

POLSKA AKADEMIA NAUK  
KOMISJA TECHNICZNEJ INFRASTRUKTURY WSI

---

POLISH ACADEMY OF SCIENCE  
COMMISSION OF TECHNICAL INFRASTRUCTURE

**INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH**

**11**

**INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS**

**Seria: monografia  
monograph**

***Marek Madeyski, Bogusław Michalec, Marek Tarnawski***

**ZAMULANIE MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH  
I JAKOŚĆ OSADÓW DENNYCH**

**SILTING OF SMALL WATER RESERVOIRS  
AND QUALITY OF SEDIMENTS**

Kraków 2008

*RADA PROGRAMOWA – RESEARCH COUNCIL*

Radomir Adamowski (*Praga*), Waclaw Bieda, Jerzy Gruszczyński,  
Dušan Húska (*Nitra*), Stanisław Krzanowski (przewodniczący), Antoni T. Miler,  
Jan Pawełek, Artur Radecki-Pawlik, Jerzy Ratomski, 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)

*WYDAWCA – EDITOR*

Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN w Krakowie  
Katedra Technicznej Infrastruktury Wsi Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

Copyright by:

Katedra Technicznej Infrastruktury Wsi, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków

*ADRES REDAKCJI – EDITORIAL OFFICE ADDRESS*

Redakcja liETW, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, tel. (12) (662) – 46 59, - 46 58, - 46 55  
Fax: (12) 662 46 60, e-mail: gruszczyński@ar.krakow.pl, www.infraeco.pl

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 opracowano w Katedrze Inżynierii Wodnej  
Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka*

Poszczególne rozdziały opracowali:

Marek Madeyski, Bogusław Michalec, Marek Tarnawski – 1, 2, i 5

Marek Madeyski, Marek Tarnawski – 4

Bogusław Michalec – 3



## SPIS TREŚCI

1.	Wprowadzenie .....	7
2.	Charakterystyka badanych obiektów i zakres badań .....	10
2.1.	Charakterystyka badanych małych zbiorników wodnych .....	11
2.2.	Charakterystyka badanych stawów rybnych .....	22
3.	Pomiary i prognoza zamulania małych zbiorników wodnych .....	24
3.1.	Metodyka badań zamulania .....	29
3.2.	Ocena intensywności zamulania .....	30
3.3.	Określenie zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska .....	32
3.4.	Prognoza zamulania .....	37
4.	Jakość osadów i możliwości ich przyrodniczego wykorzystania .....	41
4.1.	Cechy fizyczne osadów zbiornikowych i stawowych .....	41
4.2.	Cechy reologiczne osadów zbiornikowych i stawowych .....	45
4.3.	Cechy chemiczne osadów zbiornikowych i stawowych .....	47
4.4.	Możliwość przyrodniczego wykorzystania osadów dennych zbior- ników i stawów .....	49
4.5.	Charakterystyka fizyczna, reologiczna i chemiczna osadów bada- nych stawów rybnych i małych zbiorników wodnych .....	53
4.6.	Ocena możliwości przyrodniczego wykorzystania osadów dennych badanych stawów rybnych i małych zbiorników wodnych .....	61
5.	Podsumowanie i wnioski końcowe .....	65
6.	Bibliografia .....	68
	Streszczenie .....	73
	Summary .....	75

## CONTENTS

1.	Introduction .....	7
2.	Characteristics of investigated objects and range of investigations .....	10
2.1.	Characteristics of investigated small water reservoirs .....	11
3.1.	Characteristics of investigated fish ponds .....	22
3.	Measurements and prognosis of small water reservoir silting .....	24
3.1.	Method of silting .....	29
3.2.	Silting intensity appraise .....	30
3.3.	Determination of small water reservoir ability to load retention .....	32
3.4.	Silting prognosis .....	37
4.	Sediment quality and their possibility of use in nature .....	41
4.1.	Physical properties of reservoir and pond sediments .....	41
4.2.	Rheological properties of reservoir and pond sediments .....	45
4.3.	Chemical properties of reservoir and pond sediments .....	47
4.4.	Possibility of utilization of bottom sediments of reservoir and pond in nature .....	49
4.5.	Physical, rheological and chemical characteristics of sediments of examined fish ponds and small water reservoirs .....	53
4.6.	Evaluation of usability of bottom sediments of examined fish ponds and water reservoirs in nature .....	61
5.	Summary and conclusions .....	65
6.	Literature .....	68
	Summary .....	73
	Summary .....	75

