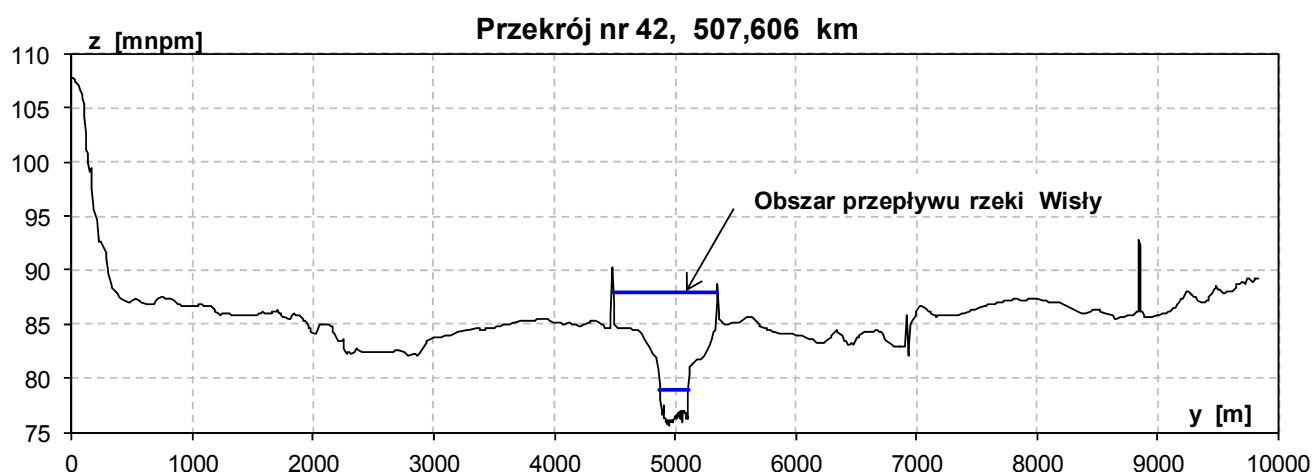
$$d_p = \frac{24 \times 0.25\text{ m} + 935 \times 0.04\text{ m}}{24 + 935} = 0.045\text{ m}$$

Zastępczą rozstaw między drzewami w kierunku przepływu a_x i poprzecznym do niego a_y , obliczono z wzoru:

$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{pro}}{N}} = \sqrt{\frac{55}{959}} = 0.24 \text{ m}$$

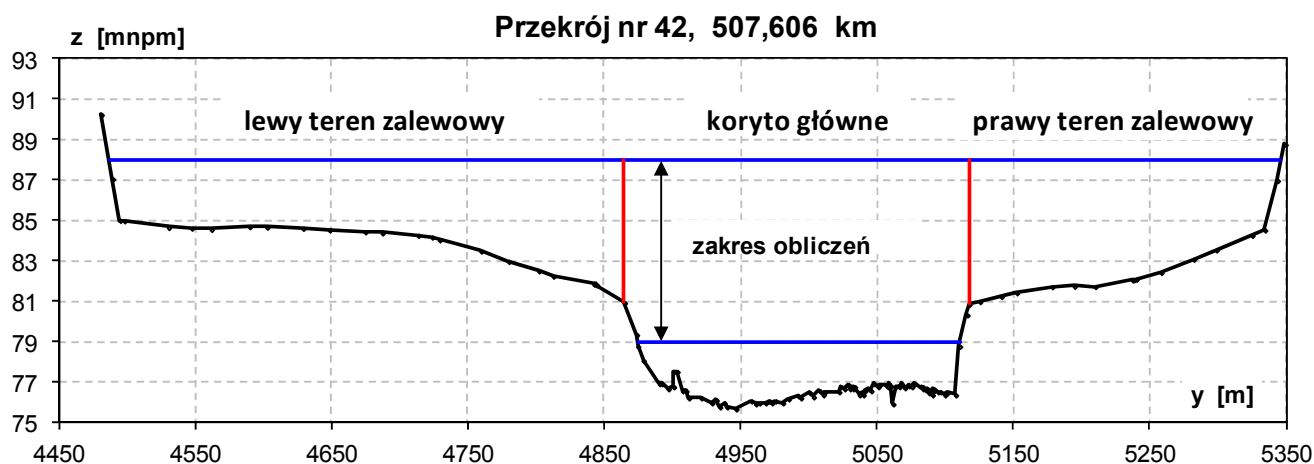
3. Przepustowość złożonego przekroju koryta z uwzględnieniem wydzielonych typów roślinności - program obliczeń w arkuszu kalkulacyjnym.

W celu prowadzenia analizy wpływu roślinności na przepustowość złożonego przekroju koryta w warunkach ustalonego przepływu wody opracowano programy obliczeniowe napisane w arkuszu kalkulacyjnym Excel – dostępnym na stronie internetowej www.mazowieckie.pl – z wykorzystaniem makr zapisanych w języku programowania VBA. Prędkości przepływu wody w obszarach/częściach złożonego w przekroju obliczono z formuły Darcy – Weisbacha. Współczynniki oporów obliczono wykorzystując opracowaną w Niemczech metodykę obliczeń opracowaną przez Niemiecki Związek Inżynierów Gospodarki Wodnej i Inżynierii Środowiska³⁹. Metodykę obliczeń przepustowości złożonych przekrojów z roślinnością przedstawiono w rozdziale 2. Ze względu na zmienność przekrojów poprzecznych koryta i występowania w nich roślinności wydzielono różne warianty porośnięcia przekroju roślinnością i przygotowano dla nich odpowiednie wersje programu. Różnice w programach wyjaśniono na przykładzie przekroju poprzecznego Wisły nr 42 w km 507,606 (rys. 3.1). Przekrój koryta jest obustronnie obwałowany. Obszar przepływu w obwałowanej części przekroju podzielono na koryto główne oraz lewy i prawy teren zalewowy (rys. 3.2).



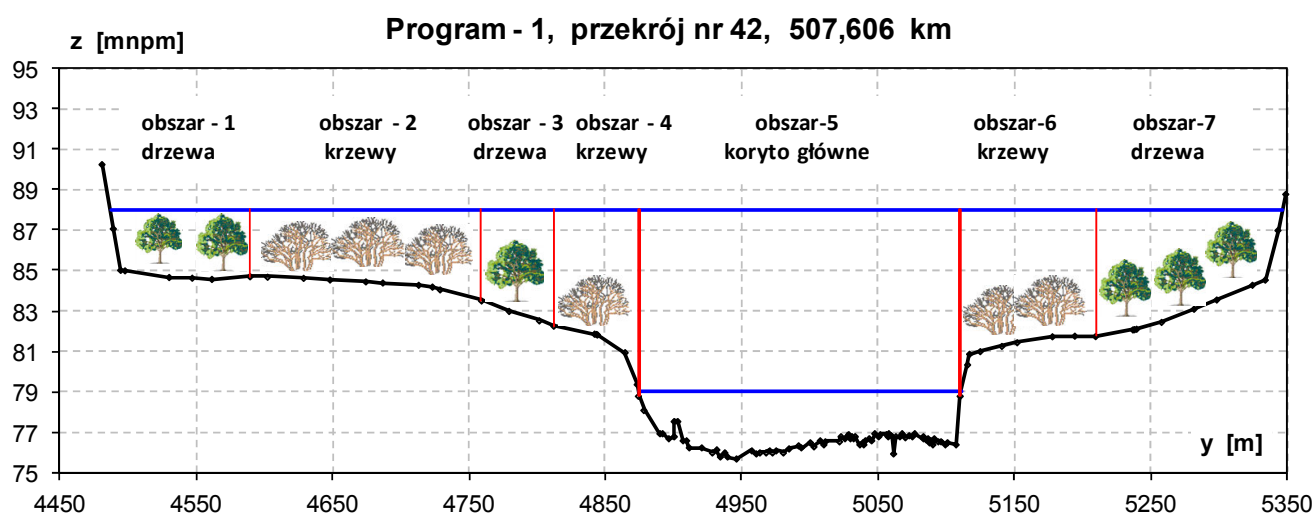
Rys. 3.1. Przekrój poprzeczny doliny rzeki Wisły wybrany do ilustracji programu.

³⁹ DVWK – MERKBLÄTTER dz. cyt.



Rys. 3.2. Przekrój poprzeczny koryta rzeki Wisły wybrany do ilustracji opracowanych programów do obliczeń przepustowości.

Uwzględnienie wpływu występującej na terenach zalewowych różnych form roślinności na przepustowość koryta wymagała wydzielenia obszarów przepływu nieporośniętych i porośniętych krzakami i drzewami. Prędkość przepływu w każdym wydzielonym obszarze z roślinnością zależy od charakterystyk roślin (liczby pni, gałęzi krzewów, ich gęstości i ich rozmieszczenia w planie). Przyjęto, że w złożonym przekroju koryta maksymalnie może występować 7 obszarów w tym 6 obszarów z roślinnością (pokazanych na rysunku 3.3).



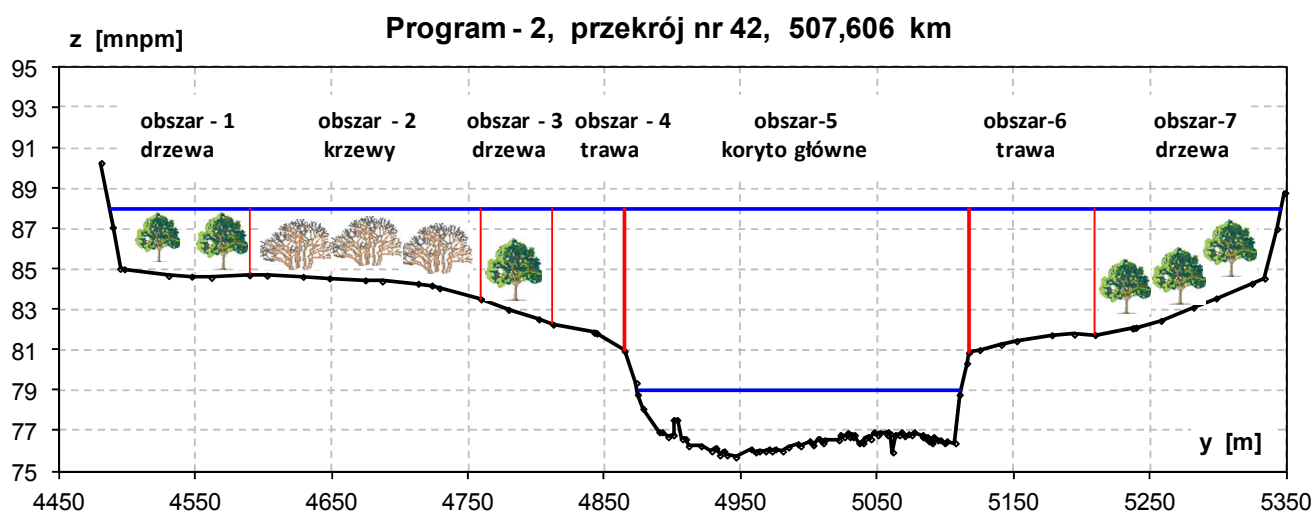
Rys. 3.3. Obszary przepływu wyodrębnione w złożonym przekroju poprzeczny koryta z roślinnością.

