POLSKA AKADEMIA NAUK – Oddział w Krakowie
KOMISJA TECHNICZNEJ INFRASTRUKTURY WSI

POLISH ACADEMY OF SCIENCES – Cracow Branch
COMMISSION OF TECHNICAL RURAL INFRASTRUCTURE

INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH

8

INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Seria: monografia
monograph

Bogusław Michalec

WYBRANE METODY OKREŚLANIA INTENSYWNOŚCI TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO

SELECTED METHODS FOR SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT DETERMINATION

Kraków 2009

RADA PROGRAMOWA – RESEARCH COUNCIL

Radomir Adamovský *(Praga)*, Tadeusz Bednarczyk, Wacław Bieda, Jerzy Gruszczyński, Bent Hasholt *(Kopenhaga)*, Dušan Húska *(Nitra)*, Stanisław Krzanowski *(przewodniczący)*, Antoni T. Miler, Jan Pawełek, Štefan Pogran (Nitra), Artur Radecki-Pawlik, Jerzy Ratomski, Stanisław Rolbiecki, Czesław Rycąbel, Janusz Lech Siemiński, Stefan Stojko *(Lwów)*, Rastislava Stolična *(Bratysława)*, Ryszard Ślizowski, Gerlind Weber *(Wiedeń)*, Stanisław Węglarczyk, Andrzej Woźniak, Zdzisław Wójcicki

KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL BOARD

Jerzy Gruszczyński *(red. nacz.)*, Jerzy Kwapisz *(z-ca red. nacz.)*,
Anna Krakowiak-Bal *(sekretarz)*,
Stanisław Węglarczyk (*red. angielska*; sweglar@pk.edu.pl)

WYDAWCA – EDITOR

Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN w Krakowie
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

© Copyright by:
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN , św. Jana 28, 31-018 Kraków

ADRES REDAKCJI – EDITORIAL OFFICE ADDRESS

Redakcja IiETW, Balicka 116 B, 30-149 Kraków, tel. (12)(662) – 46 59, - 46 58, - 46 55,
Fax: (12) 662 46 60, E-mail: jerzy.gruszczynski@ur.krakow.pl, www.infraeco.pl
Webmaster: Jakub Sikora (Jakub.Sikora@ur.krakow.pl), tel. 012-662 46 62

ISSN 1732-5587

Okładka: *Adam Chłobowski*
Korekta i adiustacja: *Krystyna Oliwa*

Skład komputerowy, druk, oprawa:
S.C. DRUKROL, AL. 29 Listopada 46, Kraków, tel. (12) 412 46 50

Monografię wykonano w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytetu Rolniczego im.Hugona Kołłątaja w Krakowie

Recenzent: ***Prof. dr hab.inż. Tadeusz Bednarczyk***

SPIS TREŚCI

1. Wstęp 9
2. Ogólna charakterystyka rumowiska rzecznego 12
   2.1. Cechy fizyczne rumowiska rzecznego 12
      2.1.1. Parametry rumowiska unoszonego 14
      2.1.2. Prędkość opadania ziaren rumowiska 16
   2.2. Ogólna charakterystyka sedymentów 21
3. Kryterium początku ruchu i unoszenia rumowiska 23
   3.1. Formy denne, szorstkość dna i profil prędkości 24
   3.2. Profil koncentracji i koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia nad dnem 28
4. Wybrane metody określenia transportu rumowiska unoszonego 31
   4.1 Określenie transportu rumowiska unoszonego na podstawie wielkości denudacji w zlewni 32
      4.1.1. Metody Reniger-Dębskiego i Brańskiego 33
      4.1.2. Metody zbudowane na uniwersalnym równaniu strat glebowych USLE 34
   4.2. Metoda Churchilla 37
   4.3. Metoda batometryczna 38
   4.4. Metoda Bijkera 41
   4.5. Metoda van Rijna 45
5. Charakterystyka obiektów badań 47
   5.1. Charakterystyka rzeki Wisłoki i zbiornika wodnego w Krempnej.... 48
   5.2. Charakterystyka rzeki Dłubni i zbiornika wodnego w Zesławicach 49
6. Określenie intensywności transportu rumowiska unoszonego na przykładzie obiektów badań 52
   6.1. Określenie intensywności transportu rumowiska unoszonego metodami Reniger-Dębskiego i Brańskiego 53
   6.2. Określenie transportu rumowiska unoszonego metodami DR-USLE i MUSLE 54
   6.3. Określenie transportu rumowiska unoszonego metodą Churchilla 57
   6.4. Określenie transportu rumowiska unoszonego na podstawie pomiarów batometrycznych 60

6.5. Określenie transportu rumowiska unoszonego metodą Bijkera..... 65
6.6. Określenie transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna 71
7. Podsumowanie 80
8. Bibliografia 84
Streszczenie 90
Summary 91

CONTENTS

1. Introduction 9
2. General characteristic of river sediments..... 12
   2.1. Physical properties of river sediment 12
      2.1.1. Parameters of suspended sediment..... 14
      2.1.2. Fall velocity of sediment particles 16
   2.2. General characteristic of sediment deposits 21
3. Criterion of initiation of motion and suspension of sediments 23
   3.1. Bed forms, bed roughness and velocity profile 24
   3.2. Concentration profile and sediment concentration on reference level 28
4. Suspended sediment chosen methods 31
   4.1. Appraisal of suspended sediment transportation on the basis of cachment denudation..... 32
      4.1.1. Reniger-Dębski's and Brański's method 33
      4.1.2. Methods basing on the universal soil losses equation USLE 34
   4.2. Churchill's method..... 37
   4.3. Bathometric method 38
   4.4. Bijker's method 41
   4.5. Van Rijn's method 45
5. Characteristics of investigated objects 47
   5.1. Characteristics of Wisłoka river and water reservoir at Krempna 48
   5.2. Characteristics of Dłubnia river and water reservoir at Zesławice.... 49
6. Appraisal of suspended sediment transportation on example of investigated objects 52
   6.1. Appraisal of suspended sediment transportation according to Reniger-Dębski's and Brański's method 53
   6.2. Appraisal of suspended sediment transportation according to DR-USLE and MUSLE method 54
   6.3. Appraisal of suspended sediment transportation according to Churchill's method 57
   6.4. Appraisal of suspended sediment transportation on the basis of bathometric measurements 60

6.5. Appraisal of suspended sediment transportation according to Bijker's method 65

6.6. Appraisal of suspended sediment transportation according to van Rijn's method 71

7. Summary 80

8. Literature 84

Streszczenie 90

Summary 91

SPIS OZNACZEŃ – LIST OF SYMBOLS

A – powierzchnia przekroju cząstki / *surface section area of particle* [m^2],
a – poziom odniesienia / *reference level* [m],
C – koncentracja wagowa rumowiska / *mass concentration of sediment* [$g \cdot m^{-3}$],
C_a – koncentracja rumowiska na wysokości poziomu odniesienia „a" nad poziomem dna / *concentration of sediment on reference level* [$g \cdot m^{-3}$],
d – średnica ziarna rumowiska / *grain diameter* [m],
D_* – parametr ziarnowy / *grain parameter* [-],
d_{16} – średnica ziarna stanowiącego wraz z drobniejszymi 16% zawartości wagowej próbki / *median grain diameter for 16% of sieve curve* [mm],
d_{50} – średnica ziarna stanowiącego wraz z drobniejszymi 50% zawartości wagowej próbki / *median grain diameter for 50% of sieve curve* [mm],
d_{84} – średnica ziarna stanowiącego wraz z drobniejszymi 84% zawartości wagowej próbki / *median grain diameter for 84% of sieve curve* [mm],
d_g – średnica średnia geometryczna / *average diamenter of grain* [mm],
d_i – średnia wartość średnicy ziaren rozpatrywanego przedziału [mm],
g – przyspieszenie ziemskie / *acceleration of gravity* [$m \cdot s^{-2}$],
h – napełnienie w korycie / *depth of flow* [m],
i – spadek zwierciadła wody / *water table slope* [-],
p_i – procentowy udział frakcji / *percent content of fraction* [%],
r – promień ziarna rumowiska / *diameter of grain* [m],
$\overline{M}$ – średnia roczna masa rumowiska zatrzymanego w zbiorniku [$t \cdot rok^{-1}$] / *mean annual mass of sediment trapped in reservoir* [$t \cdot year^{-1}$],
S – średnia roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni [$t \cdot rok^{-1}$] / *mean annual mass of sediment deliered from catchment* [$t \cdot year^{-1}$],
T – parametr transportu / *stage transport parameter* [-],
u_* – prędkość dynamiczna / *bed-shear velocity* [$m \cdot s^{-1}$],
u_{*cr} – krytyczna prędkość ścinająca określana wg Shieldsa / *critical bed-shear velocity according to Shields* [$m \cdot s^{-1}$],
u'_* – prędkość ścinająca uzależniona od ziaren rumowiska / *bed-shear velocity related to grains* [$m \cdot s^{-1}$],

w_s – prędkość opadania pojedynczego ziarna / *fall velocity of single grain* [$m \cdot s^{-1}$],

w_{d50} – prędkość opadania pojedynczego ziarna o średnicy stanowiącego wraz z drobniejszymi 50% zawartości wagowej próby / *fall velocity of single grain with median grain diameter* [$mm \cdot s^{-1}$],

w_f – prędkość opadania agregatów / *fall velocity of aggregates* [$m \cdot s^{-1}$],

w_{f50} – prędkość opadania agregatów ziaren stanowiących wraz z drobniejszymi 50% zawartości wagowej próby / *fall velocity of aggregates with median grain diameter* [$mm \cdot s^{-1}$],

z – wysokość nad dnem rozpatrywanego poziomu / *height of level above bed* [m],

β – zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska / *reservoir sediment trap efficiency* [-],

β_* – współczynnik dyfuzji cząstek stałych i „cząstek" wody / *sediment diffusion coefficient* [-],

κ – stała von Karmana, wynosząca 0,4 dla szorstkiego, płaskiego dna / *constant of von Karman, receive 0.4 for flat bed*,

ν – lepkość kinematyczna wody / *kinematic viscosity coefficient of water* [$m^{-2} \cdot s^{-1}$],

ρ – gęstość wody / *density of water* [$kg \cdot m^{-3}$],

ρ_s – gęstość rumowiska / *density of sediment* [$kg \cdot m^{-3}$].

1. WSTĘP

Rzeki i potoki kojarzone są najczęściej z przepływem wody, a także z wodą zapewniającą życie i byt organizmów oraz z zagrożeniem wynikającym z powodzi. Dopiero później dostrzega się ich wpływ na formowanie powierzchni terenu poprzez rozmywanie koryta, kształtowanie dolin. Transportując nie tylko produkty erozji rzecznej, lecz również powierzchniowej, przyczyniają się do ciągłych zmian morfologicznych terenu. Rumowisko rzeczne pochodzące z erozji powierzchniowej lub liniowej pokryw zwietrzelinowych stanowiących gleby, jak również rumowiskowy materiał skalny pochodzący z obrywów, osuwisk, erozji brzegów lub dna koryta rzeki, odprowadzane jest ze zlewni. Rumowisko to przy sprzyjających warunkach hydrodynamicznych zostaje zatrzymane lub osadzone w korycie rzecznym, na terenach przyległych do rzeki lub jest deponowane w naturalnych lub sztucznych zbiornikach wodnych.

Określenie intensywności transportu rumowiska rzecznego jest ważnym zagadnieniem w ocenie stabilności, czy też podatności koryt rzecznych na przeobrażenia powstałe w wyniku erozji brzegowej i wgłębnej dna lub akumulacji rumowiska. Właściwe określenie warunków początku ruchu rumowiska rzecznego, natężenia przepływu i warunków osadzenia lub sedymentacji tego rumowiska, stanowi istotny element przy projektowaniu budowli wodnych, systemów inżynierii rzecznej i w pracach regulacyjnych rzek. Ze względu na uziarnienie, pochodzenie, sposób przemieszczania się w korycie cieku rumowisko rzeczne dzielone jest na wleczone, unoszone i zawieszone [van Rijn 1984a; van Rijn 1984b; Graf 1984]. Rumowisko unoszone stanowi dominującą część materiału mineralnego transportowanego przez rzeki. Jak podają między innymi Brański [1975], Mikulski [1961], Reed i Hoffman [1997], Aspelund i Madsen [2004] rumowisko unoszone stanowi ponad 90% całkowitego transportu rumowiska. Natężenie transportu rumowiska unoszonego w cieku można określić w sposób bezpośredni, czyli na podstawie wyników pomiarów rumowiska lub innych cech fizycznych opisujących jego koncentrację i w sposób pośredni, tj. za pomocą metod obliczeniowych. Do metod pomiarowych można zaliczyć metody: batometryczną, fotometryczną, elektrooporową, ultradźwiękową, radioizotopową. Pośrednim sposobem określania transportu rumowiska unoszonego są metody obliczeniowe bazujące na równaniach empirycznych, półempirycznych i teoretycznych. Metody te oparte są na określeniu parametrów hydraulicznych opisujących przepływ wody i rumowiska w korycie lub na określeniu wielu czynni-

ków wpływających na erozję w zlewni oraz ilość materiału dostarczanego do koryta rzecznego. Są to najczęściej metody empiryczne opracowane w wyniku badań procesów erozji w zlewniach, do których należy zaliczyć metody bazujące na klasyfikacji intensywności denudacji, wskaźnikach denudacji odpływowej, jak również metody opracowane na bazie uniwersalnego równania strat glebowych (USLE). Spośród metod uwzględniających parametry hydrauliczne, opisujące przepływ wody i rumowiska w korycie oraz uwzględniające rozkład prędkości i koncentracji rumowiska w pionie, można wymienić m.in. metody Bagnolda [1954], Colemana czy Ikedy [Batuca, Jordaan 2000], Bijkera [1971], a także metodę van Rijna [1984b, 2007]. Są one rozwinięciem opisu transportu rumowiska unoszonego i jego koncentracji, opartego na teorii dyfuzji. Natomiast opis funkcji rozkładu koncentracji zawiesiny oparty jest na stanie równowagi hydrodynamicznej ruchu ustalonego i najczęściej bazuje na półdoświadczalnych równaniach dyfuzji turbulentnej. Takie równania wymagają wprowadzenia różnych współczynników (np. współczynników wymiany sedymentu, dyspersji czy osadzania), określanych na drodze doświadczalnego ich dopasowania do warunków przepływu wody i rumowiska.

Stosując dostępne w literaturze światowej metody określenia natężenia transportu rumowiska rzecznego, można uzyskać wyniki znacznie odbiegające od wartości rzeczywistych. Wiąże się to niejednokrotnie z koniecznością rozpatrywania zagadnienia oddzielnie dla danego regionu, a rozwiązania uniwersalne prowadzą do ujęć zbyt ogólnych, z czego wynika ich mała dokładność [Gładki 1976]. W światowej literaturze fachowej można znaleźć wiele prac naukowych poświęconych rumowisku wleczonemu i unoszonemu. Współcześnie w literaturze krajowej, dotyczącej procesów fluwialnych, wiele prac badawczych dotyczy rumowiska wleczonego. Mniej uwagi poświęca się rumowisku unoszonemu, przedstawiając głownie wyniki pomiarów batometrycznych [m.in. Bednarczyk 1994; Łajczak 1989; Jakubowki 2003; Szewrański i in. 2004; Banasik, Hejduk 2005], lub oceny transportu rumowiska na tle procesów erozji w zlewni [m.in. Banasik 1994; Banasik, Górski 1992; Michalec 2001], czy też przedstawiając udział rumowiska unoszonego w procesie zamulania zbiorników wodnych [m.in. Szewrański i in. 2002; Bodulski, Górski 2006; Michalec 2008c]. Znacząca ilość polskich publikacji z zakresu transportu rumowiska unoszonego ukazała się w okresie powojennym do lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Dużą trudność w prowadzeniu badań opisujących zmienność transportu rumowiska unoszonego w wieloleciu sprawia brak dostatecznej sieci posterunków hydrometrycznych na rzekach pierwszego i drugiego rzędu, rejestrujących koncentracje tego rumowiska. Na rzekach wyższych rzędów posterunków tych nie ma. A przecież znajomość charakterystyk opisujących zmienność natężenia dobowego, sezonowego transportu rumowiska, jego jakości, tj. uziarnienia, zawartości części organicznych jest zagadnieniem kluczowej wagi przy modelowaniu procesu sedymentacji zanieczyszczeń w zbiornikach wodnych i osadnikach wstępnych [Banasik, Hejduk 2005].

Natężenie transportu rumowiska unoszonego określa się w Polsce głównie za pomocą metod posługujących się określeniem strat glebowych w zlewni lub na podstawie wyników pomiarów batometrycznych, jeżeli jest to możliwe ze względu na posiadanie ciągów danych hydrometrycznych, obejmujących przepływy średnie dobowe i odpowiadające im koncentracje rumowiska unoszonego. Rzadziej stosowane są modele empiryczne. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie kilku wybranych metod służących określeniu transportu rumowiska unoszonego. Autor nie ograniczył się tylko do ich przedstawienia lecz również przedstawił ich praktyczne zastosowanie. Posiadając wyniki wieloletnich pomiarów batometrycznych koncentracji rumowiska w przekrojach pomiarowych dwóch rzek Polski południowej, określono natężenie transportu rumowiska unoszonego. Wyniki tych pomiarów potraktowano jako miarodajne przy ocenie wyników obliczeń pozostałymi prezentowanymi metodami. Autor ma pełną świadomość, że wyniki pomiarów batometrycznych, uwzględniających zróżnicowanie koncentracji rumowiska unoszonego w przekroju poprzecznym badanych rzek, nie przedstawiają rzeczywistych wartości natężenia transportu, lecz stanowią jedynie ich przybliżenie. W tym opracowaniu jako niekohezyjne rumowisko unoszone rozumiane będzie rumowisko pobrane za pomocą batometru i będące sumą unoszonego i zawieszonego.

Drugorzędnym celem jest uzupełnienie problematyki transportu rumowiska wleczonego przedstawionej przez Radeckiego-Pawlika [2006] o zagadnienia związane z rumowiskiem unoszonym.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA RUMOWISKA RZECZNEGO

Rumowisko rzeczne, ze względu na pochodzenie, sposób poruszania się w rzekach, kanałach i strumieniach można generalnie podzielić na trzy rodzaje, tj. wleczone, unoszone i rozpuszczone [Dąbkowski i in. 1982]. Najczęściej podawany jest podział rumowiska uwzględniający formy transportu [van Rijn 1984a; van Rijn 1984b; Graf 1984]:

– transport wleczyn (*bed load*) – transport cząsteczek pozostających w bliskim kontakcie z dnem, ruch materiału polegający na przesuwaniu, toczeniu i wykonywaniu niewielkich skoków poszczególnych ziaren, pokonujących niewielkie odległości,

– transport unosin (*suspended load*) – transport cząsteczek mających sporadyczny kontakt z dnem, ruch materiału podniesionego z dna i przemieszczanego na znaczne odległości,

– transport zawiesin (*wash load*) – transport cząsteczek bez kontaktu z dnem, część transportowanego materiału może ulec opadnięciu na skutek zmniejszenia prędkości przepływu wody w cieku.

Jak podaje Mokwa [2002], podział rumowiska zaproponowany przez Grafa [1984] lepiej opisuje zjawiska fluwialne w korytach rzecznych niż podział na rumowisko wleczone i unoszone. W dalszej części pracy, ze względu na zastosowane metody pomiarowe i obliczeniowe rumowiska, pojęcie rumowisko unoszone dotyczyć będzie zarówno rumowiska unoszonego, jak i zawieszonego.

Rumowisko unoszone to materiał klastyczny poruszający się z masą wody płynącej, którego ciężar właściwy jest większy od ciężaru właściwego wody [Ratomski, Witkowska 1992]. Rumowiskiem unoszonym według klasyfikacji Brańskiego i Skibińskiego [1965] nazywany jest materiał skalny chwytany za pomocą batometrów.

2.1. CECHY FIZYCZNE RUMOWISKA RZECZNEGO

Wielkość ziaren rumowiska jest jedną z podstawowych cech fizycznych rumowiska rzecznego. Wiele właściwości rumowiska zależy głównie od wielkości jego ziaren. Wielkość ziaren może zostać określona za pomocą analiz sitowych, pomiarów wykorzystujących metody optyczne lub fotograficzne. Ze względu na wielkość ziaren rumowiska dokonuje się klasyfikacji rumowiska, wyróżniając rumowisko wleczone, unoszone i zawieszone.

Parzonka [1991] wprowadza podział rumowiska z wydzieleniem rumowiska unoszonego i zawieszonego (rumowiska spławialnego). Przy czym pojęcie rumowisko zawieszone określa materiał terrygeniczny transportowany przez rzekę, który nie ma kontaktu z dnem. Natomiast rumowisko unoszone jest materiałem pochodzącym z dna cieku i może zasilać dno w całym przedziale przepływów wody w cieku. Zgodnie z tym podziałem rumowisko zawieszone stanowią ziarna mineralne o wielkości 5-100 μm, spośród których można wyróżnić frakcje ilaste o wielkości 0,5–10 μm, ilasto-pylaste złożone z ziaren o wielkości od 2 μm do 30 μm. Rumowisko wleczone stanowią z reguły ziarna grubsze, których średnica d_{50} jest większa od 1,0–1,2 mm [Parzonka 1991].

Król [1986] podzielił rumowisko w zależności od masy i sposobu poruszania, uwzględniając wielkość ziaren, na rumowisko skalne, stanowiące największe odłamki skał (głazy, toczyny), rumowisko wleczone, w skład którego wchodzą otoczaki o średnicach 75–15 mm, żwiry o średnicach 15–2,5 mm i piaski rzeczne o średnicach 2,5–0,05 mm. Rumowiskiem unoszonym według Króla [1986] są ziarna miału skalnego o średnicach 0,05-0,01 mm i pyłu mineralnego o średnicach mniejszych od 0,01 mm. Król [1986] wyróżnił ponadto rumowisko zawieszone, jako drobne cząstki płynące z wodą, o gęstości mniejszej niż gęstość wody i roztwory, czyli produkty działania chemicznego wody.

Według podziału rumowiska według van Rijna [1984a], uwzględniającego formy transportu cząsteczki, rumowiskiem unoszonym nazywa się ziarna mające sporadyczny kontakt z dnem i które podniesione z dna są przemieszczane na znaczne odległości. Natomiast zawiesiną nazywa cząsteczki transportowane w cieku bez kontaktu z dnem. Część transportowanych zawiesin może ulec opadnięciu na skutek zmniejszenia prędkości przepływu wody w cieku.

Kształt ziaren rumowiska jest bardzo zróżnicowany. W większości opracowań teoretycznych przyjmuje się kształt kulisty cząsteczek. W literaturze można znaleźć wiele miar opisujących kształt ziaren rumowiska. Jednym z popularnych parametrów charakteryzujących rumowisko jest współczynnik kształtu Corey'a S_F [Batuca, Jordaan 2000]:

$$S_F = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \tag{2.1}$$

w którym a, b i c są maksymalną, średnią i minimalną średnicą ziaren, które określane są jako „system współrzędnych Krumbeina".

Poza współczynnikiem kształtu ziarna rumowiska określa się również współczynnik sferyczności [Bartnik 2006]:

$$\Psi_P = \sqrt[2]{\frac{b \cdot c}{a^2}} \tag{2.2}$$

w którym a, b i c jak we wzorze (2.1).

Średnica miarodajna ziaren rumowiska jest najczęściej stosowaną miarą, służącą scharakteryzowaniu rumowiska. Określana jest na podstawie krzywej przesiewu rumowiska, określanej krzywą dystrybucji. Jako średnicę miarodajną bardzo często przyjmuje się średnicę d_{50}, ze względu na łatwość wyznaczenia. Średnicę miarodajną określa się najczęściej jako:

$$d_m = \frac{\sum d_i \cdot \Delta p_i}{\sum d_i} \tag{2.3}$$

lub

$$d_m = \frac{d_{16} + d_{84}}{2} \tag{2.3}$$

czy też za pomocą mniej popularnego wzoru Krumbeina [Batuca, Jordaan 2000], wyznaczając wcześniej maksymalną, średnią i minimalną średnicę ziaren:

$$d_m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \tag{2.4}$$

Gęstość właściwa rumowiska rzecznego zależy od wielu czynników, spośród których należy wymienić pochodzenie materiału mineralnego i jego skład pektograficzny, porowatość. Ziarna rumowiska rzecznego w Polsce pochodzą głównie z rozdrobnienia skał osadowych, magmowych, czy też metamorficznych, a podstawowym minerałem budującym je jest kwarc. Przyjmuje się, że ciężar właściwy rumowiska wynosi 2,6–2,7 $t \cdot m^{-3}$.

2.1.1. Parametry rumowiska unoszonego

Spośród wielu parametrów lub charakterystyk, opisujących cechy fizyczne rumowiska unoszonego, można wyróżnić najważniejsze, grupując je w trzech grupach.

I. Parametry określone na podstawie składu ziarnowego rumowiska, przedstawiony za pomocą krzywej przesiewu, określone na podstawie analizy prób pobranego rumowiska.

Do tych parametrów można między innymi zaliczyć średnicę miarodajną (wzory 2.2, 2.3 i 2.4), odchylenie standardowe, średnicę średnią geometryczną, standardowe odchylenie geometryczne, wskaźnik różnoziarnistości wg Hazena, współczynnik wysortowania wg Traska [Batuca, Jordaan 2000]. Wzory służące określeniu tych parametrów można odnaleźć w wielu pracach naukowych min. w pracach Batuci i Jordaana [2000], Radeckiego-Pawlika [2002], Michalca [2008d]. Poniżej podano jedynie podstawowe wzory służące określeniu średniej średnicy geometrycznej i standardowego geometrycznego odchylenia.

Średnicę średnią geometryczną (d_g) określa się według wzoru:

$$d_g = (d_{84} \cdot d_{16})^{1/2} \tag{2.5}$$

Standardowe geometryczne odchylenie (σ_g) określić można według wzoru:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \tag{2.6}$$

II. Prędkość opadania (w_s) określana dla pojedynczych ziaren rumowiska niespoistego, ziaren tworzących agregaty w wyniku flokulacji, czy też osiadania cząstek w mieszaninie lub w tzw. „chmurze" [Bruk 1970].

Zagadnienia dotyczące prędkości opadania ziaren rumowiska zostały szczegółowo omówione w następnym podrozdziale (2.1.2).

III. Parametry określające stabilność ziaren w dnie cieku, która zależy od sił działających na rumowisko. Na ziarno o średnicy (d) znajdujące się na dnie cieku działają bezwymiarowe naprężenia ścinające (τ):

$$\tau = \frac{u_*^2}{g \cdot d} \cdot \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \tag{2.7}$$

Według van Rijna [1984a i 1984b] ziarna pozostają w spoczynku, gdy wartość prędkości dynamicznej (u_*) jest mniejsza od wartości krytycznej początku ruchu (u_{*cr}). Gdy wartość prędkości dynamicznej przekroczy wartości krytyczne początku ruchu, rozpocznie się ruch ziaren (toczenie, przesuwanie), z zachowaniem ciągłego kontaktu z dnem. W miarę wzrostu prędkości dynamicznej ziarna mogą być nadal przemieszczane po dnie lub mogą wykonywać bardziej lub mniej regularne skoki. Wzrastająca prędkość dynamiczna, przekraczająca wartości prędkości opadania poszczególnych ziaren, powoduje trwałe ich unoszenie. W ten sposób poszczególne ziarna zostają dalej transportowane jako rumowisko unoszone. Analizując ruch ośrodka dwufazowego, van Rijn wprowadza do swojej analizy dwa parametry charakteryzujące ruch rumowiska. Są to: bezwymiarowy parametr ziarnowy (D_*) i parametr transportu (T):

$$T = \frac{\left(u_*'\right)^2 - \left(u_{*cr}\right)^2}{\left(u_{*cr}\right)^2} \tag{2.8}$$

$$D_* = d_{50}\left[\frac{\left(\rho_s - \rho\right) \cdot g}{\nu^2}\right]^{1/3} \tag{2.9}$$

Poza wymienionymi wyżej parametrami charakteryzującymi ruch rumowiska szczególną uwagę należy zwrócić na opublikowane przez Rouse w 1937

roku równanie rozkładu koncentracji w pionie, z założeniem logarytmicznego rozkładu prędkości, zawierające parametr unoszenia Z w postaci:

$$Z = \frac{w_s}{\kappa \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot i}} \tag{2.10}$$

Na podstawie teorii dyfuzji cząsteczek stałych w wodzie, parametr unoszenia wyrażający wpływ sił turbulencji i grawitacji działających na cząsteczkę, parametr Z został zdefiniowany [van Rijn 1984b]:

$$Z = \frac{w_s}{\beta_* \cdot \kappa \cdot u_*} \tag{2.11}$$

2.1.2. Prędkość opadania ziaren rumowiska

Prędkość opadania ziaren rumowiska zależy od dwóch sił działających na cząsteczkę w trakcie laminarnego opadania w stojącej wodzie. Są to siła oporu i siła ciężkości pomniejszone o wypór. Siła oporu zależna jest od warunków przepływu panujących wokół cząstki. Siła oporu (F) jest równa:

$$F = C_D \cdot \rho \cdot A \frac{w_s}{2} \tag{2.12}$$

w którym powierzchnia przekroju cząstki (A) w kierunku jej ruchu określana jest według równania:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \tag{2.13}$$

natomiast siłę ciężkości (G) ziarna o kształtach kulistych można określić ze wzoru:

$$G = \frac{4}{3} r^2 \cdot \pi \cdot g(\rho_s - \rho) \tag{2.14}$$

Prędkość opadania ziaren rumowiska może być określana wraz z wartością współczynnika oporów. Określenie zależności między prędkością opadania, a siłą oporu sprowadza się do określenia wartości współczynnika oporów, który jest funkcją średnicy i lepkości.