## 1. WPROWADZENIE

W ramach koncepcji budowy zbiorników zaporowych zwraca się szczególną uwagę na konieczność odbudowy części zlikwidowanych małych zbiorników, jak również dużą uwagę kieruje się ku koncepcjom budowy nowych małych zbiorników wodnych [Mioduszewski 1997]. Budowa małych zbiorników wodnych jest jednym z elementów programu związanego z „działaniami na rzecz poprawy stanu, zwiększenia i odbudowy zasobów wodnych”. Program ten znalazł poparcie rządu Polski wyrażone podjęciem starań mających na celu złagodzenie deficytu wody, w „Porozumieniu” zawartym w dniu 21 grudnia 1995 roku między Ministrem Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej a Ministrem Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa [„Porozumienie ...” 1995]. W myśl „Porozumienia” w programie małej retencji wyróżnia się małe zbiorniki wodne, których pojemność całkowita nie przekracza 5 mln m<sup>3</sup>. Literatura krajowa podaje różne klasyfikacje zbiorników wodnych mające na celu wyznaczenie rozgraniczenia pomiędzy dużymi i małymi zbiornikami wodnymi. Najczęściej kryterium wielkości zbiornika są takie wskaźniki, jak wysokość zapory i pojemność zbiornika. Klasyfikacja podana przez Mioduszewskiego [1997] jest szczegółowym rozwinięciem podziału zaproponowanego przez Dziewońskiego [1973], który klasyfikuje małe zbiorniki wodne również ze względu na wysokość zapory ziemnej i pojemność zbiornika. W myśl tego podziału do małych zbiorników należy zaliczyć obiekty, które spełniają następujące warunki: wysokość zapory jest mniejsza lub równa 2 m, a pojemność zbiornika jest dowolnie duża. Do tej samej grupy należą także zbiorniki, których wysokość zapory jest mniejsza lub równa 5 m, ale pojemność zbiornika mieści się w przedziale od 50 tys. m<sup>3</sup> do 100 tys. m<sup>3</sup>, oraz gdy zbiornik wodny ma dowolną wysokość zapory, ale pojemność zbiornika jest mniejsza od 25 tys. m<sup>3</sup>. Proponowany przez Radczuk [1997] podział zbiorników wyróżnia cztery kryteria, umożliwiające wydzielenie podzbiorów klasyfikacji. Pierwszym kryterium klasyfikacji jest wysokość zapory i pojemność zbiornika. Zgodnie z zaproponowanym podziałem małym zbiornikiem jest obiekt, którego wysokość zapory jest mniejsza lub równa 5 m, a pojemność zbiornika nie większa niż 100 tys. m<sup>3</sup>. Spośród kryteriów podziału zbiorników zaporowych najczęściej wyróżnianym wskaźnikiem, podawanym w różnego rodzaju opracowaniach, jest wielkość zbiornika wyrażana poprzez pojemność, na podstawie którego dany obiekt może zostać zaliczony do małych zbiorników wodnych.

Zamulanie zbiorników wodnych jest jednym z głównych czynników ograniczających prawidłową eksploatację zbiorników wodnych. Intensywność procesu wypływania małego zbiornika wodnego i stawu rybnego jest różna i zależna od wielu czynników, omówionych w licznych pracach [Dąbkowski i in. 1982; Bednarczyk 1994; Parzonka 1991; Madeyski 1998; Michalec 2001]. Jak podaje Łajczak [1995] za Hartungiem, intensywność zamulania zbiorników, wyrażona poprzez średnie roczne zmniejszenie się pojemności początkowej zbiorników, wyrażona w procentach pojemności początkowej, wynosi dla zbiorników dużych około 0,25%, średnich około 0,5%, a małych nawet do 3%. Stawy rybne charakteryzują się mniejszą intensywnością zamulania niż małe zbiorniki wodne, gdyż jak podaje Madeyski [1998] o tempie zamulania stawów decydują również czynniki biologiczne i hodowlane. Szczególnie niewielkie obiekty narażone są na szybką utratę pojemności wodnej na rzecz akumulowanego w czaszy rumowiska, gdyż zlokalizowane najczęściej w górnych partiach zlewni i działające jak osadnik, przechwytyują znaczną część transportowanego przez ciek rumowiska. Średnie roczne tempo zamulania zbiorników, należących do kategorii średnich w skali globalnej, wybudowanych w naszym kraju, określone na podstawie pomiarów, mieści się w przedziale 0,02–0,58% [Cyberski 1970]. Natomiast przeciętne roczne zamulenie małych zbiorników w porównaniu z tempem zamulania dużych zbiorników wodnych jest od 8,8 nawet do 65,5 razy większe, zatem pojemność małych zbiorników wodnych ulega redukcji średnio kilka do kilkudziesięciu razy szybciej [Bednarczyk i in. 2002; Michalec 2003a].