Do analizy wpływu roślinności na warunki przepływu wody w złożonym przekroju koryta opracowano 5 programów obliczeniowych, umożliwiających obliczanie przepustowości koryta rzeki przy różnych wariantach rozmieszczenia roślinności w przekroju poprzecznym:

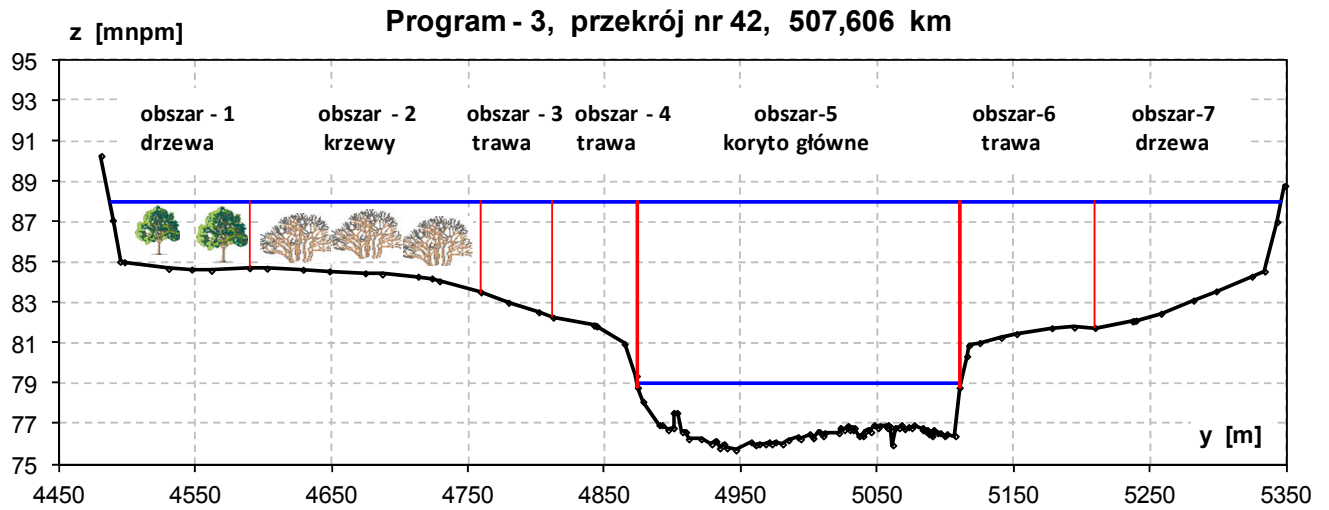
- pierwszy program umożliwia obliczanie przepustowości z uwzględnieniem występowania 7 obszarów pokazanych na rysunku 3.3,
- drugi program umożliwia obliczanie przepustowości z uwzględnieniem 7 obszarów, ale w obszarze 4 i 6 przy korycie głównym nie występują krzewy i drzewa (rys. 3.4),

- trzeci program umożliwia obliczanie przepustowości przekroju przy założeniu, że krzewy i drzewa występują w dwóch pierwszych obszarach na lewym terenie zalewowym (rys. 3.5),
- czwarty program umożliwia obliczanie przepustowości przekroju przy założeniu, że oba tereny zalewowe są bez drzew i krzewów (rys. 3.6),
- piąty program umożliwia obliczanie przepustowości przekroju przy założeniu, że krzewy i drzewa występują tylko w obszarze 1, 2 i 7 przekroju poprzecznego (rys. 3.7).

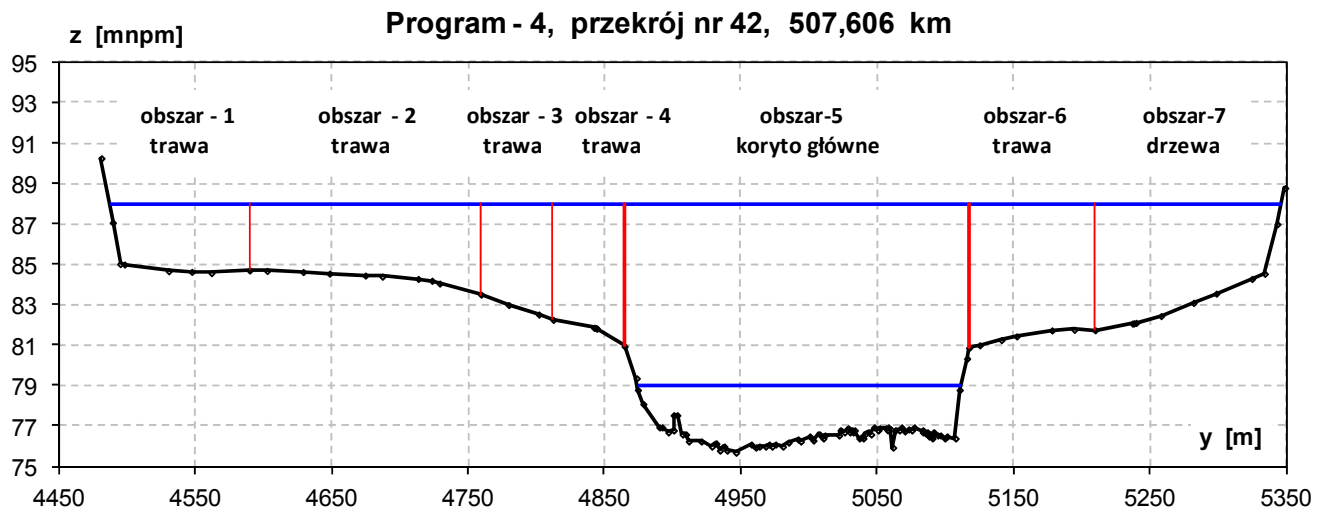
Opracowane programy umożliwiają obliczanie natężenia przepływu wody w przekrojach poprzecznych z podaną liczbą obszarów rozmieszczenia roślinności. Geometria przekroju, granice obszarów, charakterystyki roślin w poszczególnych obszarach, ilość obszarów z roślinnością średnią i wysoką (drzewa i krzewy) oraz spadek podłużny dna koryta stanowią dane do obliczeń. Szczegółowy opis zakresu dopuszczalnych zmian w danych do obliczeń podano w zakładce „Uwagi” w opracowanym programie zapisanym w arkuszu kalkulacyjnym Excel – dostępnym na stronie internetowej www.mazowieckie.pl.



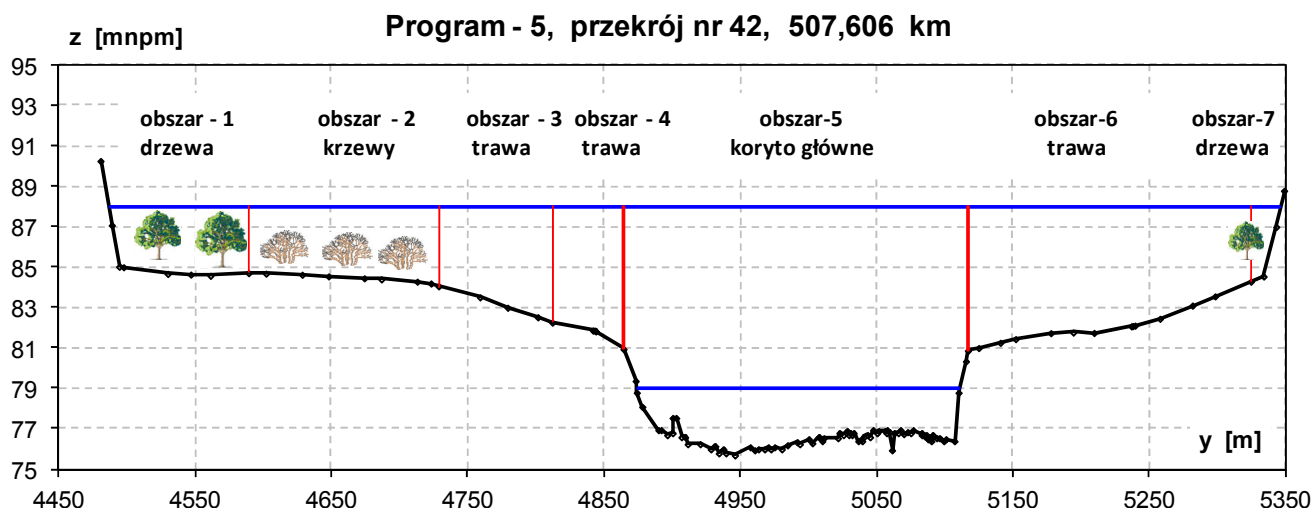
Rys. 3.4. Obszary przepływu wyodrębnione w złożonym przekroju poprzecznym koryta z roślinnością.



Rys. 3.5. Obszary przepływu wyodrębnione w złożonym przekroju poprzeczny koryta z roślinnością.



Rys. 3.6. Obszary przepływu wyodrębnione w złożonym przekroju poprzeczny koryta z roślinnością.



Rys. 3.7. Obszary przepływu wyodrębnione w złożonym przekroju poprzeczny koryta z roślinnością.

Rozpoczęcie obliczeń natężenia przepływu wody w korycie rzeki wymienionymi programami wymaga wprowadzenia danych o przekroju poprzecznym koryta rzeki. Współrzędne przekroju poprzecznego Y i Z wprowadzane są w arkuszu „DaneXYZ” od komórki „A21” (Wszystkie wprowadzane dane oznaczono kolorem żółtym). Po podaniu rzędnej zwierciadła wody w przekroju RZW (komórka „I5”), można dwoma programami kontrolnymi obliczyć podstawowe parametry przekroju poprzecznego. Pierwszym z tych programów oblicza się szerokość zwierciadła wody w przekroju, początkową i końcową odciętą zwierciadła wody w przekroju, pole powierzchni przekroju poprzecznego strumienia wody, głębokość średnią oraz długość obwodu zwilżonego przekroju. Drugim programem kontrolnym, po ustaleniu liczby obszarów przepływu (komórka „K23”) i granic tych obszarów (komórki „L25:U25”), oblicza się dla każdego obszaru: szerokość zwierciadła wody w obszarze, głębokość w płaszczyźnie obszaru, głębokość średnią, długość obwodu zwilżonego, pole powierzchni, promień hydrauliczny, oraz sumy kontrolne tych parametrów. Kolejnym krokiem jest wybór odpowiedniego programu obliczeniowego z pięciu przedstawionych powyżej, które znajdują się w arkuszach (Program1, Program2, ...). W każdym z programów podaje się spadek zwierciadła wody (komórka „E4”), liczbę obszarów przepływu (komórka „K5”), numer obszaru koryta głównego (komórka „E6”), granice obszarów (komórki „K7:T8”). W komórkach „K10:T13” podaje się dla poszczególnych obszarów chropowatość powierzchni dna, średnią średnicę drzew lub gałęzi krzewów oraz średnią odległość między drzewami lub gałęziami krzewów w kierunku przepływu (X) i (Y). W komórkach „J15:J23” wpisuje się chropowatość piaskową skarp koryta głównego oraz granice pomiędzy obszarami nad skarpami koryta głównego. W komórkach „J25:J27” (programy 2 - 5) podaje się poziomy zależne od metody obliczeń przepływu w danym obszarze. Zakres rzędnych zwierciadła wody do obliczeń przepustowości oraz ich skok głębokości wpisuje się w komórkach „Q16:Q18”.

4. Kryteria usuwania roślinności z terenów zalewowych.

W skupiskach roślin rzek nizinnych, porastających tereny zalewowe dominują krzewy wikliny, wierzby i zarośla. Roślinność tę Schiechl i Stern⁴⁰ podzielił na trzy grupy wyraźnie zróżnicowane pod względem wysokości i kształtu bryły utworzonej przez roślinność:

- - zarośla (np. wiklina uszata, szara):

⁴⁰ SCHIECHTL H.M., STERN R. (2002): Naturnaher Gewässerstrukturen. Grundlagen, Leitbilder, Planung. Karlsruhe (Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe).

Charakteryzują się niewielką wysokością i półkolistym, bądź eliptycznym obrysem przekroju. Gęste gałęzie i liście oraz niewielka wysokość powodują podczas przepływu wody w terenach zalewowych wzmożone procesy sedymentacyjne, filtrowanie unoszonych cząstek. Usunięcie akumulowanego w terenie zalewowym rumowiska wymaga olbrzymiego nakładu pracy i przycięcia roślin.

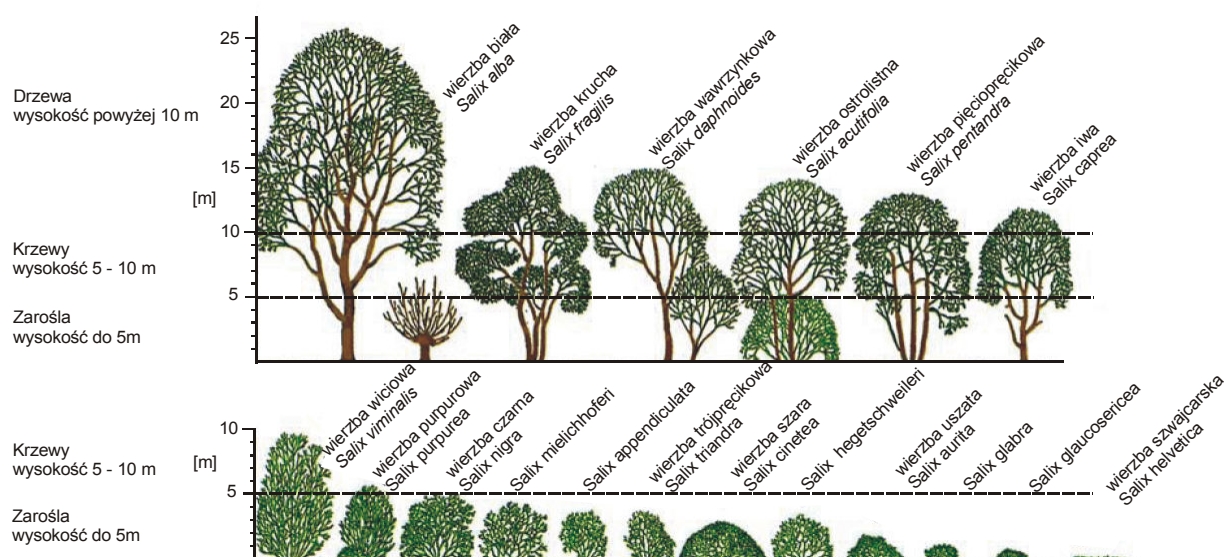
- - krzaki (np. wiklina czarna, wiciowa):

Ta forma roślin odznacza się silnym rozgałęzieniem i ulistnieniem na całej wysokości. Przekrój poprzeczny krzaków roślin jest eliptyczny lub prostokątny. Obecność liści wzmacnia sedymentację podczas przepływu wody, a uginające się pod naporem wody gałęzie „wylapują” przepływające w wodzie rośliny i zanieczyszczenia, co prowadzi do zwiększenia oporu opływających roślin i dalszą intensyfikację procesów akumulacji rumowiska.