Występują dwa źródła oporu przeciwstawiającego się opadaniu cząstek w cieczy, tj. opory pochodzące od działania ciśnienia dynamicznego cieczy na poruszającą się w niej cząstkę i opory pochodzące od ciśnienia lub lepkości ośrodka, w którym przemieszcza się cząstka [Bogárdi 1974]. Wartość tych oporów uzależniona jest od reżimu ruchu cząstki (laminarny, przejściowy czy turbulentny) oraz od odpowiadającego im układu strug opływających ziarno i towa-

rzyszących im zjawisk. Dodatkowymi czynnikami, komplikującymi zagadnienie określenia prędkości opadania cząstek, są zjawiska związane ze wzajemnym oddziaływaniem cząstek zawieszonych w cieczy. W literaturze można odnaleźć wiele formuł opisujących prędkość opadania cząstek, uwzględniających różne parametry, takie jak reżim ruchu, kształt i wielkość cząstek, właściwości cieczy, czy też właściwości mieszaniny ciecz-cząstki stałe.

Stokes w 1851 roku wyprowadził równanie na opadanie ziarna kulistego w wodzie, a jego ograniczeniem jest zakres ważności dla ruchu laminarnego, który charakteryzuje liczba Reynoldsa mniejsza od 1. Prawo Stokesa można zapisać w postaci :

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^2}{18\nu} \tag{2.15}$$

Wielu badaczy podaje formuły, opracowane w określonych warunkach hydraulicznych strumienia. Najczęściej stosowane są wzory Rubey'a [1933], Sha [1956], Zhanga [1989], van Rijna [1989], Ibada-Zade'a [1992], Zhu i Chenga [1993], Chenga [1997], Ahrensa [2000], Gruata [Batuca, Jordaan 2000] oraz Changa i Liou [2001], służące określeniu prędkości opadania (w_s) pojedynczych ziaren rumowiska nie niespójnego rumowiska. Uwzględniając wpływ flokulacji, można za pomocą wzoru Burbana i in. [1990] określić cechę hydrauliczną pojedynczego ziarna, lub za pomocą wzoru Migniot [Singh 2002] cechę hydrauliczną agregatów ziaren, utworzonych w wyniku flokulacji.

Według Rubey'a [1933] prędkość opadania ziaren rumowiska w_s można wyznaczyć ze wzoru:

$$w_s = F\left[d \cdot g\left(\rho_s - \rho\right)\right]^{0,5} \tag{2.16}$$

gdzie F = 0,79 dla ziaren rumowiska większych, o średnicy od 1 mm do 2 mm, dla ziaren mniejszych od 1 mm F określa się ze wzoru:

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{d^3 \cdot g\left(\rho_s - \rho\right)}\right]^{0,5} - \left[\frac{36\nu^2}{d^3 \cdot g\left(\rho_s - \rho\right)}\right]^{0,5} \tag{2.17}$$

dla ziaren większych 2 mm prędkość opadania ziaren wg Rubey'a wynosi:

$$w_s = 32 d^{0,5} \tag{2.18}$$

Prędkość opadania ziaren rumowiska według Sha [1956], dla różnych średnic ziaren, można określić za pomocą wzorów:

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^2}{24\nu} \quad \text{dla } d < 0{,}1 \text{ mm} \tag{2.19}$$

$$\left(\log\frac{w_s \cdot d}{\nu \cdot D_*} + 3{,}79\right)^2 + \left(\log D_* - 5{,}777\right)^2 = 39 \quad \text{dla } 0{,}1 \text{ mm} \le d \le 2 \text{ mm} \tag{2.20}$$

$$w_s = 1{,}14\sqrt{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d} \quad \text{dla } d > 2 \text{ mm} \tag{2.21}$$

Według Zhanga [1989] prędkość opadania ziaren rumowiska, niezależnie od ich średnicy, wyznacza się ze wzoru:

$$w_s = \sqrt{\left(13{,}95\frac{\nu}{d}\right)^2 + 1{,}09(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d} - 13{,}95\frac{\nu}{d} \tag{2.22}$$

Van Rijn [1989] zaproponował następujące formuły na określenie prędkości opadania ziaren rumowiska:

$$w_s = \frac{1}{18}\frac{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d^2}{\nu} \quad \text{dla } d < 0{,}1 \text{ mm} \tag{2.23}$$

$$w_s = 10\frac{\nu}{d}\left(\sqrt{1 + 0{,}01D_*^3} - 1\right) \quad \text{dla } 0{,}1 \text{ mm} \le d \le 1 \text{ mm} \tag{2.24}$$

$$w_s = 1{,}1\sqrt{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d} \quad \text{dla } d > 1 \text{ mm} \tag{2.25}$$

Ibad-Zade [1992] określił prędkość opadania ziaren rumowiska w postaci:

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d^2}{21\nu} \quad \text{dla } d < 0{,}15 \text{ mm} \tag{2.26}$$

$$w_s = 67{,}6(\rho_s - \rho)\cdot d + 0{,}52(\rho_s - \rho)\left(\frac{T}{26} - 1\right) \quad \text{dla } 0{,}15 \text{ mm} \le d \le 1{,}5 \text{ mm} \tag{2.27}$$

$$w_s = 1{,}068\sqrt{(\rho_s - \rho)\cdot g \cdot d} \quad \text{dla } d > 1{,}5 \text{ mm} \tag{2.28}$$

prędkość opadania ziarna rumowiska według wzoru określana jest cw $m \cdot s^{-1}$, a T oznacza temperaturę w ºC.

Według Zhu i Chenga [1993] prędkość opadania ziaren rumowiska można określić ze wzoru:

$$w_s = \frac{\nu}{d}\left(\frac{-24\cos^2\alpha + \sqrt{576\cos^6\alpha + \left(18\cos^2\alpha + 2{,}6\sin^2\alpha\right)D_*^3}}{9\cos^3\alpha + 1{,}8\sin^2\alpha}\right) \tag{2.29}$$

gdzie:

$$\alpha = 0, \text{ dla } D_* \leq 1 \tag{2.30}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\left(2 \cdot 2{,}5\left(\log D_*\right)^{-3}\right)} \quad \text{dla } d > 1 \text{ mm} \tag{2.31}$$

Zaproponowana przez Chenga [1997] postać równania, służącego określeniu cechy hydraulicznej, ma postać:

$$w_s = \frac{\nu}{d}\left(\sqrt{25 + 1{,}2D_*^2} - 5\right) \tag{2.32}$$

Ahrens [2000], bazując na wynikach badań Hallermeiera, określił prędkość opadania ziaren rumowiska:

$$w_s = \frac{C_1\left(\rho_s - \rho\right) \cdot g \cdot d^2}{\nu} + C_2 + \sqrt{\left(\rho_s - \rho\right) \cdot g \cdot d} \tag{2.33}$$

gdzie:

C_1 i C_2 – współczynniki reprezentujące odpowiednio laminarny i turbulentny reżim przepływu wody, określane ze wzorów:

$$C_1 = 0{,}055\,\mathrm{tg}\left[12A^{-0{,}59}\exp(-0{,}0004W)\right] \tag{2.34}$$

$$C_2 = 1{,}06\,\mathrm{tg}\left[0{,}016A^{0{,}5}\exp(-\frac{120}{W})\right] \tag{2.35}$$

w których W oznacza wskaźnik wyporu hydrostatycznego:

$$W = \frac{\left(\rho_s - \rho\right) \cdot g \cdot d^3}{\nu^2} \tag{2.36}$$

Gruata [Batuca, Jordaan 2000] opracował wzory określające prędkość opadania dla ziaren piasku w postaci:

– dla ruchu laminarnego:

$$w_s = \frac{1}{24}\frac{g \cdot d^2}{\nu}\left(\rho_s - \rho\right) \tag{2.37}$$

– dla ruchu turbulentnego:

$$w_s = \left(\frac{2}{1{,}75} \cdot g \cdot d \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2.38}$$

Według Changa i Liou [2001] prędkość opadania ziarna rumowiska można wyznaczyć ze wzoru:

$$w_s = \frac{\nu}{d} \frac{\alpha \cdot W^{\beta}}{\left(\chi \cdot \left(1 + \alpha \cdot W^{\beta-1}\right)\right)} \tag{2.39}$$

w którym W oznacza wskaźnik wyporu hydrostatycznego (wzór 2.36), a α, β i χ są współczynnikami wynoszącymi odpowiednio 30,22, 0,463 i 18.

Dla określenia cechy hydraulicznej pojedynczego ziarna w Polsce najczęściej stosowane są wzory i nomogramy rosyjskich badaczy, między innymi Gončarova, Karauševa, i Sarkisjana, które można odnaleźć w wielu pracach polskich naukowców [m.in. Dąbkowski i in. 1982; Wiśniewski, Kutrowski 1973].

W przypadku drobnoziarnistego spoistego rumowiska następuje flokulacja pojedynczych ziaren. Jak podaje Parzonka [1977] badania Migniot wykazały wzrost prędkości opadania ziaren w wyniku flokulacji ze względu na zawartość soli. Z drugiej strony, prędkości opadania mogą jednak również zmniejszać się przy wzroście zawartości soli, np. w przypadku silnych wyjściowych koncentracji [Parzonka 1977]. Badania Migniot w ujściowych odcinkach rzek wpływających do morza wykazały zwiększenie flokulacji, a współczynnik flokulacji, dotyczący agregatów ziaren tworzących się w wodzie morskiej ma postać:

$$F = 250 \cdot d_{50}^{-1,8} \tag{2.40}$$

Współczynnik ten został ustalony przez Migniot w wyniku badań osadów pelitycznych, czyli osadów wapiennych, tworzących zawiesinę o koncentracji 10 $g \cdot l^{-1}$ w wodzie morskiej o zawartości 30% soli [Parzonka 1977]. Migniot stwierdził także, że współczynnik flokulacji F, określany jest dla ziaren d_{50} mniejszych od 40 μm oraz podaje, że flokulacja powoduje znaczne zwiększenie prędkości opadania i upraszcza proces sedymentacji Parzonka [1986].

Prędkość opadania agregatów (w_{f50}), utworzonych w wyniku flokulacji, określaną w $mm \cdot s^{-1}$ jak podaje Parzonka [1986] za Migniot, należy określić ze wzoru:

$$w_{f50} = w_{d50} \cdot F \tag{2.41}$$

w którym w_{d50} to prędkość opadania pojedynczego ziarna o średnicy stanowiącego wraz z drobniejszymi 50% zawartości wagowej próby [$mm \cdot s^{-1}$], a współczynnik flokulacji (F) należy określić ze wzoru (2.40).

Uwzględniając flokulacje ziaren rumowiska, Migniot [Singh 2002] zaproponował obliczenie cechy hydraulicznej agregatów dla danej średnicy ziaren d, wyrażonych w μm, w następującej postaci:

$$w_f = \frac{250}{d^2} w \tag{2.42}$$

W wyniku badań laboratoryjnych [Burban i in. 1990] został opracowany wzór służący określeniu prędkości opadania pojedynczego ziarna spoistego rumowiska, uwzględniający empiryczne współczynniki wpływu flokulacji:

$$w_s = a \cdot d^m \tag{2.43}$$

w którym współczynniki a i m dla wody słodkiej wynoszą odpowiednio $8{,}4 \cdot 10^{-3}$ i -0,024. Dla wody morskiej współczynniki a i m wynoszą odpowiednio $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ i -0,14.

2.2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SEDYMENTÓW

Ze względu na przedstawienie w rozdziale 5.2 metody Churchilla, służącej określeniu transportu rumowiska unoszonego na podstawie objętości osadów zgromadzonych w zbiornikach wodnych, przedstawiono ogólną krótką charakterystykę sedymentów. W zbiornikach wodnych zatrzymywana jest część materiału mineralnego transportowanego przez cieki w postaci rumowiska rzecznego. W osadach małych zbiorników wodnych dominuje materiał mineralny o uziarnieniu mniejszym od 0,2 mm [Wiśniewski 1972; Okada, Baba 1982; Sloff 1991]. Rumowisko gruboziarniste, o frakcjach powyżej 2 mm, w małych zbiornikach wodnych i stawach, zostaje zatrzymane powyżej wlotu do zbiorników [Madeyski 1998; Michalec 2008d].

Charakteryzując osady zbiorników wodnych określa się skład granulometryczny, charakterystyczne średnice (m.in. średnicę miarodajną, d_{50}), kształt ziaren, a także porowatość, gęstość właściwą oraz gęstość objętościową, jak również ciężar objętościowy początkowy i po konsolidacji.

Gęstość objętościowa rumowiska sedymentów może wynosić od 320 do 960 $kg \cdot m^{-3}$ w przypadku osadów ilastych i gliniastych znajdujących się stale pod wodą, dla piasków znajdujących się stale pod wodą wynosi od 1300 do 1600 $kg \cdot m^{-3}$. W przypadku wyłaniających się okresowo osadów składających się z bardzo drobnego materiału mineralnego jego gęstość objętościowa wynosi od 1200 do 2000 $kg \cdot m^{-3}$ [Batuca, Jordaan 2000].

Początkowy ciężar objętościowy osadów zależy głównie od ich składu granulometrycznego, a także od warunków eksploatacji zbiornika wodnego. Według Lane i Koelzera [1953] początkowy ciężar objętościowy sedymentów (γ_s) w zbiorniku wodnym można określić według równania:

$$\gamma_s = 825(p + 2)^{0,13} \tag{2.44}$$

w którym „p" to zawartość niespoistego materiału, o średnicach większych od 0,05 mm, wyrażona w procentach.

Uwzględniając warunki eksploatacji zbiornika wodnego, początkowy ciężar objętościowy sedymentów (γ_s) można wyznaczyć za pomocą formuły opracowanej przez Lara i Pembetron [1963]:

$$\gamma_s = W_c P_c + W_m P_m + W_s P_s \tag{2.45}$$

w której początkowy ciężar objętościowy wyrażony jest w $lb \cdot ft^{-3}$, a P_c, P_m i P_s to zawartość procentowa gliny, iłu i piasku, a W_c, W_m i W_s to współczynniki dla gliny, iłu i piasku zależne, określane w zależności od warunków eksploatacji zbiornika wodnego, tzn. czy osady, ze względu na wahania lustra, wody są stale, czy też okresowo ponad lub pod powierzchnią wody.

Ciężar objętościowy osadów po konsolidacji określa się po T latach eksploatacji i można go wyznaczyć ze wzoru Lane'a i Koelzera [1953], wyróżniając przypadek jednorodnych i niejednorodnych osadów. Ciężar objętościowy skonsolidowanych jednorodnych osadów po T latach eksploatacji wyznaczyć można według wzoru:

$$\gamma_{s,T} = \gamma_{s,1} + K \cdot \log T \tag{2.46}$$

a niejednorodnych osadów:

$$\gamma_{s,T} = \sum_{i=1}^{3} P_i \left(\gamma_{s,1} + K \cdot \log T\right)_i \tag{2.47}$$

w którym ciężar objętościowy $\gamma_{s,T}$ po T latach wyrażony jest w $lb \cdot ft^{-3}$, a $\gamma_{s,1}$ to ciężar objętościowy po pierwszym roku eksploatacji. K jest współczynnikiem określanym w zależności od warunków eksploatacji zbiornika, a P_i jest zawartością procentową piasku (i = 1), iłu (i = 2) i gliny (i = 3).

Według Traska i Millera [Batuca, Jordaan, 2000] ciężar objętościowy $\gamma_{s,T}$ po T latach eksploatacji można określić, znając ciężar objętościowy po pierwszym roku eksploatacji ($\gamma_{s,1}$), według formuły:

$$\gamma_{s,T} = \gamma_{s,1} + K\left(\frac{T}{T-1} \ln (T-1)\right) \tag{2.48}$$

w której K określane jest według typu zbiornika i warunków eksploatacji, określonych przez Traska i Millera.

3. KRYTERIUM POCZĄTKU RUCHU I UNOSZENIA RUMOWISKA

Wyróżnia się trzy formy ruchu cząstek stałych w strumieniu: toczenie się i poślizg po dnie, saltację i unoszenie. W momencie przekroczenia krytycznych naprężeń ścinających ziarna rumowiska, pozostając w kontakcie z dnem zaczynają się poruszać – ślizgać i toczyć. Dalszy wzrost naprężeń powoduje, iż cząstki zaczynają odrywać się od dna i wykonują mniej lub bardziej regularne skoki, które określa się ruchem saltacyjnym. Kiedy siły działające na cząstki osiągają pewien poziom, mogą być oderwane od dna i wskutek turbulentnych zawirowań dostać się w górne warstwy strumienia, przechodząc w stan unoszenia.

Początek ruchu rumowiska wleczonego klasycznie określa się za pomocą kryterium Shieldsa, które wiąże z sobą liczbę Reynoldsa dla ziarna oraz bezwymiarowe naprężenia ścinające. Kryterium Shieldsa zachowuje swą ważność w odniesieniu do materiału niespoistego i jednorodnego oraz do dna płaskiego. Na początek ruchu, jak również unoszenia wpływ ma wiele czynników, spośród których należy podkreślić wpływ naprężeń działających na dno, różnoziarnistość materiału dennego i wpływ form dennych [m. in. Yang 1973; Bogardi 1974; Richards 1982; Mokwa 2002]. Aby dokonać jednoznacznego rozgraniczenia pomiędzy rumowiskiem wleczonym a unoszonym wobec przebiegu jego poruszania się, wprowadza się pewne założenia, takie jak np. sposób poruszania się cząstek lub przyjęcie pewnego poziomu odniesienia, poniżej którego warstwa rumowiska jest traktowana jako wleczone, a powyżej jako unoszone. Jako kryterium ustalania takiego poziomu przyjmuje się np. wielokrotność nominalnego uziarnienia materiału dennego, długość i wysokość skoków saltacyjnych cząstek lub w przypadku form dennych ich wysokość [van Rijn 1984a].

Bagnold jako rumowisko wleczone uznał to, które kontakt z dnem utrzymuje głównie dzięki siłom ciężkości, natomiast w przypadku rumowiska unoszonego, ciężar cząstki zanurzonej w wodzie jest równoważony przez siły unoszące strumienia [van Rijn 1984b]. Warunek początku unoszenia Bagnold, ujmujący krytyczną prędkość dynamiczną (u_{*cr}) i prędkość opadania cząstek stałych w wodzie (w), przedstawił następująco:

$$\frac{u_{*cr}}{w} = 1 \tag{3.1}$$

Engelund przyjął takie samo kryterium jak Einstein, według którego rumowisko wleczone porusza się w warstwie przydennej o grubości dwóch średnic ziaren [van Rijn 1984b]. Rumowisko to jest w kontakcie z dnem lub wykonuje skoki długości kilku średnic ziarna. Na podstawie teoretycznej analizy stabilności i ruchu cząstek dna doszedł do wniosku, że cząstka zostaje unoszona, gdy prędkość dynamiczna osiąga wartość:

$$u_{*cr} = 0{,}25 \cdot w_s \tag{3.2}$$

Van Rijn przyjął podobne założenia jak Bagnold. Według niego rumowisko unoszone to rumowisko, którego cząstki wykonują skoki saltacyjne o długości ponad 100 średnic ziarna, a poziom odniesienia dla dna płaskiego równy jest wysokości saltacji. Van Rijn przedstawił warunki krytyczne początku ruchu, uwzględniając wartość parametru ziarnowego, w postaci:

$$\frac{u_{.*cr}}{w_s} = \frac{4}{D_*}; \text{ dla } 1 < D_* \le 10 \tag{3.3}$$

$$\frac{u_{.*cr}}{w_s} = 0{,}4; \text{ dla } D_* > 10 \tag{3.4}$$

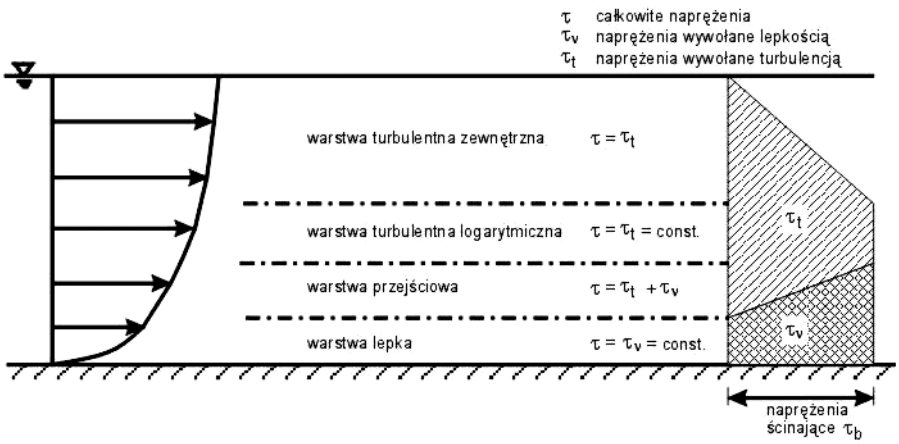
3.1. FORMY DENNE, SZORSTKOŚĆ DNA I PROFIL PRĘDKOŚCI

Jednym z podstawowych problemów, istotnym przy określeniu natężenia transportu rumowiska, jest właściwe określenie szorstkości dna cieku. W przypadku dna zbudowanego z drobnoziarnistego rumowiska jego szorstkość jest pośrednio wynikiem transportu rumowiska, który generując formy denne, wpływa z kolei na szorstkość dna [van Rijn 2007]. W literaturze zagranicznej można odnaleźć wiele opracowań dotyczących form dennych [m.in. Fredsoe i in. 1999; Przedwojski i in. 1995; van Rijn 1984b; Yalin 1977]. Spośród polskiej literatury fachowej na uwagę zasługuje praca Radeckiego-Pawlika [2002], w której szczegółowo podana została klasyfikacja form dennych i korytowych.

Najczęściej opisując formy denne, poza wyznaczeniem jej wysokości i długości, posługuje się szorstkością k_s w powiązaniu z parametrami hydrodynamicznymi. Poza tym podstawowymi parametrami wpływającymi na szorstkość dna są: wielkość cząsteczki rumowiska, naprężenia styczne działające na cząsteczkę i liczba Reynoldsa, dla tej cząsteczki [Yalin 1977]. Przy założeniu hydraulicznie szorstkich warunków strumienia, wpływ ziarnowej liczby Reynoldsa jest zaniedbywany.

Warunki tworzenia się form dennych w przypadku przepływu ustalonego można ogólnie określić jako [van Rijn 2007]: 1) tzw. reżim niskiego transportu

(ang. *lower transport regime*) z płaskim dnem, zmarszczkami, wydmami i łachami; 2) tzw. reżim przejściowy (ang. *transitional regime*) z rozmytymi wydmami i łachami; 3) górny reżim transportu (ang. *upper transport regime*) z płaskim ruchomym dnem i antywydmami (liczba Frouda > 0,8 i parametr Shieldsa >1), a łachy mogą wystąpić w górnym reżimie, gdy liczba Frouda < 0,8 i parametr Shieldsa > 1. Najmniejszymi formami dennymi są zmarszczki, powstające gdy prędkość przepływu wody będzie większa o 10–20% od krytycznej prędkości dla początku ruchu rumowiska, a średnia średnica ziarna budującego dno jest mniejsza od 500 μm [van Rijn 2007]. Długość zmarszczek jest niewielka i nie przekracza głębokości napełnienia koryta. Gdy prędkości przydenne wzrastają, zmarszczki stają się bardziej nieregularne, a ich proporcje wysokości i długości ulegają zaburzeniu. Megazmarszczki charakteryzują się długością większą od głębokości wody. Innym przykładem form dennych reżimu niskiego transportu są wydmy. Wydmy mają asymetryczny (trójkątny) profil i mają raczej stromą zawietrzną stroną i delikatnie wznoszącą się stronę podprądową. Ogólną cechą wydm jest oddzielanie strumienia wody po zawietrznej stronie, powodującego powstawanie silnych wirów za szczytem wydmy. Długość wydm związana jest również z głębokością wody (h) i wynosi 3–15 h. Jak podaje van Rijn [2007] wydmy nie powstają na dnie cieków, których skład mineralny materiału dennego jest mniejszy niż 100 μm. Wtedy tworzą się w dnie jedynie fale paskowe o płaskiej, ruchomej powierzchni, na której mogą pojawiać się zmarszczki. Szczegółowa charakterystyka form dennych ich podział i opis warunków powstawania została przedstawiona w pracach Radeckiego-Pawlika [2002, 2006].



Rysunek 1. Klasyfikacja stref profilu prędkości (rysunek bez skali – warstwa burzliwa zewnętrzna stanowi 80 –90% napełnienia)
Figure 1. Classification of flow region (figure is not to scale - turbulent outer layer accounts for 80–90% of the water depth)

Rozpatrując wpływ szorstkości dna, czy też brzegów lub ścian, na przepływ wody w korycie należy wyróżnić poszczególne warstwy logarytmicznego profilu prędkości. Zgodnie z rysunkiem 1 profil prędkości składa się z warstwy lepkiej, przejściowej, burzliwej strefy logarytmicznej i burzliwej strefy zewnętrznej.

Szorstkość dna cieku k_s określana jest za pomocą bezwzględniej szorstkości ziarnowej według Nikuradse. Można wyróżnić:

1) „przepływ hydraulicznie gładki" (rys. 2.a) – szorstkość dna jest dużo mniejsza od grubości warstwy lepkiej i nie wpływa na dystrybucję prędkości w pionie:

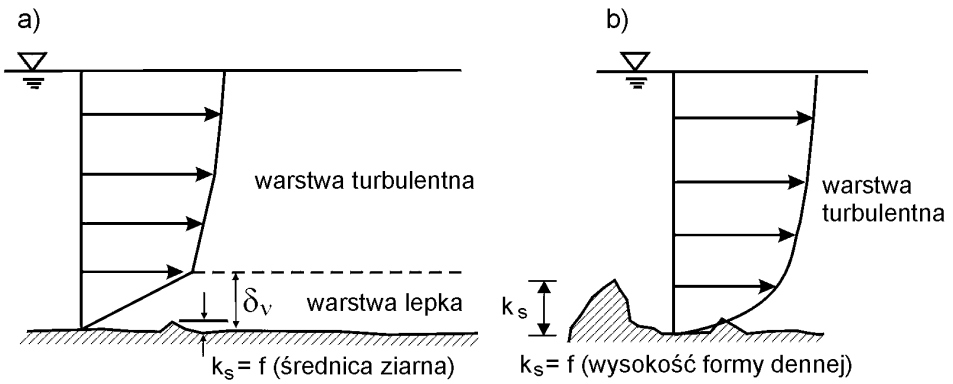
$$\frac{u_* \cdot k_s}{\nu} \leq 5 \tag{3.5}$$

2) „przepływ hydraulicznie szorstki" (rys. 2.b) – szorstkość dna jest tak duża, że przyczynia się do tworzenia wirów przydennych, warstwa lepka nie istnieje – prędkość przepływu wody nie zależy od lepkości:

$$\frac{u_* \cdot k_s}{\nu} \geq 70 \tag{3.6}$$

3) „przepływ hydraulicznie przejściowy" – rozkład prędkości przepływu wody zależy od lepkości i szorstkości dna:

$$5 \leq \frac{u_* \cdot k_s}{\nu} \leq 70 \tag{3.7}$$



Rysunek 2. Klasyfikacja stref profilu prędkości według Nikuradse;
a) przepływ hydraulicznie gładki, b) przepływ hydraulicznie szorstki
Figure 2. Classification of flow region in velocity profile according to Nikuradse;
a) hydraulically smooth flow, b) hydraulically rough flow

Określając stałą z_0 z równania logarytmicznego rozkładu prędkości w profilu w postaci:

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{3.8}$$

można na podstawie kryterium podanego przez Nikuradse określić szorstkość bezwzględną dna w przypadku „przepływu hydraulicznie szorstkiego”:

$$k_s = 0{,}033 \cdot z_0 \tag{3.9}$$

a w przypadku „przepływu hydraulicznie przejściowego”:

$$k_s = \frac{1}{0{,}033}\left(z_0 - 0{,}11\frac{\nu}{u_*}\right) \tag{3.10}$$

Stała z_0 określa wysokość nad dnem, na której prędkość przepływu wody wynosi zero.

Bezwzględną szorstkość dna k_s można określić również na podstawie średnicy ziarna rumowiska znajdującego się na dnie cieku. Jedynie w przypadku płaskiego dna pokrytego jednorodnym rumowiskiem składającym się kulistych ziaren szorstkość dna k_s możemy określić jako równą średnicy ziarna. Jednakże w warunkach naturalnych mamy do czynienia nie tylko z płaskim dnem zbudowanym z różnoziarnistego materiału mineralnego, lecz również z różnymi formami dennymi. W przypadku braku form dennych, zgodnie ze wskazaniem podanym przez van Rijna wysokość „a” przyjmuje się równą szorstkości k_s wg Nikuradse [van Rijn 1984a], którą można wyznaczyć m.in. za pomocą wzorów Kamphiusa:

$$k_s=2{,}5\cdot d_{90} \tag{3.11}$$

Hey’a:

$$k_s=3{,}5\cdot d_{84} \tag{3.12}$$

Mahmooda:

$$k_s=5{,}1\cdot d_{84} \tag{3.13}$$

lub Gładki:

$$k_s=2{,}3\cdot d_{80} \tag{3.14}$$

w których d_{90}, d_{84} i d_{80} oznaczają średnice ziarna stanowiącego wraz z drobniejszymi odpowiednio 90, 84 i 80% zawartości wagowej próbki.