Małe zbiorniki wodne zamulane są głównie drobnoziarnistym materiałem mineralnym. Sposoby minimalizacji dopływu rumowiska do zbiornika powinny być uwzględniane już na etapie przygotowania obiektu. Do pierwszej grupy działań ograniczających dostawę materiału do zbiornika zaliczyć można właściwe zabiegi przeciwdziałające procesom erozyjnym w zlewni. Zabiegi te bezpośrednio wpływają na ilość materiału klastycznego w ciekach, a więc i dostarczanego do zbiorników. Obszary o wysokiej erozyjności powinny zostać zalesione, zwłaszcza w górnych partiach zlewni, natomiast tereny użytkowane rolniczo ulec przeobrażeniu. Zastosowanie zmiany upraw, zadarnianie drogi spływu, prawidłowe prowadzenie orki, a w ostateczności zastosowanie terasów znacznie ograniczyć może ilości erodowanego materiału glebowego.

Na obszarach, gdzie trudno jest zmniejszyć areal ziemi uprawnej rolę lasów powinny spełniać pasy zadrzewień lub zakrzewień. W wysokich partiach zlewni, biegnące wzdłuż warstwic pasy leśne pozwalają na zmniejszenie przesuszenia gleby, akumulują opady i zmniejszają spływy powierzchniowe, a tym samym hamują erozję gleb [Bolesta 1966].

Drugą grupę sposobów ograniczenia ilości dostarczanego rumowiska do zbiornika stanowią rozwiązania techniczne. Zabezpieczenia wymagają miejsca osuwisk. Celowe jest również ustabilizowanie brzegów koryt rzecznych, jak i dna. Można tego dokonać poprzez wykonanie technicznej i biologicznej zabu-



dowy koryt [Bolesta 1966]. Skuteczną metodą jest również wykonanie kilku małych zbiorników zamiast jednego dużego [Figuła 1958], a także wybudowanie zbiorników suchych lub wstępnych służących jako osadniki, z możliwościami okresowego wydobywania osadu [Bolesta 1966; Żbikowski, Żelazo 1993]. Zbiorniki takie mogą tworzyć swoistą, naturalną zaporę biologiczną, będąc silnie porośnięte starannie dobraną roślinnością wodną.

Innym, bardzo ciekawym z punktu widzenia inżynierskiego, jest rozwiązanie polegające na wykonaniu „*bypassu*” łączącego cofkę zbiornika z jego dolnym stanowiskiem [Scheuerlein 1999]. Wykorzystanie takiego rozwiązania składa się z trzech faz: przechwycenie osadu przez ujęcia zlokalizowane przy zaporach separacyjnych, przeprowadzenie przepływu o dużej koncentracji „*bypassem*” wokół zbiornika z wypływem w dolnym biegu rzeki. Właściwie zaprojektowane „*bypassy*”, stanowią efektywne rozwiązanie problemu dostarczania do zbiornika nadmiernych ilości materiału klastycznego.

Pomijany często aspektem procesu zamulania jest jakość wody i osadów dennych. Zarówno zanieczyszczenia dostarczane do zbiornika jako „suchy opad”, jak też dopływające z wodą rzeczną, mogą przyczyniać się do powstawania w zbiornikach różnych procesów chemicznych, zmieniających warunki i formy akumulacji i to zarówno naturalnego materiału unoszonego, jak i związków chemicznych rozpuszczonych w wodzie. Drobne cząstki gruntów gliniastych mogą łączyć się w sprzyjających warunkach w znacznie większe skupiska zwane flokułami lub agregatami, których prędkości opadania są większe od cząstek elementarnych. Czynnikiem umożliwiającymi łączenie się cząstek elementarnych są m.in. właściwości fizyczno-chemiczne i elektrochemiczne cieczy, właściwości minerałów budujących flokuły, zawartość materii organicznej oraz niewielkie prędkości przepływu. Wpływ zasolenia wody oraz koncentracji cząstek na proces tworzenia flokuł i ich sedimentację badał Migniot [1968], stwierdzając silny wpływ tych dwóch czynników na prędkość opadania. Skład chemiczny osadu może być przyczyną wtórnego zanieczyszczenia wody w procesie ich resuspensji, przyspieszając proces tworzenia flokuł.