- - drzewa (np. wierzba iwa, biała):

Ta forma roślin ma pień główny, a ulistnienie zaczyna się na pewnej wysokości, przez co nie wpływa znacząco na warunki przepływu wielkich wód. Hydrauliczne opory opływu drzew są niewielkie.

Wysokość form roślin wyróżnionych przez Schiechtla i Sterna⁴¹ przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Formy i wysokość zarośli, krzaków i drzew porastających tereny zalewowe europejskich rzek nizinnych⁴².

Kryteria usuwania roślinności z terenów zalewowych wyprowadzono z analizy przepustowości przekroju koryta. O ile maksymalna prędkość przepływu wody w korycie bez roślinności zależy głównie od jego spadku i różnych form chropowatości powierzchni dna i skarp koryta, to rozkład prędkości wody w złożonym przekroju poprzecznym koryta jest dodatkowo uzależniony od jego kształtu: największe prędkości przepływu wody występują w głębszym korycie głównym, najmniejsze w płytszym terenie zalewowym. W terenie zalewowym, graniczącym z korytem głównym występuje obszar przyśpieszonego przepływu wody. Dla potrzeb praktyki można przyjąć, że w złożonym przekroju poprzecznym koryta

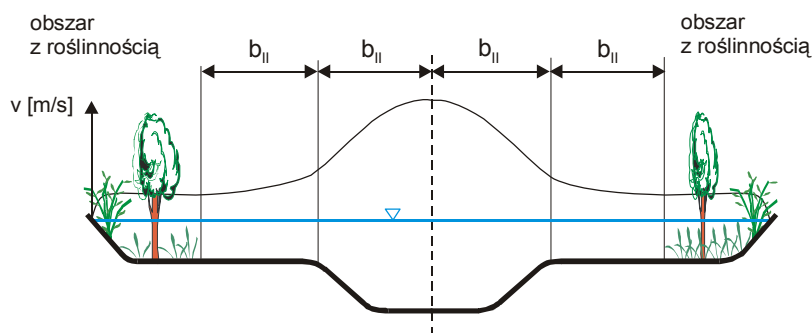
⁴¹ Tamże.

⁴² Tamże, str. 40.

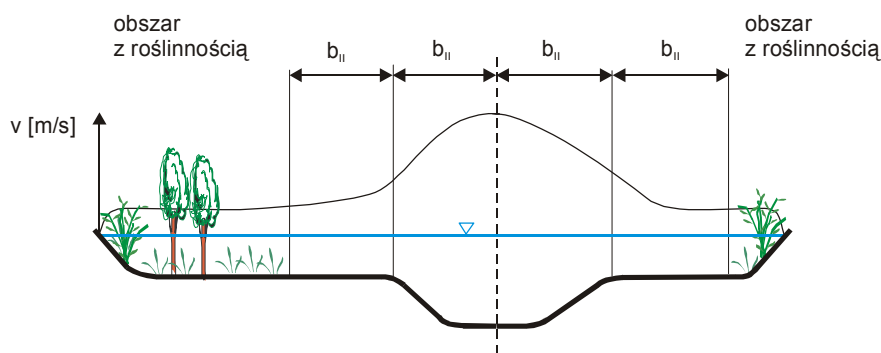
bez zabudowy o płaskich symetrycznych terenach zalewowych wpływ przyśpieszenia przepływu wody w terenie zalewowym wywołanego szybszym przepływem wody w korycie głównym sięga w głąb terenu zalewowego na odległość równą połowie szerokości koryta głównego (b_{II} - patrz rys. 1.10). A zatem w tej części terenu zalewowego złożonego przekroju koryta występują prędkości wody, które istotnie wpływają na przepustowość całego przekroju. W drugiej części terenu zalewowego ograniczonego obwałowaniem lub wysoczyzną prędkości przepływu wody są znacznie niższe i w efekcie ta część przekroju mniej wpływa na przepustowość całego przekroju poprzecznego. W oparciu o to stwierdzenie i opisane, głównie w literaturze niemieckiej, wyniki badań modelowych przepustowości koryt o złożonych przekrojach poprzecznych z roślinnością w terenie zalewowym oraz obliczeń rozkładów prędkości można sformułować następujące kryteria usuwania/pozostawiania roślinności w terenach zalewowych:

Kryteria usuwania/pozostawiania roślinności

1. W złożonych przekrojach koryt o płaskich, symetrycznych i niesymetrycznych terenach zalewowych nie należy pozostawiać zarośli, krzewów i gęstych skupisk drzew w terenie zalewowym o szerokości b_{II} równej w przybliżeniu połowie szerokości koryta głównego i bezpośrednio przyległym do koryta głównego (rys. 4.2a, 4.2b).



Rys. 4.2a. Obszary z roślinnością w złożonych przekrojach koryt o płaskich, symetrycznych terenach zalewowych – rozkład prędkości wody.

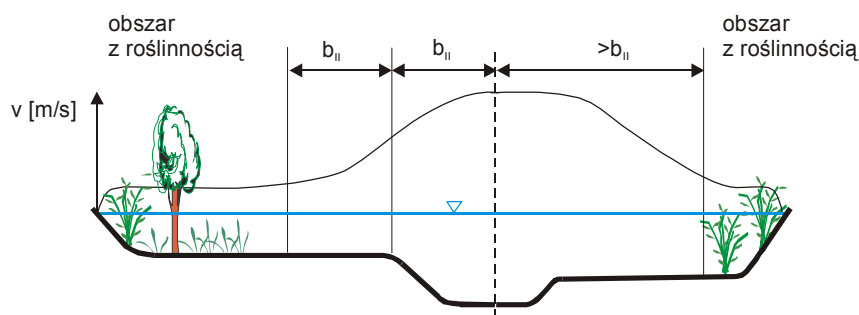


Rys. 4.2b. Obszary z roślinnością w złożonych przekrojach koryt o płaskich, niesymetrycznych terenach zalewowych – rozkład prędkości wody.

Dopuszczenie do występowania skupisk roślinności w tym terenie prowadzić może do znacznego zmniejszenia prędkości przepływu wody, w następstwie czego dochodzi do akumulacji rumowiska wleczonego w skupiskach roślin i tuż za nimi. Pozostawione krzewy ulegają „uszczelnieniu” niesionymi przez wodę trawami i liśćmi, co przy odpowiedniej ich gęstości powoduje wyłączenie tej części przekroju z przepływu. Przepustowość całego

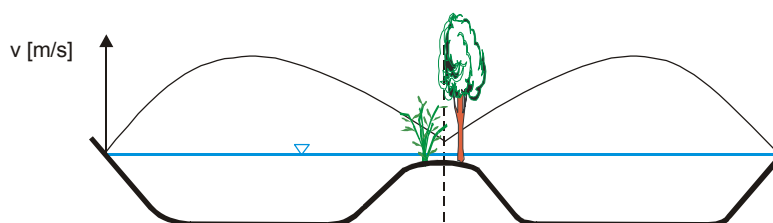
przekroju zmniejszają istotnie powstające odsypiska rumowiska. Pozostawione w tym obszarze pojedyncze drzewa nie mają istotnego wpływu na rozkład prędkości przepływu wody.

2. W złożonych przekrojach poprzecznych koryta o zróżnicowanej wysokości/głębokości terenów zalewowych nie należy pozostawiać roślinności przede wszystkim w głębszym terenie zalewowym (rys. 4.3). Odległość oddziaływania przepływu w terenie zalewowym przez przepływ w korycie głównym w tej części przekroju koryta jest większa niż połowa szerokości koryta głównego. W odniesieniu do płytszego terenu zalewowego należy stosować poprzednie zalecenia.



Rys. 4.3. Obszary z roślinnością w złożonych przekrojach koryt o zróżnicowanej wysokości/głębokości terenów zalewowych – rozkład prędkości wody.

3. W złożonym przekroju poprzecznym koryta z wyspą/wyspami każdy typ roślinności na wyspie istotnie zmniejsza przepustowość przekroju poprzecznego koryta (rys. 4.4). Stosunkowo najmniejszy wpływ na rozkład prędkości przepływu wody ma roślinność wysoka – drzewa. Natomiast skupiska zarośli i krzewów istotnie ograniczają prędkość przepływu wody, intensyfikują proces akumulacji rumowiska, co przyspiesza proces podziału przekroju poprzecznego na części.



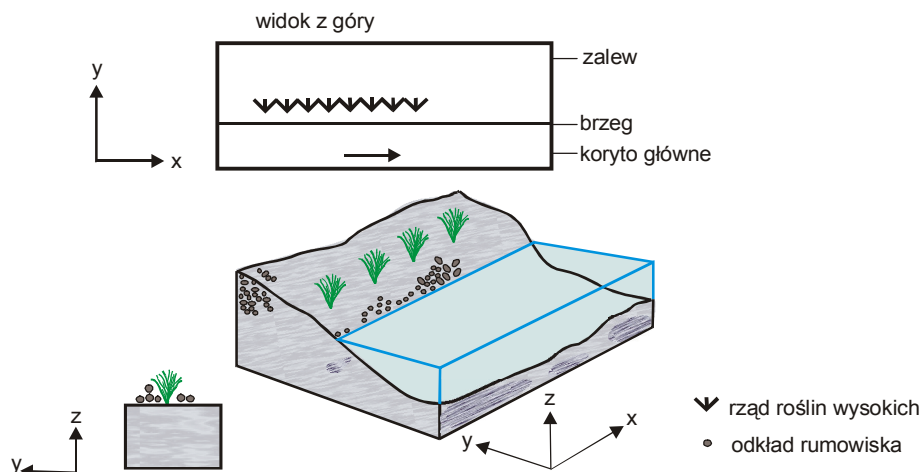
Rys. 4.4. Obszary z roślinnością w złożonym przekroju poprzecznym koryta z wyspą – rozkład prędkości wody.

Gęste skupiska roślinności wysokiej powodują odkładanie rumowiska wleczonego wewnątrz skupisk roślin i tuż za nimi. Wymiary powstałych odsypisk obliczać można na podstawie długości i szerokości ścieżki Karmana (określanych z zależności podanych przez Pasche⁴³) powstałej na powierzchni wody przy opływie pnia drzewa. Nie stwierdzono występowania równości objętości rumowiska dopływającego i odpływającego, dlatego trzeba się liczyć z ciągłym powiększaniem powierzchni odkładu rumowiska wleczonego, a w praktyce z nasileniem prac związanych z usuwaniem odsypisk po przejściu wezbrań. Wszystkie

⁴³ PASCHE E. dz. cyt.

rodzaje roślin utrudniają przejście lodów w korycie i z tego względu nie należy pozostawić roślinności na wyspie.

4. W obszarach z pozostawioną roślinnością w terenach zalewowych pokazanych na rysunkach 4.2, 4.3 nie powinno się pozostawiać jednego rzędu gęstych roślin wysokich (drzew) usytuowanych wzdłuż linii brzegu koryta głównego (rys. 4.5). Pojęcie „gęste rośliny” oznacza, że odległość między roślinami jest mniejsza niż długość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczej rośliny.