3.2. PROFIL KONCENTRACJI I KONCENTRACJA RUMOWISKA NA POZIOMIE ODNIESIENIA NAD DNEM

Na podstawie teorii dyfuzji z uwzględnieniem logarytmicznego rozkładu prędkości w pionie w 1937 roku Rouse wyprowadził równanie koncentracji w pionie, mające zapis w postaci [van Rijn 1984b]:

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{a(h-z)}{z(h-a)}\right]^Z ; \quad \text{dla } \frac{z}{h} < 0{,}5 \tag{3.15}$$

lub

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{a}{d-a}\right]^Z \cdot e^{-4Z(\frac{z}{d}-0{,}5)} ; \quad \text{dla } \frac{z}{h} > 0{,}5 \tag{3.16}$$

Występujący we wzorze Rouse parametr unoszenia uwzględnia współczynnik dyfuzji β_* między cząstkami stałymi a cząstkami wody. Największą trudność stanowi przyjęcie wartości tego współczynnika. Według niektórych autorów jego wartość powinna być mniejsza od jedności. Przyjmowane często w modelowaniu transportu rumowiska unoszonego założenie, że współczynnik dyfuzji cząstek stałych jest równy współczynnikowi dyfuzji wody może dotyczyć w tym ujęciu co najwyżej drobnych cząstek rumowiska, których prędkość opadania jest niewielka w stosunku do prędkości turbulentnych, a więc głównie frakcji ilastych i pylastych rumowiska. W innym ujęciu zjawiska stwierdza się, że na znajdujące się w zawirowaniach turbulentnych cząstki stale działają siły odśrodkowe, wyrzucające cząstki z obrębu zawirowania, tym samym zwiększając dystans poruszania się tych cząstek w stosunku do cząstek wody, co powodowałoby, że $\beta_*>1$ [van Rijn 1984b]. Według Laursena [Bogárdi 1974; Zanke 1982] wartość współczynnika β_* jest mniejsza lub równa jedności. Podyktowane jest to założeniem, że cząsteczka stała o większej gęstości nie jest w pełni odpowiedzialna za zawirowania i turbulencje wody i przyjmuje się wręcz, że współczynnik dyfuzji cząstek stałych jest równy dyfuzji „cząstek" wody. To założenie może odnosić się jedynie do bardzo drobnych cząsteczek stałych. Hassan, Coleman [Bogárdi 1974] ustalili wartość współczynnika $\beta_* = 1{,}5$ dla cząsteczek o średnicy 0,10 mm, a dla cząsteczek o średnicy 0,16 mm wartość β_* wynoszącą 1,3, co świadczy o zmniejszaniu się wartości współczynnika β_* ze wzrostem średnicy ziarna. Również van Rijn, wychodząc z założenia, że działające siły odśrodkowe w trakcie zawirowań turbulentnych zwiększają dystans pomiędzy ziarnami, przyjmuje wartość współczynnika β_* większą od jedności [van Rijn 1984b]. Według van Rijn'a β_* jest funkcją wielkości cząstki stałej i wyraża się wzorem:

$$\beta_* = 1 + 2 \cdot \left(\frac{w}{u_*} \right)^2 ; \quad \text{dla } 0{,}1 < \frac{w}{u_*} < 1, \tag{3.17}$$

przy czym czynnik uwzględniający wpływ turbulencji cieczy na ziarna rumowiska (φ) uzależnia od lokalnej koncentracji (C):

$$\varphi = 1 + \left[\frac{C}{C_0} \right]^{0,8} - 2 \left[\frac{C}{C_0} \right]^{0,4} \tag{3.18}$$

gdzie:

C_0 – maksymalna przydenna koncentracja rumowiska [$g \cdot m^{-3}$].

Zaproponowany przez van Rijn'a [1984b] zapis równania koncentracji w pionie ma postać:

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{a}{h-a} \right]^z \exp\left[-4Z \left(\frac{z}{h} - 0{,}5 \right) \right]; \quad \text{dla } \frac{z}{h} \geq 0{,}5 \tag{3.19}$$

Zapis ten ustalony jednak został dla niskich koncentracji bez uwzględnienia wpływu turbulencji (φ=1). Uwzględnienie wpływu turbulencji (efekt skoku ziaren rumowiska) umożliwia wprowadzenie zmodyfikowanego parametru unoszenia Z':

$$Z' = Z + \varphi \tag{3.20}$$

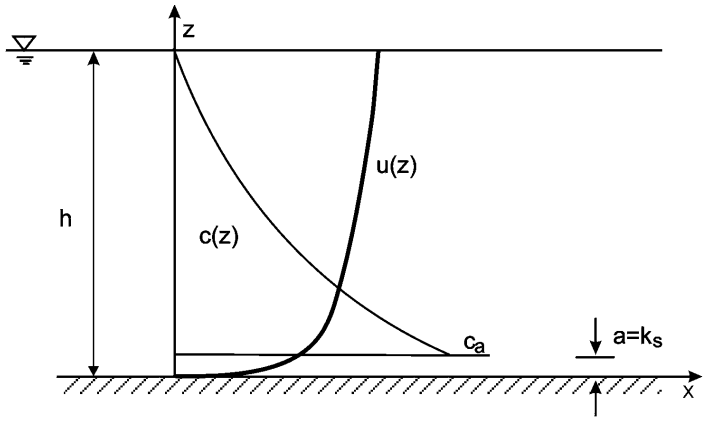
przy czym wpływ turbulencji uwzględniony zostaje poprzez czynnik φ, który można zapisać w postaci [van Rijn 1984b]:

$$\varphi = 2{,}5 \left(\frac{w}{u_*} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{C_a}{C_0} \right)^{0,4} ; \quad \text{dla } 0{,}01 \leq \frac{w}{u_*} \leq 1 \tag{3.21}$$

Powyższe założenia zostały wyprowadzone dla warunków, dla których poziom odniesienia „a" (rys. 3), uwzględniający wysokość form dennych (Δ_f), został wyznaczony w postaci:

$$a = 0{,}5 \Delta_f \tag{3.22}$$

Gdy wysokość form dennych jest nieznana przyjmuje się „a" chropowatości bezwzględnej (k_s) według Nikuradse, przy czym minimalna wartość „a" jest równa 0,01 h [van Rijn 1984b].



Rysunek 3. Profil prędkości przepływu wody u(z)
i koncentracji rumowiska unoszonego c(z)
Figure 3. Vertical distribution of flow velocity u(z)
and suspended sediment concentration c(z)

Wyznaczenie koncentracji na poziomie odniesienia C_a możliwe jest według poniższego równania:

$$C_a = \frac{0{,}035}{\alpha_2} \cdot \frac{D_{50}}{a} \cdot \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad (3.23)$$

gdzie:

α_2 – współczynnik korekcyjny, wynoszący 2,3 według badań van Rijna [1984b].

4. WYBRANE METODY OKREŚLANIA TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO

Metody określania ilości rumowiska unoszonego transportowanego przez rzekę możemy podzielić na metody pomiarowe (bezpośrednie) i obliczeniowe (pośrednie). Spośród metod bezpośrednich wyróżniamy metody: batometryczne, fotometryczne, elektrooporowe, ultradźwiękowe i radioizotopowe. Metody pośrednie czyli metody obliczeniowe umożliwiają określenie transportu rumowiska na postawie równań empirycznych, półempirycznych i teoretycznych.

Metody obliczeniowe służące ustaleniu wielkości transportu rumowiska unoszonego oparte są na określeniu parametrów opisujących przepływ wody i rumowiska w korycie, lub wielu czynników wpływających na erozję w zlewni oraz ilość materiału dostarczanego do koryta rzecznego. Są to najczęściej metody empiryczne. Do najczęściej stosowanych metod empirycznych określenia transportu rumowiska unoszonego na podstawie ustalonej masy erodowanej gleby w zlewni oraz ilość materiału dostarczanego do koryta rzecznego należy zaliczyć:

– metodę opartą na klasyfikacji intensywności denudacji wg Reniger-Dębskiego [Reniger 1959; Dębski 1959],
– metodę opartą na mapie wskaźników denudacji odpływowej opracowaną przez Brańskiego [1975],
– metodę DR-USLE [Wischmeier, Smith 196; Roehl 1962].
– metodę MUSLE [Williams 1975],
– metodę RUSLE [Renard i in. 1997].

Spośród metod obliczeniowych opartych na określeniu parametrów opisujących przepływ wody i rumowiska unoszonego w korycie należy wymienić:

– metodę Ariathurai i Krona [1976],
– metodę Einsteina [1950],
– metodę Yalina w modyfikacji Fostera [1982],
– metodę Bijkera [1971],
– metodę van Rijna [1984b].

Matematyczne modelowanie transportu rumowiska rzecznego (unoszonego i wleczonego) jest ważnym obszarem w zagadnieniach morfodynamiki rzek.

Modele te bazują na wynikach prac między innymi Ackersa i White [1973], Cunge'a, Holly i in. [1980], Engelunda i Fredsoe [1976], Holly'ego i in. [1990], Karima i Kennedy'ego [1981], Mehta i in. [1989], Onishi i in. [1993], Raudkivi [1967]. Dla warunków ustalonych stosuje się formuły empiryczne wiążące ilość rumowiska z jego parametrami, prędkością przepływu wody, przepływem, przekrojem poprzecznym koryta lub naprężeniami działającymi na to koryto. W przypadku osadów kohezyjnych (glina, drobny ił) należy również uwzględnić oddziaływanie kohezyjne wiążące cząsteczki [Mehta i in. 1989]. Zasadnicza trudność w matematycznym opisie transportu rumowiska rzecznego wynika ze zmienności natężenia przepływu i parametrów rumowiska. Trudność ta spowodowała powstanie kilku różnych formuł, stosowanych w praktyce. Analizy walidacyjne tych formuł [Onishi i in. 1993] pokazały, że podejście Ackersa-White'a, Engelunda-Hansena, van Rijna i Toffaleti'ego dają najbardziej zadowalające wyniki, w przypadku osadów niekohezyjnych dla szerokiego zakresu warunków przepływów i właściwości rumowiska. Należy przy tym zaznaczyć, że dla określonych warunków hydraulicznych w cieku (określonej rzeki) uzyskanie optymalnych wyników jest możliwe poprzez dopasowanie formuł empirycznych do warunków w nim panujących. Modele transportu osadu są oparte na równaniu zachowania masy (równanie adwekcji i dyfuzji z członem źródeł i strat opisującym procesy sedymentacji i tworzenia zawiesiny) oraz równanie deformacji dna (równanie Exnera). W modelach tych najważniejszym problemem jest parametryzacja prędkości tworzenia się osadu rumowiska i zawiesiny. Dla tego celu w modelowaniu można zastosować parametry przepływu wody i rumowiska w rzekach i kanałach, które są wyznaczane z uśrednionych po przekroju koryta trójwymiarowych równań przepływu. Tak zbudowane są moduły obliczeniowe znanych programów HEC-6 [Thomas, Prashum 1977], REDSED [Cheng, 1997], FLUVIAL 11 [Chang, 1988], IALLUVIAL [Karima, Kenedy 1981] i CHARIMA [Holly et al., 1990], który jest rozszerzeniem IALLUVIAL, jak również MIKE-11 z Danish Hydraulics Institute i TELMAC z Laboratory of Hydraulics we Francji. MIKE-11 i TELMAC są systemami modelowania zawierającymi również wielowymiarowe modele przepływu. HEC-2SR, FLUVIAL 11, CHARIMA, MIKE-11, i TELMAC zawierają moduły obliczeń przepływu bazujące na numerycznych metodach rozwiązywania uproszczonych wersji równań Saint-Venanta.

4.1 OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO NA PODSTAWIE WIELKOŚCI DENUDACJI W ZLEWNI

Według Xiaoqing [2003] metody określenia produktów erozji można podzielić na dwie kategorie, tj. metody opracowane na podstawie statystycznej analizy (równania statystyczne) i modele deterministyczne zawierające empiryczne parametry. Statystyczne równania opisują związek ilości produktów ero-

zji z jednym lub wieloma zmiennymi opisującymi cechy zlewni lub klimatu. Równania te są opracowane w celu określenia wartości średnich na podstawie długiego okresu obserwacji i dotyczą badanej zlewni. Wyniki opracowań statystycznych nie mogą być ekstrapolowane na inne zlewnie. Przykładem są metody Reniger-Dębskiego [Reniger 1959; Dębski 1959] i Brańskiego [1975]. W modelach deterministycznych natomiast wprowadza się parametry określone na podstawie badań empirycznych lub wyskalowanych na podstawie doświadczeń eksperymentalnych. Przykładem takiego modelu jest równanie strat glebowych USLE, opracowane przez Wischmeiera i Smitha. Równanie USLE stało się równaniem bazowym do budowy wielu modeli opisujących straty glebowe w zlewni.

4.1.1. Metody Reniger-Dębskiego i Brańskiego

Metoda Reniger-Dębskiego, służąca określeniu natężenia procesów erozyjnych w zlewni, oparta jest na dziewięciostopniowej skali zmywalności gleb opracowanej przez Reniger [1959] i ilościowych wskaźnikach denudacji odpowiadających poszczególnym klasom. Wskaźniki denudacji zostały ustalone przez Dębskiego [1959]. Dla pierwszej klasy zmywalności gleb Dębski przypisał intensywność denudacji wynoszącą 1,32 $t \cdot km^{-2} \cdot rok^{-1}$, a dla klasy dziewiątej – 427,0 $t \cdot km^{-2} \cdot rok^{-1}$.

Ze względu na trudności ujęcia ilościowego wpływu czynników decydujących o erozji, takich jak: klimat, gleby, morfologia terenu, intensywność erozji została scharakteryzowana poprzez zgrupowanie tych czynników do poszczególnych klas.

Metoda Brańskiego. Ustalone wskaźniki intensywności erozji i opracowana przez Brańskiego [1968] mapa wskaźników miały być pomocne w opracowaniu charakterystyki dorzeczy i ostateczną podstawą służącą opracowaniu mapy zmącenia wody rzek. W przeciwieństwie do mapy intensywności denudacji na terenie Polski, opracowanej przez Reniger na podstawie charakterystyki wielu czynników wpływających na erozję, mapa opracowana przez Brańskiego oparta została na wynikach pomiarów transportu materiału unoszonego. Nie uwzględnia ona transportu rumowiska wleczonego ze względu na brak pomiarów wleczenia. Jednym z celów i kryteriów opracowania mapy, przyjętym przez Brańskiego, była możliwość porównania jej z mapą Reniger. W tym celu Brański wyróżnił dziewięć wskaźników intensywności erozji. Porównanie obu map wykazuje rozbieżność oceny natężenia procesów erozji w poszczególnych regionach Polski. Dotyczy to szczególnie rejonu Pojezierzy Mazurskiego i Pomorskiego, Wyżyny Lubelskiej, Niziny Sandomierskiej. Według mapy opracowanej przez Reniger na Nizinie Sandomierskiej erozja prawie nie występuje, a według Brańskiego wskaźniki intensywności erozji osiągają maksymalne wartości. Wskaźniki denudacji (α) zostały ustalone przez Brańskiego [1975] na podstawie

pomiarów rumowiska unoszonego jako ilorazy określonych przyrostów transportu rumowiska unoszonego i przyrostów powierzchni zlewni. Na mapie wydzielono osiem typów zlewni w zależności od nasilenia procesów denudacji o wskaźnikach α: >200, 200–150, 150–100, 100–50, 50–30, 30–10, 10–5, <5 $t \cdot km^{-1}$.

4.1.2. Metody zbudowane na uniwersalnym równaniu strat glebowych USLE

Metoda DR-USLE bazuje na uniwersalnym równaniu strat glebowych (*Universal Soil Loss Equation – USLE*). Równanie to zostało opracowane w USA przez Wischmeiera i Smitha [1965] na postawie statystycznych analiz danych uzyskanych w ciągu wieloletnich badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w warunkach naturalnych i laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatorów deszczu. Obliczenie średniej z wielolecia rocznej masy erodowanej gleby z jednostki powierzchni możliwe jest dzięki równaniu w postaci:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot C \cdot S \cdot P \tag{4.1}$$

gdzie:

E – średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby z jednostki powierzchni [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$],
R – średnia roczna erozyjność deszczów i spływów [$Je \cdot rok^{-1}$],
K – podatność gleby na erozję [$t \cdot ha^{-1} \cdot Je^{-1}$],
L – bezwymiarowy współczynnik długości zbocza,
C – bezwymiarowy współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania,
S – bezwymiarowy współczynnik spadku zbocza,
P – bezwymiarowy współczynnik zabiegów przeciwerozyjnych.

Szczegółowy opis równania USLE i jego zastosowania w warunkach polskich można znaleźć między innymi w pracach Banasika [1994], Banasika i Górskiego [1992], Bednarczyka i in. [2000].

Określenie ilości rumowiska odpływającego ze zlewni wymaga wyznaczenia wskaźnika dopływu rumowiska DR (*delivery ratio*). Za pomocą wskaźnik DR określa się jaka część produktów erozji w zlewni dostaje się do cieku. W metodzie DR-USLE posłużono się wskaźnikiem DR wyznaczonym z zależności funkcyjnej opracowanej przez Roehla [1962]. Ilość rumowiska odpływającego ze zlewni można zatem wyznaczyć metodą DR-USLE za pomocą poniższego równania:

$$S = DR \cdot (E \cdot F) \tag{4.2}$$

gdzie:

S – roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni [$t \cdot rok^{-1}$],
DR – bezwymiarowy wskaźnik dopływu rumowiska [-],
F – powierzchnia zlewni [ha].

W stosowanej w Polsce metodzie DR-USLE bezwymiarowy wskaźnik dopływu rumowiska określany jest według Roehla [1962], w zależności od powierzchni zlewni:

$$\log(DR) = 1{,}9135 - 0{,}3385 \cdot \log 10\,(F) \tag{4.3}$$

W literaturze światowej możemy odnaleźć wiele metod służących określeniu wskaźnik dopływu rumowiska DR. Jedną z metod opracował Renfro, bazując na pracach badawczych Manera z lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Równanie, które opracował Renfro na podstawie badań 14 zlewni w Teksasie, ma postać:

$$\log(DR) = 1{,}7935 - 0{,}1419 \cdot \log(F) \tag{4.4}$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (4.2), przy czym powierzchnia zlewni F wyrażona jest w km^2.

Wzór podany przez Vanoni [1975] uważany jest za najbardziej uogólniający określenie wskaźnik dopływu rumowiska i jest jednym z najczęściej stosowanych [Xiaoqing 2003]. Został opracowany na podstawie analizy wyników badań odpływu rumowiska z ponad 300 zlewni Europy i Stanów Zjednoczonych. Wskaźnik dopływu rumowiska DR według Vanoniego można wyznaczyć w funkcji powierzchni zlewni F, wyrażonej w milach kwadratowych, ze wzoru:

$$DR = 0{,}42 \cdot F^{-0{,}125} \tag{4.5}$$

Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych opracował rozwinięcie modelu Vanoni, bazując na wynikach badań Renfro, podając równanie w postaci:

$$DR = 0{,}51 \cdot F^{-0{,}11} \tag{4.6}$$

w którym powierzchnia zlewni F wyrażona jest również w milach kwadratowych.

Wskaźnik DR zależny jest w głównej mierze od topograficznych cech zlewni. W przypadku zlewni z krótkimi i stromymi zboczami ilość rumowiska dostarczanego do cieku jest większa niż w zlewni charakteryzującej się taką samą wielkością erozji, lecz o zboczach płaskich i długich. Istotny jest również kształt zlewni, gdyż zlewnie o kształcie wydłużonym charakteryzują się większym wskaźnikiem DR. Kolejną cechą zlewni, mającą wpływ na wartość wskaźnika dostawy rumowiska do cieku jest uśredniony spadek głównego cieku lub nachylenie zlewni. Maner [1958] przedstawił równie opisujące zależność DR od różnicy wysokości najwyższego punktu zlewni i ujścia cieku (R) oraz od długości zlewni (L) w postaci:

$$\log(DR) = 2{,}943 + 0{,}824 \log(R/L) \tag{4.7}$$

Natomiast Williams i Berndt [1972], uwzględniając spadek głównego cieku (I) wyrażony w procentach, opracowali równanie:

$$DR = 0{,}627\, I^{0{,}403} \tag{4.8}$$

Jak wynika z badań Wallinga i Webba [1982] wskaźnik dostawy rumowiska zależy od budowy materiału erodowanego w zlewni. Gruby materiał mineralny odpływający ze zlewni jest wynikiem erozji bocznej i dennej w strumieniach oraz erozji w wąwozach, natomiast drobny materiał powstaje w wyniku erozji powierzchniowej na obszarze zlewni. Uwzględniając zróżnicowanie granulometryczne materiału mineralnego wynoszonego ze zlewni, Walling i Webb [1982] zaproponował określenie wskaźnika DR, wyrażonego w procentach, według zależności uwzględniającej zawartość procentową frakcji gliniastych w glebie erodowanej w zlewni C i w materiale odpływającym ze zlewni C_{sed}:

$$DR = C_{soil} / C_{sed} \tag{4.9}$$

Metoda RUSLE. W 1987 roku został opracowany model RULSE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) przez Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych [Renard i in. 1997]. Model ten wyróżnia się kilkoma cechami: dane można opracowywać komputerowo, wprowadzono zmodyfikowany parametr R, uwzględniając sezonowe zróżnicowanie w powiązaniu z systemem płodozmianów, wprowadzono sezonową podatność gleby na erozję (K), zmieniono sposób wyznaczania parametru C – bezwymiarowego współczynnika rodzaju upraw i sposobu użytkowania, zmodyfikowano współczynnik LS, określając go jako stosunek erozji wywołanej przez strumienie wody do erozji całkowitej dla różnych nachyleń zbocza, a bezwymiarowy współczynnik zabiegów przeciwerozyjnych określono jako współczynnik kolejnych zmian użytków zielonych w grunty orne i odwrotnie. Na bazie modelu RUSLE został opracowany przez Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych model WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) służący przewidywaniu, czy też prognozowaniu erozji wodnej. Powstały trzy typy modeli WEPP: model do obliczeń erozji w przekroju poprzecznym zbocza, model do obliczeń erozji w zlewni i model do obliczeń erozji w zlewni na podstawie zbudowanej siatki [Xiaoqing 2003].

Metoda MUSLE. Uniwersalne równanie strat glebowych zostało zmodyfikowane w 1975 roku przez Williamsa [Williams, Berndt 1977]. Metoda ta została opracowana na podstawie analizy 778 wezbrań w potokach zlokalizowanych w 18 zlewniach o powierzchni od 15 do 1500 ha [Sadeghi 2004]. Równanie MUSLE jest prostym zapisem równania USLE, w którym indeks erozji deszczu został zastąpiony składnikami równania wyrażającymi wielkość spływu:

$$Y = 95 \cdot (V \cdot Q_p)^{0,56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{4.10}$$

gdzie:

Y – masa rumowiska transportowanego w danej fali wezbraniowej [t],

V – objętość całkowita wezbrania [ac-ft],

Qp – maksymalny przepływ w fali wezbraniowej [cubic ft ·s-1],

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (4.1).

W tej metodzie nie jest konieczne określenie wskaźnika dopływu rumowiska DR. Objętość całkowita wezbrania V i maksymalny przepływ w fali wezbraniowej Q_p określane są z hydrogramów, gdzie V służy oszacowaniu ilości gleby erodowanej, a Q_p służy określeniu ilości sedymentów wynoszonych ze zlewni.

Równanie MUSLE było stosowane przez różnych badaczy, spośród których wielu dokonało jego korekty. Najczęściej przytaczane są modyfikacje równia MUSLE opracowane przez Asokan [1981], Dasa [1982], Nicksa i in. [1994] Banasika i Walling [1996] oraz Banasika i Madeyskiego [1990].

Modyfikacja równania MUSLE dokonana przez Banasika i Madeyskego [1990] została dokonana na podstawie badań adaptacyjnych równania dla rzek karpackich. W wyniku tych badań ustalone zostały współczynniki α i β wynoszące odpowiednio 5,42 i 1,02.

$$Y = \alpha \cdot (V \cdot Q_p)^{\beta} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{4.11}$$

w którym oznaczenia jak we wzorze (4.10).

4.2. METODA CHURCHILLA

Ilość rumowiska unoszonego można określić na podstawie pomierzonej objętości rumowiska odłożonego w zbiorniku wodnym. Bolesta [1966] stwierdził, że stosunek objętości rumowiska osadzonego w zbiorniku do powierzchni zlewni określa przybliżony wskaźnik erozji dorzecza, a na jego podstawie można oszacować natężenie transportu rumowiska unoszonego. Ustalony w ten sposób wskaźnik denudacji odpływowej, określony przez Wiśniewskiego [1967] jako „wskaźnik denudacji mechanicznej", nie uwzględnia ilości rumowiska unoszonego odpływającego ze zbiornika. Pomimo tego Wiśniewski [1975] podkreśla, że pomiary zamulania zbiorników są najdokładniejszą metodą określenia ilości rumowiska odpływającego ze zlewni. Wyznaczenie wskaźnika denudacji mechanicznej wymaga określenia objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym. Jak wykazano w pracach Michalca i in. [2009], na podstawie wskaźnika denudacji mechanicznej nie można poprawnie określić ilości rumowiska wynoszonego ze zlewni. Określając natężenie transportu rumowiska unoszonego na podstawie pomiarów zamulania, należy uwzględnić zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska. Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska unoszonego nazywana jest również zdolnością retencyjną lub akumulacyjną materiału unoszonego, określa jaka część dostarczonego do zbiornika materiału unoszonego zostanie trwale zatrzymana w zbiorniku. W pracach badawczych, dotyczących określenia zdolności zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska można odnaleźć metody służące określeniu ilości produktów erozji wynoszonych ze zlewni, a w tym przypadku zatrzymanych w zbiorniku wodnym. Według metody opracowanej przez Churchilla [1948]

ilość rumowiska odpływającego ze zlewni można określić na podstawie objętości osadów w zbiorniku wodnym. Znając również zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska (β) i gęstość objętościową rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym, umożliwiającą określenie średniej rocznej masy rumowiska zatrzymanego w zbiorniku ($\overline{M}$), można ustalić średnią roczną masę sedymentów odpływających ze zlewni (S) w $t \cdot rok^{-1}$, według wzoru:

$$S = \frac{\overline{M}}{\beta} \tag{4.12}$$

We wzorze (4.12) zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska określana jest ze wzoru lub nomogramu Churchilla. W raporcie opracowanym przez Trimble'a i Carey'a [1984] zastosowano wzór (4.12), w którym wartość parametru β określono z nomogramu Brune'a. Nomogramy i wzory Churchilla, Brune'a i innych autorów zostały syntetycznie przedstawione w pracy Michalca [2008d].

4.3. METODA BATOMETRYCZNA

Metoda batometryczna należy do metod bezpośrednich. Ustalenie wielkości transportu rumowiska unoszonego metodą bezpośrednią polega na wykonaniu pomiarów natężenia transportu rumowiska w cieku. Pomiary mogą polegać na bezpośrednim określeniu wielkości natężenia transportu lub na wyznaczeniu wartości innej wielkości fizycznej, za pomocą której natężenie transportu zostaje wyznaczone pośrednio. Pomiar natężenia transportu rumowiska unoszonego dokonuje się za pomocą batometrów butelkowych. Metodyka pomiaru przedstawiona została w materiałach Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego [„Instrukcja obsługi..." 1966; Brański 1966]. Natężenie transportu rumowiska unoszonego może zostać określone poprzez pomiary pośrednie, które oparte są na wyznaczeniu wartości innej wielkości fizycznej niż w pomiarze bezpośrednim. Jedną z wielkości fizycznych może być intensywność światła przenikającego (czy też transmisja) przez roztwór woda-rumowisko unoszone. Łajczak klasyfikuje do tej metody pomiary nefelometryczne i kolorymetryczne [Łajczak 1989]. Wymienione przez Łajczaka metody nie mają w Polsce szerokiego zastosowania. Spowodowane jest to dużą i szybką zmiennością frakcji ziaren transportowanych w zawieszeniu [Łajczak 1989]. Metody te stosuje się do określenia mętności wód i ścieków. Pojęcie mętność określa optyczne właściwości drobnych cząstek stałych w próbce wody, które powodują rozproszenie światła [Hermanowicz i in. 1999]. Granicę pomiędzy mętnością a zawiesiną określa średnica cząsteczek stałych roztworu wodnego. Zawiesiną jest roztwór, którego cząsteczki mają średnicę większą od ok. $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ m [Dojlido 1987].

Uzyskane wyniki z pomiarów zmącenia metodą pomiarową bezpośrednią czy pośrednią stanowią materiał wyjściowy do obliczenia różnych miar transportu rumowiska unoszonego, takich jak:

– zmącenie P [$mg \cdot l^{-1}$ lub $g \cdot m^{-1}$], określające wagową zawartość rumowiska unoszonego w jednostce objętości wody,

– unoszenie sekundowe U [$g \cdot s^{-1}$],

– transport R [t], określający ilość rumowiska przetransportowaną w określonym czasie przez dany przekrój poprzeczny rzeki,

– jednostkowa denudacja odpływowa d_o [$t \cdot km^{-2} \cdot rok^{-1}$], określająca ilość rumowiska odprowadzanego z jednostki zlewni w ciągu jednego roku.