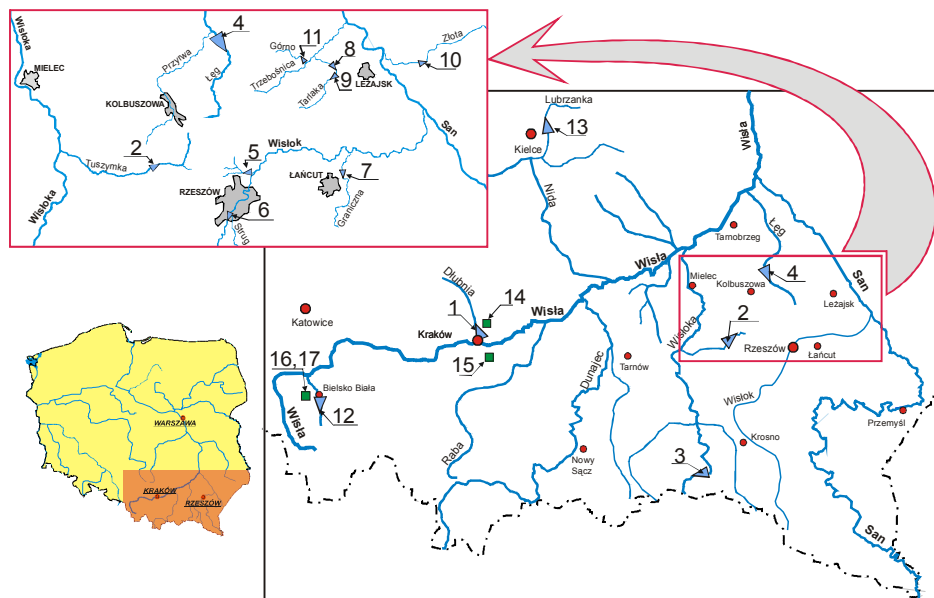
Zamulanie zbiorników wodnych i stawów, po zróżnicowanych w czasie okresach eksploatacji, wymusza konieczność usunięcia osadów z dna. Należy wtedy dobrać techniczne środki zastosowania i zagospodarowania osadów. Odpowiedzi na te dwa problemy związane są z koniecznością określenia cech reologicznych i fizycznych osadów istotnych przy ustaleniu sposobu usunięcia osadów z dna oraz cech chemicznych niezbędnych do podjęcia decyzji o możliwości ich ewentualnego wykorzystania przyrodniczego.

## 2. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OBIEKTÓW I ZAKRES BADAŃ

Badania zamulania, obejmujące zarówno określenie ilości rumowiska dopływającego i zatrzymanego, a także jego charakterystyki, zostały przeprowadzone na obiektach położonych w południowej i południowo-wschodniej części Polski, w małych zbiornikach wodnych oraz stawach rybnych typu karpiego. Stawy stanowią bowiem specyficzny rodzaj małych zbiorników wodnych. Wyróżnia je przede wszystkim funkcja jaką spełniają oraz sposób przepływu wody. Dlatego ilość zgromadzonego się w stawie namułu zależy nie tylko od zmacenia wody w rzece, która zasila te stawy, ale też od sposobu ujęcia wody i doprowadzenia jej do stawu. Niezależnie od namulów dostarczonych z zewnątrz (osady allochtoniczne) w stawie wytwarzają się osady autochtoniczne będące wynikiem bogatego życia biologicznego. Powoduje to zwiększoną zawartość części organicznych w osadach dennych stawów w porównaniu z osadami zbiornikowymi [Bednarczyk, Madeyski 1990; Madeyski 1998].

Badane małe zbiorniki wodne i stawy rybne znajdują się w dorzeczu Górnej Wisły (rys. 1). Przy wyborze obiektów kierowano się następującymi kryteriami: pojemność zbiorników wodnych nie powinna być większa od 5 mln m<sup>3</sup> i powinny być zlokalizowane na ciekach z pełną, w miarę możliwości, charakterystyką hydrologiczną. Ze względu na odniesienie wyników pomiarów zamulania ważne jest dysponowanie pełną dokumentacją techniczną obiektu, zawierającą m.in. profil podłużny i przekroje poprzeczne. Badaniami zamulania objęto następujące zbiorniki wodne: Zesławice (rz. Dłubnia), Cierpisz (rz. Tuszynka), Krempna (rz. Wisłok), Wilcza Wola (rz. Łęg), Bagna Rzeszowskie (rz. Czarna), Rzeszów (rz. Wisłok), Głuchów (pot. Graniczna), Brzoza Stadnicka i Brzoza Królewska (pot. Tarlaka), Ożanna (rz. Złota), Niedźwiadek (pot. Górno), Wapienica (rz. Wapienica), Cedzyna (rz. Lubrzanka) i Cierpisz (rz. Tuszynka). Badane stawy rybne położone są w okolicach Krakowa (Proszowice, Gdów) oraz Bielska-Białej (Grodziec Śląski, Gołysz).

Małe zbiorniki wodne lokalizowane są najczęściej na ciekach II rzędu i wyższych rzędów, a te najczęściej nie są kontrolowane pod względem hydrologicznym. Spośród wymienionych powyżej zbiorników jedynie zbiorniki retencyjne Krempna, Zesławice i Rzeszów oraz Maziarnia znajdują się na ciekach kontrolowanych hydrologicznie.