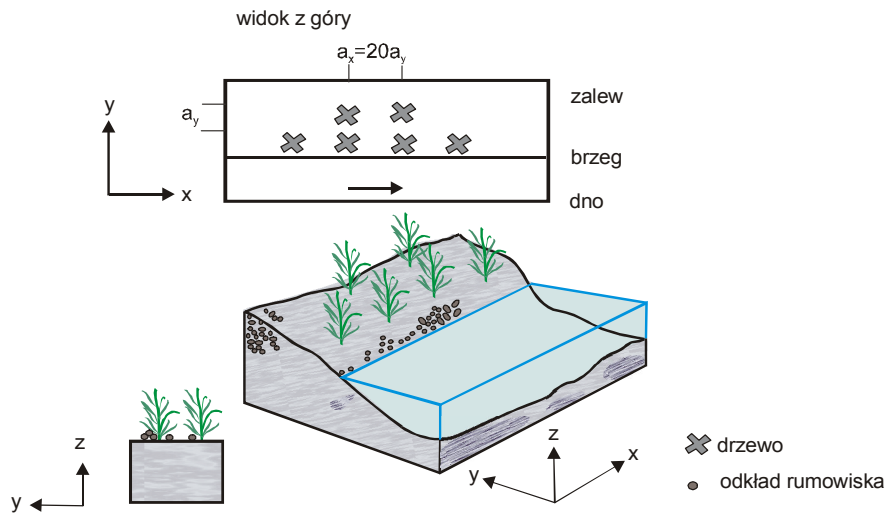


Rys. 4.5. Rząd roślin wysokich w terenie zalewowym⁴⁴.

Występowanie drzew w terenie zalewowym w rzędzie równoległym do linii brzegu powoduje wzmożone procesy sedymentacji i powstawania odkładów wzdłuż rzędów roślin. Tworzy się wyraźny korytarz przepływowy, zwłaszcza przy gęstych krzakach, uszczelnianych często przez liście i roślinność (np. liście barszczu). Od zasady tej stosuje się odstępstwa omówione w punkcie 9 i 10.

5. W obszarach z pozostawioną roślinnością w terenach zalewowych pokazanych na rysunkach 4.2, 4.3 nie należy pozostawiać roślinności wysokiej oraz karp / pieńków ściętych drzew usytuowanych w dwóch lub więcej rzędach spełniających warunek odległości pokazany na rysunku 4.6.

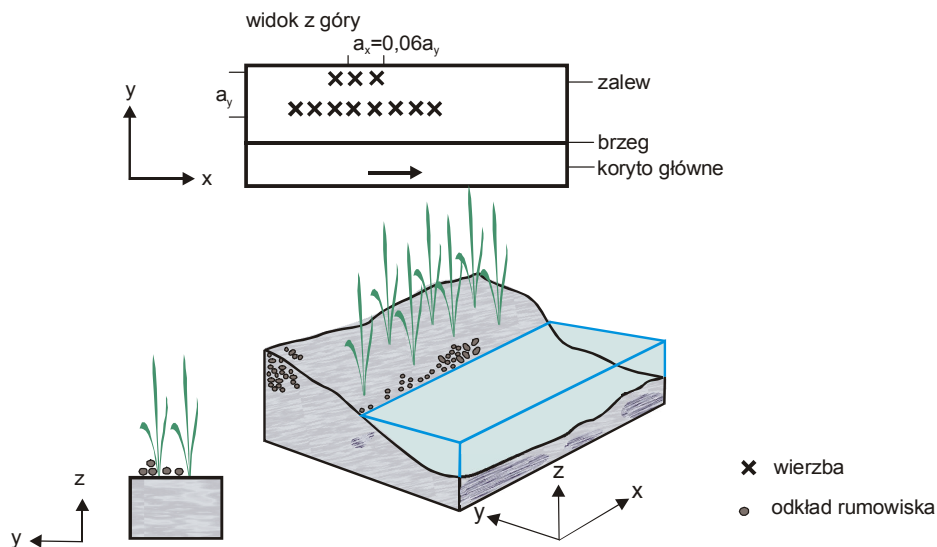
⁴⁴ Tamże, str. 3.



Rys. 4.6. Usytuowanie skupisk roślinności wysokiej w terenie zalewowym⁴⁵.

Pozostawienie wysokich karp przy nieprawidłowo ściętych drzewach powoduje przy przepływie wielkich wód powstanie odkładów i odsypisk rumowiska wleczonego, powiększających się ze wzrostem gęstości roślin i średnicy ich gałęzi.

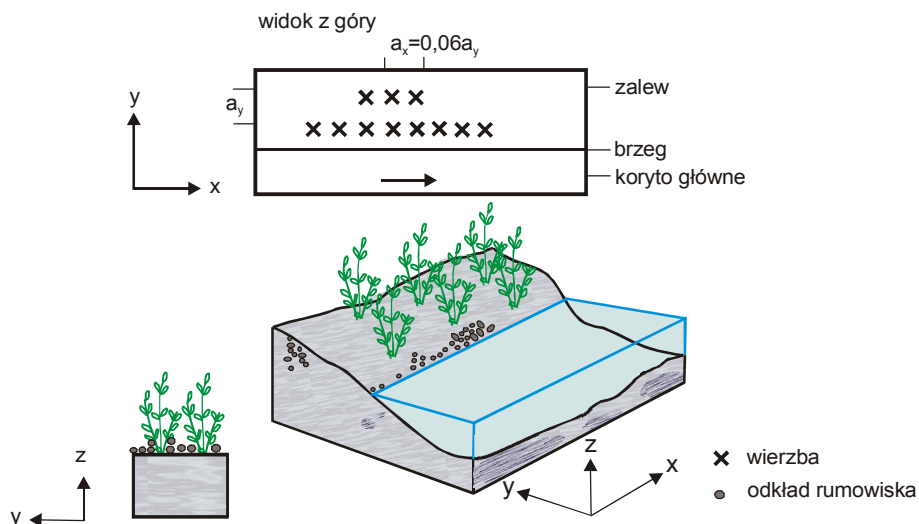
6. W obszarach z pozostawioną roślinnością w terenach zalewowych pokazanych na rysunkach 4.2, 4.3 nie zaleca się pozostawiania dwóch rzędów dojrzałych wierzb lub innych drzew usytuowanych równoległe do linii brzegowej i spełniających warunek odległości pokazany na rysunkach 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 (woda nie sięga liści).



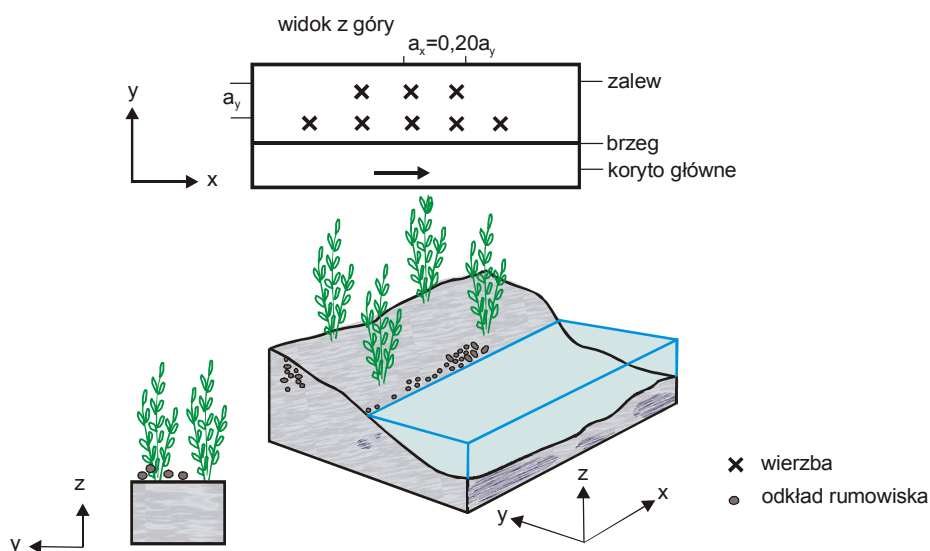
Rys. 4.7. Usytuowanie dwóch rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁴⁶.

⁴⁵ Tamże, str. 3.

⁴⁶ Tamże, str. 3.



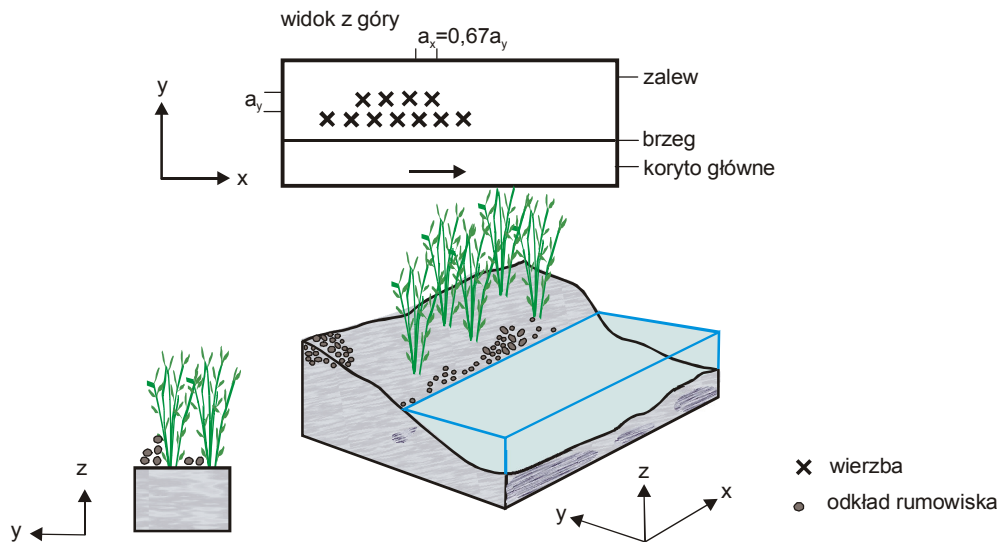
Rys. 4.8. Usytuowanie dwóch rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁴⁷.



Rys. 4.9. Usytuowanie dwóch rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁴⁸.

⁴⁷ Tamże, str. 3.

⁴⁸ Tamże, str. 3.

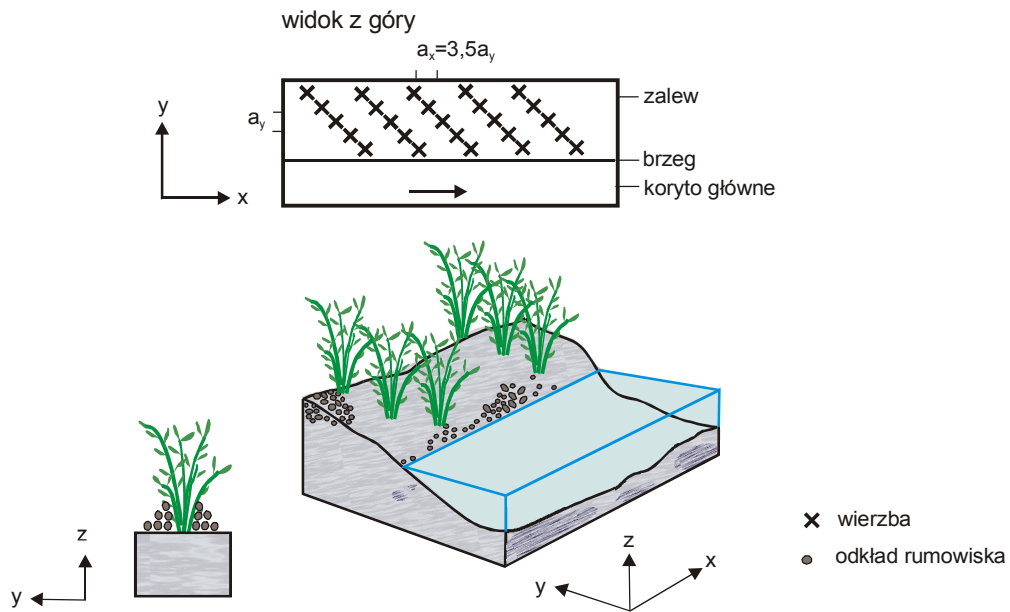


Rys. 4.10. Usytuowanie dwóch rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁴⁹.