Stosowane przez polską służbę hydrologiczną metody obliczeniowe: normalna i uproszczona, oparte są na wynikach codziennych pomiarów zmącenia [„Opracowanie wyników...” 1982]. W przypadku braku danych codziennych wartości mętności uzupełnia się je na podstawie interpolacji liniowej lub pętlowej pomiędzy wartościami pomierzonymi. Metoda normalna oparta jest na obliczeniu codziennej wartości unoszenia U [$g \cdot s^{-1}$], będącej iloczynem codziennych wartości zmącenia P [$g \cdot m^{-3}$] i codziennych wartości przepływu Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]. Następnie w okresie obliczeniowym, najczęściej w jednym miesiącu, oblicza się wartość średnią unoszenia z okresu U_{Sr}. Wartość miesięcznego transportu rumowiska można obliczyć według równania:

$$R = 10^{-3} \cdot 86400 \cdot t \cdot U_{Sr} = 86{,}4 \cdot \sum_{i=1}^{i=t} U_i \qquad (4.13)$$

gdzie:

t – ilość dni w miesiącu,

R – transport rumowiska [t].

Metoda uproszczona jest mniej pracochłonna. Punktem wyjścia jest obliczenie średniego miesięcznego zmącenia jako średniej arytmetycznej codziennych wartości zmącenia. Uwzględniając obliczone średnie miesięczne unoszenie i średni miesięczny przepływ, oblicza się wartość średniego miesięcznego unoszenia. Obliczenie miesięcznej masy transportu wykonuje się jak w metodzie normalnej.

Metoda uproszczona skraca zdecydowanie czas obliczeń, daje wymierne udogodnienia w trakcie opracowywania materiału o dużej ilości danych wyjściowych. Pozostaje jednak problem dokładności obliczeń. Obliczenia wg metody uproszczonej dają wyniki kilkakrotnie zaniżone w stosunku do wielkości obliczonych metodą normalną [Gładki, Madeyski 1975]. Natomiast wyniki obliczeń według metody normalnej są znacznie zaniżone w stosunku do wyników obliczeń wykonanych na podstawie zagęszczonych pomiarów zmącenia [Froehlich 1975].

Stosowanie powyższych metod obliczeniowych wymaga znajomości zmąceń i przepływu z każdego dnia z godz. $7^{\underline{00}}$ [Łajczak 1989]. Brakujące wartości zmąceń uzupełnia się za pomocą interpolacji. Łajczak podaje przetestowane metody interpolacji służących uzupełnieniu brakujących danych:

– interpolacja liniowa w każdej sytuacji hydrologicznej,

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu w każdej sytuacji hydrologicznej,

– interpolacja liniowa w okresach międzywezbraniowych i interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas wezbrań,

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu w okresach międzywezbraniowych i interpolacja liniowa podczas wezbrań,

– interpolacja liniowa podczas wzrostu przepływu i interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas zmniejszania się przepływu,

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas wzrostu przepływu i interpolacja liniowa podczas zmniejszania się przepływu.

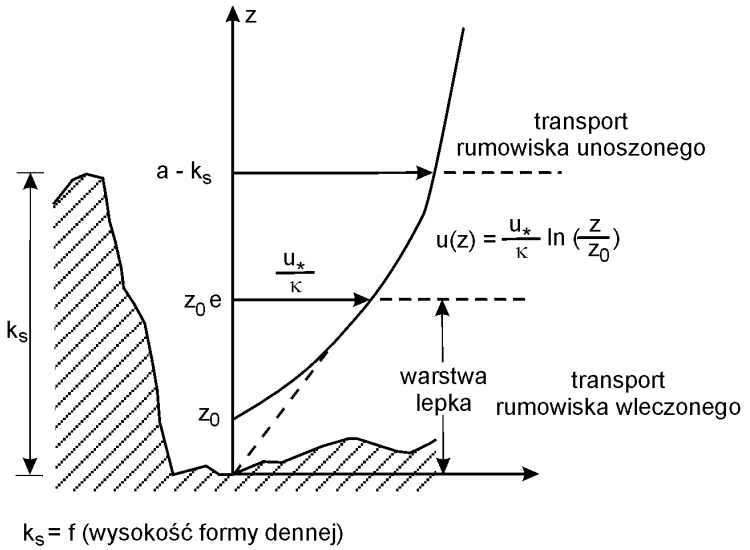
Zastosowanie wymienionych metod interpolacji wymaga wyróżnienia w histogramach codziennych przepływów czterech wskazanych sytuacji hydrologicznych. Najbardziej czasochłonną i zarazem najdokładniejszą metodą interpolacji jest sposób drugi z podanych wyżej [Łajczak 1989]. Krytycznej ocenie poddano metody obliczania wielkości transportu materiału unoszonego. Zarówno Łajczak [1989], Froehlich [1975], Gładki i Madeyski [1975] stwierdzają, że metoda normalna i uproszczone dają wyniki obliczeń znacznie zaniżone w stosunku do uzyskanych na podstawie zagęszczonych pomiarów zmącenia. Pomiary bezpośrednie i pośrednie, wykonywane najczęściej jako pojedyncze w stałych miejscach poboru, nie uwzględniają rzeczywistego rozkładu zmącenia w całym przekroju poprzecznym rzeki. Tym samym uzyskany wynik obliczeń ilości transportu rumowiska unoszonego obarczony jest błędem. Dokładniejsze wyniki uzyskuje się na podstawie pomiarów wielopunktowych. Wyniki tych pomiarów umożliwiają opracowanie współczynnika korekcyjnego (k), będącego ilorazem średniego zmącenia w przekroju poprzecznym rzeki (P_m) i zmącenia w miejscu stałego poboru prób wody (P_p). Współczynnik korekcyjny będący współczynnikiem proporcjonalności lub nachylenia prostej regresji $P_m=k \cdot P_p$, można wyznaczyć tylko na podstawie jednocześnie wykonywanych pomiarów. W przeciwnym wypadku nie uzyska się związku między zmąceniem średnim w przekroju a zmąceniem w punkcie [Brański 1968]. Wyniki obliczeń współczynnika korekcyjnego, obliczonego dla głównych rzek dorzecza Wisły i Odry przedstawiają prace Brańskiego [Brański 1968, 1975].

Ilość transportowanego rumowiska unoszonego zależy do warunków hydrodynamicznych panujących w cieku oraz od natężenia procesów erozyjnych, uwarunkowanych szeregiem czynników. Można tu wymienić czynniki stałe, takie jak np. budowa geologiczna oraz rodzaj i miąższość gleby, nachylenie (spadek) zboczy, użytkowanie rolnicze i sezonowo zmienne, np. stopień rozwoju

wegetacji roślin, warunki meteorologiczne, z których najważniejsze to wielkość i natężenie opadów, intensywność roztopów. Uwzględnienie tych czynników jest trudne, szczególnie w przypadku dużych zlewni. Pomocnym w uwzględnieniu czynników sezonowo zmiennych może być rozpatrywanie zjawiska w wydzielonych sezonach hydrologiczno-meteorologicznych.

4.4. METODA BIJKERA

Rumowisko najczęściej dzielone jest na wleczone, unoszone i zawieszone. Niejednokrotnie rumowisko zawieszone łączone jest z unoszonym i traktowane jako unoszone. Mechanizm ruchu rumowiska unoszonego i wleczonego różni się zasadniczo. Einstein [1950] podaje granicę między rumowiskiem unoszonym i wleczonym, określaną za pomocą średnicy ziarna rumowiska budującego dno, równej $2d_{50}$. Bijker [1971] stwierdził, że tak określona granica odpowiada warunkom, gdy dno jest płaskie. Jeżeli w dnie pojawią się formy denne, to ruch rumowiska wleczonego odbywa się w warstwie dennej równej wysokości form dennych. Natomiast granicą rozdzielającą rumowisko wleczone i unoszone jest tzw. wysokość poziomu odniesienia „a" nad dnem, która określana jest za pomocą szorstkości bezwzględnej k_s [Bijker 1971]. Profil prędkości w strefie przydennej, odpowiadającej wysokości od dna do poziomu odniesienia „a", przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Profil prędkości nad dnem o szorstkości względnej k_s wg Bijkera [1971]
Figure 4. Velocity profile above bed with roughness k_s acc. to Bijker [1971]

Wysokość „a” nad dnem według Bijkera [1971] określa się jako równą szorstkości względnej k_s, którą dla dna płaskiego określić można ze wzoru:

$$k_s = (1 \div 10)d_{50} \tag{4.14}$$

gdy w dnie występują zmarszczki szorstkości względna k_s jest równa wysokości zmarszczek (H_r):

$$k_s = 100d_{50} = H_r \tag{4.15}$$

Bijker [1971] sugeruje, że w hydraulicznie szorstkim strumieniu dolna lepka warstwa mieści się od $z_1 = 0$ do $z = z_oe$, gdzie wysokość z_oe określana jest w punkcie krzywej profilu prędkości, w którym prosta krzywej rozkładu prędkości jest styczna do krzywej logarytmicznego rozkładu prędkości (rys. 4). Prędkość średnią na wysokości z_oe można obliczyć ze wzoru:

$$\overline{V}_{z_0e} = \frac{u_*}{\kappa} \tag{4.16}$$

a prędkość średnia d na w warstwie przydennej, której wysokość jest równa szorstkości względnej k_s, wynosi:

$$V_b = \frac{1}{k_s}\left(\frac{1}{2}\frac{u_*}{\kappa}z_0e + \int_{z_0e}^{k_s}\frac{u_*}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)dz\right) \approx 6{,}34u_* \tag{4.17}$$

natomiast transport jednostkowy rumowiska w warstwie przydennej, klasyfikowanego do rumowiska wleczonego, można obliczyć z formuły podanej przez Bijkera [1971]:

$$q_b = V_b \cdot k_s \cdot c_a \tag{4.18}$$

stąd koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia „a” nad dnem wynosi:

$$C_a = \frac{q_b}{V_b \cdot k_s} = \frac{q_b}{6{,}34u_* \cdot k_s} \tag{4.19}$$

Znając rozkład prędkości przepływu wody w pionie i profil koncentracji rumowiska unoszonego oraz wartość koncentracji C_a rumowiska unoszonego na poziomie „a” nad dnem Bijker [1971] określił jednostkowe natężenie transportu rumowiska unoszonego według równania:

$$q_s = \int_a^h V(z)\,c(z)\,dz = \int_a^h \left(\frac{u_*}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)C_a\left(\frac{h-z}{z}\frac{a}{h-a}\right)^{\frac{w_s}{\kappa \cdot u_*}}\right)dz \tag{4.20}$$

które można uprościć do postaci:

$$q_s = 11{,}6u_* \, C_a \, a\left(I_1 \ln\left(\frac{h}{0{,}033k_s} \right) + I_2 \right) \tag{4.21}$$

gdzie I_1 i I_2 są zmiennymi, zawierającymi całki Einsteina ($J_1(Z)$ i $J_2(Z)$), określanymi według wzorów:

$$I_1 = 0{,}216 \frac{A^{(Z-1)}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B} \right)^Z dB = 0{,}216 \frac{A^{(Z-1)}}{(1-A)^Z} J_1(Z) \tag{4.22}$$

$$I_2 = 0{,}216 \frac{A^{(Z-1)}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B} \right)^Z \ln B \, dB = 0{,}216 \frac{A^{(Z-1)}}{(1-A)^Z} J_2(Z) \tag{4.23}$$

w których:

$$A = \frac{k_s}{h} \text{ lub } A = \frac{a}{h} \tag{4.24}$$

$$B = \frac{z}{h} \tag{4.25}$$

$$Z = \frac{w_s}{k_s \cdot u_*} \tag{4.26}$$

Wprowadzając do wzoru (4.21) rekomendowane przez Bijkera [1971] równanie służące określeniu koncentracji rumowiska unoszonego C_a (wzór 4.19), z założeniem wysokości poziomu odniesienia $a = k_s$ i znając natężenie transportu rumowiska wleczonego q_b, natężenie transportu rumowiska unoszonego można określić:

$$q_s = 1{,}83 \, q_b \left(I_1 \ln\left(\frac{h}{0{,}033k_s} \right) + I_2 \right) \tag{4.27}$$

Zasadniczą trudność w praktycznym zastosowaniu wzorów (4.21) i (4.27) stanowi rozwiązanie całek Einsteina, ujętych we wzorach (4.22) i (4.23), służących określeniu zmiennych I_1 i I_2. Guo i Julien [2004] opracowali algorytm rozwiązania całek Einsteina $J_1(Z)$ i $J_2(Z)$. Całki te zostały określone w 1950 roku przez Einsteina w zaproponowanej formule służącej określeniu transportu rumowiska wleczonego, uwzględniając wpływ i strukturę pulsacji prędkości przydennej. Całki Einsteina mają postać:

$$J_1(Z) = \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z dB \tag{4.28}$$

$$J_2(Z) = \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z \ln B \, dB \tag{4.29}$$

Guo i Julien [2004] przekształcili powyższe całki do postaci umożliwiających ich rozwiązanie:

$$J_1(Z) = \int_0^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z dB - \int_0^A \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z dB \tag{4.30}$$

$$J_2(Z) = \int_0^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z \ln B \, dB - \int_0^A \left(\frac{1-B}{B}\right)^Z \ln B \, dB \tag{4.31}$$

Obliczenie całki $J_1(z)$ możliwe jest dzięki podanemu przez Guo, Julien [2004] przybliżeniu w postaci:

$$J_1(Z) = \frac{Z\pi}{\sin Z\pi} - \left(\frac{(1-A)^Z}{A^{Z-1}} - z\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k-z}\left(\frac{A}{1-A}\right)^{k-Z}\right) \tag{4.32}$$

Wartość całki $J_2(Z)$ można określić z poniższego równania [Guo, Julien 2004]:

$$\begin{gathered} J_2(Z) = \frac{Z\pi}{\sin Z\pi} - \left(\pi \operatorname{ctg} Z\pi - 1 - \frac{1}{Z} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{Z+k}\right)\right) - \\ \left(F_1(Z)\left(\ln A + \frac{1}{Z-1}\right) + Z\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k F_1(Z-k)}{(Z-k)(z-k-1)}\right) \end{gathered} \tag{4.33}$$

w którym wartość F_1 określa się z równania:

$$F_1(Z) = \frac{(1-A)^Z}{A^{Z-1}} - Z\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{Z-k}\left(\frac{A}{1-A}\right)^{k-Z} \tag{4.34}$$

4.5. METODA VAN RIJNA

Van Rijn [1984b] na podstawie wyznaczonego profilu koncentracji proponuje obliczenie jednostkowego natężenia transportu rumowiska unoszonego według formuły:

$$q_s = \frac{u_* \cdot C_a}{\kappa}\left[\frac{a}{h-a}\right]^{Z'}\left[\int_a^{0,5h}\left(\frac{d-z}{z}\right)^{Z'}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)+\int_{0,5h}^{h}\exp\left[-4Z'\left(\frac{z}{h}-0,5\right)\right]\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)dz\right] \quad (4.35)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorach powyżej.

Ze względów praktycznych zastosowania wzoru (4.35) obliczenia jednostkowego natężenia transportu rumowiska unoszonego można wykonać według schematu [van Rijn 1984b]:

1) obliczenie parametru ziarnowego D_* (wzór 2.9),
2) obliczenie krytycznej prędkości ścinającej wg Shieldsa,
3) obliczenie parametru transportu T (wzór 2.8),
4) określenie wysokości charakterystycznego poziomu odniesienia „a" równego połowie wysokości form dennych, lub przyjmując wysokość „a" równą chropowatości względnej (k_s), jeżeli wielkość form dennych jest nieznana, z zachowaniem a_{min} równego 0,01h,
5) określenie koncentracji rumowiska unoszonego C_a na wysokości poziomu odniesienia „a" ponad dnem (wzór 3.23),
6) określenie tzw. reprezentatywnego ziarna D_s według wzoru:

$$\frac{D_s}{d_{50}} = 1 + 0,011(\sigma_s - 1)\cdot(T - 25) \quad (4.36)$$

gdzie:

σ_s – standardowe odchylenie geometryczne:

$$\sigma_s = 0,5\left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{16}}{d_{50}}\right) \quad (4.37)$$

7) określenie prędkości opadania pojedynczej cząstki rumowiska w_s dla cząstek mniejszych od 0,1 mm według wzoru (2.23), dla cząstek o średnicy od 0,1 do 1 mm według wzoru (2.24), a dla cząstek większych od 1 mm według wzoru (2.25),
8) obliczenie krytycznej prędkości dynamicznej według wzoru:

$$u_* = (g \cdot h \cdot i)^{0,5} \quad (4.38)$$

gdzie:

i – spadek zwierciadła wody [-],

h – napełnienie [m],

9) określenie współczynnika proporcjonalności pomiędzy dyfuzją cząstek stałych i wody β_* według wzoru (3.17),

10) określenie współczynnika korekcyjnego φ:

$$\varphi = 2{,}5\left[\frac{w}{u_*}\right]^{0,8}\left[\frac{C_a}{C_0}\right]^{0,4};0{,}01 \le \frac{w}{u_*} \le 1 \tag{4.39}$$

11) określenie parametru zawieszenia – Z i zmodyfikowanego parametru zawieszenia Z' według wzoru:

$$Z' = Z + \varphi \tag{4.40}$$

12) obliczenie czynnika F:

$$F = \frac{\left[\frac{a}{h}\right]^{Z'} - \left[\frac{a}{h}\right]^{1,2}}{\left[1 - \frac{a}{h}\right]^{Z'}\left[1{,}2 - Z'\right]} \tag{4.41}$$

13) obliczenie transportu jednostkowego q_s:

$$q_s = F \cdot \bar{u} \cdot h \cdot C_a \tag{4.42}$$

gdzie:

q_s – transport jednostkowy [$m^{-3} \cdot s^{-1} \cdot mb^{-1}$],

$\bar{u}$ – średnia prędkość przepływu [$m \cdot s^{-1}$].

5. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW BADAŃ

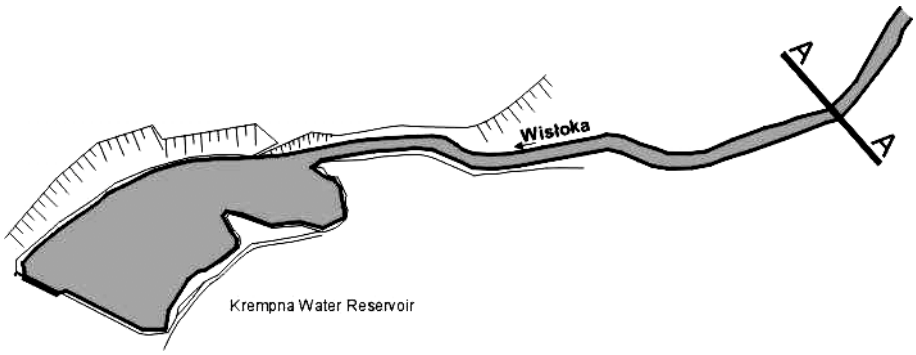
Zastosowanie wybranych metod określenia intensywności transportu rumowiska unoszonego przedstawiono na przykładzie wybranych dwóch obiektów badań. Obliczenia intensywności transportu rumowiska unoszonego wykonano w przekrojach badawczych zlokalizowanych powyżej wlotu do małych zbiorników wodnych w Krempnej i w Zesławicach (rys. 5).

Rysunek 5. Lokalizacja zbiorników wodnych Krempna i Zesławice
Figure 5. Location of Krempna and Zesławice reservoirs

Pierwszy przekrój badawczy (A-A) znajduje się w km 147+900 rzeki Wisłoki, powyżej wlotu do zbiornika wodnego w Krempnej, a drugi (B-B) w km 10+720 rzeki Dłubni, powyżej wlotu do zbiornika w Zesławicach. W niniejszej pracy posłużono się również wynikami pomiarów zamulania zbiorników wodnych Krempna i Zesławice. Zbiornik Krempna położony jest w zlewni górskiej. Zapora zbiornika zamyka zlewnie w początkowym biegu rzeki Wisłoki. Zbiornik Zesławice znajduje się na rzece Dłubni i zamyka zlewnię terenów podgórskich. Został wybudowany w dolnym odcinku rzeki Dłubni, która w tej części swego biegu charakteryzuje się cechami rzeki nizinnej.

5.1. CHARAKTERYSTYKA RZEKI WISŁOKI I ZBIORNIKA WODNEGO W KREMPNEJ

Rzeka Wisłoka należy do dorzecza górnej Wisły, obejmującego obszar w obrębie trzech wielkich jednostek fizyczno-geograficznych. Są to Karpaty, Kotliny Podkarpackie oraz Wyżyny Małopolskie. Wisłoka jest rzeką o II rzędowej zlewni, mającą swój początek w Beskidzie Niskim. Źródła wypływają u podnóża Dębiego Wierchu na wysokości ok. 600 m n.p.m. Całkowita długość rzeki Wisłoki liczy 163,6 km, a powierzchnia zlewni wynosi 4110,2 km^2. Rzeka Wisłoka od źródeł do zbiornika w miejscowości Krempna o długości 18,6 km obejmuje zlewnię cząstkową o powierzchni 165,3 km^2. Profile wodowskazowe Krempna i Kotań zlokalizowane są w 145,0 km i 147,85 km biegu rzeki Wisłoki. Przekrój badawczy zlokalizowano w przekroju wodowskazowym w Kotani (rys. 6).



Rysunek 6. Zbiornik wodny w Krempnej i lokalizacja przekroju badawczego A-A
Figure 6. Water reservoir in Krempna and location of research cross-section A-A

Obszar zlewni to teren o rzeźbie górskiej i podgórskiej. Znajduje się na nim wiele wzniesień sięgających powyżej 600 m n.p.m., a najwyższy punkt zlewni stanowi szczyt Góry Mareszka 780 m n.p.m. Wniesienia porozdzielane są dolinami, których dna znajdują się na wysokości około 400 m n.p.m. Ma to znaczący wpływ na kształtowanie się fali powodziowej i ilości doprowadzanego do Wisłoki rumowiska. Deniwelacje na terenie zlewni wynoszą 200–250 m. Utworami powierzchniowymi na terenie zlewni są gliny zwietrzelinowe i stokowe, powstałe w wyniku fizycznego wietrzenia skał podłoża. Wytworzone z twardszych skał osadowych i fliszowych zalegają na zboczach i niższych grzbietach. Wykształcone są jako gliny pylaste i ilaste, z przewagą bardziej zwięzłych gleb gliniasto-pylastych i gliniasto-ilastych, będących najczęściej średnio i słabo szkieletowymi glebami brunatnymi wyługowanymi.

Dolna część zlewni i jej płaskie stoki to niewielkie obszary użytkowane rolniczo, których tylko 4% stanowią grunty orne, usytuowane na łagodnych stokach i w szerokich dnach dolin. Na terenie zlewni nie są stosowane zabiegi przeciwerozyjne, nie stosuje się płodozmianu, orka prowadzona jest równolegle do spadku stoków. Jedynie około 2% powierzchni zlewni stanowi infrastrukturę dróg i zabudowy. Niekiedy użytki rolne zajmują często wyżej położone, ale mniej spadziste odcinki stoków z głębszymi i mniej szkieletowymi glebami. Najczęściej są to łąki i pastwiska. Na obszarze tym rozwinięta została hodowla bydła, dlatego użytki zielone stanowią przeszło 14% powierzchni. Obszar zajmowany przez uprawy nieznacznie się powiększa, związane jest to z postępującą nieopłacalnością chowu bydła.

Obszar zlewni ze względu na jej górski charakter w dużej mierze stanowi użytek leśny. Tereny zajmowane przez użytek leśny stanowią na terenie zlewni około 80%. W dużej części lasy należą do Magurskiego Parku Krajobrazowego, którego powierzchnię w 95,7% stanowią lasy [Górecki i in. 2003].

Zbiornik w miejscowości Krempna, o pojemności 119,1 tys. m^3, został wykonany w latach 1970–1972. Zbiornik, o charakterze rekreacyjnym, zlokalizowany jest w górnym odcinku rzeki Wisłoki w km 145+023. W roku 1987 powstał, na zlecenie Urzędu Gminy w Krempnej, projekt renowacji zbiornika. Po przebudowie pojemność pierwotna zbiornika wynosiła 112 tys. m^3. Powierzchnia zalewu przy normalnym piętrzeniu to 3,2 ha. Długość zbiornika, mierzona w osi, wynosi 400 m.

5.2. CHARAKTERYSTYKA RZEKI DŁUBNI I ZBIORNIKA WODNEGO W ZESŁAWICACH

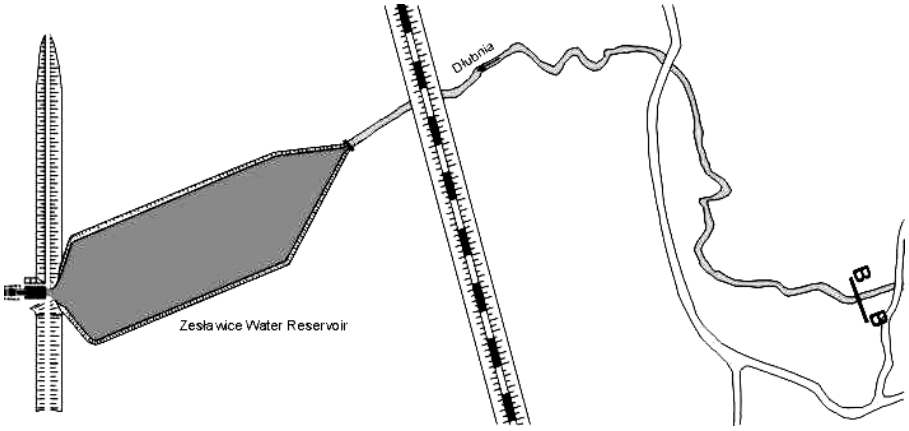
Rzeka Dłubia od źródeł znajdujących się na Wyżynie Krakowskiej, przepływa przez Wyżnę Miechowską, Wysoczyznę Proszowicką, znajdując swoje ujście w Dolinie Wisły, staje się lewobrzeżnym dopływem Wisły w km 89+400. Całkowita długość rzeki wynosi 53,2 km, a powierzchnia zlewni wynosi 271,6 km^2.

Dorzecze górnej Dłubni obejmuje Wyżynę Krakowską i Wyżynę Miechowską. Wyżyna Miechowska, w części południowej dorzecza, kończy się progiem, za którym zalega duży stożek napływowy Dłubni. Stożek ten znajduje się poniżej Zesławic i zaliczany jest do Kotliny Sandomierskiej

Najczęściej występującym na obszarze dorzecza Dłubni typem gleb są gleby wytworzone na lessach. Większość z nich to gleby lessowe całkowite ze znakami brunatnymi [Strzemski 1954]. Na stokach i wierzchowinach występują głównie gleby lessowe nieprzemyte, będące bardziej przepuszczalnymi. Natomiast w dolnych częściach zboczy znajdują się bardziej przepuszczalne gleby lessowe przemyte [Dynowska 1963]. Poza lessami występują czarnoziemy, zajmujące niewielkie powierzchnie, oraz rędziny. Gleby rędzinne, występujące na obszarze Wyżyny Miechowskiej, wytworzone są na marglach kredowych [Starkel 1980].

Powierzchnia zlewni jest stosunkowo słabo zalesiona, zatem obszary leśne nie mają większego wpływu na stosunki wodne w zlewni. Na obszarze dorzecza Dłubni występują siedliska borowe, siedliska ciepłolubnych buczyn, jak również różne podzespoły grądowych lasów wyżynnych. Lasy zajmują stosunkowo niewielką powierzchnię, zaledwie 7%. Łąki stanowią ok. 3%, a powierzchnia przeznaczona pod uprawy zajmuje ok. 90% powierzchni zlewni [Bednarczyk 1994].

Zlikwidowany w 1992 roku jedyny wodowskaz kontrolujący całą zlewnię Dłubni, znajdował się w 6+300 km biegu rzeki. Powierzchnia zlewni do przekroju wodowskazu wynosi 264 km^2. Poziom zera wodowskazu wynosił 208,10 m n.p.m. według Kronsztadt. Na podstawie danych obserwacyjnych z lat 1951–91 obliczono średni roczny przepływ (SSQ) wynoszący 1,17 $m^3 \cdot s^{-1}$. Wartość średniego niskiego przepływu dla badanego wielolecia wynosi SNQ = 0,43 $m^3 \cdot s^{-1}$. Rzeka Dłubnia zwiększa średni przepływ Wisły o około 1%.



Rysunek 7. Zbiornik wodny w Zesławicach i lokalizacja przekroju badawczego B-B
Figure 7. Water reservoir in Zesławice and location of research cross-section B-B

W 8,7 km biegu rzeki Dłubni znajduje się zbiornik wodny Zesławice (rys. 7). Powierzchnia zlewni do przekroju zapory zbiornika wodnego wynosi 218,1 km^2. Pojemność całkowita zbiornika wynosi 228 tys. m^3, a powierzchnia zalewu przy normalnym piętrzeniu to 9,5 ha. Długość zbiornika, mierzona w osi, wynosi 650 m.

Zbiornik ten o charakterze retencyjnym został zbudowany w latach 1964–1966 i oddany do użytku w październiku 1966 roku. Przeznaczenie zbiornika to: zaopatrzenie w wodę przemysłową ówczesną Hutę im. Lenina, zaopatrzenie w wodę pitną MPWiK w Krakowie oraz ochrona przeciwpowodziowa. Już w pierwszych latach eksploatacji zbiornika stwierdzono znaczne zamulenie. W roku 1988 przystąpiono do odmulenia zbiornika głównego. Elementem piętrzącym jest zapora ziemna zbiornika, a rolę urządzeń spustowych spełnia jaz ruchomy. Szczegółową charakterystykę zbiornika wodnego w Zesławicach zawierają prace Bednarczyka [1994], Michalca [2008a, 2008d].

6. OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO NA PRZYKŁADACH OBIEKTÓW BADAŃ

Przedstawione w rozdziale 5. dwa przekroje badawcze w rzekach Wisłoce i Dłubni posłużą zaprezentowaniu wyników obliczeń intensywności transportu rumowiska unoszonego. Zamierzeniem autora monografii było nie tylko przedstawienie sposobu zastosowania wybranych metod określenia transportu rumowiska unoszonego, lecz również podjęcie próby scharakteryzowania tych metod ze względu na łatwość i praktyczność ich zastosowania w połączeniu z oceną ich dokładności. Ocenę tę wykonano w odniesieniu do metody opartej na pomiarach batometrycznych, przyjętej jako miarodajnej. Transport rumowiska unoszonego na podstawie pomiarów batometrycznych, dla poszczególnych lat oraz średni roczny, określono dysponując ciągami danych hydrometrycznych z okresów eksploatacji zbiorników wodnych, znajdujących się poniżej przekrojów badawczych w rzekach Wisłoce i Dłubni. W obliczeniach posłużono się ciągami danych hydrometrycznych, obejmujących przepływy średnie dobowe, z okresu 1972–2003 dla rzeki Wisłoki i 1966–1983 dla rzeki Dłubni.

Według metod Reniger-Dębskiego i Brańskiego określono średnią roczną denudację odpływową ze zlewni, jako średnią roczną masę rumowiska unoszonego transportowanego w przekrojach badawczych. Tę samą wielkość otrzymano z obliczeń metodami DR-USLE i MUSLE.

Określenie rocznej masy sedymentów odpływających ze zlewni rzek Wisłoki i Dłubni według wzoru Churchilla (4.12) umożliwiły wyniki pomiarów zamulania zbiorników wodnych, odpowiednio zbiornika Krempna i Zesławice. W obliczeniach tych uwzględniono opróżnienie zbiornika Krempna w sześciomiesięcznym okresie zimowo-wiosennym.

Transport rumowiska unoszonego metodą Bijkera i van Rijna określono na podstawie kilku pomiarów hydrometrycznych w przekrojach pomiarowych A-A i B-B. Pomiary te, obejmujące określenie prędkości przepływu wody i koncentracji rumowiska unoszonego na różnych wysokościach w kilku wyznaczonych pionach hydrometrycznych, zostały wykonane przy przepływach wynoszących: 0,39, 0,90, 3,12, i 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$ – rzeka Wisłoka i 0,44, 1,96, 3,63 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$ – rzeka Dłubnia. Pomiary prędkości przepływu wody wykonano hydrometrycznym młynkiem indukcyjnym firmy OTT Hydrometrie C2000. Pomiar koncen-

tracji rumowiska unoszonego wykonano przyrządem fotooptycznym – Portable Suspended Soils and Turbidity Monitor System 770 firmy Partech. W trakcie pomiarów hydrometrycznych pobrano próby materiału mineralnego z dna badanych rzek. Przeprowadzono także badania form dennych w rzece Dłubni i form korytowych w rzece Wisłoce. Badania te posłużyły określeniu szorstkości względnej dna, a następnie ustaleniu wysokości poziomu odniesienia „a" nad dnem i koncentracji rumowiska unoszonego C_a na tym poziomie. Poprawne określenie tej koncentracji stanowi o dokładności obliczeń według metod Bijkera [1971] i van Rijna [1984b], co zostanie przedstawione w rozdziałach 6.5 i 6.6.

6.1. OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO METODAMI RENIGER-DĘBSKIEGO I BRAŃSKIEGO

Wielkość denudacji ze zlewni rzek Wisłoki i Dłubni, do przekrojów zbiorników wodnych, określono wyznaczając cząstkowe zlewnie. Powierzchnie tych zlewni zostały przypisane odpowiednim klasom zmywalności gleb i wskaźnikom denudacji. Posłużono się w tym celu podkładami mapowymi w skali 1:25 000.

Denudacja materiału mineralnego ze zlewni rzeki Wisłoki do przekroju zbiornika wodnego w Krempnej, określona metodą Reniger-Dębskiego, wynosi 37334,0 $t \cdot rok^{-1}$ (tab. 1) [Michalec, Tarnawski 2006].

Tabela 1. Wielkość denudacji w zlewni rzeki Wisłoki określona metodą Reniger-Dębskiego
Table 1. Amount of denudation in the Wisłoka river catchment determined by Reniger-Dębski method

Klasa wg Reniger Class acc. to Reniger	Powierzchnia zlewni odpowiadająca klasie [km^2] Catchment area corresponding to class [km^2]	Wskaźnik denudacji wg Dębskiego [$t \cdot km^2 \cdot rok^{-1}$] Denudation index acc. to Dębski [$t \cdot km^2 \cdot year^{-1}$]	Denudacja [$t \cdot rok^{-1}$] Denudation [$t \cdot year^{-1}$]
VI	29,6	123,0	3640,8
VII	95,4	218,0	20 797,2
VIII	40,3	320,0	12 896,0
Suma	165,3	–	37 334,0

Wielkość denudacji ze zlewni rzeki Dłubni do przekroju zbiornika wodnego w Zesławicach, określona metodą Reniger-Dębskiego, wynosi 32 748,0 $t \cdot rok^{-1}$ (tab. 2) [Michalec 2008b].

Tabela 2. Wielkość denudacji w zlewni rzeki Dłubni określona metodą Reniger-Dębskiego
Table 2. Amount of denudation in the Dłubnia river catchment determined by Reniger-Dębski method

Klasa wg Reniger Class acc. to Reniger	Powierzchnia zlewni odpowiadająca klasie [km^2] Catchment area corresponding to class [km^2]	Wskaźnik denudacji wg Dębskiego [t·km^2·rok^{-1}] Denudation index acc. to Dębski [t·km^2·year^{-1}]	Denudacja [t·rok^{-1}] Denudation [t·year^{-1}]
VI	197,6	123,0	24 304,8
VIII	2,9	320,0	928,0
IX	17,6	427,0	7515,2
Suma	218,1	–	32 748,0

Określone wskaźniki intensywności erozji zlewni rzeki Wisłoki według Brańskiego [1975] wynoszą 5–6. Obliczona intensywność erozji wynosi 100 t·km^{-2}, a wielkość denudacji odpływowej z tej zlewni jest równa 16530 t·rok^{-1} [Michalec 2001].

Według metody Brańskiego [1975] wskaźnik intensywności erozji w zlewni rzeki Dłubni wynosi 3–4. Odpowiada to, według mapy rozkładu wskaźników denudacji odpływowej, wartości denudacji jednostkowej równej 200 t·km^{-2}. Średnia roczna denudacja odpływowa ze zlewni o powierzchni 218,1 km^2 jest równa 43 620 t·rok^{-1} [Michalec 2001].

6.2. OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO METODAMI DR-USLE I MUSLE

Średnia roczna masa rumowiska, odprowadzana przez rzekę Wisłokę ze zlewni zamkniętej zaporą zbiornika wodnego w Krempnej, obliczona wg równania DR-USLE (4.2), wynosi 8234,1 t · rok^{-1}. W tabeli 3 zamieszczono wartości parametrów równania DR-USLE.

Średnia roczna masa rumowiska odprowadzana przez rzekę Dłubię ze zlewni zamkniętej zaporą zbiornika wodnego w Zesławicach, obliczona wg równania DR-USLE (4.2), wynosi 17 022,3 t·rok^{-1} (tab. 4).

Tabela 3. Parametry równania DR-USLE i wyniki obliczeń średniej rocznej masy rumowiska odprowadzanej ze zlewni rzeki Wisłoki
Table 3. Parameters of DR-USLE equation and results of computations of annual average amount of sediment delivered from the Wisłoka river catchment

Parametr równania Equation parameter	Wartość Value
Średnia roczna erozyjność deszczów i spływów – R [Je· rok^{-1}] The rainfall factor – R [Je· year^{-1}]	103,900
Współczynnik podatności gleb na erozję – K [t · ha^{-1} · Je^{-1}] The soil-erodibility factor – K [t · ha^{-1} · Je^{-1}]	0,820
Współczynnik topograficzny – LS [-] The slope-lenght and solpe-gradient factor – LS [-]	7,263
Współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania – C [-] The cropping-management factor – C [-]	0,007
Współczynnik zabiegów przeciwdziałających erozji – P [-] The erosion-control practice factor – P [-]	1,0
Uzyskane wyniki obliczeń Results of computations	Wartość Value
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby z jednostki powierzchni – E [t · km^{-2} · rok^{-1}] Annual average soil loss per unit area – E [t · km^{-2} · rok^{-1}]	433,2
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby w całej zlewni [t · rok^{-1}] Annual average soil loss per cachment area [t · year^{-1}]	71600,6
Wskaźnik dopływu rumowiska – DR [-] Sediment delivery ratio – DR [-]	0,115
Średnia roczna masa rumowiska [t · rok^{-1}] Annual average mass of sediment [t · year^{-1}]	8234,1

Tabela 4. Parametry równania DR-USLE i wyniki obliczeń średniej rocznej masy rumowiska odprowadzanej ze zlewni rzeki Dłubni
Table 4. Parameters of DR-USLE equation and results of computations of annual average amount of sediment delivered from the Dubnia river catchment

Parametr równania Equation parameter	Wartość Value
Średnia roczna erozyjność deszczów i spływów – R [Je· rok^{-1}] The rainfall factor – R [Je· year^{-1}]	86,994
Współczynnik podatności gleb na erozję – K [t · ha^{-1} · Je^{-1}] The soil-erodibility factor – K [t · ha^{-1} · Je^{-1}]	0,539
Współczynnik topograficzny – LS [-] The slope-lenght and solpe-gradient factor – LS [-]	1,129
Współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania – C [-] The cropping-management factor – C [-]	0,152
Współczynnik zabiegów przeciwdziałających erozji – P [-] The erosion-control practice factor – P [-]	0,851

Uzyskane wyniki obliczeń Results of computations	Wartość Value
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby z jednostki powierzchni – E [t · km^{-2} · rok^{-1}] Annual average soil loss per unit area – E [t · km^{-2} · rok^{-1}]	773,1
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby w całej zlewni [t · rok^{-1}] Annual average soil loss per cachment area [t · year^{-1}]	168 537,1
Wskaźnik dopływu rumowiska – DR [-] Sediment delivery ratio – DR [-]	0,101
Średnia roczna masa rumowiska [t · rok^{-1}] Annual average mass of sediment [t · year^{-1}]	17 022,3

Ze względu na konieczność rejestracji stanów wody, umożliwiających określenie przepływu w funkcji napełnienia, transport rumowiska unoszonego metodą MUSLE w rzece Wisłoce w przekroju wodowskazowym w Kotani, znajdującego się powyżej wlotu do zbiornika wodnego w Krempnej, określono dla hydrogramów fal zebraniowych z okresu 1972–2003. Średni roczny transport rumowiska unoszonego w tym okresie wynosi 5862 t·rok^{-1} (tab. 5).

Tabela 5. Transport rumowiska unoszonego w rzece Wisłoce i Dłudni obliczony metodą MUSLE

Table 5. Suspended sediment transport calculated in Wisłoka river and the Dłubnia river according to MUSLE method

Rzeka Wisłoka Wisłoka river			Rzeka Dłubnia Dłubnia river		
Rok Year	Przepływ SQ Water discharge SQ [m^3·s^{-1}]	Transport rumowiska unoszonego Transport of suspended sediment [t]	Rok Year	Przepływ SQ Water discharge SQ [m^3·s^{-1}]	Transport rumowiska unoszonego Transport of suspended sediment [t]
1972	1,18	3427,9	1966	1,28	10547,9
1973	1,06	16162,2	1967	1,30	14715,4
1974	2,84	10915,0	1968	1,09	7098,3
1975	1,55	1258,3	1969	1,59	41626,7
1976	2,19	8625,5	1970	1,06	7706,6
1977	0,8	4253,9	1971	1,20	11704,8
1978	1,75	3439,8	1972	0,90	5950,8
1979	2,72	2559,1	1973	0,67	845,3
1980	6,35	8266,6	1974	1,06	2920,1
1981	1,56	5638,4	1975	1,27	6844,9
1982	0,80	4508,4	1976	1,11	4669,2
1983	2,21	4360,7	1977	1,25	10798,3
1984	2,12	4466,4	1978	0,88	3552,8
1985	3,08	7857,6	1979	1,44	15639,2
1986	1,33	3899,8	1980	0,82	1985,9
1987	1,97	4227,1	1981	0,97	5469,8

Rzeka Wisłoka Wisłoka river			Rzeka Dłubnia Dłubnia river		
Rok Year	Przepływ SQ Water discharge SQ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	Transport rumowiska unoszonego Transport of suspended sediment [t]	Rok Year	Przepływ SQ Water discharge SQ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	Transport rumowiska unoszonego Transport of suspended sediment [t]
1988	0,92	3434,4	1982	1,10	3034,9
1989	1,96	4083,4	1983	0,71	1848,0
1990	1,51	4052,1			
1991	2,72	9122,5			
1992	3,31	7335,7			
1993	0,97	3082,5			
1994	1,44	3164,6			
1995	1,58	3766,7			
1996	3,03	5585,2			
1997	2,34	9320,7			
1998	1,48	3911,2			
1999	1,13	11502,6			
2000	1,33	4054,6			
2001	1,51	16703,1			
2002	2,93	1003,7			
2003	1,33	3582,7			

Ze względu na opróżnienie zbiornika w okresie zimowo-wiosennym, tj. od listopada do maja, obliczono również transport rumowiska z okresu maj–listopad każdego roku eksploatacji. Wyniki obliczeń z półrocza umożliwią porównanie transportu rumowiska z wielkością zamulenia zbiornika, która z kolei umożliwi określenie transportu rumowiska unoszonego na podstawie objętości osadów w zbiornikach wodnych (rozdz. 6.3). Średni transport rumowiska unoszonego w okresie piętrzenia wody w zbiorniku wodnym w Krempnej, obliczony metodą MUSLE, wynosi 3506 t.

Wyniki obliczeń transportu rumowiska unoszonego dopływającego do zbiornika w Zesławicach w latach 1969–1983 zamieszczono w tabeli 5. Średni roczny transport rumowiska obliczony metodą MUSLE (wzór 4.11), w wyniku wydzielenia fal wezbraniowych w poszczególnych latach rozpatrywanego okresu, wynosi 8720 $t \cdot rok^{-1}$.

6.3. METODA OKREŚLENIA TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO METODĄ CHURCHILLA

Ilość rumowiska odpływającego ze zlewni, w przypadku gdy jest ona zamknięta zbiornikiem wodnym, można określić na podstawie objętości osadów zgromadzonych w zbiorniku. Określenie rocznej masy sedymentów odpływających ze zlewni rzek Wisłoki i Dłubni według wzoru Churchilla (4.12) było możliwe dzięki wykonanym pomiarom zamulania zbiorników wodnych, znaj-

dujących się na tych rzekach. Ze względu na odmulenie każdego ze zbiorników, a także ich przebudowę wykonaną w trakcie prac odmuleniowych, powodującą zmianę charakterystyki geometrycznej zbiornika lub warunków przepływu wody, zbiorniki te oznaczono cyfrą jeden dla okresu przed odmuleniem (tj. Krempna-1 i Zesławice-1) i cyfrą dwa – po odmuleniu (tj. Krempna-2 i Zesławice-2) [Michalec 2008c, 2008d]. Zbiornik wodny w Krempnej w wyniku odmulenia i przebudowy zwiększył swoją pojemność początkową. Zmianie uległ również kształt zbiornika w części wlotowej. Zbiornik wodny w Zesławicach w wyniku odmulenia i przebudowy nie zmienił pojemności, lecz zmienił się charakter i wielkość dopływu wody w wyniku rozdzielenia całkowitego dopływu wody w węźle wodnym na wlocie od zbiornika i skierowania części przepływu do wybudowanego zbiornika bocznego.

Określoną na podstawie pomiarów objętość osadów rumowiska (tab. 6) przeliczono na masę na podstawie określonej gęstości objętościowej osadów. Średnia gęstość objętościowa osadów, określona na podstawie sześciu prób pobranych w różnych częściach każdego z badanych zbiorników, wynosi odpowiednio 1,23 $t \cdot m^{-3}$ – zbiornik Krempna i 1,03 $t \cdot m^{-3}$ – zbiornik Zesławice.

Tabela 6. Objętość odkładów rumowiska w badanych zbiornikach wodnych w poszczególnych latach eksploatacji [Michalec 2008]

Table 6. Volume of the deposited sediments in the studied water reservoirs in individual years of exploitation [Michalec 2008]

Zbiornik Reservoir	Pojemność pierwotna Original capacity [m^3]	Rok pomiaru Year of measure-ments	Rok eksploatacji Year of opera-tion	Objętość okładów rumowiska Volume of sediment deposits [m^3]	Masa okładów rumowiska M [t] Mass of sediment deposits M [t]
Krempna-1	119 100	1986	15	35 665	43 868
Krempna-2	112 000	1996	9	27 041	33 260
		1997	10	30 464	37 471
		1998	11	34 637	42 604
		1999	12	38 002	46 742
		2000	13	40 144	49 377
		2002	15	44 200	54 366
		2003	16	44 901	55 228
		2005	18	45 810	56 346
Zesławice-1	228 000	1968	2	26 968	27 777
		1969	3	70 425	72 538
		1970	4	75 780	78 053
		1971	5	76 251	78 539
		1974	8	86 192	88 778
		1983	17	116 091	119 574
Zesławice-2		1999	14	56 162	57 847
		2005	20	75 315	77 574
		2006	21	77 232	79 549

Wyznaczona z nomogramu Churchilla zdolność zbiorników wodnych (β) na rzece Wisłoce i Dłubni wynosiła, w zależności od długości okresu eksploatacji, odpowiednio 59,1–64,3% i 75,3–86,0% (tab. 7). Rozpiętość uzyskanych wartości β wynika z wpływu zwiększającej się objętości odkładów rumowiska na wartości wskaźnika sedymentacji, określonego dla poszczególnych lat eksploatacji, w których wykonano pomiary zamulania. Szczegółowe wyjaśnienie zasady określania wartości β według metody Churchilla, jak również według innych metod, zostało przedstawione w pracy Michalca [2008d]. Zróżnicowane przyrosty ilości rumowiska zatrzymanego w kolejnych latach eksploatacji analizowanych zbiorników (tab. 6) i tym samym zróżnicowane wartości średniej rocznej masy rumowiska zatrzymanego w tych zbiornikach oraz wartości β (tab. 7) wpłynęły na otrzymane różne wartości S – średniej rocznej masy sedymentów odpływających ze zlewni, obliczonej wzorem 4.12.

Określona średnia roczna masa rumowiska dopływającego do zbiornika wodnego Krempna-1, tj. przebudowa zbiornika, wynosiła 4570 $t \cdot rok^{-1}$. Natomiast średnia roczna masa rumowiska dopływającego do zbiornika Krempna-2 (po przebudowie), określona na podstawie osiemnastu lat eksploatacji wynosiła 5297 $t \cdot rok^{-1}$. Wartość średnia, uwzględniająca okres przed i po przebudowie, wynosi 4934 $t \cdot rok^{-1}$. Ze względu na niewielkie zróżnicowanie ilości rumowiska zatrzymywanego w kolejnych latach w zbiorniku Krempna otrzymane wartości średniej rocznej masy sedymentów odpływających ze zlewni (S) nie różnią się znacząco, tak jak w przypadku zbiornika Zesławice (tab. 7). Przed odmuleniem i przebudową zbiornika (Zesławice-1) średnia roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni wynosiła 9341–30 224 $t \cdot rok^{-1}$, a po odmuleniu i przebudowie (Zesławice-1) wynosiła 4478–4805 $t \cdot rok^{-1}$. Otrzymana na podstawie zamulania zbiornika Zesławice-2, tak znacznie mniejsza masa rumowiska odpływającego ze zlewni, wynika z faktu, że część rumowiska, która przed odmuleniem i przebudową dopływała do zbiornika Zesławice-1, zostawała zatrzymywana w zbiorniku bocznym, zasilanym wodą ze wspólnego węzła wodnego znajdującego się na wlocie do zbiorników Zesławice-2 i wspomnianego zbiornika bocznego. Uzyskane wyniki wskazują, zwłaszcza na przykładzie dotyczącym zbiornika wodnego w Zesławicach, że uzyskana z obliczeń tą metodą średnia roczna masa rumowiska odpływającego ze zlewni zależy przede wszystkim od określonej objętości osadów w zbiorniku i jest ona zróżnicowana w poszczególnych latach eksploatacji. Przyjąć należałoby wyniki uzyskane z najdłuższego okresu obserwacji, czyli po siedemnastu latach eksploatacji. Średnia roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni zbiornika Zesławice w tym okresie wynosiła 9341 $t \cdot rok^{-1}$.

Tabela 7. Średnia roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni zbiorników wodnych w Krempnej i Zesławicach
Table 7. Mean annual mass of sediment transported from catchments of Krempna and Zesławice water reservoirs

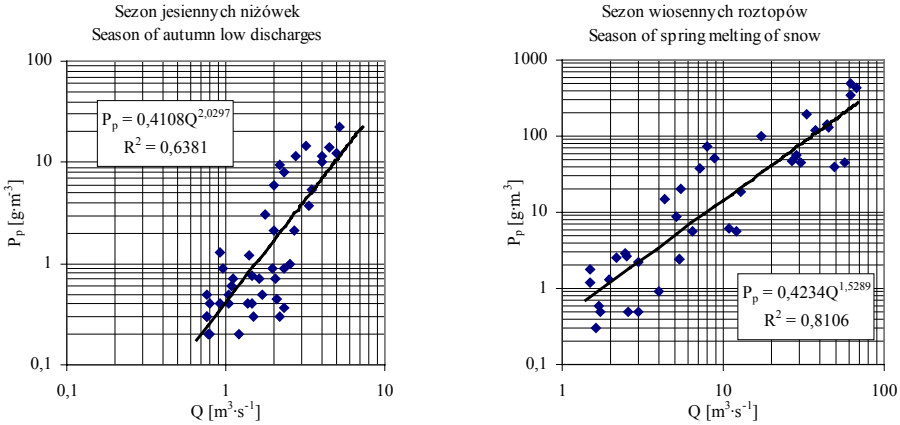
Zbiornik Reservoir	Rok eksploatacji Year of operation	Średnia roczna masa rumowiska zatrzymanego w zbiorniku $\overline{M}$ [t] Mean annual mass of sediment trapped in reservoir $\overline{M}$ [t]	Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska β [%] wg Chrurchilla Reservoir sediment trap efficency β [%] acc. to Churchill	Średnia roczna masa sedymentów odpływających ze zlewni S [t·rok^{-1}] Mean annual mass of sediment transported from catchment S [t·year^{-1}]
Krempna-1	15	2924,5	64,0	4570
Krempna-2	9	3695,6	64,3	5747
	10	3747,1	63,5	5901
	11	3873,0	62,4	6207
	12	3895,2	61,5	6334
	13	3798,2	60,9	6237
	15	3624,4	59,6	6081
	16	3451,8	59,4	5811
	18	3130,4	59,1	5297
Zesławice-1	2	13 888,5	83,0	16 733
	3	24 179,3	80,0	30 224
	4	19 513,4	79,5	24 545
	5	15 707,7	79,5	19 758
	8	11 097,2	78,6	14 119
	17	7033,7	75,3	9341
Zesławice-2	14	4131,9	86,0	4805
	20	3878,7	84,7	4579
	21	3788,0	84,6	4478

6.4. OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO NA PODSTAWIE POMIARÓW BATOMETRYCZNYCH

Obliczenie rzeczywistej ilości rumowiska dopływającego do analizowanego przekroju wymaga dysponowania danymi hydrologicznymi takimi jak przepływ i odpowiadająca mu koncentracja rumowiska unoszonego. Ciągi danych hydrologicznych dla rzek Wisłoki i Dłubni uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Obliczenia transportu rumowiska unoszonego na podstawie pomiarów batometrycznych przeprowadzono według tzw. metody normalnej. Brakujące dane zmącenia uzupełniono, wykorzystując opracowane zależności koncentracji rumowiska unoszonego w funkcji przepływu. Na podstawie uzyskanych wartości unoszenia U_i [g·s^{-1}], będących iloczynem przepływu i koncentracji rumowiska, obliczono transport dobowy, miesięczny

i roczny w rozpatrywanym okresie obserwacyjnym. Uwzględniając zmienność natężenia procesów erozyjnych w ciągu roku wydzielono następujące sezony: wiosennych roztopów, letnich deszczy ulewnych, jesiennych niżówek i zimy [Bednarczyk 1994]. Każdy z wyodrębnionych sezonów charakteryzuje typowy przebieg zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych powtarzalnych w ciągu badanego okresu. Wykreślone krzywe zależności koncentracji rumowiska od natężenia przepływu dla każdego z tych sezonów posłużyły określeniu ilości unoszonego rumowiska w okresach braku obserwacji batometrycznych.

Ilość transportowanego rumowiska unoszonego w przekroju wlotowym do zbiornika wodnego Krempna obliczono na podstawie danych hydrologicznych, obejmujących ciąg obserwacyjny przepływów średnich dobowych z okresu 1972–2003. Pomiary batometryczne wykonane w latach 1996-2003, obejmowały pomiar koncentracji rumowiska w jednym punkcie przekroju pomiarowego. Ciąg danych, obejmujący przepływy z okresu 1972–2003, uzupełniono przypisując poszczególnym przepływom wartości koncentracji rumowiska unoszonego. W tym celu opracowano zależności funkcyjne przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska unoszonego, pomierzonego w latach 1996–2003. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe zależności ustalone dla okresu letnich deszczy ulewnych i jesiennych niżówek. Zależności te umożliwiły uzupełnienie brakujących danych dla dni nieobjętych pomiarami koncentracji rumowiska unoszonego.



Rysunek 8. Zależności funkcyjne przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska unoszonego w wydzielonych sezonach hydrologiczno-meteorologicznych – rzeka Wisłoka

Figure 8. Functional dependencies for mean daily flows and corresponding suspended sediment concentrations in separate hydrological and meteorological seasons – the Wisłoka river

W obliczeniach transportu rumowiska unoszonego uwzględniono koncentrację rumowiska w całym przekroju poprzecznym rzeki. W tym celu ustalono współczynnik korekcyjny „k", będący ilorazem średniej koncentracji rumowiska unoszonego w przekroju poprzecznym rzeki i koncentracji rumowiska unoszonego w miejscu stałego poboru próby. Pomiary koncentracji rumowiska unoszonego w przekroju poprzecznym rzeki wykonano w trakcie batometrycznych pomiarów punktowych, wykonywanych w latach 1996–2003. Współczynnik „k", ustalony z równania regresji z przedziałem ufności wynoszącym 95%, wynosi 0,906.

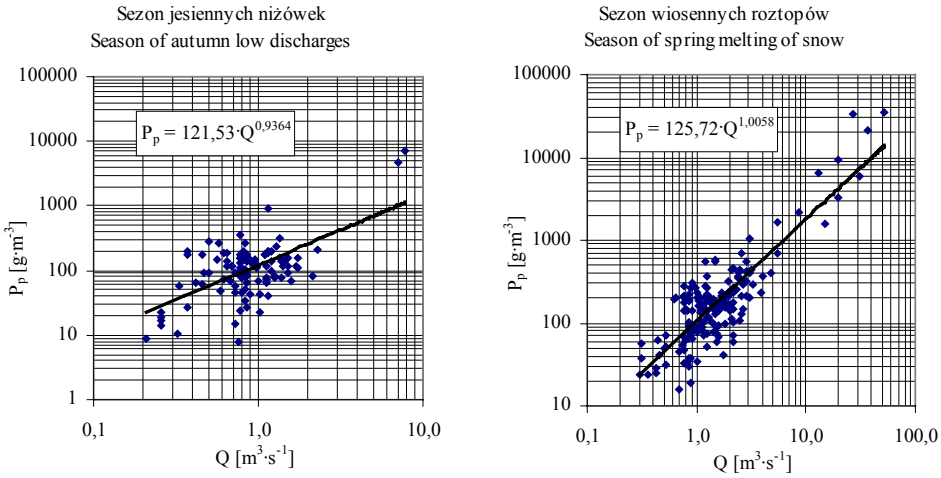
W tabeli 8 zamieszczono wyniki obliczeń ilości rumowiska unoszonego dopływającego do zbiornika w Krempnej w latach 1972–2003. Średni roczny transport rumowiska unoszonego w Wisłoce, obliczony na podstawie pomiarów batometrycznych, wynosi 8395,7 $t \cdot rok^{-1}$ [Michalec 2008b]. Ze względu na opróżnienie zbiornika w okresie zimowo-wiosennym, tj. od listopada do maja, zamieszczono również natężenie transportu rumowiska z okresu maj–listopad każdego roku eksploatacji. Wyniki obliczeń z półrocza umożliwią porównanie transportu rumowiska ze średnią roczną masą sedymentów odpływających ze zlewni, określoną na podstawie wielkości zamulenia zbiornika wodnego w Krempnej. Średnie natężenie transportu rumowiska z okresu maj–listopad w analizowanym wieloleciu wynosi 5106 $t \cdot rok^{-1}$.