**Rysunek 1.** Lokalizacja badanych zbiorników wodnych i stawów rybnych w Dorzeczu Górnej Wisły. Zbiorniki wodne: 1 – Zesławice, 2 – Cierpisz, 3 – Kremarna, 4 – Wilcza Wola, 5 – Bagna Rzeszowskie, 6 – Rzeszów, 7 – Głuchów, 8 – Brzoza Królewska, 9 – Brzoza Stadnicka, 10 – Ożanna, 11 – Niedźwiadek, 12 – Wapienica, 13 – Cedzyna. Stawy rybne: 14 – Proszowice, 15 – Gdów, 16 – Grodziec Śląski, 17 – Gołysz

**Figure 1.** Location of examined reservoirs and fish ponds. Water reservoirs: 1 – Zesławice, 2 – Cierpisz, 3 – Kremarna, 4 – Wilcza Wola, 5 – Bagna Rzeszowskie, 6 – Rzeszów, 7 – Głuchów, 8 – Brzoza Królewska, 9 – Brzoza Stadnicka, 10 – Ożanna, 11 – Niedźwiadek, 12 – Wapienica, 13 – Cedzyna. Fish ponds: 14 – Proszowice, 15 – Gdów, 16 – Grodziec Śląski, 17 – Gołysz

## 2.1. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH

Szczegółowy opis badanych zbiorników i zlewni zamieszczono w pracach Bednarczyka i Michalca [1996a, 1996b, 1997, 2002], Madeyskiego i Tarnawskiego [2006b], Michalca [2003a, 2003b, 2004] i Tarnawskiego [2003, 2007] oraz w innych pracach powyższych autorów. Opis badanych stawów rybnych został przedstawiony w pracy Madeyskiego [1998].

Podstawowe parametry badanych zbiorników wodnych zamieszczono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Podstawowe parametry badanych zbiorników wodnych  
**Table 1.** Basic parameters of studied water reservoirs

Zbiornik / ciek Reservoir / water-course	Pojemność zbiornika Reservoir capacity [tys. m <sup>3</sup> ]	Powierzchnia zalewu Surface area [ha]	Długość zbiornika Length of the reservoir [m]	Współczynnik pojemności $\alpha$ Capacity-inflow ratio $\alpha$ [%]	Powierzchnia zlewni zbiornika wodnego Catchment area of water reservoir [km <sup>2</sup> ]
Zesławice / rz. Dłubnia	228,0	9,50	650	0,663	218,00
Cierpisz / rz. Tuszymka	34,5	2,30	340	0,278	54,50
Krempna / rz. Wiśłoka	119,1	3,20	400	0,372	165,30
Wilcza Wola / rz. Łęg	3860,0	160,00	6510	9,638	233,00
Bagna Rzeszowskie / rz. Czarna	48,0	1,5	180	2,708	204,2
Rzeszów / rz. Wiśłok	1800,0	68,20	6700	0,306	2060,70
Głuchów / pot. Graniczna	22,6	1,50	640	0,126	12,30
Brzoza Królewska / pot. Tarlaka	48,8	6,13	440	0,693	30,40
Brzoza Stadnicka / pot. Tarlaka	5,15	1,15	193	0,449	7,60
Ożanna / rz. Złota	252,0	18,00	950	0,791	136,30
Niedźwiadek / pot. Górno	124,5	8,10	550	2,378	18,75
Wapienica / rz. Wapienia	1100,0	17,50	1000	2,907	55,53
Cedzyna / rz. Lubrzanka	1554,0	64,00	2200	4,448	140,00

Poniżej zamieszczono ogólną charakterystykę zbiorników: Zesławice, Cierpisz, Krempna, Wilcza Wola, Bagna Rzeszowskie i Wapienica. Szczegółową analizę procesu zamulania przedstawiono dla czterech wytypowanych zbiorników wodnych, tj. Krempna, Wilcza Wola, Wapienica i Cierpisz. Ocenę jakości osadów i możliwości ich przyrodniczego wykorzystania opracowano na podstawie badań zbiorników wodnych Zesławice, Cierpisz, Bagna Rzeszowskie, Wilcza Wola i Krempna.

**Zbiornik wodny Zesławice i zlewnia rzeki Dłubni.** Zbiornik retencyjny w Zesławicach na rzece Dłubni został zbudowany w latach 1964–1966 i oddany do użytku w październiku 1966 roku. Przeznaczeniem zbiornika jest: zaopatrzenie w wodę przemysłową ówczesnej Huty im. Lenina, zaopatrzenie w wodę pitną miasta Krakowa oraz ochrona przeciwpowodziowa.