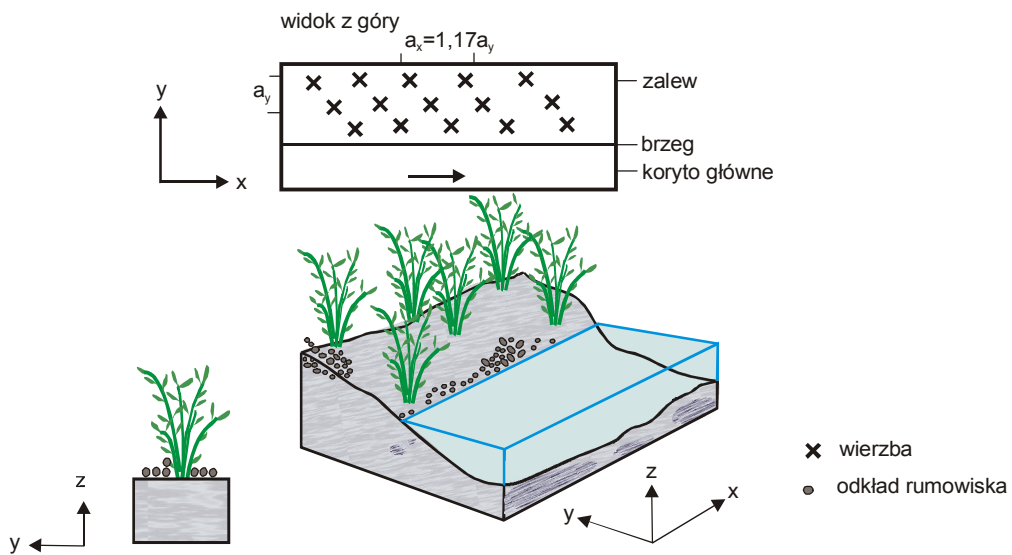
Pomimo zróżnicowania odległości między drzewami występują wzmożone procesy powstawania odsypisk rumowiska, zwłaszcza w obrębie drugiego rzędu roślin. Zjawisko tłumaczyć można w oparciu o rozkład prędkości przepływu wody w przekroju poprzecznym koryta. Oddziaływanie strumieni (interakcja strumienia w korycie głównym ze strumieniem w terenie zalewowym) powoduje wzrost prędkości w obrębie rzędu roślin w pobliżu koryta głównego oraz wyraźne zmniejszenie prędkości w obrębie oddalonego od koryta głównego drugiego rzędu roślin i stąd obserwowany wzmożony odkład rumowiska. Nasilenie tego procesu obserwowano wraz ze wzrostem gęstości roślin. Konieczne staje się regularne prześwietlanie roślin, które szybko rozwijając się nadają niekorzystne z hydraulicznego punktu widzenia cechy.

7. W obszarach z pozostawioną roślinnością w terenach zalewowych pokazanych na rysunkach 4.2, 4.3 nie zaleca się pozostawiania rzędów dojrzałych wierzb w poprzecznych rzędach, różnie rozmieszczonych względem osi przekroju (rys. 4.11, 4.12, 4.13).

⁴⁹ Tamże, str. 3.



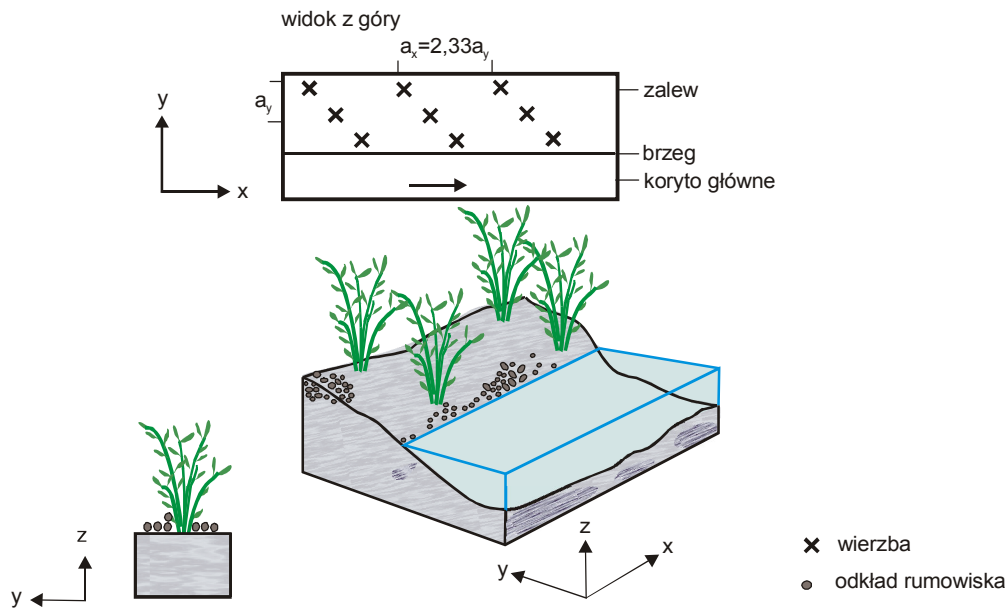
Rys. 4.11. Usytuowanie rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁵⁰.



Rys. 4.12. Usytuowanie rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁵¹.

⁵⁰ Tamże, str. 3.

⁵¹ Tamże, str. 3.



Rys. 4.13. Usytuowanie rzędów dojrzałych wierzb lub drzew wzdłuż linii brzegowej (woda nie sięga liści)⁵².

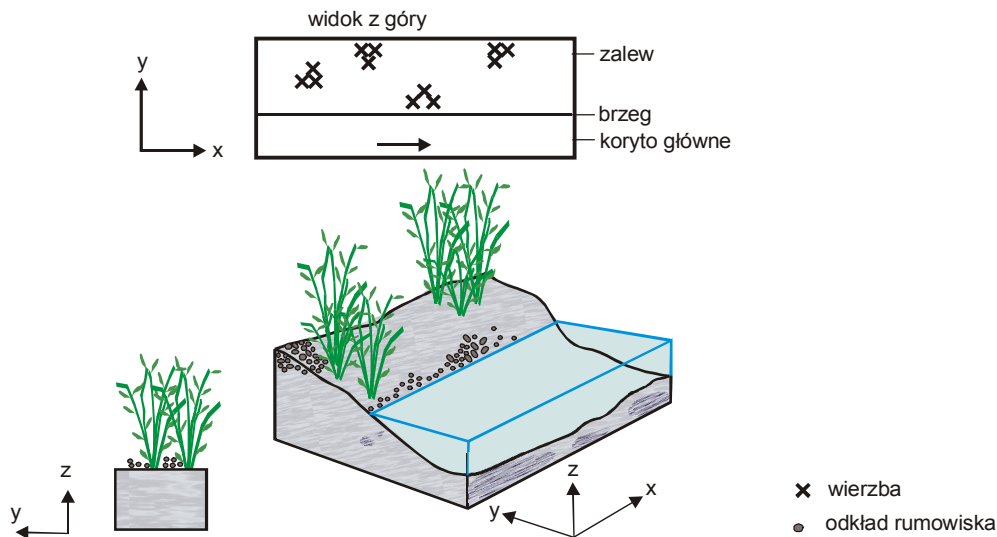
Pomimo znacznie zróżnicowanych odległości między rzędami drzew, badania potwierdzają wzrost tendencji powstawania odsypisk rumowiska i tworzenia się jednej lub dwóch rynien wzdłuż linii brzegowej. Praktyczny aspekt tych badań zaleca, aby ograniczyć rozwój roślin w przekroju poprzecznym koryta. Roślinność pozostawiana w pobliżu linii brzegu powinna rosnać w górę, aby nie ograniczać światła przekroju. Dopuszczenie do zarastania przestrzeni między drzewami przez zarośla i krzewy grozi uszczelnieniem światła między drzewami – „zatkaniem” przekroju, co skutkuje podniesieniem zwierciadła wody w przekroju.

8. Bezwzględnie nie należy dopuszczać do powstawania i utrzymywania nawet najniższych ogrodzeń, w terenach zalewowych, które podczas przepływu wody w terenie zalewowym ulegają „uszczelnieniu” i pracują jak przelewy o ostrej krawędzi, wywołując dodatkowe spiętrzenie wody w korycie.

9. Wyniki badań laboratoryjnych⁵³ dopuszczają występowanie rzadkich skupisk roślinności wysokiej (drzew) w terenie zalewowym w odległości mniejszej niż szerokość b_{II} od koryta głównego (rys. 4.14). Nie należy dopuścić, aby zarośla i krzewy porastały pomiędzy drzewami. Pojęcie „rzadkie rośliny” oznacza, że odległość między roślinami jest większa niż długość ścieżki Karmana powstałej przy opływie pojedynczej rośliny.

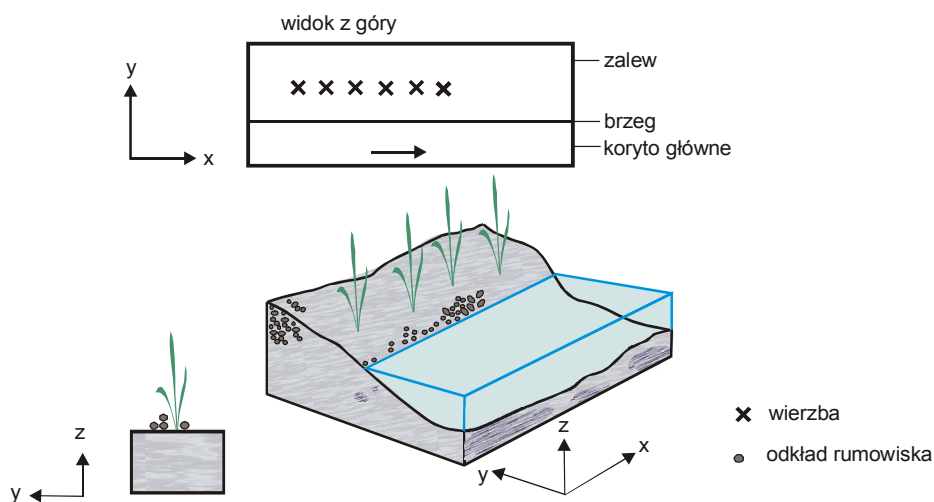
⁵² Tamże, str. 3.

⁵³ Tamże, str. 3.



Rys. 4.14. Usytuowanie rzadkich skupisk roślinności wysokiej w terenie zalewowym⁵⁴.

10. Wyjątkowo dopuszcza się pozostawienie rzędu rzadkich dojrzałych wiklin lub wierzb wzdłuż linii brzegu koryta głównego (wielka woda nie sięga liści drzew) w obszarach zurbanizowanych (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Usytuowanie roślinności wysokiej w terenie zalewowym w obszarze zurbanizowanym⁵⁵.

Taki typ roślin występuje często wzdłuż koryt położonych w obszarach miast. Pozostawia się „okna” pozbawione drzew, umożliwiające dostęp mieszkańcom do rzeki. Badania hydrauliczne nie potwierdziły powstawania odsypisk rumowiska w obrębie rzadkich roślin wysokich, które wykazują ograniczone opory przepływu.

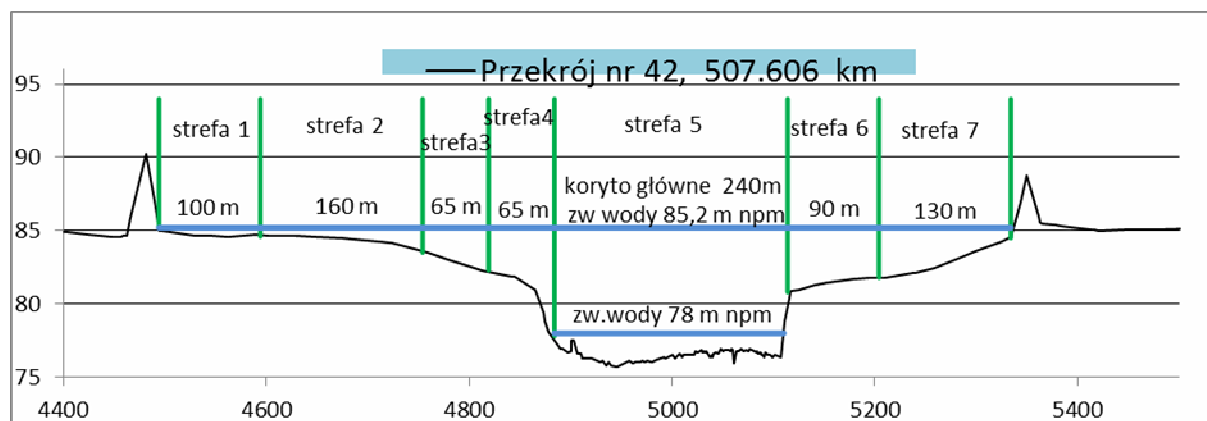
⁵⁴ Tamże, str. 3.

⁵⁵ Tamże, str. 3.

5. Tereny zalewowe koryta z rozwiniętymi typami roślin wpływającymi na warunki przepływu wody i wymagającymi jej usunięcia

Do analiz wybrano odcinek koryta Wisły z reprezentatywnym przekrojem pokazanym na rys. 5.1. Na rysunku tym naniesiono rzędną wody równą 85.20 m z dnia 22 maja 2010 roku przy przepływie $Q = 5740 \text{ m}^3/\text{s}$.

Charakterystykę roślinności w przekroju wykonano na podstawie wizji lokalnej. Złożony przekrój poprzeczny podzielony został na szereg stref / obszarów, w których dokonano szacunkowej inwentaryzacji roślinności.