Tabela 8. Transport rumowiska unoszonego w rzece Wisłoce obliczony na podstawie pomiarów batometrycznych
Table 8. Transport of suspended sediment in the Wisłoka river computed on the basis of bathometric measurements

Rok Year	Masa rumowiska unoszonego obliczona na podstawie pomiarów batometrycznych [t] Mass of suspended sediment computed on the basis of bathometric measurements [t]	
	okres styczeń–grudzień the January–December period	okres maj-listopad the May–November period
1972	4 117,1	3 267,5
1973	1 652,3	1 160,1
1974	4 522,6	4 016,6
1975	3 630,0	2 738,5
1976	4 351,9	2 529,5
1977	4 476,9	348,2
1978	6 233,2	2 402,1
1979	7 123,3	4 910,9
1980	17 896,2	15 868,2
1981	4 143,2	671,8
1982	2 119,4	541,8

Rok Year	Masa rumowiska unoszonego obliczona na podstawie pomiarów batometrycznych [t] Mass of suspended sediment computed on the basis of bathometric measurements [t]	
	okres styczeń–grudzień the January–December period	okres maj-listopad the May–November period
1983	8 820,9	3 475,1
1984	5 021,2	4 128,5
1985	11 313,2	6 340,7
1986	5 748,4	4 945,6
1987	15 378,9	3 099,7
1988	6 437,1	5 217,9
1989	40 523,9	3 556,2
1990	3 667,7	1 225,4
1991	5 166,6	4 673,9
1992	26 714,9	19 666,3
1993	3 606,1	2 799,0
1994	9 001,9	7 648,9
1995	3 923,3	9 683,5
1996	9 468,8	8 433,5
1997	6 113,0	5 157,5
1998	5 264,7	2 824,8
1999	10 075,9	9 068,3
2000	10 913,2	6 547,9
2001	14 435,0	11 548,0
2002	2 713,5	2 442,2
2003	4 089,8	2 453,9
Średnia: Mean:	8 395,7	5 106,0

Ilość rumowiska unoszonego transportowanego przez Dłubnię określono na podstawie danych hydrologicznych z posterunku wodowskazowego Zesławice, udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Krakowie. Dysponując ciągiem danych obejmujących przepływy z całego okresu eksploatacji zbiornika, uzupełniono ciąg, przypisując poszczególnym przepływom brakujące wartości koncentracji rumowiska unoszonego według metodyki przyjętej w obliczeniach transportu rumowiska w Wisłoce. Opracowane zależności funkcyjne przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska unoszonego (rys. 9) umożliwiły uzupełnienie brakujących danych, dotyczących koncentracji rumowiska, dla dni nieobjętych pomiarami.



Rysunek 9. Zależności funkcyjne przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska unoszonego w wydzielonych sezonach hydrologiczno-meteorologicznych – rzeka Dłubnia
Figure 9. Functional dependencies for mean daily flows and corresponding suspended sediment concentrations in separate hydrological and meteorological seasons – the Dłubnia river

Obliczono iloczyny przepływu średniego dobowego i koncentracji, a następnie średni dobowy transport rumowiska. W obliczeniach transportu rumowiska unoszonego uwzględniono koncentrację rumowiska w całym przekroju poprzecznym rzeki. W tym celu ustalono współczynnik korekcyjny „k", będący ilorazem średniej koncentracji rumowiska unoszonego w profilu poprzecznym rzeki i koncentracji rumowiska unoszonego w miejscu stałego poboru próby. Współczynnik „k", wynoszący 1,065, został ustalony z równania regresji z przedziałem ufności wynoszącym 95 %.

Średni roczny transport rumowiska unoszonego dopływającego do zbiornika w Zesławicach w latach 1969-1983, obliczony metodą batometryczną, wynosi 16 404,6 t·rok^{-1} (tab. 9) [Michalec 2008b].

Tabela 9. Transport rumowiska unoszonego w rzece Dłubni obliczony na podstawie pomiarów batometrycznych
Table 9. Transport of suspended sediment in the Dłubnia river computed on the basis of bathometric measurements

Rok Year	Masa rumowiska unoszonego obliczona na podstawie pomiarów batometrycznych [t] Mass of suspended sediment computed on the basis of bathometric measurements [t]
1966	15 716,0
1967	15 320,2
1968	7 439,1
1969	136 330,8
1970	9 712,7
1971	11 722,2
1972	6 374,5
1973	2 992,4
1974	7 890,9
1975	11 943,1
1976	8 153,4
1977	16 017,5
1978	5 356,3
1979	19 114,0
1980	4 303,3
1981	6 386,5
1982	7 744,5
1983	2 764,8
Średnia: Mean:	16 404,6

6.5. OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO METODĄ BIJKERA

Zastosowanie metody Bijkera [1971] wymaga dysponowania rozkładem prędkości przepływu wody w pionie i profilem koncentracji rumowiska unoszonego, z którego dla znanej względnej szorstkości dna k_s, można określić wartość koncentracji C_a. Badania dna rzek Wisłoki i Dłubni umożliwiły określenie warunków występowania odpowiednio form korytowych i form dennych, a następnie wysokości poziomu odniesienia „a" i względnej szorstkości dna k_s. W okresie lipiec–wrzesień 2005 roku wykonano badania obejmujące określenie rodzaju i wysokości form dennych i korytowych w Wisłoce i w Dłubni, składu granulometrycznego materiału mineralnego dna badanych rzek oraz pomiary koncentracji rumowiska unoszonego i prędkości przepływu wody w korycie. W trakcie tych badań przepływy w Wisłoce wynosiły 0,54–1,15 $m^{-3} \cdot s^{-1}$, a w Dłubni 0,78–1,24 $m^{-3} \cdot s^{-1}$.

Określając natężenie transportu rumowiska unoszonego według metod Bijkera i van Rijna nie uwzględnia się wpływu form korytowych lecz szorstkość dna. Na podstawie analizy sitowej składu granulometrycznego dna rzeki Wisłoki określono średnice charakterystyczne, m.in. miarodajną d_m, d_{50}, a także średnicę największego ziarna rumowiska dennego [Michalec 2008d]. Średnica d_m 0,062 m, średnica d_{50} jest równa 0,036 m, a średnica największego ziarna to 0,12 m. Wyniki badań form korytowych Wisłoki przedstawiono w pracy Michalca [2008c].

W celu określenia możliwości występowania form dennych w rzece Dłubni wykonano pomiary hydrometryczne prędkości przepływu wody. W trakcie trzech pomiarów przepływu w Dłubni tylko przy największym stwierdzono występowania typowych form dennych w przekroju badawczym. Przepływy wynosiły odpowiednio 0,78 $m^{-3}\cdot s^{-1}$ 0,93 $m^{-3}\cdot s^{-1}$ i 1,24 $m^{-3}\cdot s^{-1}$, a średnie prędkości w przekroju rzeki mieściły się w granicach 0,23–0,62 $m\cdot s^{-1}$. Obliczone na podstawie pomiarów naprężenia styczne wynosiły 7,27–9,06 $N\cdot m^{-2}$. Według wykresów Hjulsröma, Simonsa i Richardsona w tym przekroju następuje ruch ziaren, lecz jak odczytano z wykresu Simonsa i Richardsona, przy tak znacznych naprężeniach panujące warunki hydrauliczne odpowiadają górnemu obszarowi ruchu. Stwierdzono, posługując się nomogramami Roberta, Zanke i Ashleya, że istnieje możliwość tworzenia form dennych w postaci zmarszczek, co stwierdzono w trakcie badań terenowych przy przepływie wynoszącym 1,24 $m^{-3}s^{-1}$. Wysokość tych form, tworzących pseudo zmarszczki, nie przekraczała 1,0 cm. Natomiast wg nomogramu van Rijna przy tym przepływie panujące warunki hydrauliczne odpowiadające strefie przejściowej, między reżimem niskim i wysokim, powinny sprzyjać tworzeniu się wydm [Michalec 2008a].

Szorstkość względna k_s wg Nikuradse dna rzek Wisłoki i Dłubni, określona wzorami Kamphiusa (3.11), Hey'a (3.12), Mahmooda (3.13) i Gładki (3.14), wynosi odpowiednio od 202 do 469 mm i od 0,20 do 0,64 mm (tab. 10). Szorstkość względna dna rzeki Wisłoki według wzoru (4.14) wynosi 36÷360 mm, a dna rzeki Dłubni, według wzoru (4.15) w warunkach tworzenia się zmarszczek, wynosi 100 $d_{50} = 100\cdot 0{,}031 = 3{,}1$ mm.

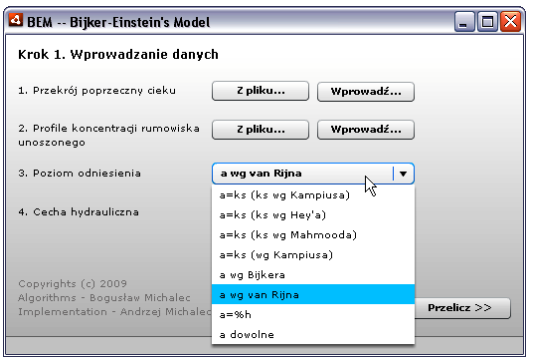
Otrzymane wyniki badań form korytowych i dennych umożliwiły ustalenie poziomu odniesienia „a" nad dnem, który według założeń Bijkera [1971] może zostać określony jako szorstkość względna k_s. Dla rzeki Wisłoki ustalono k_s = 36 mm, równą d_{50}, a dla rzeki Dłubni k_s = 3,1 mm. Szorstkości te przyjęto jako wysokość poziomu odniesienia „a" dla określenia koncentracji rumowiska unoszonego C_a w metodzie Bijkera. Koncentrację C_a określono z profili koncentracji, opracowanych na podstawie pomiarów rumowiska unoszonego na różnych wysokościach wyznaczonych pionów hydrometrycznych. Ze względu na brak pomiarów natężenia transportu rumowiska wleczonego w badanych przekrojach nie określano koncentracji C_a według wzoru (4.19), podanego przez Bijkera.

Tabela 10. Szorstkość względna k_s dna rzek Wisłoki i Dłubni wyznaczona wzorami empirycznymi
Table 10. Equivalent roughness k_s of Wisłoka and Dłubnia river-bed calculated using empirical method

Wzór wg Equation acc. to	Rzeka Wisłoka Wisłoka river		Rzeka Dłubnia Dłubnia river	
	Średnica ziarna Particle diameter [mm]	Szorstkość względna k_s [mm] Equivalent roughness k_s [mm]	Średnica ziarna Particle diameter [mm]	Szorstkość względna k_s [mm] Equivalent roughness k_s [mm]
Kamphius	d_{90}=100	250	d_{90}=0,255	0,64
Hey	d_{84}=92	322	d_{84}=0,120	0,42
Mahmood	d_{84}=92	469	d_{84}=0,120	0,61
Gładki	d_{80}=88	202	d_{80}=0,088	0,20

Jak już wspomniano na początku rozdziału pomiary hydrometryczne wykonano w Wisłoce przy przepływach wynoszących 0,39, 0,90, 3,12, i 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$. W tabeli 11 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń wykonanych w przekroju pomiarowym w Wisłoce przy przepływach 0,39 i 0,90 $m^3 \cdot s^{-1}$, a w tabeli 12 przy przepływach 0,39 i 0,90 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Jednostkowe natężenie transportu rumowiska unoszonego w pionach pomiarowych przekroju badawczego A-A Wisłoki obliczono wzorem (4.21). Wartości zmiennych I_1 i I_2 wyznaczono rozwiązując całki Einsteina J_1 (4.28) i J_2 (4.29) według algorytmu Guo i Juliena [2004] stosując wzory (4.32) i (4.33). Obliczenia wykonano za pomocą autorskiego programu komputerowego BEM (Bijker-Einstein's Model) (rys. 10), zrealizowanego w języku Java i operującego na plikach w formacie arkusza Microsoft® Excel™ [Michalec 2009]. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach 6.11 i 6.12.



Rysunek 10. Okno dialogowe programu BEM
Figure 10. BEM programs dialogue window

Liczbę Rouse Z (2.11) obliczono dla cechy hydraulicznej w_s ziarna rumowiska unoszonego wyznaczonej ze wzoru van Rijna (2.23). Umożliwi to ustalenie podobnych danych wyjściowych w obliczeniach natężenia transportu rumowiska unoszonego, zezwalających na jak najbardziej miarodajne porównanie wyników obliczeń metodą Bijkera i van Rijna. Cechę hydrauliczną ziarna w_s = 0,0045 $m \cdot s^{-1}$ określono dla d_{50} = 0,074 mm. Średnica ta została określona na podstawie analizy składu granulometrycznego rumowiska pobranego w wyniku odpompowania zawiesiny w przekroju pomiarowym A-A Wisłoki.

Otrzymanie właściwych wyników obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego metodą Bijkera dla przyjętego poziomu odniesienia a = k_s = 36 mm okazało się niemożliwe. Obliczony parametr unoszenia Z w poszczególnych pionach dla wszystkich przepływów był większy od 1 i wynosił od 1,033 do 4,808. Według Srivastasa [2006] wyniki obliczeń wartości całek Einsteina według metody podanej przez Guo i Juliena [2004] są rozbieżne dla Z > 1, generując tym samym błędy w obliczeniach. W wyniku obliczeń programem BEM otrzymano ujemne wartości natężenia transportu rumowiska unoszonego dla wszystkich analizowanych przepływów. Posługując się programem komputerowym BEM dokonano serii obliczeń w celu określenia wysokości „a" umożliwiającej uzyskanie wyników obliczeń zbliżonych do wartości natężenia transportu rumowiska określonych na podstawie pomiarów batometrycznych. Wyniki obliczeń programem BEM, zbliżone do wartości otrzymanych z obliczeń wykonanych dla pomiarów batometrycznych, uzyskano dla a = 0,06 m, stanowiącej połowę średnicy największego ziarna rumowiska, określonego z krzywej granulometrycznej. W tabeli 11 zamieszczono wyniki raportu obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego przy przepływach 3,12 i 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Natężenie transportu rumowiska unoszonego w przekroju Wisłoki przy przepływach 0,39, 0,90, 3,12, i 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$, określone metodą Bijkera, wynosi odpowiednio 11,8, 25,8, 334,2 i 1837,3 g s^{-1}. Natomiast według metody batometrycznej natężenie transportu rumowiska unoszonego dla analizowanych przepływów wynosi odpowiednio 8,7, 19,3, 245,5 i 1687,4 g s^{-1}. Wyniki obliczeń według metody Bijkera są od 9% do 36% wyższe od natężenia transportu określonego metodą batometryczną.

Dla rzeki Dłubni, podobnie jak w przykładzie obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego w Wisłoce dla k_s przyjętego zgodnie z metodyką Bijkera, uzyskano ujemne wartości natężenia transportu rumowiska w przypadku każdego z analizowanych czterech przepływów, wynoszących 0,44, 1,96, 3,63 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$. Przyczyną uzyskania takich wyników okazała się niska wartość poziomu odniesienia, którą przyjęto równą szorstkości względnej k_s = 3,1 mm zgodnie z metodyką Bijkera. Dla tej wysokości poziomu odniesienia otrzymano w każdym pionie przy różnych napełnieniach wartości A, będące ilorazem k_s i napełnienia h, mniejsze od 0,01. Według Rolanda i Zanke [2006] dla wartości A mniejszych od 0,01 uzyskuje się błędne wyniki, stosując rozwiązanie całki Einsteina zaproponowane przez Guo i Juliena [2004]. Skłoniło to autora monografii do przeprowadzenia serii obliczeń w celu określenia wysokości „a", umożliwia-

jącej uzyskanie wyników obliczeń zbliżonych do wartości natężenia transportu rumowiska określonych na podstawie pomiarów batometrycznych. Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego BEM, przyjmując cechę hydrauliczną dla ziarna d_{50} = 0,034 m, określonego na podstawie analizy składu granulometrycznego rumowiska pobranego w wyniku odpompowania zawiesiny w przekroju pomiarowym B-B Dłubni. Obliczona wzorem (2.23) prędkość opadania ziarna d_{50} wynosi w_s = 0,00095 $m \cdot s^{-1}$.

Tabela 11. Wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego według metody Bijkera dla przepływów Q=3,12 $m^3 \cdot s^{-1}$ i Q=7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$ w rzece Wisłoce
Table 11. Results of calculations of intensity of suspended sediment transportation according to Bijker method for water discharges Q=.,12 $m^3 \cdot s^{-1}$ and Q=7.56 $m^3 \cdot s^{-1}$ in Wisłoka river

Symbol Symbol	Piony pomiarowe / Measuring verticals						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Q = 3,12 $m^3 \cdot s^{-1}$							
L [m]	3,30	5,40	7,80	10,20	12,35	14,10	16,70
h [m]	0,29	0,31	0,45	0,53	0,52	0,63	0,49
ū [$m \cdot s^{-1}$]	0,430	0,433	0,470	0,545	0,544	0,538	0,516
C_a [$g \cdot m^{-3}$]	62,2	76,3	74,2	97,3	96,5	110,1	89,1
A [-]	0,207	0,194	0,133	0,113	0,115	0,095	0,122
Z [-]	0,694	0,670	0,556	0,510	0,517	0,469	0,532
J_1 [-]	3,561	3,135	1,914	1,644	1,681	1,463	1,763
J_2 [-]	-11,605	-9,788	-5,024	-4,029	-4,163	-3,355	-4,465
I_1 [-]	1,462	1,345	1,096	1,098	1,097	1,155	1,091
I_2 [-]	-4,765	-4,201	-2,877	-2,689	-2,717	-2,649	-2,763
q_s [$g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]	1,5	6,8	19,5	31,7	30,5	44,1	26,2
Q = 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$							
L [m]	3,00	5,35	7,55	10,00	12,20	13,75	15,95
h [m]	0,53	0,57	0,66	0,78	0,89	0,77	0,77
ū [$m \cdot s^{-1}$]	0,609	0,629	0,681	0,698	0,762	0,643	0,640
C_a [$g \cdot m^{-3}$]	203,2	226,2	267,3	264,5	329,1	226,7	217,2
A [-]	0,11	0,11	0,09	0,08	0,07	0,08	0,08
Z [-]	0,510	0,493	0,457	0,421	0,395	0,424	0,424
J_1 [-]	1,644	1,564	1,422	1,313	1,250	1,320	1,320
J_2 [-]	-4,029	-3,733	-3,200	-2,781	-2,526	-2,806	-2,806
I_1 [-]	1,098	1,117	1,179	1,294	1,420	1,284	1,284
I_2 [-]	-2,689	-2,665	-2,653	-2,741	-2,869	-2,730	-2,730
q_s [$g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]	66,2	80,1	113,5	137,2	200,2	116,0	111,1

Gdzie: L – odległość od brzegu lewego, h – głębokość pionu, ū – średnia prędkość przepływu w pionie, C_a – koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia „a" wg pomiarów, A – bezwymiarowa wysokość odniesienia, Z – parametr unoszenia, I_1 i I_2 – zmienne Einsteina, J_1 i J_1 – całki Einsteina, q_s – jednostkowe natężenie transportu rumowiska unoszonego

Where: L – distance from the left bank, h – vertical depth, ū – mean flow velocity in vertical, C_a – Reference level suspended sediment concentration acc. to measurements, A – dimensionless reference height, Z – suspension parameter, I_1 i I_2 – Einstein's variables, J_1 i J_1 –Einstein's integrals, q_s – unitary intensity of suspended sediment transportation

Wykonane serie obliczeń programem BEM umożliwiły obliczenie natężenia transportu rumowiska unoszonego, o wartościach zbliżonych do otrzymanych z obliczeń z metody batometrycznej, dla wysokości poziomu odniesienia „a" równego 5% napełnienia w danym pionie hydrometrycznym. Przyjęcie takiej wartości „a" jest zalecane w wielu pracach naukowych, między innymi w pracach Itakury i Kishi [1980], Akiyamy and Fukushima [1986], oraz Garcí i Parkera [1991]. W tabeli 12 zamieszczono wyniki obliczeń wykonanych dla przepływów 3,12 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Tabela 12. Wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego według metody Bijkera dla przepływów Q=3,13 $m^3 \cdot s^{-1}$ i Q=7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$ w rzece Dłubni
Table 12. Results of calculations of intensity of suspended sediment transportation according to Bijker method for water discharges Q=3.12 $m^3 \cdot s^{-1}$ and Q=7.41 $m^3 \cdot s^{-1}$ in Dłubnia river

Symbol Symbol	Piony pomiarowe / Measuring verticals						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Q = 3,12 $m^3 \cdot s^{-1}$							
L [m]	3,3	5,4	7,8	10,2	12,35	14,1	16,7
h [m]	0,29	0,31	0,45	0,53	0,52	0,63	0,49
ū [$m \cdot s^{-1}$]	0,43	0,433	0,47	0,545	0,544	0,538	0,516
C_a [$g \cdot m^{-3}$]	96,1	109,5	97,9	110,9	119,7	144,3	102,8
A [-]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Z [-]	0,607	0,547	0,313	0,244	0,252	0,188	0,275
J_1 [-]	2,195	1,800	1,114	1,036	1,044	0,995	1,068
J_2 [-]	-6,446	-4,746	-1,943	-1,600	-1,635	-1,393	-1,742
I_1 [-]	1,589	1,553	1,916	2,183	2,147	2,467	2,052
I_2 [-]	-4,667	-4,093	-3,342	-3,372	-3,364	-3,454	-3,348
q_s [$g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]	4,8	7,9	20,3	33,2	34,2	61,5	25,9
Q = 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$							
L [m]	1,1	1,9	2,7	3,5	4,35	5,15	6,25
h [m]	0,54	0,71	1,25	1,45	1,5	1,44	1,04
ū [$m \cdot s^{-1}$]	0,692	0,803	1,049	1,102	1,099	1,056	0,892
C_a [$g \cdot m^{-3}$]	190,2	201,1	288,6	276,3	213,3	202,1	142,5
A [-]	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Z [-]	0,409	0,270	0,116	0,093	0,088	0,094	0,152
J_1 [-]	1,292	1,062	0,962	0,956	0,954	0,956	0,975
J_2 [-]	-2,669	-1,719	-1,184	-1,129	-1,118	-1,131	-1,281
I_1 [-]	1,673	2,071	2,952	3,140	3,182	3,134	2,691
I_2 [-]	-3,456	-3,351	-3,635	-3,710	-3,728	-3,708	-3,534
q_s [$g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]	25,3	51,9	224,3	277,4	227,9	201,3	79,8

Gdzie: L – odległość od brzegu lewego, h – głębokość pionu, ū – średnia prędkość przepływu w pionie, C_a – koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia „a" wg pomiarów, A – bezwymiarowa wysokość odniesienia, Z – parametr unoszenia, I_1 i I_2 – zmienne Einsteina, J_1 i J_1 – całki Einsteina, q_s – jednostkowe natężenie transportu rumowiska unoszonego

Where: L – distance from the left bank, h – vertical depth, ū – mean flow velocity in vertical, C_a – Reference level suspended sediment concentration acc. to measurements, A – dimensionless reference height, Z – suspension parameter, I_1 i I_2 – Einstein's variables, J_1 i J_1 –Einstein's integrals, q_s – unitary intensity of suspended sediment transportation

Natężenie transportu rumowiska unoszonego w przekroju B-B Dłubni przy przepływach 0,44, 1,96, 3,63 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$, określone metodą Bijkera, wynosi odpowiednio 10,8, 331,0, 681,3 i 1504,7 g s^{-1}. Określone według metody batometrycznej natężenie transportu rumowiska unoszonego dla analizowanych przepływów wynosi odpowiednio 5,6, 179,6, 386,4 i 2359,7 g s^{-1}. Wyniki obliczeń transportu rumowiska według metody Bijkera przy przepływach 0,44, 1,96 i 3,63 $m^3 \cdot s^{-1}$ są niższe o 93, 84 i 76% od natężenia transportu określonego metodą batometryczną. Natężenie transportu rumowiska przy przepływie najwyższym, obliczone metody Bijkera, jest natomiast wyższe od natężenia określonego metodą batometryczną o 36%.

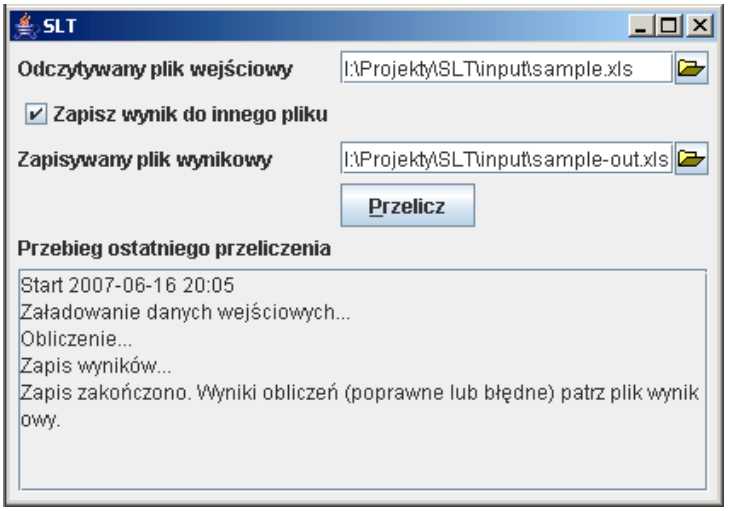
6.6. OKREŚLENIE TRANSPORTU RUMOWISKA UNOSZONEGO METODĄ VAN RIJNA

Określając transport rumowiska unoszonego metodą van Rijna (wzór 5.42), posłużono się schematem obliczeniowym podanym w Rozdziale 5.5. Wcześniej określono koncentrację rumowiska unoszonego C_a na poziomie odniesienia „a" nad dnem. Koncentrację tę określono ze wzoru van Rijna (3.23), a także, korzystając z opracowanych na podstawie pomiarów terenowych, z profili koncentracji rumowiska unoszonego. Obliczenia wykonano dla tych samych przepływów w rzekach Wisłoce i Dłubni jak w metodzie Bijkera (Rozdział 6.5).

Ze względu na żwirowe dno rzeki Wisłoki wysokość poziomu odniesienia „a" określono według van Rijna równą chropowatości względnej (k_s), z zachowaniem a_{min} równego 0,01 h. Obliczenia natężenia transportu rumowiska unoszonego w przekroju A-A Wisłoki wykonano dla kilku wariantów, w których „a" określono: jako równe szorstkości względnej k_s określonej ze wzorów Kamphiusa (3.11), Hey'a (3.12), Mahmooda (3.13), Gładki (4.14) i Bijkera (4.14) oraz równe 0,01 napełnienia w danym pionie, a także przyjmując „a" równe połowie średnicy największego ziarna rumowiska dennego. Obliczenia wykonano w autorskim programie komputerowym SLT (*Suspended Load Transport*), zrealizowanym w środowisku Java [Michalec 2007] (rys. 11).

Wykonane obliczenia transportu rumowiska z tak przyjętymi wysokościami „a" wykazały, że dla analizowanych przepływów w Wisłoce nie można uzyskać zadowalających wyników obliczeń transportu rumowiska unoszonego. Okazało się, że określone „a" jako k_s ze wzorów Kamphiusa, Hey'a, Mahmooda, Gładki i Bijkera, jest w przypadku niskich przepływów większe od napełnienia w rzece, lub też nie można zachować warunku podanego przez van Rijna, mówiącego, że a_{min} ma się równać 0,01 napełnienia w korycie cieku. Również

przyjmując minimalną wysokość poziomu odniesienia „a”, równą 0,01 wysokości napełnienia otrzymano koncentracje C_a na tym poziomie znacznie przewyższające rzeczywistą wartość tej koncentracji, określoną z pomiarów, a obliczony transport rumowiska był od 5 do 16-krotnie wyższy od określonego metodą bezpośrednią.



Rysunek 11. Okno dialogowe programu SLT
Figure 11. SLT programs dialogue window

W tabeli 13 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń transportu rumowiska unoszonego dla przepływu 0,90 $m^3 \cdot s^{-1}$ i wysokości a = 0,6 m, określonej jako połowa średnicy największego ziarna rumowiska dennego. Wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 13 otrzymano dla C_a określonego ze wzoru van Rijna (3.23), w którym w wartość współczynnika α_2 wynoszącą 2,3 zastąpiono wartością 2,1. Została ona ustalona w wyniku obliczeń wykonanych za pomocą opracowanej autorskiej aplikacji SLT (ang. *Suspended Load Transport*), tak aby uzyskać jak najwyższą zgodność wyników obliczeń koncentracji C_a i natężenia transportu rumowiska unoszonego U_s. Otrzymana w wyniku obliczeń metodą van Rijna (z α_2 = 2,1) wartość U_s = 20,2 $g \cdot s^{-1}$ dla przepływu 0,90 $m^3 \cdot s^{-1}$ jest zbliżona od wyniku obliczeń metodą batymetryczną. Natężenie transportu rumowiska według metody batometrycznej wynosi 19,3 $g \cdot s^{-1}$.