Pojemność użyteczna zbiornika wodnego Zesławice wynosi 228 tys. m<sup>3</sup>, a powierzchnia zalewu przy normalnym piętrzeniu jest równa 9,50 ha. Zbiornik wodny Zesławice znajduje się w 8,7 km biegu rzeki Dłubni. Powierzchnia zlewni do profilu Zesławice wynosi 218,0 km<sup>2</sup>.

Rzeka Dłubnia wypływa na wysokości 417 m n.p.m. Jest ona lewobrzeżnym dopływem Wisły. Całkowita długość rzeki wynosi 53,2 km, a powierzchnia zlewni wynosi 271,6 km<sup>2</sup>. Od źródeł znajdujących się na Wyżynie Krakowskiej przepływa przez Wyżynę Miechowską i Wysoczyznę Proszowicką i uchodzi do Wisły w km 89+400.

Dorzecze górnej Dłubni zajmuje wyżynny obszar nachylony łagodnie w kierunku południowo-wschodnim, obejmujący Wyżynę Krakowską i Wyżynę Miechowską. Najczęściej występującym na obszarze dorzecza Dłubni typem gleb są gleby wytworzone na lessach. Poza lessami występują czarnoziemy, zajmujące niewielkie powierzchnie oraz rędziny. Gleby rędzinne, występujące na obszarze Wyżyny Miechowskiej, wytworzone są na marglach kredowych.

Największą powierzchnię zajmują rośliny uprawne: grunty orne zajmują 78,1%, użytki zielone 1,6%, a lasy 9,5%. Pozostałe 10,8% stanowią tereny zurbanizowane. Na większości pól uprawnych, dochodzących aż do samego cieku, stosowana jest orka wzdłuż spadku stoku. Przyspiesza to spływ powierzchniowy, a tym samym intensyfikuje proces erozji gleb.

**Zbiornik wodny Cierpisz i zlewnia rzeki Tuszynki.** W 23,7 km biegu rzeki Tuszynki w miejscowości Cierpisz zlokalizowana jest mała zapora piętrząca wodę, zamykająca zlewnię cząstkową o powierzchni 54,5 km<sup>2</sup>. Zbiornik o pojemności 34,5 tys. m<sup>3</sup> został wybudowany w 1955 roku, a oddany do eksploatacji w 1956 roku. W 1990 roku zbiornik został odmulony. Objętość usuniętych namulów wynosiła 15 tys. m<sup>3</sup>.

Rzeka Tuszynka Duża jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Wisłoki. Jej długość wynosi 34,4 km. Całkowita powierzchnia zlewni obejmuje obszar o powierzchni 144,0 km<sup>2</sup>. Tuszynka Duża ma charakter rzeki nizinnej. W dolnej partii zlewni przepływa przez tereny płaskie, użytkowane w większości rolniczo. W środkowym i górnym biegu rzeka przepływa przez tereny leśne oraz łąki i pastwiska, często podmokłe.

Obszar zlewni pokryty jest lekkimi glinami zwałowymi oraz naglinowymi piaskami gliniastymi stanowią kompleksy gleb żytnio-ziemniaczanych. Gleby gliniasto-ilaste niedostatecznie natlenione znajdują się również pod użytkami zielonymi. Stopień zalesienia w zlewni wynosi 48%. Łąki i użytki zielone stanowią 24%, a grunty orne 35% powierzchni zlewni.

**Zbiornik wodny Krempna i zlewnia rzeki Wisłoki.** Zbiornik w miejscowości Krempna został wykonany w latach 1970–1972. Zbiornik ten o charakterze rekreacyjnym i o pojemności 119,1 tys. m<sup>3</sup> zlokalizowany jest w górnym odcinku rzeki Wisłoka w km 145+023. Elementem piętrzącym jest zapora ziemna o długości 145 m, z betonowym czteroprzęsłowym jazem wypo-

sażonym w zamknięcia ruchome. Na zlecenie Urzędu Gminy w Krempnej powstał w 1987 r. projekt renowacji zbiornika. W celu ograniczenia intensywności zamulania zbiornika, która jest szczególnie nasiloną w okresie wiosennych roztopów, zbiornik zostaje opróżniany późną jesienią (na przełomie listopada i grudnia) i ponownie napełniany późną wiosną (na przełomie maja i czerwca) [„Renowacja zbiornika ...” 1987].

Rzeka Wisłoka od źródeł do zbiornika w miejscowości Krempna o długości 18,6 km obejmuje zlewnię cząstkową o powierzchni 165,3 km<sup>2</sup>. Profil wodowskazowy Krempna zlokalizowany jest w 145,0 km biegu rzeki Wisłoki. Całkowita długość rzeki Wisłoki wynosi 163,6 km, a powierzchnia zlewni 4110,2 km<sup>2</sup>.