Rys. 5.1. Złożony przekrój poprzeczny koryta Wisły z naniesionymi strefami wybrany do analiz.

Strefa / obszar 1 – strefa drzew wysokich

Szerokość strefy 100 m. Dominują drzewa topoli czarnej, w domieszce wierzba biała, topola biała i krzewy. Wysokość drzew wynosi 20-25 m, średnica korony ok. 10-12 m, średnica pni od 20 do 50 cm. Korona drzew dosyć wysoko osadzona, luźna, pnie w rozstawie ok. 10 x 10 m, zdarzają się miejsca o rozstawie gęstszej 5 x 5 m. Granica strefy otoczona często szczelną strefą roślinności krzewiastej. Obszar porośnięty wysoką trawą.

Strefa / obszar 2 – strefa krzewów

Najbardziej zróżnicowana ze stref o szerokości ok. 160 m. Obejmuje obszar po dawnych ogródkach działkowych. Pozostałości ogrodzeń z siatki, budynki gospodarcze i bardzo duże zróżnicowanie krzewów i drzew zarówno owocowych, jak i gatunków dziko rosnących. Najczęściej spotykane drzewa i krzewy: klon jesionolistny, wierzba biała, wierzba wiciowa. Roślinność tworzy strefy zwarte do wysokości ok. 10 m. Również odnotowano roślinność zbiorowisk welonowych, która dodatkowo zwiększa opory przepływu. Obszar porośnięty wysoką trawą.

Strefa / obszar 3 – strefa drzew

Szeroka na 65 m strefa złożona z wysokich osobników (do 20 m) topoli czarnej i wierzby białej o rozstawie pni ok. 10 x 10 m. Średnica pni od 15 do 55 cm. Gdy rozstawa pni jest większa pomiędzy nimi znajdują się krzewy wierzby, klonu jesionolistnego. Obszar porośnięty wysoką trawą.

Strefa / obszar 4 – strefa krzewów

Strefa o szerokości ok. 65 m zbudowana głównie z krzewów i niższych drzew wierzby białej, wiciowej. Wysokość strefy ok. 10 m. Obszar porośnięty wysoką trawą.

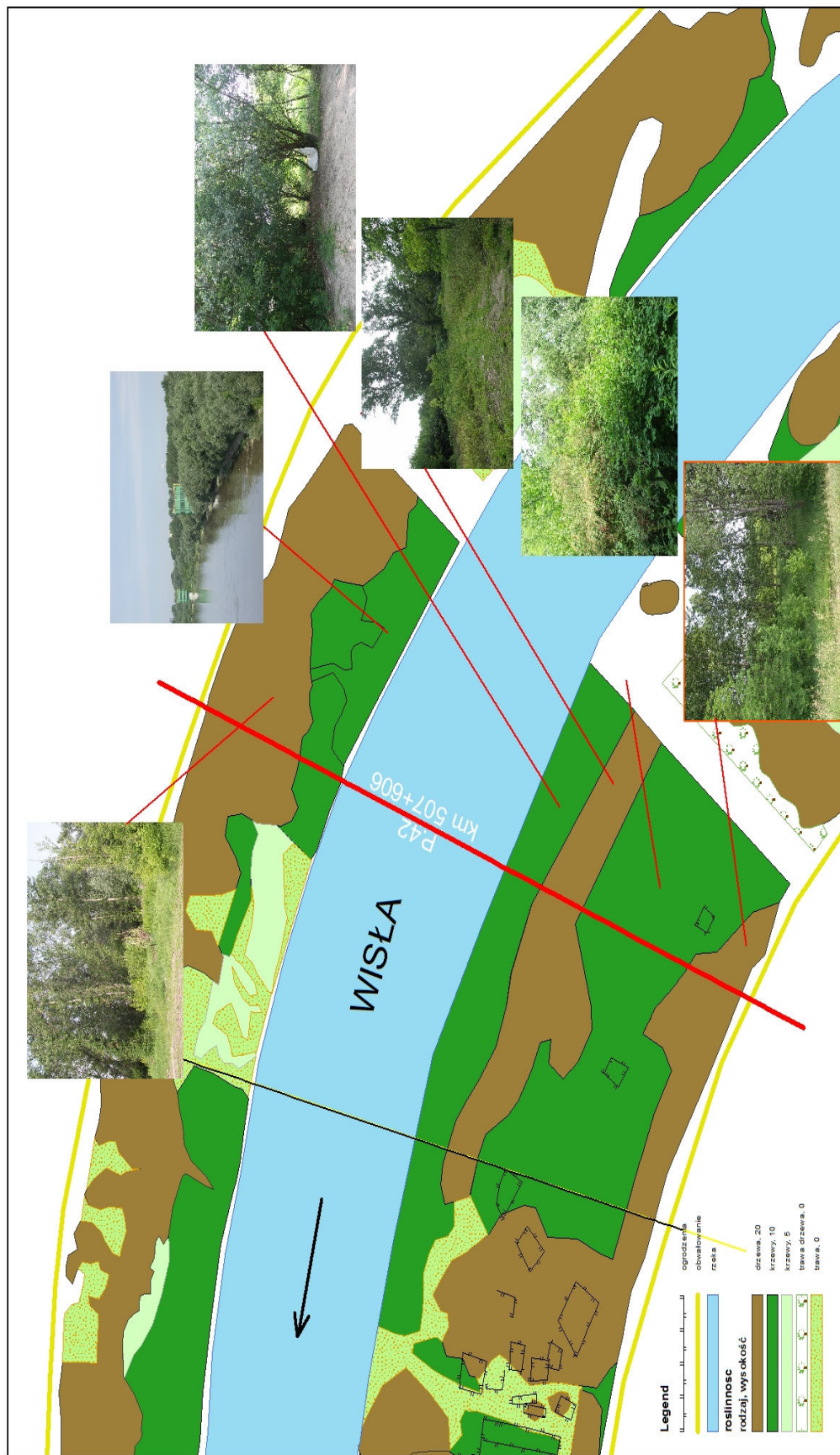
Strefa / obszar 6 – strefa krzewów

Strefa szerokości ok. 90 m, złożona z gatunków drzew i krzewów głównie wierzby białej, wiciowej wysokość roślin do 10 m. Obszar porośnięty wysoką trawą.

Strefa / obszar 7 – strefa drzew

Strefa drzew do wysokości 20 m. Główne gatunki to topola czarna, wierzba biała. Rozstawa drzew 10 x 10 m, średnica pni od 10 do 50 cm. Tam gdzie rozstawa drzew jest większa pojawiają się krzewiaste formy klonu jesionolistnego i wysokie ziołorośla (1 m wysokości). Obszar porośnięty wysoką trawą.

Plan sytuacyjny koryta Wisły z przekrojem wybranym do analiz przepustowości i pokazanym typem roślinności w terenie zalewowym przedstawiono na mapie (rys. 5.2).

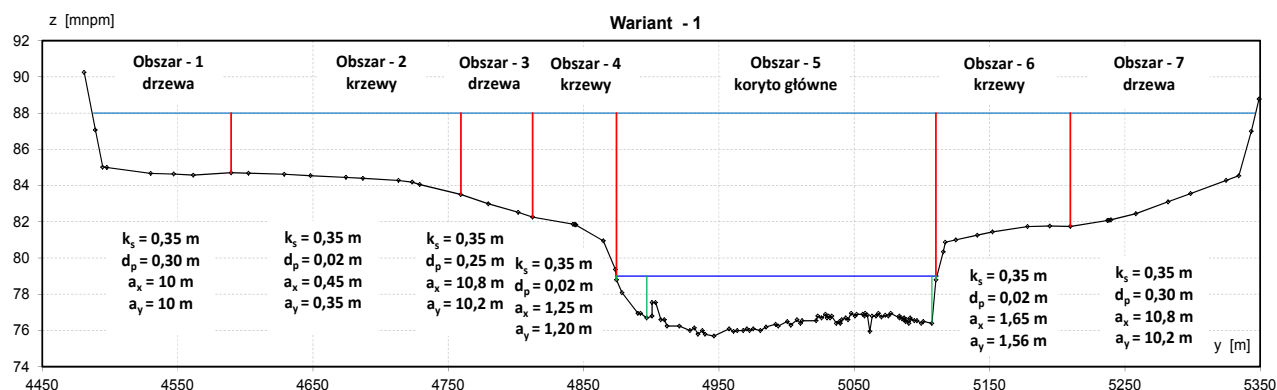


Rys. 5.2. Plan sytuacyjny koryta Wisły z przekrojem wybranym do analiz przepustowości i pokazanym typem roślinności w terenie zalewowym.

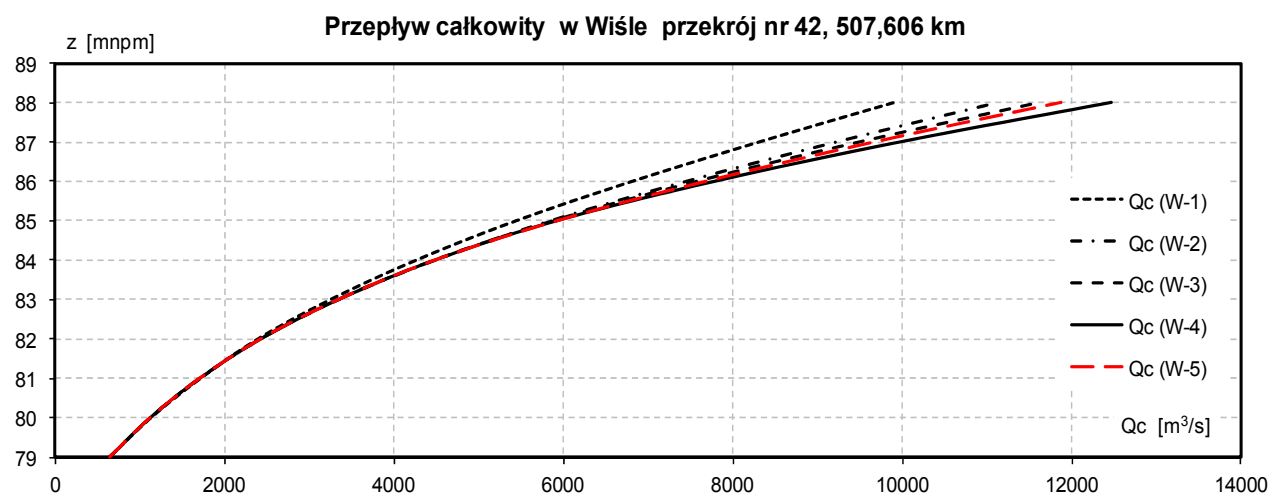
Przeanalizowano 5 wariantów przepustowości w przekroju koryta Wisły w km 507,606.

Wariant 1.

Na podstawie szacunkowej inwentaryzacji terenów zalewowych przyległych do przekroju koryta zweryfikowano parametry roślin w poszczególnych strefach pokazane na rysunku 5.3. Weryfikacji parametrów dokonano wykorzystując rzędną wody równą 85.20 m z dnia 22 maja 2010 roku przy przepływie $Q = 5740 \text{ m}^3/\text{s}$ i stałym spadku dna koryta równym $i = 0.24 \text{ ‰}$. Krzywą przepustowości przekroju koryta obliczoną w tym wariantie W-1 pokazano na rysunku 5.4.



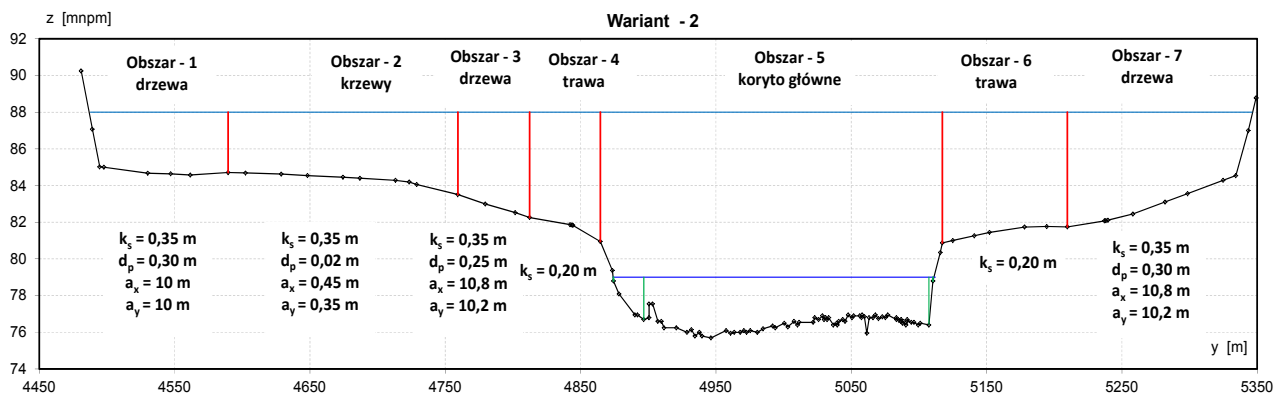
Rys. 5.3. Parametry roślin i chropowatości zweryfikowane w przekroju na podstawie rzędnej wody oraz natężenia przepływu z dnia 22 maja 2010 roku.