Tabela 13. Obliczenia transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna – rzeka Wisłoka, przepływ Q=0,90 $m^3 \cdot s^{-1}$

Table 13. Calculations of suspended sediment transport by van Rijn method – Wisłoka river, discharge Q=0.90 $m^3 \cdot s^{-1}$

Parametr Parameter	Symbol i jednostka Symbol and units	Piony pomiarowe Measuring verticals				
		I	II	III	IV	V
Odległość od brzegu lewego Distance from the left bank	L [m]	3,00	2,35	2,20	2,45	2,20
Głębokość w pionie Vertical depth	h [m]	0,34	0,36	0,33	0,45	0,35
Średnia prędkość przepływu w pionie Average flow velocity in vertical	$\bar{u}$ [$m \cdot s^{-1}$]	0,329	0,343	0,365	0,378	0,371
Prędkość dynamiczna Dynamic velocity	u_* [$m \cdot s^{-1}$]	0,037	0,038	0,036	0,043	0,037
Prędkość dynamiczna uzależniona od ziaren rumowiska Bed-shear velocity related to grains	u'_* [$m \cdot s^{-1}$]	0,016	0,017	0,019	0,019	0,019
Krytyczna prędkość dynamiczna określana wg Shieldsa Critical bed-shear velocity according to Shields	u_{*cr} [$m \cdot s^{-1}$]	0,117	0,121	0,117	0,135	0,119
Parametr transportu Stage transport parameter	T [-]	0,814	0,943	1,238	1,232	1,290
Średnica reprezentatywna rumowiska Representative particle diameter	D_s [mm]	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
Cecha hydrauliczna Particle fall velocity	w_s [$10^{-3} m \cdot s^{-1}$]	4,516	4,516	4,516	4,516	4,516
Współczynnik dyfuzji sedymentu Sediment diffusion coefficient	β_* [-]	1,0029	1,0027	1,0031	1,0022	1,0029
Parametr ziarnowy Particle diameter	D_* [-]	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Współczynnik korekcyjny Correction coefficient	α_2 [-]	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia „a” Reference level suspended load concentration	C_a [$g \cdot m^{-3}$]	12,7	15,8	23,8	23,6	25,3
Parametr unoszenia Suspension parameter	Z [-]	0,096	0,093	0,098	0,084	0,095
Czynnik wpływu cząsteczki na turbulencje przepływu Factor expresses the influence of the sediment particles on the turbulence structure of fluid	φ [-]	0,155	0,152	0,157	0,139	0,154
Zmodyfikowany parametr unoszenia Modified suspension parameter	Z’ [-]	0,251	0,245	0,255	0,223	0,249
Współczynnik unoszenia Suspension coefficient	F [-]	0,557	0,585	0,576	0,593	0,579
Transport rumowiska unoszonego w pionie Suspended sediment load in vertical profiles	q_s [$g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$]	1,02	1,41	2,05	2,90	2,36
Transport rumowiska unoszonego Suspended sediment transport	U_s [$g \cdot s^{-1}$]	20,2				

Otrzymane wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego $U_{s\,III}$ (tab. 14), wykonanych za pomocą programu SLT, przy przepływach 0,39, 0,90, 3,12, i 7,56 $m^3 \cdot s^{-1}$ porównano z wynikami uzyskanymi z metody batometrycznej ($U_{s\,m}$), przyjętej jako miarodajnej w ocenie rezultatów obliczeń. Wartości $U_{s\,III}$ obliczono dla koncentracji C_a wyznaczonej według wzoru van Rijna (3.23), w którym współczynnik α_2 przyjęto równy 2,1. W tabeli 14 zamieszczono również natężenie transportu rumowiska unoszonego $U_{s\,I}$, obliczone dla koncentracji C_a, wyznaczonej z profili koncentracji, a także zamieszczono wartości natężenia $U_{s\,II}$, obliczone dla koncentracji C_a wyznaczonej według wzoru van Rijna (3.23), ze współczynnikiem α_2 ustalonym przez van Rijna i wynoszącym 2,3. Określony za pomocą programu SLT współczynnik $\alpha_2 = 2,1$ umożliwił uzyskanie wartości $U_{s\,III}$ najbliższych wynikom obliczeń natężenia transportu rumowiska ($U_{s\,m}$), określonego na podstawie pomiarów terenowych. Porównując wyniki obliczeń (tab. 14) wyraźnie wyższe wartości unoszenia sekundowego otrzymano dla niskich przepływów ($Q = 0,39\ m^3 \cdot s^{-1}$ i $Q = 0,9\ m^3 \cdot s^{-1}$) , na co wskazują obliczone wskaźniki $U_{s\,I}/U_{s\,m}$, $U_{s\,II}/U_{s\,m}$ i $U_{s\,III}/U_{s\,m}$, charakteryzujące się wartościami większymi od 1,0. Dla przepływów wyższych od około 2,0 $m^3 \cdot s^{-1}$ obliczone unoszenie sekundowe U_s jest niższe od obliczonego metodą batometryczną. Odmienną tendencję wykazał Mokwa [2002]. Obliczona w przekroju wodowskazowym Ścinawa na rzece Odrze intensywność unoszenia sekundowego rumowiska była ponad czterokrotnie wyższa od najniższej obliczonej z pomiarów i wynoszącej 13,5 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$. Dla wyższych wartości jednostkowego unoszenia sekundowego Mokwa uzyskał mniejszą różnicę wyników. Dla obliczonej na podstawie pomiarów intensywności wynoszącej 255 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ wyniki obliczeń metodą van Rijna były 1,34-krotnie wyższe.

Obliczenia natężenia transportu rumowiska unoszonego w Dłubni wykonano dla przepływów 0,44, 1,96, 3,63 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$. Jak stwierdzono w wyniku badań form dennych, wykonanych przy przepływach 0,78–1,24 $m^{-3} \cdot s^{-1}$, możliwość powstania zmarszczek w dnie jest możliwa przy przepływach wynoszących powyżej 1,24 $m^{-3} \cdot s^{-1}$. Wysokość form dennych nie przekraczała 1 cm i dla przepływów 0,44 i 1,96, $m^3 \cdot s^{-1}$ nie była niższa od 0,01 napełnienia w poszczególnych pionach pomiarowych. Natomiast przy przepływach, 3,63 i 7,41 $m^3 \cdot s^{-1}$ wysokość form dennych była niższa od 0,01 napełnienia w przekroju, uniemożliwiając tym samym przyjęcia poziomu odniesienia równego jej wysokości, zgodnie z założeniami van Rijna [1984b]. Z tego względu przyjęto jako poziom odniesienia „a" wysokość równą 0,01 napełnienia w każdym z pionów pomiarowych. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na trudność właściwego określenia poziomu odniesienia „a" dla zróżnicowanych przepływów w przypadku nie występowania form dennych. Według metodyki podanej przez van Rijna, w przypadku braku form dennych, wysokość „a" przyjmuje się równą szorstkości bezwzględnej k_s wg Nikuradse. Określone k_s za pomocą wzorów Kamphiusa, Hey'a, Mahmooda i Gładki (tab. 10) wynoszą od

0,202 mm do 0,638 mm. Gdy napełnienia w wyznaczonych pionach w przekroju badawczym Dłubni wynosiły od 0,14 do 0,42 m (przepływ 0,44 $m^3 \cdot s^{-1}$), to minimalna wysokość odniesienia „a_{min}" równa 1% napełnienia były odpowiednio równe 0,17 i 0,44 mm. Zatem określone k_s można przyjąć jako poziom odniesienia „a". Natomiast już przy przepływie wynoszącym 1,96 $m^3 \cdot s^{-1}$ napełnienia w pionach wynosiły 0,31÷0,74 m, „a_{min}" wynosiło odpowiednio 0,31÷0,74 mm. Dla tego przepływu i wyższych, charakteryzujących się napełnieniami większymi od 0,64 m, nie można określać k_s jako poziomu odniesienia, gdyż wtedy nie zachowa się warunku a_{min}= 0,01 napełnienia.

Tabela 14. Porównanie wyników obliczeń transportu rumowiska unoszonego w rzece Wisłoce metodą van Rijna i metodą batometryczną
Table 14. Comparison of calculated results of suspended load in Wisłoka river by van Rijn method and bathometric method

Opis Description		Symbol i jednostka Symbol and units	Przepływ Q [$m^3 \cdot s^{-1}$] Discharge Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]			
			0,39	0,90	3,12	7,56
Transport rumowiska unoszonego Suspended sediment transportation	C_a wg pomiarów, a = 0,6 m C_a acc. to measurements, a = 0.6 m	$U_{s\,I}$ [$g \cdot s^{-1}$]	12,4	28,6	212,9	1458,9
	C_a wg wzoru (3.23) i α_2 = 2,3 [-], a = 0,6 m C_a acc. to equation (3.23) and α_2 = 2.3 [-], a = 0.6 m	$U_{s\,II}$ [$g \cdot s^{-1}$]	9,5	20,8	212,9	1439,1
	C_a wg wzoru (3.23) i α_2 = 2,1 [-],a = 0,6 m C_a acc. to equation (3.23) and α_2 = 2.1 [-], a = 0.6 m	$U_{s\,III}$ [$g \cdot s^{-1}$]	9,2	20,2	236,8	1601,1
	metoda batometryczna bathometric method	$U_{s\,m}$ [$g \cdot s^{-1}$]	8,7	19,3	246,0	1687,0
$U_{s\,I}/U_{s\,m}$		[-]	1,41	1,48	0,87	0,86
$U_{s\,II}/U_{s\,m}$		[-]	1,09	1,08	0,87	0,85
$U_{s\,III}/U_{s\,m}$		[-]	1,05	1,04	0,96	0,95

Przeprowadzone obliczenia za pomocą programu SLT wykazały, że uzyskanie wyników obliczeń metodą van Rijna (współczynnik korekcyjny α_2 = 2,3) zbliżonych do wyników obliczeń na podstawie pomiarów batometrycznych, można uzyskać dla przyjętego poziomu odniesienia „a" równego 5% napełnienia w badanym pionie. Pomimo tego, że tak określona wysokość „a" jest większa od maksymalnie największej wysokości poziomu odniesienia, równej szorstkości bezwzględnej k_s, została ona przyjęta do dalszych obliczeń. Jak już wyżej wspomniano, wielu badaczy skłania się do przyjęcia wysokości „a". Wykonane

serie obliczeń zezwoliły ostatecznie na obliczenie natężenia transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna, z zachowaniem poprawnego przyjęcia poziomu „a”, porównywalnego z natężeniem transportu określonym na podstawie pomiarów batometrycznych. Obliczone unoszenie sekundowe U_s dla „a” wynoszącego 0,01 napełnienia w poszczególnych pionach pomiarowych wymagało ustalenia współczynnika korekcyjnego α_2, umożliwiającego obliczenie koncentracji C_a według wzoru van Rijna (3.23), która z kolei powinna być równa koncentracji C_a określonej z profili koncentracji. Ustalony współczynnik α_2 wynosi 9,9. Wyniki przykładowych obliczeń natężenia transportu rumowiska przy przepływie 1,96 $m^3 \cdot s^{-1}$ zamieszczono w tabeli 15.

Tabela 15. Obliczenia transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna – rzeka Dłubnia, przepływ Q=1,96 $m^3 \cdot s^{-1}$

Table 15. Calculations of suspended sediment transport by van Rijn method – Dłubnia river, discharge Q=1.96 $m^3 \cdot s^{-1}$

Parametr *Parameter*	Symbol i jednostka Symbol and units	Piony pomiarowe Measuring verticals						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Odległość od brzegu lewego Distance from the left bank	L [m]	7,55	8,10	8,90	9,30	10,10	10,50	11,30
Głębokość w pionie Vertical depth	h [m]	0,42	0,52	0,72	0,74	0,74	0,71	0,31
Średnia prędkość przepływu w pionie Average flow velocity in vertical	$\bar{u}$ [$m \cdot s^{-1}$]	0,579	0,651	0,751	0,763	0,779	0,756	0,524
Średnica ziarna rumowiska unoszonego Suspended particles diameter	D_{50} [mm]	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Poziom odniesienia Reference level	a [m]	0,004	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,003
Prędkość dynamiczna Dynamic velocity	u_* [$m \cdot s^{-1}$]	0,076	0,085	0,099	0,101	0,101	0,099	0,065
Prędkość dynamiczna uzależniona od ziaren rumowiska Bed-shear velocity related to grains	u'_* [$m \cdot s^{-1}$]	0,027	0,029	0,033	0,034	0,034	0,033	0,025
Krytyczna prędkość dynamiczna określana wg Shieldsa Critical bed-shear velocity according to Shields	u_{*cr} [$m \cdot s^{-1}$]	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Parametr transportu Stage transport parameter	T [-]	3,673	4,613	5,952	6,131	6,420	5,879	3,096
Średnica reprezentatywna rumowiska Representative particle diameter	D_s [mm]	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208

Cecha hydrauliczna Particle fall velocity	w_s [10^{-4}m·s^{-1}]	9,533	9,533	9,533	9,533	9,533	9,533	9,533
Współczynnik dyfuzji sedymentu Sediment diffusion coefficient	β_* [-]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Parametr ziarnowy Particle diameter	D_* [-]	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Współczynnik korekcyjny Correction coefficient	α_2 [-]	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
Koncentracja rumowiska na poziomie odniesienia „a” Reference level suspended load concentration	C_a [g·m^{-1}]	213,8	243,1	257,3	261,8	280,5	256,2	224,3
Parametr unoszenia Suspension parameter	Z [-]	0,030	0,027	0,023	0,023	0,023	0,024	0,035
Czynnik wpływu cząsteczki na turbulencje przepływu Factor expresses the influence of the sediment particles on the turbulence structure of fluid	φ [-]	0,061	0,057	0,050	0,050	0,050	0,051	0,069
Zmodyfikowany parametr unoszenia Modified suspension parameter	Z’ [-]	0,091	0,084	0,073	0,073	0,073	0,075	0,104
Współczynnik unoszenia Suspension coefficient	F [-]	0,588	0,605	0,629	0,631	0,631	0,628	0,562
Transport rumowiska unoszonego w pionie Suspended sediment load in vertical profiles	q_s [g·m^{-1}·s^{-1}]	30,19	49,43	87,6	93,37	102,05	85,26	19,94
Transport rumowiska unoszonego Suspended sediment transport	U_s [g·s^{-1}]	282,1						

Porównując natężenie transportu rumowiska unoszonego ($U_{s\,I}$, $U_{s\,II}$, $U_{s\,III}$, $U_{s\,IV}$,), obliczone wzorem van Rijna (4.42) z wynikami obliczeń otrzymanymi z metody batometrycznej ($U_{s\,m}$) stwierdzono, że najmniejszą różnicę wyników otrzymano, wyznaczając wysokość odniesienia „a” równą 0,05 głębokości napełnienia w pionie hydrometrycznym (tab. 16). Tak ustalona wysokość „a” jest niezgodna z założeniami podanymi przez van Rijna. Dlatego, podobnie jak dla przekroju A-A w Wisłoce, ustalono wartość współczynnika korekcyjnego α_2, tak aby uzyskać wartości koncentracji C_a obliczanej worem (3.23) najbliższe wartościom określonym z profili koncentracji. Dla wysokości „a” równej 0,01 głębokości napełnienia w pionie hydrometrycznym i dla ustalonego α_2 = 9,9 wskaźnik $U_{s\,III}$ /$U_{s\,m}$ wynosi do 0,80 do 1,03 (tab. 16). Oznacza to, że stosując ustalony współczynnik korekcyjny dla przekroju badawczego B-B Dłubni większe różnice wyników obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna otrzyma się dla przepływów niskich.

Tabela 16. Porównanie wyników obliczeń transportu rumowiska unoszonego w rzece Dłubni metodą van Rijna i metodą batometryczną
Table 16. Comparison of calculated results of suspended load in Dłubnia river by van Rijn method and bathometric method

Opis Description			Symbol i jednostka Symbol and units	Przepływ Q [$m^3 \cdot s^{-1}$] Discharge Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]			
				0,44	1,96	3,64	7,4
Transport rumowiska unoszonego Suspended sediment transportation	a = 0,01h	C_a wg pomiarów C_a acc. to measurements	$U_{s\,I}$ [$g \cdot s^{-1}$]	7,2	258,0	891,2	1214,7
		C_a wg wzoru (3.23) i α_2 = 2,3 [-] C_a acc. to equation (3.23) and α_2 = 2,3 [-]	$U_{s\,II}$ [$g \cdot s^{-1}$]	35,2	1153,8	4247,2	6359,5
		C_a wg wzoru (3.23) i α_2 = 9,9 [-] C_a acc. to equation (3.23) and α_2 = 9.9 [-]	$U_{s\,III}$ [$g \cdot s^{-1}$]	8,7	282,1	1021,9	1543,1
	a=0,05h	C_a wg wzoru (3.23) i α_2=2,3 [-] C_a acc. to equation (3.23) and α_2 = 2.3 [-]	$U_{s\,IV}$ [$g \cdot s^{-1}$]	10,2	311,7	1044,7	1562,6
		metoda batometryczna bathometric method	$U_{s\,m}$ [$g \cdot s^{-1}$]	10,8	331,0	1088,2	1503,7
$G_{s\,I}/G_{s\,m}$			[-]	0,66	0,78	0,82	0,81
$G_{s\,II}/G_{s\,m}$			[-]	3,25	3,49	3,90	4,23
$G_{s\,III}/G_{s\,m}$			[-]	0,80	0,85	0,94	1,03
$G_{s\,IV}/G_{s\,m}$			[-]	0,94	0,94	0,96	1,04

Otrzymano również zadowalające wyniki obliczeń transportu rumowiska unoszonego w Dłubni wzorem (3.23) van Rijna, w którym koncentracja C_a została określona z pomiarów, na podstawie których sporządzono profile koncentracji. Wskaźnik $U_{s\,I}/U_{s\,m}$ wynosi od 0,66 do 1,81, natomiast wskaźnik ten dla Wisłoki mieści się w przedziale 0,86÷1,48. Zróżnicowanie wyników dla tych dwóch rzek może wynikać z odmiennych warunków hydrodynamicznych panujących w badanych rzekach, jak również w odmienności warunków, dla których metoda van Rijna została opracowana. Przykładem są profile koncentracji, które stanowiły podstawę opracowania przez van Rijna równania służącego określeniu koncentracji na poziomie odniesienia „a" na dnem. Zróżnicowanie koncentracji w pionach badanych przez van Rijna było znacznie większe niż w przypadku rzek Wisłoki i Dłubni. Koncentracja powierzchniowa na profilach koncentracji rzek Enoree i Barton-Lin wynosi ok. 10÷30 ppm, natomiast na głębokości względnej 0,05 wynosi ok. 400÷1000 ppm, czyli jest 30÷40-krotnie większe.

W rzece Dłubni koncentracja na głębokości względnej 0,05 jest 1,6÷2,2-krotnie większa do koncentracji powierzchniowej, a w rzece Wisłoce 1,7÷5,3-krotnie większa. Stąd też bezpośrednie przeniesienie metody van Rijna nie gwarantuje uzyskania poprawnych wyników, świadczą o tym wskaźniki $U_{s\ II}/U_{s\ m}$ określone dla przekroju A-A rzeki Wisłoki (tab. 17) i wskaźniki $U_{s\ II}/U_{s\ m}$ określone dla przekroju B-B rzeki Dłubni. Ustalone współczynniki korekcyjne α_2 dla badanych przekrojów rzek Wisłoki i Dłubni, wynoszące odpowiednio 2,1 i 9,9, zezwalają na otrzymanie właściwych wyników obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego. Wprowadzają do wzoru (3.24), podanego przez van Rijna, ustalone współczynniki korekcyjne α_2 koncentrację rumowiska unoszonego na poziomie odniesienia „a" na dnie w rzece Wisłoce można określić ze wzoru:

$$C_a = 0{,}0181 \cdot \frac{D_{50}}{0{,}06} \cdot \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \tag{6.1}$$

a w rzece Dłubni:

$$C_a = 0{,}00354 \cdot \frac{D_{50}}{a} \cdot \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \tag{6.2}$$

7. PODSUMOWANIE

Wybór właściwej metody określenia natężenia transportu rumowiska unoszonego uzależniony jest przede wszystkim od rodzaju danych wejściowych, jakimi się dysponuje i celu ustalenia ilości rumowiska przepływającego przez rozpatrywany przekrój. Najłatwiejszymi w zastosowaniu i nie wymagającym dysponowania danymi hydrologicznymi są historyczne metody Reniger-Dębskiego i Brańskiego. Określona tymi metodami średnia roczna denudacja odpływowa ze zlewni cząstkowych Wisłoki i Dłubni różni się znacząco. Określona metodą Reniger-Dębskiego ilość rumowiska odpływającego przez badany przekrój Wisłoki jest ponad 2,2-krotnie większa od określonej metodą Brańskiego. Natomiast dla rzeki Dłubni uzyskano wyższe o ponad 33% wyniki z metody Brańskiego w porównaniu do wyników otrzymanych metodą Reniger-Dębskiego (tab. 17). Metody te mogą służyć szacunkowemu określeniu ilości rumowiska odpływającego ze zlewni. Bardziej miarodajne wyniki można otrzymać, posługując się metodami opracowanymi na bazie uniwersalnego równania strat glebowych. Wymagają one jednak bardzo dokładnej i wnikliwej analizy danych wejściowych wprowadzanych do obliczeń poszczególnych współczynników równania USLE, gdyż niedokładność czy też niepoprawność oceny nawet jednego z nich dyskwalifikuje uzyskany wynik obliczeń. Przykładowo nieprawidłowe określenie rodzaju upraw, ich procentowego udziału w powierzchni użytkowanej rolniczo, czy też nieuwzględnienie płodozmianów, powoduje rozrzut wartości współczynnika C od wartości 0,003 do niemal stukrotnie większej. Średnia roczna masa rumowiska odpływającego z badanych zlewni cząstkowych, określona metodami DR-USLE i MUSLE, jest kilkakrotnie niższa od wartości uzyskanych za pomocą metod Reniger-Dębskiego i Brańskiego (tab. 17).

Posiadając wyniki pomiarów wielkości zamulenia zbiorników wodnych, można określić ilość rumowiska odpływającego ze zlewni za pomocą metody Churchilla. Jest to metoda prosta w zastosowaniu, w której zasadniczą trudność stanowi właściwe określenie zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska (β). W przypadku analizowanych małych zbiorników wodnych Krempna i Zesławice, znajdujących się poniżej przekrojów badawczych Wisłoki i Dłubni stwierdzona została możliwość poprawnego określenia β ze wzoru lub nomogramu Churchilla [Michalec 2008d]. Jak wykazano w pracy Michalca [2008d], zdolność zbiornika Krempna do zatrzymywania rumowiska, określona według Churchilla, różniła się kilkanaście procent do wartości rzeczywistej. Większe różnice otrzymano dla zbiornika Zesławice. Dlatego też uzyskano większe zróżnicowanie w poszczególnych latach wartości rocznej masy sedymentów odpływających ze zlewni tego zbiornika. Średnie roczne wartości natężenia transportu

rumowiska unoszonego, obliczone metodą Churchilla, okazały się najniższą spośród uzyskanych z obliczeń wybranymi metodami (tab. 17). Uzyskanie właściwego wyniku za pomocą tej metody zależy od poprawnego określenia zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska.

Tabela 17. Zestawie wyników obliczeń transportu rumowiska unoszonego
Table 17. Comparison of calculation results of suspended sediment transport

Rzeka River	Średnia roczna masa rumowiska [t·rok^{-1}] Mean annual mass of sediment [t·year^{-1}]					
	metoda Reniger-Dębskiego Reniger-Dębski's method	metoda Brańskiego Brański's method	metoda DR-USLE DR-USLE method	metoda MUSLE MUSLE method	metoda Churchilla Churchill's method	metoda batometycza bathometric's method
Wisłoka	37 334	16 530	8 234	5862	4934	8 396
Dłubnia	32 748	43 620	17 022	8720	9341	16 405

Najdokładniej natężenie transportu rumowiska unoszonego można określić w wyniku bezpośrednich pomiarów [Łajczak 1989]. Wskazane przy tym jest prowadzenie tzw. zagęszczonych pomiarów koncentracji rumowiska. Pomiary te wykonuje się zwykle raz na dobę, lub rzadziej. Taki sposób pomiarów natężenia transportu rumowiska umożliwia zastosowanie sposobu obliczeń metodą normalną lub uproszczoną [Opracowanie wyników 1982]. Wielu badaczy potwierdza, że uzyskane metodą normalną i uproszczoną wyniki obliczeń są znacznie zaniżone w stosunku do uzyskanych na podstawie zagęszczonych pomiarów zmącenia [Łajczak 1989; Froehlich 1975; Gładki, Madeyski 1975]. Ze względów finansowych prowadzenie pomiarów dobowych koncentracji rumowiska unoszonego jest, w przypadku wielu cieków, niemożliwe do zrealizowania, tym bardziej prowadzenie ciągłych zagęszczonych pomiarów zmącenia jest trudne do zrealizowania. Posługując się metodą normalną, bazującą na wynikach pomiarów dobowych, ważne jest uwzględnienie czynników hydrologiczno-meteorologicznych charakteryzujących genezę procesów erozji ze względu na rodzaj czynnika wywołującego zjawisko, odmienność przebiegu warunków związanych z dostawą produktów erozji do cieku, jak i charakterem ich transportu w rzece w powiązaniu z przebiegiem zjawisk hydrologicznych. Ujęcie tych czynników umożliwia wydzielenie sezonów hydrologiczno-meteorologicznych, dla których ustala się związek pomiędzy transportem rumowiska unoszonego a przepływem. Związek ten umożliwia uzupełnienie ciągów brakujących danych, z uwzględnieniem charakteru sytuacji hydrologicznej panującej w rzece. Ważne jest również uwzględnienie koncentracji rumowiska unoszonego w całym przekroju poprzecznym rzeki.

Określenie natężenia transportu rumowiska unoszonego na podstawie równań empirycznych, zawierających funkcje opisujące koncentracje C_a tego rumowiska na poziomie odniesienia „a" nad dnem, wiąże się z koniecznością właściwego, indywidualnego określenia wysokości „a" dla danego przekroju obliczeniowego. Przyjęty poziom odniesienia w metodzie Bijkera, zgodnie z procedurą obliczeniową, okazał się zbyt niski, a wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego w Wisłoce i w Dłubni dla a = k_s otrzymano nieprawidłowe. Stosując metodą Bijkera, uzyskano wyniki zbliżone do wyników obliczeń metodą batometryczną dla wysokości „a" większych od k_s. W rzece Wisłoce, dla a = 0,06 m stanowiącego połowę średnicy największego ziarna rumowiska dennego, natężenie transportu rumowiska unoszonego było wyższe od 9% do 36% od natężenia transportu określonego metodą batometryczną. W rzece Dłubni ustalono, że dla poziomu odniesienia a" równego 5% napełnienia w danym pionie hydrometrycznym możliwe jest uzyskanie wartości wyników obliczeń metodą Bijkera zbliżonych do wartości określonych na podstawie pomiarów batometrycznych. Wyższą zgodność uzyskano dla największego przepływu.

Trudności obliczenia natężenia transportu rumowiska unoszonego metodą van Rijna wynikały również z powodu trudności we właściwym określeniu poziomu odniesienia „a" nad dnem. Ze względu na żwirowe dno Wisłoki wysokość poziomu odniesienia „a" określono według van Rijna równą chropowatości względnej (k_s), z zachowaniem a_{min} równego 0,01 h, gdzie h jest napełnieniem. Wtedy dla przepływów niskich, przyjmując a = k_s chropowatość względna była wyższa od napełnień w pionach, natomiast dla a = 0,01 h otrzymano koncentracje C_a przewyższające wartość rzeczywiste, określone z pomiarów, a obliczony transport rumowiska był od 5 do 16-krotnie wyższy od określonego metodą normalną. Ustalono, że w przekroju badawczym Wisłoki, dla poziomu a = 0,06 m i dla skorygowanej wartości współczynnika korekcyjnego α_2 (wzór 3.23), wynoszącego 2,1, można uzyskać wyniki obliczeń metodą van Rijna różniące się o ±5% od wartości uzyskanych z metody batometrycznej.

Dno rzeki Dłubni zbudowane jest z dobnofrakcyjnego materiału mineralnego. Przyjęcie zgodnie z metodyką van Rijna wysokości „a" w Dłubni, równej szorstkości bezwzględnej k_s wg Nikuradse, stwarzało znaczną trudność. Przy wyższych napełnieniach, dla przyjętego poziomu odniesienia a = k_s nie można było zachować warunku a = 0,01 h. Przyjmując wysokość a = 0,05 h uzyskano natężenie transportu rumowiska unoszonego, obliczone metodą van Rijna, różniące się o ±6% od wartości uzyskanych z metody batometrycznej. W próbie obliczenia natężenie transportu dla a = 0,01 h należało dokonać korekty współczynnika α_2. Dla α_2=9,9 uzyskano wyniki obliczeń metodą van Rijna, różniące się do 20% w stosunku do wyników obliczeń metodą batometryczną.

Podsumowując, można stwierdzić, że metody historyczne, takie jak Reniger-Dębskiego, Brańskiego, traktujące globalnie natężenie procesów erozyjnych

i transportu rumowiska w makroregionach Polski, mogą stanowić jedynie metodę szacunkową w obliczeniach ilości transportowanego rumowiska. Za pomocą metody DR-USLE możliwe jest uzyskanie poprawnych wyników obliczeń, tj. odpowiadających rzeczywistej ilości transportowanego rumowiska. Jej zaletą jest możliwość zastosowania w przypadku braku danych hydrologicznych. Należy pamiętać, że metody Reniger-Dębskiego, Brańskiego i DR-USLE umożliwiają określenie średniej rocznej masy rumowiska przepływającej przez badany przekrój cieku. Uwzględnienie dynamiki przepływu rumowiska umożliwia metoda MUSLE. Wymaga ona jednak dysponowania hydrogramami fal wezbraniowych i może mieć zastosowanie w przypadku braku danych batometrycznych.

Zastosowanie metody Churchilla ogranicza się do cieków, na których znajdują się zbiorniki wodne. Uzyskanie miarodajnego wyniku za pomocą tej metody wymaga określenia zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska (β). Właściwe określenie średniej rocznej ilości rumowiska odpływającego ze zlewni zależy od dokładności określenia β i od długości okresu eksploatacji zbiornika, po upływie którego dokonano pomiaru objętości odkładów rumowiska.