Utworami powierzchniowymi na terenie zlewni są gliny zwietrzelinowe i stokowe, powstałe w wyniku fizycznego wietrzenia skał podłoża. Są to gleby średnio głębokie, przeważnie kwaśne, o słabej zasobności w składniki pokarmowe. Dolna część zlewni i jej płaskie stoki to niewielkie obszary użytkowane rolniczo, z których tylko 4% stanowią grunty orne. Około 2% powierzchni zlewni zajmuje infrastruktura dróg i zabudowa. Na obszarze tym rozwinięta została hodowla bydła, dlatego użytki zielone stanowią przeszło 14% powierzchni. Obszar zajmowany przez uprawy nieznacznie się powiększa, co związane jest z postępującą nieopłacalnością chowu bydła. Tereny zajmowane przez użytki leśny stanowią na terenie zlewni około 80% i należą do Magurskiego Parku Krajobrazowego.

**Zbiornik wodny Wilcza Wola i zlewnia rzeki Łęg.** W miejscowości Wilcza Wola w km 56+100 zlokalizowany jest zbiornik wodny o pojemności 3860,0 tys. m<sup>3</sup>. Został on oddany do eksploatacji w 1989 roku. [„Założenia techniczno-ekonomiczne...” 1973]. Elementem piętrzącym jest zapora ziemna z jazem stałym posiadającym upusty denne. Czołowa zapora ziemna zamyka dolinę rzeki Łęg. Oś zapory przebiega prostopadłe do doliny rzeki. Głównym zadaniem zbiornika wodnego Wilcza Wola jest magazynowanie wody w celu nawodnienia zmeliorowanych użytków zielonych, zapewnienie dostatecznej ilości wody do zasilania stawów rybnych i pokrycia potrzeb lokalnych wodociągów, jak również częściowa redukcja fali powodziowej.

Powierzchnia zlewni do profilu wodowskazowego Wilcza Wola wynosi 242,9 km<sup>2</sup>, natomiast do przekroju zapory 233 km<sup>2</sup>. Rzeka Łęg jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Wisły. Ujście tej rzeki zlokalizowane jest w 274,0 km rzeki Wisły. Całkowita długość Łęgu wynosi 84,4 km, a powierzchnia zlewni 960,2 km<sup>2</sup>. Ma ona charakter rzeki nizinnej. Zlewnia rzeki Łęg, położona w obrębie Kotliny Sandomierskiej, należy do zapadliska przedkarpackiego. Budują je utwory piaszczysto-gliniaste. Największą powierzchnię dorzecza zajmują gleby wytworzone z piasków całkowitych luźnych, słabo gliniastych i gliniastych. Użytki zielone zajmują 4,19 tys. ha (ok. 21,88% powierzchni dorzecza), grunty orne 8,84 tys. ha (46,16%), lasy 2,21 tys. ha (11,54%). Pozostałe tereny obejmują

mujące wody powierzchniowe, tereny osiedlowe, drogi i koleje, nieużytki i inne zajmują 3,91 tys. ha (20,42% powierzchni).

**Zbiornik wodny Bagna Rzeszowskie i zlewnia rzeki Czarna.** Regulacja rzeki Czarna oraz budowa stopnia i zbiornika miała na celu zahamowanie silnej erozji brzegów. Obecnie obiekt wykorzystywany jest przez Polski Związek Wędkarski. Czasę zbiornika, o pojemności 48,0 tys. m<sup>3</sup>, wykonano na obszarze lokalnego obniżenia nadbrzeżnej łąki, stąd nieregularny przebieg linii brzegowej. Powierzchnia zalewu wynosi około 1,5 ha, przy zachowanej rzędnej piętrzenia 192,00 m n.p.m. Elementem piętrzącym jest jaz stały o wysokości 3,55 m i o szerokości przelewu 12 m. Ściana odpowietrzna przelewu jest ukształtowania wg krzywej Creagera. Rozproszenie energii na dolnym stanowisku następuje w niecce wypadowej o głębokości 0,5 m, zakończonej rzędem szykan.