Rys. 5.4. Krzywe przepustowości koryta wyznaczone w poszczególnych wariantach występowania roślinności w przekroju.

Wariant 2.

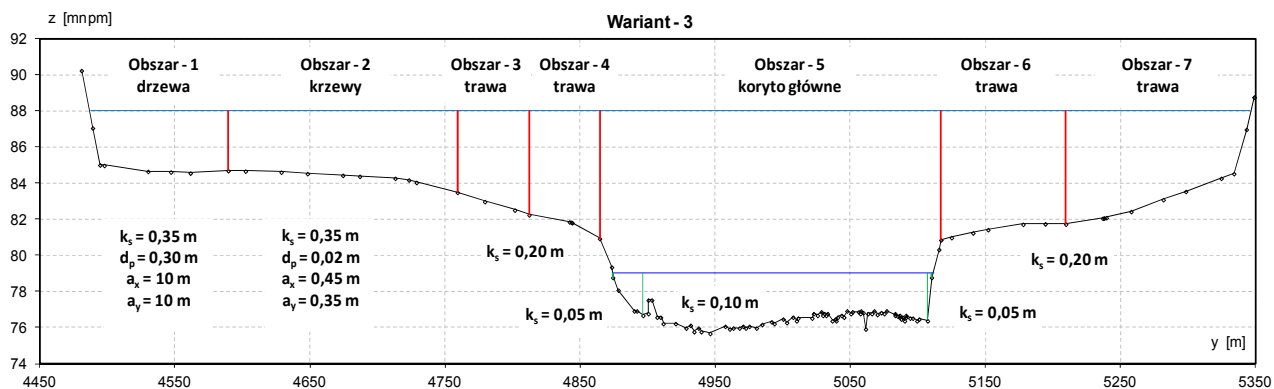
W wariantcie tym określono przepustowość koryta po całkowitym usunięciu roślinności z obszaru 4 i 6. Krzywą przepustowości W-2 przekroju koryta pokazano na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Parametry roślin i chropowatości zweryfikowane w przekroju na podstawie rzędnej wody oraz natężenia przepływu z dnia 22 maja 2010 roku w wariantie 2.

Wariant 3.

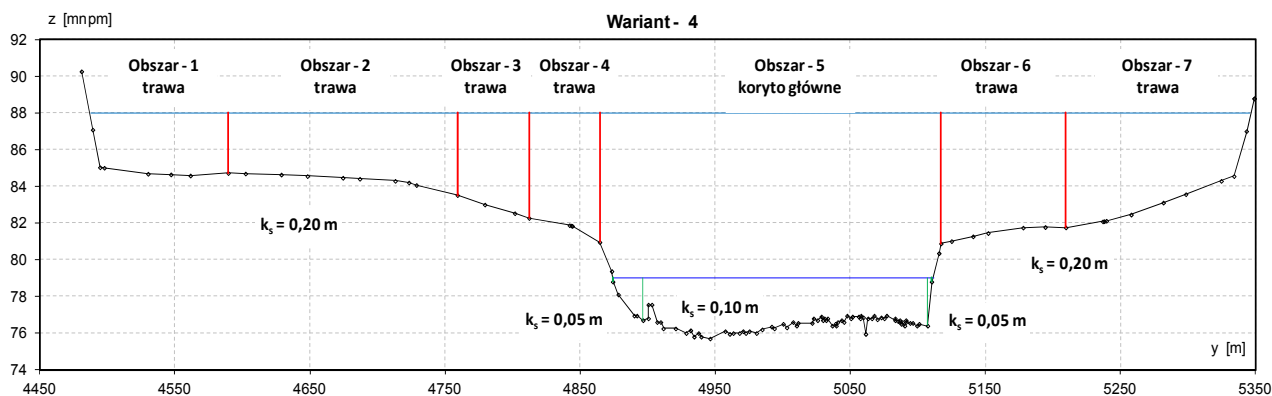
W wariantie tym określono przepustowość koryta po usunięciu roślinności z obszaru 3, 4 i 6, 7. Krzywą przepustowości przekroju koryta pokazano na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Parametry roślin i chropowatości zweryfikowane w przekroju na podstawie rzędnej wody oraz natężenia przepływu z dnia 22 maja 2010 roku w wariantie 3.

Wariant 4.

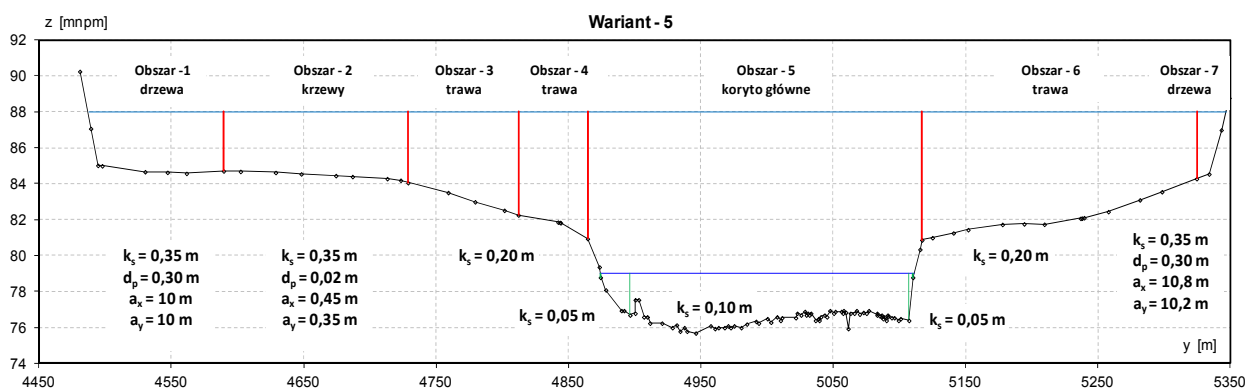
W wariantie tym całkowicie usunięto roślinność z obszaru przekroju. Krzywą przepustowości przekroju koryta pokazano na rysunku 5.4.



Rys. 5.7. Parametry roślin i chropowatości zweryfikowane w przekroju na podstawie rzędnej wody oraz natężenia przepływu z dnia 22 maja 2010 roku w wariantcie 4.

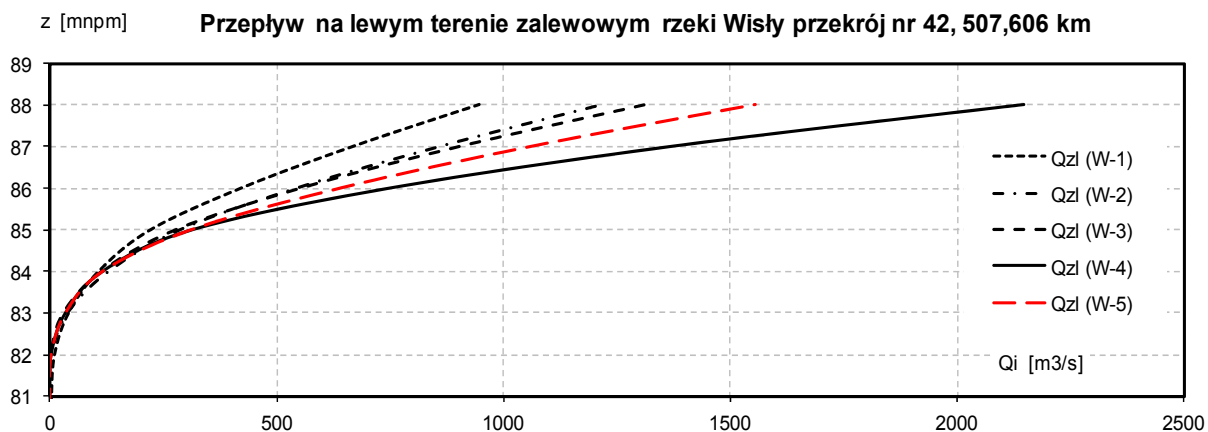
Wariant 5.

Usunięcie roślinności z obszaru przekroju zgodnie z opracowanymi zaleceniami dla przekroju z niesymetrycznymi terenami zalewowymi. Krzywą przepustowości przekroju koryta pokazano na rysunku 5.8.

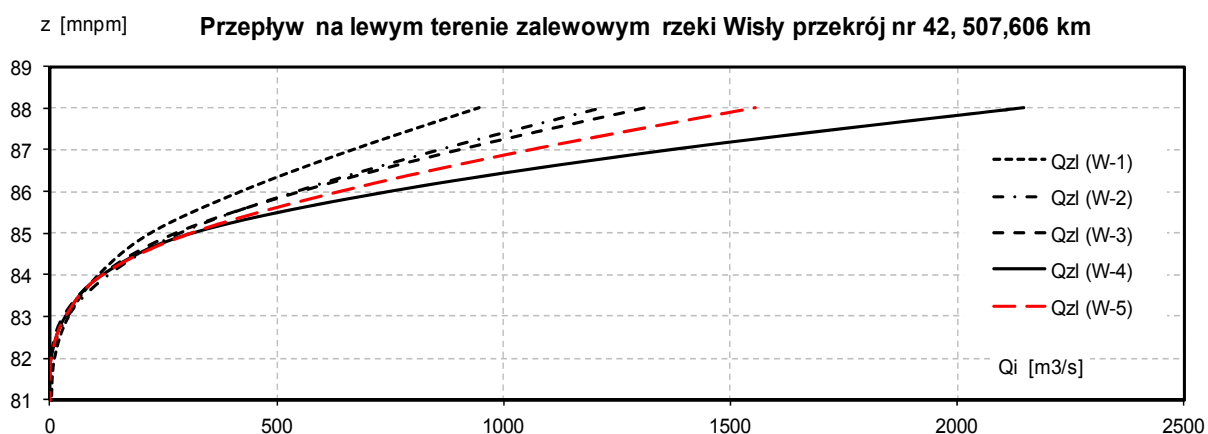


Rys. 5.8. Parametry roślin i chropowatości zweryfikowane w przekroju na podstawie rzędnej wody oraz natężenia przepływu z dnia 22 maja 2010 roku w wariantcie 5.

Zmianę przepustowości lewego i prawego terenu zalewowego w każdym z analizowanych wariantów pokazano na rysunku 5.9 i 5.10.

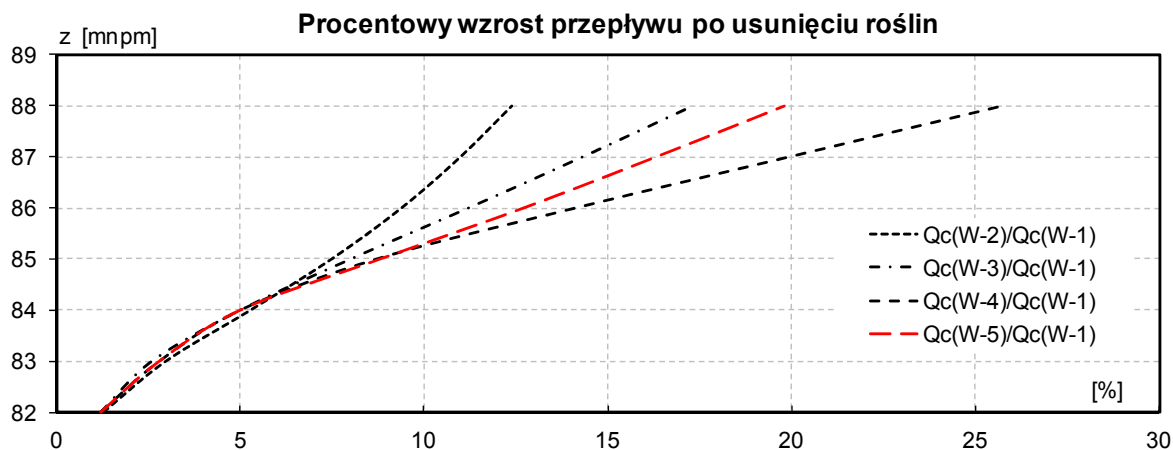


Rys. 5.9. Krzywe przepustowości lewego terenu zalewowego koryta wyznaczona w analizowanych wariantach występowania roślinności w przekroju.