Określenie natężenie transportu rumowiska unoszonego za pomocą metod Bijkera i van Rijna wymaga indywidualnego dla danego cieku doboru wysokości poziomu odniesienia „a" nad dnem. Obliczona koncentracja C_a w badanych rzekach Wisłoce i Dłubni, na poziomie którego wysokość zostanie określona według zaleceń podanych przez autorów metod obliczeniowych, różniła się znacząco od określonej z profili koncentracji, opracowanych na podstawie pomiarów terenowych. Tym samym uzyskano błędne wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska unoszonego. Zastosowanie tych metod dla innych cieków może wiązać się z koniecznością wcześniejszej weryfikacji wyników obliczeń wykonanych na podstawie pomiarów batometrycznych i wprowadzeniem korekt, w postaci doboru wysokości „a", lub w przypadku metody van Rijna korekty współczynnika α_2.

8. BIBLIOGRAFIA

Ackers P, White W R. *Sediment transport: New approach and analysis.* J. of Hyd. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., No 99, 1973, s. 2041–2060.

Ahrens J. P. *The fall velocity equation.* Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering. Vol. 126(2), 2000, s. 99–102.

Akiyama J., Fukushima Y. *Entrainment of noncohesive sediment into suspension. Proc., 3rd Int. Symp. on River Sedimentation*, Univ. of Mississippi, 1986, s. 804–813.

Ariathurai, R., Kron, R.B. *Finite element model for cohesive sediment transport.* Jour. of Hydr. Div., ASCE, HY3, 1976, 323–338.

Asokan, K. *Runoff and sediment yield from Bino subwatershed of Ramganga catchment.* M-Tech. Thesis, G.B.Pant Univ. of Agr. And Tech., Pantnagar, India, 1981, s. 38–49.

Aspelund A., Madsen S. *Baker river project.* Hydrology and Geomorphology of Baker and middle Skaigt River. Part 2. *Sediment transport and channel response.* Final draft report, R2 Resource Consultants, Washington 2004.

Bagnold, R.A. *The physics of blown sand and desert dunes.* Methuen, London 1954, 265.

Banasik K. *Model sedymentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej.* Wydawnictwo SGGW, Rozprawy Naukowe i Monografie, Warszawa 1994, 120.

Banasik K., Madeyski M. *Próba wykorzystania zmodyfikowanego równania strat glebowych do oceny ilości rumowiska unoszonego w falach wezbraniowych małych zlewni karpackich.* Roczniki Nauk Rolniczych, z. 3/4, seria F, tom 82, Kraków 1990.

Banasik K., Górski D. *Wykorzystanie uniwersalnego równania strat glebowych USLE do oceny ilości rumowiska unoszonego odpływającego z małych zlewni.* Gospodarka Wodna, nr 3,1992, s. 62–66.

Banasik K., Hejduk L. *Badania granulometrii rumowiska unoszonego w małej rzece nizinnej.* Acta Agrophysica, nr 5(2), 2005, s. 253–262.

Banasik, K., Walling, D.E. *Predicting sediment graphs for a small agricultural catchment.* Nordic hydrology, 27(4), 1996, s. 275–294.

Bartnik W. *Charakterystyka hydromorfologiczna rzek i potoków górskich.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Polska Akademia Nauk, Seria Monografie, nr 4, 2006, s. 131–142.

Batuca G. D., Jordaan M. J. Jr. *Silting and desilting of reservoirs.* A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands, 2000, s. 353.

Bednarczyk T. *Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach.* Zeszyty Naukowe AR w Krakowie nr 229, Inżynieria Środowiska z. 15, 1994.

Bednarczyk T., Madeyski M., Michalec B. *Ocena przydatności metody DR-USLE do określenia transportu rumowiska unoszonego.* Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 385, ser. Konferencje XI, 2000, s. 173–181.

Bijker, E.W. *Longshore transport computation.* Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 97(4), 1971, s. 687–701.

Bodulski J., Górski J. *Evaluation and prediction of silting in reservoir Cedzyna on the Lubrzanka River.* Journal of Water and Land Development. Vol. 10, No 10, 2006, s.133–149.

Bogárdi J. *Sediment transport in alluvial streams.* Akadémiai Kiadó, Budapest 1974, 826.

Bolesta W. *Zamulanie zbiorników wodnych i sposoby przeciwdziałania.* Gospodarka Wodna. Rok XXVI, z. 7, 1966, s. 262–269.

Brański J. *Instrukcja oznaczania unosin metodą wagową bezpośrednią przy użyciu sączków.* Materiały PIHM do użytku wewnętrznego 1966.

Brański J. *Zmącenie wody i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich.* Prace PIHM, z. 95, Warszawa 1968, s. 49–66.

Brański J. Ocena *denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów rumowiska unoszonego.* Prace PIHM nr 6, Warszawa 1975, 57.

Brański J., Skibiński J. *Transport rumowiska rzecznego w przełomowym odcinku Wisły środkowej.* Materiały Sympozjum SITG w Kazimierzu Dolnym, 1965.

Bruk S. T. *Teorijska razmatranja u oblasti mehanika kretanja recnih nanosa.* Seminar Erozija, Bujicni Tokovi i Rečni Nanos, Belgrad 1970, s. 239–252.

Burban P.Y., Xu, Y., Mcneil J., Lick W. *Settling speeds of flocs in fresh and sea waters.* Journal of Geophysics Research, Vol. 95(C10), 1990, s. 18213–18220.

Chang, *Fluvial processes in river engineering.* John Wiley and Sons, New York 1988.

Chang H. K., Liou J. C. *Discussion of a fall velocity equation.* Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering. Vol. 127(4), 2001, s. 250–251.

Cheng N.S. *Simplified settling velocity formula for sediment particle.* Journal of Hydraulic Engineering, 123(2), 1997, s. 149–152.

Churchill, M. A. *Analysis and use of reservoir sedimentation data with discussion by L. C. Gottschalk.* Porc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, Colorado, 1948, s. 139–140.

Cunge, J.A., Holly F.M., Verwey A. *Practical aspects of computational river hydraulics.* Pitman Publ. Ltd., London, 1980, 420.

Das, G. 1982. *Runoff and sediment yield from upper Ramganga catchment.* Ph.D. thesis, G.B.Pant Univ. of Agr. And Tech., Pantnagar, India 1982, 121.

Dąbkowski L, Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych.* PWRiL, Warszawa 1982.

Dębski K. *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski.* Prace i Studia KGW PAN, II, cz. I, Warszawa 1969.

Dojlido J. *Chemia wody.* Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1987.

Dynowska I. *Stosunki hydrograficzne oraz zagadnienia ochrony wód zachodniej części Wyżyny Miechowskiej.* Ochrona Przyrody, r. 29, Kraków 1963.

Engelund F., Fredsoe J. *A sediment transport model for alluvial channels.* Nordic Hydrol. Lingby, Denmark, No. 7, 1976, s. 293–300.

Einstein, H.A. *The bed load function for sediment transport in open channel flows.* Technical Bulletin 1026, USDA, 1950, 71.

Foster, G.R. *Modeling the erosion process.* Hydrologic Modeling of small watersheds. Transaction of the ASAE, 1982, s. 295–380.

Fredsoe, J., Andersen, K. H., Sumer, B. M. *Wave plus current over a ripple-covered bed. Coastal Eng.*, 38, 1999, s. 177–221.

Froehlich W. *Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej.* Prace Geogr. IGiPZ PAN, 114, 1975.

García M. H., Parker G. *Entrainment of bed sediment into suspension. J. Hydraul. Eng.*, 117(4), 1991, s. 414–435.

Gładki H., Madeyski M. *Transport rumowiska w korzycie rzeki Raby w przekroju Stróża i Proszówki.* Probl. Zagosp. Ziem Górskich, nr 14, 1975.

Gładki H. *Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie karpackich dopływów Wisły.* Zesz. Nauk. AR w Krakowie nr 118, seria: Rozprawy z. 43, 142, 1976.

Graf W. *Hydraulic of sediment transport*. Mc Graw Hill. New York 1984.

Górecki A., Krzemień K., Skiba S., Zemanem B. *Przyroda Magurskiego Parku Narodowego.* Magurski Park ,Narodowy, Uniwersytet Jagielloński, Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 2003, 168.

Guo J. Julien P.Y. *Efficient algorithm for computing Einstein integrals.* Journal of Hydraulic Engineering, vol.130, No 12, 2004, s. 1198–1201.

Holly F.M., Yang J.C., Schovarz P., Scheefer J., Hsu S.H., Einhelling R. *CHARMA numerical simulation of unsteady water sediment movements in multi-connected networks of mobile-bed channels.* IIHR Report No. 343, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa 1990.

Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Koziorowski B., Zerbe J. *Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.

Ibad-Zade Y. A. *Movement of sediment in open channels.* Russian translation series, Vol. 49, Rotterdam, Netherland 1992.

Itakura T., Kishi T.. *Open channel flow with suspended sediments. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 106(8), 1980, s. 1325–1343.

Instrukcja obsługi batymetru butelkowego typu PIHM-1. Materiały PIHM do użytku wewnętrznego 1966.

Jakubowski T. *Określenie natężenia erozji wodnej gleb w zlewni cieku górskiego o użytkowaniu rolniczym.* Inżynieria Rolnicza, nr 3 (45), 2003, s. 85–92.

Karim M.F., Kennedy J.F. *ILLUVIAL: A computer-based flow and sediment routing model for alluvial streams and its application to the Missoti River.* IIHR Report No. 250, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa 1991.

Król Cz. *Hydrologia.* Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1986.

Lane E.W., Koelzer V.A. *Density of sediments deposited in reservoirs.* Report No. 9, St. Paul, US Engineering District 1953.

Lara, J.M., Pemberton E.L. *Initial weight of deposited sediments.* Proceedings of Federal Interagency Sedimentation Conference. USDA-ARS, Miscellaneous Publication 82. In: Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 970, 1963, s. 818–845.

Łajczak A. *Zróżnicowanie transportu zawiesiny w Karpackiej części Dorzecza Wisły.* Dokumentacja Geograficzna IGiPZ PAN, z. 5, 1989, 81.

Madeyski M. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych.* Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawa habilitacyjna nr 236, Kraków 1998, 95.

Maner S.B. *Factor affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area.* Trans. AGU, vol. 39, No. 4, 1958, s. 669–675.

Mehta A.J., Hayter E.J., Parker W.R., Krone R.B., Teeter A.M. *Cohesive sediment transport. I: Processes description.* Jour. of. Hydr. Engineering, ASCE No. 115(8), 1989, s. 1076–1093.

Michalec A. *Opracowanie aplikacji - programu komputerowego służącego obliczaniu transportu rumowiska unoszonego w rzece i w małym zbiorniku wodnym.* Dokumentacja techniczna aplikacji SLT, maszynopis, Kraków 2007.

Michalec A. *BEM - model transportu rumowiska unoszonego według teorii Bijkera.* Dokumentacja techniczna aplikacji SLT, maszynopis, Kraków 2009.

Michalec B. *Ocena stopnia zamulenia zbiorników karpackich na tle natężenia transportu rumowiska unoszonego i wleczonego.* Rozprawa doktorska. Maszynopis, Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie, 2001, 215.

Michalec B. *Study of Bed Forms in a River and a Small Water Reservoir.* Polish Journal of Natural Sciences, Abbrev.: Pol. J. Natur. Sc., Vol 23(1), 2008a, s. 99–109.

Michalec B. *Appraisal of methods of qualification of sediment quantity supplied to a small water reservoir.* Archives of Environmental Protection vol. 34, no 2, Polish Academy of Sciences, Zabrze 2008b, s. 49–62.

Michalec B. *Appraisal of suspended sediment concentration on reference level according to van Rijn's method.* Annals of Warsaw University of Life Science – SGGW Land Reclamation, No 40, 2008c, s. 67–76.

Michalec B. *Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły*. Zesz. Uniw. Roln. w Krakowie, nr 451, Seria rozprawy, z. 328, 2008d.

Michalec B., Pęczek K. Strutyński M. *Wskaźnik denudacji mechanicznej zlewni małego zbiornika wodnego.* Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, z. 4, Kraków 2009, 101–108.

Michalec B., Tarnawski M. *Assessment of sediment supplied to a small water reservoir at Krempna.* XXIII Conference on the Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management. Serbia, Belgrad, Full text on CD and available on Web page: http://www.hidmet.sr.gov.yu/eng/hidrologija/konferencija/papers.php# ES. 2006, s. 76–85.

Mikulski Z. *Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich.* Gosp. Wod., 1, 1961, s. 461–463.

Mokwa M. *Sterowanie procesami fluwialnymi w korytach rzek przekształconych antropogenicznie.* Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 439, Rozprawy CLXXXIX, 2002, 135.

Nicks, A. D., Williams, R.D. Williams, J. R., and Gander, G. A. *Estimating erosion with models having different technologies.* In: Proc. 25th Annual Conf. Intl. erosion Control Assoc., Reno, NV, February 15–18, 1994, s. 51–61.

Okada T, Baba K. *Sediment release plan at Sakuma Reservoir.* Proc. of 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro, 1982, s. 82–91.

Onishi Y., Graber H.C., Trent D.S. *Preliminary modeling of wave-enhanced sediment and contaminant transport in new ford harbor.* In: Metha, Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, 1993, s. 541–557.

Opracowanie wyników pomiarów rumowiska unoszonego do wydawnictw rocznikowych – wskazówki. Wyd. IMGW, Warszawa 1982.

Parzonka W. *Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych.* Skrypty Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 159, 1977, 140.

Parzonka W. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka transportu zawiesiny rzecznej o wysokiej koncentracji w obrębie kaskady zbiornikowej.* Archiwum Hydrotechniki, Tom XXXIII, z.4, 1986, s. 377–396.

Parzonka W. *Erozja, transport i sedymentacja rumowiska w rzekach i w zbiornikach.* Materiały XI Ogólnopolskiej Szkoły Hydrauliki PAN, IBW, Gdańsk 1991, s. 81–99.

Przedwojski B, Błażejewski R., Pilarczyk K.W. *River training techniques. Fundamentals, design and applications.* Wyd. A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield. 1995, 487

Radecki-Pawlik A. *Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej.* Zesz. Nauk, AR w Krakowie, z. 281, 2002, 142.

Radecki-Pawlik A. *Wybrane metody obliczania intensywności transportu rumowiska.* Polska Akademia Nauk. Komisja Technicznej infrastruktury wsi. Seria: monografie nr 1, Kraków 2006, 99.

Ratomski J., Witkowska H. *Podstawy projektowania regulacji potoków górskich przy uwzględnieniu ruchu rumowiska.* Politechnika Krakowska, Kraków 1992.

Raudkivi, Raudkivi A.J. *Sedimentation – exclusion and removal of sediment from diverted water.* IAHR Hydraulic Structures Design Manual 6. A.A. Balkema Publishers, Brookfield, Vermont 1993, 172.

Reed L.A., Hoffman S.A. *Sediment deposition in Lake Clarke, Lake Aldred and Conowingo Reservoir.* Pennsylvania and Maryland, 1910-1993. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 1997, s. 96–4048.

Renfro W.G. *Use of erosion equation and sediment delivery ratios for predicting sediment yield.* In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. US Dept. Agric, Publ. ARS-S-40, 1975, s. 33–45.

Richards K.S. *Rivers: form and process in alluvial channels.* Methuen, London 1982, 361.

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).* U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 1997.

Reniger A. *Zagadnienia erozji gleb w Polsce.* Prace i Studia KGW PAN, II, cz. I, Warszawa 1959.

Roehl J. *Sediment source area, delivery rations and influencing morphological factors.* IAHS publ. 59, 1962, 202–213.

Roland A., Zanke U. *Discussion of "Efficient Algorithm for Computing Einstein Integrals" by Junke Guo and Pierre Y. Julien.* Jour. of Hydr. Eng. ASCE, 2006, s. 334–336.

Rubey, W.W. *Settling velocities of gravel, sand and silt particles.* American Journal of Science, Vol.25, 1933, s. 325–338.

Sadeghi S.H. *Application of MUSLE in prediction of sediment yield in Iran conditions.* Proc. 3th International Soil Conservation Organization Conference-Brisbane, Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions, Paper No. 998, 2004, s. 105–114.

Sha Y. Q. *Basic principles of sediment transport. Journal of sediment research.* Beijing, China, 1(2), 1956, s. 1–54.

Singh V. *Two dimensional sediment transport model using parallel computers.* Master of Science Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, 2002, 108.

Sloff C.J. *Reservoir sedimentation: a literature survey.* Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 91-2. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1991, 124.

Srivastas R. *Discussion of "Efficient Algorithm for Computing Einstein Integrals" by Junke Guo and Pierre Y. Julien.* Jour. of Hydr. Eng. ASCE, 2006, s. 336–337.

Starkel L. *Erozja gleb a gospodarka wodna w Karpatach.* Zeszyt Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Kraków 1980.

Strzemski M. *Gleby województwa krakowskiego.* Przegl. Geograf., t. XXVI, z. 4, Warszawa 1954.

Szewrański S., Sasik J., Żmuda R. *Ocena zamulania małych zbiorników wodnych zlokalizowanych w silnie erodowanej zlewni rolniczej.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 487, 2002, s. 345–352.

Szewrański Sz., Wojtysiak M, Żmuda R. *Nasilenie chemicznej erozji gleb w zlewni rolniczej na Wzgórzach Trzebnickich.* Formatko Circumiectus, ser. Kształt. Środ., nr 3(2), 2004, s. 51–65.

Thomas W.A., Prashum A.L. *Mathematical model of scour and deposition.* Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, No. HY11, 1977, s. 1613–1641.

Trimble S.W., Carey W.P. *Sediment characteristics of Tennessee streams and reservoirs.* United States Department of the Interior Geological Survey. USGS Publications. Open-File Report 84–749, 1984, 32.

van Rijn L. C. *Sediment transport. Part I: Bed load transport.* Journal of Hydraulic Engineering, vol.110, No 10, 1984a, s. 1431–1456.

van Rijn L. C. *Sediment transport. Part II: Suspended load transport.* Journal of Hydraulic Engineering, vol.110, No 10, 1984b, s. 1613–1641.

van Rijn, L. C. *Handbook: sediment transport by currents and waves.* Rep. H461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands 1989.

van Rijn L. C. *Unified view of sediment transport by currents and waves. Part II: Suspended Transport.* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 6, 2007, s. 668–689.

Vanoni, V.A., *Sedimentation Engineering.* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 54, 1975, 745.

Walling, D.E., Webb, B.W. *Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields.* Proc. Exeter Symposium 137, 1982, s. 327–337.

Williams, J. R. *Sediment – yield prediction with universal equation using runoff energy factor.* Proceedings of the sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, 1975.

Williams, J.R., Berndt, H.D. *Sediment yield computed with universal equation.* Journal of hydraulic division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 98(HY12), 1972, s. 2087–2098.

Williams, J.R, Berndt, H.D. *Sediment yield prediction based on watershed hydrology.* Transaction of the ASAE, 20(6), 1977, s. 1100–1104.

Wischmeier H. W., Smith D. D. *Predicting rainfall erosion losses-aquide from cropland east of the Rocky Mountains.* USDA, Agriculture Handbook, No. 282, 1965, 47.

Wiśniewski B. *Zamulenie zbiornika wodnego w Myczkowcach po 5 latach eksploatacji.* Gospodarka Wodna. Rok XXVII, z. 7, 1967, s. 246–248.

Wiśniewski B. *Ilość rumowiska unoszonego i wleczonego w rzekach polskich.* Gospodarka Wodna, nr 10–11, Warszawa 1972, s. 381–385.

Wiśniewski B. *Dokładność pomiarów zamulenia zbiorników wodnych.* Gospodarka Wodna, nr 3 Warszawa 1975, s. 81–86.

Wiśniewski B., Kutrowski M. *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej.* Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytyczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt", Warszawa 1973, 55.

Xiaoqing Y. *Manual on sediment management and measurement.* World Meteorological Organization. Operational Hydrology Report No. 47. Geneva, Switzerland, 2003, 158.

Yalin, M. S. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon, Oxford, U.K, 1977.

Yang C. T. *Incipient motion and sediment transport.* Journal of hydraulic division. ASCE, vol.99, No. HY10, Proceeding paper 10067, 1973, s. 1679–1704.

Zanke U. *Grundlagen der Sedimentbewegung.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1982.

Zhang R. J. *Sediment dynamics in rivers.* Water Resources Press 1989.

Zhu L. J., Cheng N. S. *Settlement of sediment particles.* Research Rep., Department of River and Harbor Engineering. Nanjing Hydraulics Research Institute, Nanjing, China 1993.

Dr inż. Bogusław Michalec
Uniwersytet Rolniczy
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Al. A. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków
tel. (0-48-12) 633-53-42,
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie

Rumowisko unoszone stanowi ok. 90% całkowitego transportu rumowiska rzecznego. Znajomość warunków transportu rumowiska rzecznego, jego rodzaju, wielkości natężenia jest niezbędna przy projektowaniu, wykonywaniu i eksploatacji obiektów realizowanych dla potrzeb gospodarki wodnej. Ma ona szczególne znacznie w prognozie zamulania zbiorników wodnych.

Natężenie transportu rumowiska unoszonego może zostać określenie różnymi metodami, tj. bezpośrednimi czyli pomiarowymi i pośrednimi – obliczeniowymi. Spośród metod bezpośrednich wyróżniamy metody: batometryczne, fotometryczne, elektrooporowe, ultradźwiękowe i radioizotopowe. Metody pośrednie umożliwiają obliczenie transportu rumowiska na podstawie równań empirycznych, półempirycznych i teoretycznych. Opisanie warunków transportu rumowiska unoszonego na podstawie badań empirycznych wiąże się z koniecznością wprowadzenia parametrów hydraulicznych, opisujących przepływ wody i parametrów charakteryzujących rumowisko unoszone. Ujęcie tych parametrów w opisie ruchu wody i rumowiska wymaga uwzględnienia ich wzajemnego dynamicznego oddziaływania. Istotne jest tu także określenie rozkładu prędkości przepływu wody w przekroju koryta, sił i naprężeń działających na dno, charakteryzujących początek ruchu. Rozkład koncentracji rumowiska unoszonego z uwzględnieniem jego składu granulometrycznego i prędkości opadania poszczególnych ziaren oraz parametry hydrauliczne umożliwiają opisanie transportu mieszaniny wody i rumowiska oraz określenie zdolności transportowej fazy stałej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych metod służących obliczaniu transportu rumowiska unoszonego. Do najczęściej stosowanych w Polsce metod pośrednich określenia transportu rumowiska unoszonego można wyróżnić bazujące na określonej masie erodowanej gleby w zlewni. Spośród nich najczęściej stosowane dotychczas to metoda Reniger-Dębskiego oparta na klasyfikacji intensywności denudacji i metoda wskaźników denudacji odpływowej Brańskiego oraz metoda DR-USLE bazującą na uniwersalnym równaniu strat glebowych USLE, w której wskaźnik odpływu rumowiska DR określany jest metodą podaną przez Rohela. Spośród metod obliczeniowych opartych na określeniu parametrów opisujących przepływ wody i rumowiska w korycie coraz częściej stosowana jest metoda van Rijna. W pracy przedstawiono również mniej popularną metodę MUSLE i niestosowaną dotychczas w Polsce metodę Bijkera.

Stosując metodę DR-USLE, otrzymano stosunkowo najmniejszą różnicę wyników transportu rumowiska w przeciwieństwie do metod Brańskiego czy Reniger-Dębskiego. Wskazuje to na możliwość zastosowania metody DR-USLE w obliczeniach ilości transportowanego rumowiska w przypadku braku danych hydrologicznych. Uwzględnienie dynamiki przepływu rumowiska umożliwia metoda MUSLE. Wymaga ona jednak dysponowania hydrogramami fal wezbraniowych i może mieć zastosowanie w przypadku braku danych batymetrycznych. Wykazano możliwość zastosowania metod Bijkera i van Rijna w obliczeniach natężenia transportu rumowiska unoszonego. Jednakże wymagają one przeprowa-

Summary

Suspended sediment constitutes about 90% of the total river sediment transport. Recognition of river sediment transport, its kind intensity is indispensable in designing, execution, and operation of objects realized for needs of water economy. It is of great importance in water reservoir silting forecast.

Intensity of suspended sediment transport may be determined by use of various methods i.e. direct ones – measurement methods and indirect – calculation ones. Among the direct ones the following ones may be distinguished: bathometric, photometric, electro-resistance, ultrasonic and radioisotope method. Indirect methods permit to calculate sediment transport basing upon empiric, semi-empiric and theoretical equations. Description of suspended sediment transport based on empiric investigation is connected with the necessity of introduction of hydraulic parameters describing water flow and parameters characterizing suspended sediment. Introduction of these parameters into description of water and sediment movement requires consideration of their reciprocate dynamic influence. Determination of water flow velocity, distribution in the river bed section, forces, and stresses acting on the bottom characterizing the beginning of movement is also significant. Distribution of suspended sediment concentration, taking into regard its granulometric composition and fall velocity of particular grains, as well as hydraulic parameters, permit description of transport of the water-sediment mixture and determination of transportability of the sediment.

The aim of the present paper is to present some of those methods of suspended sediment transport determination. Among the most frequently applied indirect methods of appraisal of suspended sediment transport used in Poland those basing upon a determined mass of eroded soil in the basin may be mentioned. From those the most commonly applied is, up till now, the Reniger-Dębski's approach based on classification of denudation intensity and the approach of runoff denudation indices used by Brański and the DR-USLE method based upon the universal soil loss equation USLE in which the index of sediment discharge is determined by use of the method given by Rohel. Among the calculation methods based on appraisal of parameters describing water and sediment discharge in river the van Rijn's approach is more and more frequently applied. The less popular method MUSLE was also introduced in the paper and the not applied in the Poland Bijker's approach was presented.

Applying the DR-USLE method a relatively smallest difference in results of sediment transport, opposite to Brański's or Reniger-Dębski's approaches, was obtained. This points at possible applicability of the DR-USLE method in calculation of the amount of transported sediment in case hydrological data are missing. The MUSLE method permits to take into account the dynamics of the sediment flow. In this method it is, however, necessary to dispose of hydrograms of freshet waves. They can be used mainly in case of lack of bathymetric data. The possibility of the use of Bijker' and van Rijn's approaches was showed a possibility of adaptation of this methods in calculations of suspended sediment transport. They require, however, performance of calibration works.

Key words: *erosion, denudation, suspended sediment transport, sediment concentration, river*

INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH

Czasopismo naukowe wydawane przez Komisję Technicznej Infrastruktury Wsi Polskiej Akademii Nauk Oddział w Krakowie. Ma charakter ogólnokrajowy i jest otwarte na Autorów z całego świata. Wydawane jest w języku polskim i angielskim. Zgłaszane do publikacji artykuły winny być oryginalnym osiągnięciem Autora, dotychczas niepublikowane, poświęcone problemom technologicznym, projektowym, ekonomicznym lub teoretycznym z tytułowego zakresu czasopisma. Przyjmujemy manuskrypty, w objętości do 10 str. pisma komputerowego (Times New Roman, 12, odstęp 1,5) napisane w języku polskim lub angielskim Autorów spoza Polski prosimy o nadsyłanie manuskryptów w języku angielskim. Każdy artykuł winien być zaopatrzony w wyczerpujące streszczenie ze słowami kluczowymi (w języku manuskryptu) do 3000 znaków (jedna strona), wraz z załączonym tłumaczeniem angielskim. Drukujemy również w kolorze, w przypadku istotnej konieczności (fotografie, skomplikowane rysunki, mapy). Manuskrypt, w dwóch egzemplarzach należy przesłać pocztą na adres Redakcji, dołączając tekst na dyskietce lub CD, z oddzielnymi ilustracjami.

INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Scientific journal published by the Commission of Technical Infrastructure of Polish Rural Areas of the Academy of Letters - Krakow Branch. It is a nation wide journal, which accepts contributions from Authors from all over the world. It is published in Polish and English. Submitted contributions should be original scientific papers, so far unpublished, dealing with technological, design, economic or theoretical issues within the scope of the journal.

Submitted manuscripts should not exceed 10 typewritten pages (Times New Roman, font 12, 1.5 line spacing). The Authors from abroad may submit their papers in English. Each article must have a summary and keywords of not more than 3000 characters (one page). Color reproductions are possible only in special cases (photographs, complicated figures or maps). The manuscripts, in duplicate, should be sent by post to the editorial office. Electronic version on a diskette or CD with illustrations provided separately should accompany the hard copies

INFARSTRUKTUR UND ÖKOLOG1E DES LÄNDL1CHEN RAUMS

Die neue Forschungszeitschrift der Kommission der Technischen Infrastruktur an der Polnischen Wissenschaftsakademie, Abteilung in Krakau, hat ein nationaler Charakter und publiziert gern die Arbeiten von Autoren aus Polen sowie auch aus der ganze Welt. Die Forschungszeitschrift wird in Polnisch und Englisch verlegt.

Die vorgelegten Artikel sollen Originalarbeiten sein und dürfen nicht gleichzeitig an anderer Stelle zur Publikation eingereicht werden. Die Forschungsarbeiten sollen den Technologischen, Wirtschaftlichen. Planungs- sowie auch den theoretischen Problemen gewidmet sein, die eng der Titelbereich der Zeitschrift behandeln. Zugesandte Manuskripte sollen mit dem Umfang von höchstens 10 Druckseiten (Times New Roman, Schriftgrosse: 12 pt, Zeilenabstand: 1.5-fach) sein. Für die Autor/innen ausserhalb Polens wird es zugelassen die Manuskripten in Englisch zuschicken.

Dem Text wird im Manuskript eine Zusammenfassung mit den Schlussworten vorangestellt, die eine Lange von 3000 Zeichen (1 Druckseite) nicht übersteigen sollte.

Nach Bedarf drucken wir auch in Farbę (Aufnahmen, Karten, komplizierte Bilden).

Die zwei ausgedruckte Exemplare eines Manuskripts mit der Diskettenversion (die Abbildungen getrennt) bitte zur Redaktion senden.