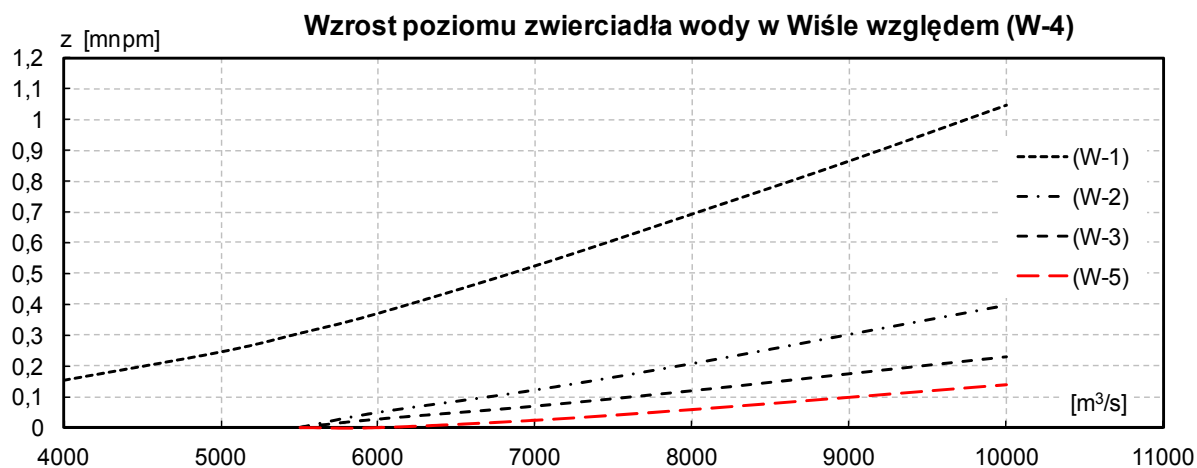
Rys. 5.10. Krzywe przepustowości prawego terenu zalewowego koryta wyznaczone w analizowanych wariantach występowania roślinności w przekroju.

Wzrost przepustowości koryta w poszczególnych wariantach usuwania roślin z przekroju koryta pokazano na rysunku 5.11.



Rys. 5.11. Procentowy wzrost przepustowości koryta w poszczególnych wariantach usuwania roślin w stosunku do stanu istniejącego.

Na rysunku 5.12 przedstawiono wzrost poziomów wody wywołany występowaniem roślinności w przekroju w stosunku do wariantu W-4 bez roślinności w przekroju.



Rys. 5.12. Wzrost stanów wody w poszczególnych wariantach w stosunku do wariantu 4 bez roślin w przekroju.

Na rysunku 5.13 pokazano przekroje poprzeczne złożonego koryta Wisły wybrane do analiz usuwania roślinności.



Rys. 5.13. Przekroje poprzeczne złożonego koryta Wisły wybrane do analiz usuwania roślinności.

Oszacowanie liczby gałęzi krzewów i drzew przewidzianej do usunięcia

Między przekrojami 41 (507,310 km), 42 (507,606 km) oraz 43 (508,00 km) wydzielono obszar 3 porośnięty drzewami, obszar 4 porośnięty krzewami oraz obszar 6 porośnięty krzakami i obszar 7 porośnięty drzewami i obliczono powierzchnię terenu zalewowego porośniętą przez krzewy i drzewa. Wyniki obliczeń powierzchni zalewu ograniczonej przekrojami 41 i 43 zestawiono w tabeli 5.1:

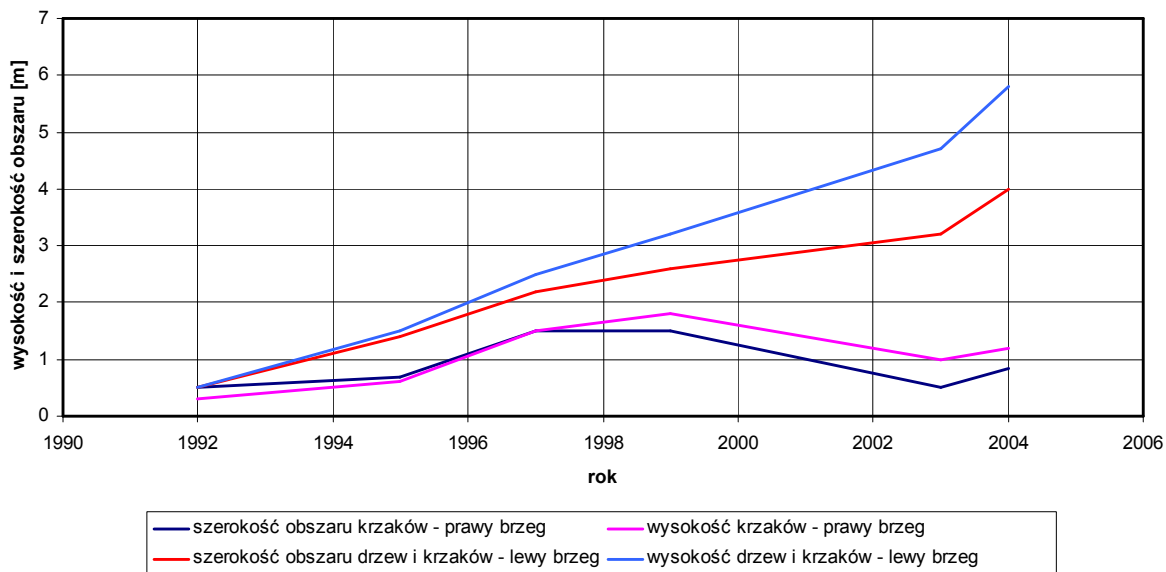
Tabela 5.1 Zestawienie liczby drzew i gałęzi krzaków przewidzianych do wycięcia w terenie zalewowym na długości 100 m koryta Wisły.

Obszar przekroju	Powierzchnia porośnięta drzewami	Powierzchnia porośnięta krzewami	Liczba sztuk w każdym obszarze na 100 m długości koryta
3	$65 \text{ m} \cdot 690 \text{ m} = 44850 \text{ m}^2$	0	$\frac{44850 \text{ m}^2}{10.8 \text{ m} \cdot 10.2 \text{ m} \cdot 690 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 59$
4	0	$65 \text{ m} \cdot 690 \text{ m} = 44850 \text{ m}^2$	$\frac{44850 \text{ m}^2}{1.25 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} \cdot 690 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 4333$
6	0	$90 \text{ m} \cdot 690 \text{ m} = 62100 \text{ m}^2$	$\frac{62100 \text{ m}^2}{1.65 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} \cdot 690 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 3636$
7	$20 \text{ m} \cdot 690 \text{ m} = 13800 \text{ m}^2$	0	$\frac{13800 \text{ m}^2}{10.8 \text{ m} \cdot 10.2 \text{ m} \cdot 690 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 18$
Razem	58650 m^2	106950 m^2	7969 gałęzi 77 drzew

6. Zalecenia prac utrzymaniowych w międzywalu rzek ograniczające nadmierny rozwój roślinności wpływającej na podwyższenie fali wezbraniowej

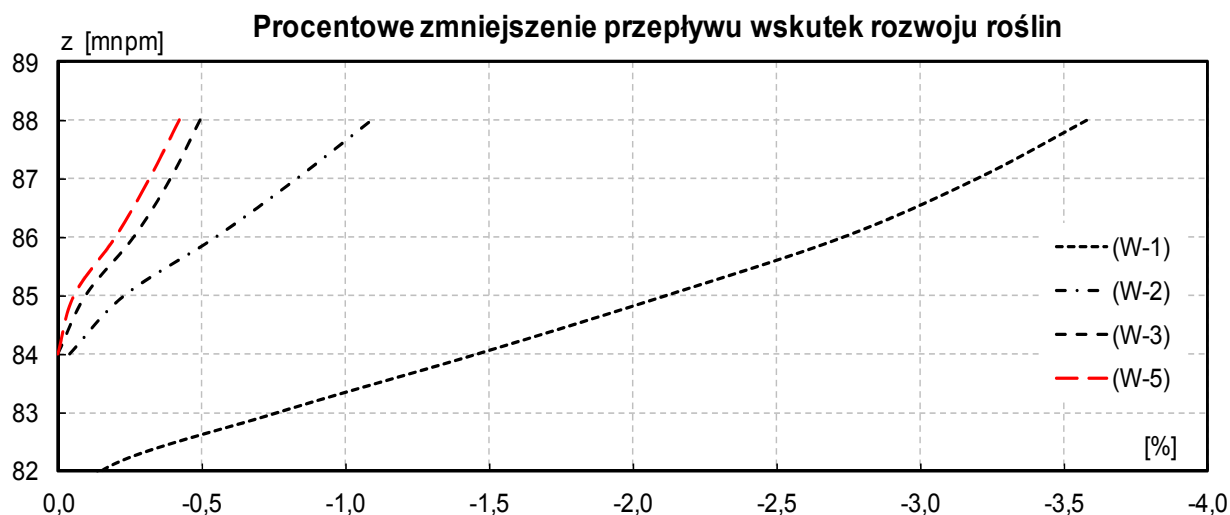
Do oceny przepustowości koryta z porastającą jego tereny zalewowe roślinnością przyjmuje się rozmiary obszaru przekroju zajętego przez skupiska roślin i parametry geometryczne roślin: d_p – średnicę drzew i gałęzi krzewów, a_x – odległości między drzewami w kierunku przepływu, a_y – odległości między drzewami w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu. Wartości średnie tych parametrów szacuje się na podstawie inwentaryzacji w terenie. Wielkość obszaru skupisk roślinnych i parametry roślin i zmieniają się istotnie z upływem czasu. Na rysunku. 6.1 pokazano zmiany wysokości i szerokości obszaru zajętego przez krzaki (prawy brzeg rzeki nizinnej) na renaturyzowanej rzece Enz w Niemczech⁵⁶. Na tym samym rysunku przedstawiono też zmiany szerokości obszaru krzaków i drzew oraz wysokości krzaków i drzew na brzegu prawym. Te unikalne dane pozwalają oszacować tempo rozwoju skupiska roślinności krzaczastej bez i z drzewami.

⁵⁶ Tamże, str. 3.



Rys. 6.1. Rozwój skupisk roślinności krzaczastej bez i z drzewami w terenie zalewowym renaturyzowanej rzeki Enz w Niemczech.

W analizach przepustowości możliwe jest uwzględnienie stanu rozwoju roślinności. Żeby wyjaśnić jak przyrost średnicy gałęzi i pni drzew wpływa na przepustowość przekroju koryta obliczono przepustowość wybranego przekroju Wisły, przy wzroście o 25 % średnicy gałęzi krzaków i pni drzew i zmniejszeniu o 25 % rozstawy między gałęziami krzaków. Zmiany przepustowości przekroju koryta Wisły dla wszystkich analizowanych wariantów utrzymania roślin pokazano na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Procentowe zmiany przepustowości przekroju koryta Wisły dla wszystkich analizowanych wariantów utrzymania roślin przy założeniu wzrostu o 25 % średnicy gałęzi krzaków i pni drzew oraz zmniejszeniu o 25 % rozstawy między gałęziami krzaków.

Jak widać, wzrost średnicy gałęzi i pni drzew nie powoduje istotnych zmian przepustowości w przekroju koryta. O wiele większy wpływ na jego przepustowość ma powiększanie się szerokości obszarów w przekroju skupisk roślin. Dla potrzeb praktyki i właściwego

utrzymania warunków przepływu wody w terenie zalewowym należy przestrzegać następujących zasad ograniczających nadmierny rozwój roślinności:

- szerokość obszaru zajętego przez skupiska krzaków i drzew powiększa się dwukrotnie szybciej niż obszar skupisk krzaków i średnio w ciągu 2 lat poszerza się o ponad 100 %. Oznacza to, że korekta powierzchni obszarów krzaczastych z drzewami nie powinna być prowadzona rzadziej niż co 2 lata,
- nie rzadziej niż co 3 lata powinno się prowadzić korekcje powierzchni obszarów krzaków bez drzew,
- nie należy dopuszczać w terenie zalewowym do zarastania powierzchni wokół pozostawionych drzew zaroślami i krzewami,
- bezwzględnie nie należy dopuszczać do powstawania i utrzymywania nawet najniższych ogrodzeń, w terenach zalewowych, które podczas przepływu wody w terenie zalewowym ulegają „uszczelnieniu” i pracują jak przelewy, wywołując dodatkowe spiętrzenie wody w przekroju.

Zasady te dotyczą obszarów utrzymywanych zgodnie z kryteriami usuwania roślinności z terenów zalewowych podanych w rozdziale 4.