Rzeka Czarna stanowi lewobrzeżny dopływ rzeki Wisłok. Na jej ujściowym odcinku, na terenie zawała zlokalizowany jest mały zbiornik rolniczy, zwany Bagna Rzeszowskie. Całkowita długość rzeki Czarnej, zwanej też Mrówką lub Mrowlą wynosi 22,8 km, a powierzchnia zlewni 204,2 km<sup>2</sup>. Rzeka przepływa przez tereny Podgórze Rzeszowskiego i Rynny Podkarpackiej. Najmłodsze utwory holoceniowe zalegają na starszych utworach osadów mioceńskich, w których przeważają utwory ilaste, w głębszych warstwach przechodzące w ilolupki i łupki z przewarstwieniami piaskowców lub żwirów. Na utworach miocenu zalegają czwartorzędowe gliny zwałowe, piaski i żwiry [Dynowska, Maciejewski 1991]. W obrębie dolin rzecznych, w obniżeniach terenu i u podnóży stoków, osadziły się osady mineralne aluwialne i deluwialne, a w wielu miejscach wykształciły się także torfy. W dolinie rzeki Czarna spotyka się gleby mułowo-bagienne oraz gleby powstałe z glin lekkich i średnich, glin zwałowych, lessów i pyłów wodnego pochodzenia, będących utworami lessowymi. Zlewnię charakteryzuje płaska rzeźba terenu, z występującymi tylko na krańcach obszaru pasmami wzniesień i pagórków. Wzniesienie dorzecza rzeki waha się od 190 do 240 m n.p.m.

Zlewnia rzeki Czarna ma charakter typowo rolniczy. Grunty orne stanowią aż 57,2% powierzchni zlewni, a w strukturze upraw dominują uprawy zbóż, roślin okopowych oraz warzyw. Użytki zielone zajmują 18,4% powierzchni zlewni. Górna, północno-zachodnią i północną partię zlewni porastają kompleksy leśne. Gleby tych terenów odznaczają się niskimi walorami użytkowymi, a w drzewostanie dominują gatunki drzew iglastych. Obszary te stanowią 21,6% zlewni. Tereny nieużytków, torfowisk, stawów oraz obszary zurbanizowane zajmują około 2,8% powierzchni zlewni.

**Zbiornik wodny Rzeszów i zlewnia rzeki Wisłok.** Podstawowymi zadaniami oddanego do eksploatacji w 1973 roku zbiornika, o pojemności 1800,0 tys. m<sup>3</sup>, miały być według projektu było utrzymanie rzędnej poziomu wody dla jej ujęcia, ochrona przed powodzią oraz stworzenie zaplecza sportowego i rekreacyjnego dla mieszkańców miasta Rzeszowa i okolic. Budowlę

piętrzącą stanowi stopień wodny zlokalizowany w 63+760 km biegu rzeki Wisłok. Sekcja przelewowa składa się z 4 przęseł o szerokości po 20,8 m. Przęsła zamykane są zasuwami o wysokości 4,30 m oraz ruchomymi klapami, pozwalającymi na podpiętrzenie wody ponad poziom N.P.P. o 1 m. Rzędna normalnego poziomu piętrzenia wynosi 198,50 m n.p.m.. Wytworzenie w dolinie rzeki Wisłok zbiornika o całkowitej pojemności 1,8 mln. m<sup>3</sup> i długości (wraz z zasięgiem cofki) około 6,7 km spowodowało powstanie zalewu o powierzchni przekraczającej 68 ha. Zbiornik zasilany jest dodatkowo wodami jedyne go bezpośredniego dopływu, tj. rzeki Strug.

Z wykonanych w 1986 roku pomiarów zamulenia wynika, że w ciągu czternastoletniej eksploatacji nastąpiło zmniejszenie pojemności zbiornika o ok. 66%, tj. z 1,8 mln. m<sup>3</sup> do 0,6 mln. m<sup>3</sup>.

Długość rzeki Wisłok na odcinku od źródeł do stopnia wodnego Rzeszów jest równa 141,2 km. Powierzchnia cząstkowa zlewni do zbiornika wynosi 2060,7 km<sup>2</sup>, a natomiast całkowita powierzchnia zlewni 3528,2 km<sup>2</sup>. Długość rzeki od źródeł do ujścia wynosi 204,9 km.

Wisłok od źródeł do Rzeszowa przepływa przez regiony zaliczane do Karpat Zewnętrznych nazywanych fliszowymi. Wśród regionów geomorfologicznych można wymienić Beskid Niski, Doły Jasielsko-Sanockie, Pogórze Strzyżowskie i Pogórze Dynowskie. Płynąc dalej Rynną Podkarpacką i doliną Sanu staje się lewobrzeżnym jego dopływem.

Znaczna długość rzeki i wielkości zlewni są przyczynami zróżnicowania geologicznego i morfologicznego. Beskid Niski, w którym rzeka Wisłok bierze swój początek, to obszary górskie i podgórskie. W okolicach Rzeszowa przecina ona obszary Pogórza Dynowskiego, zbudowane z dużych fałdów.

Na obszarze objętym zlewnią Wisłoku występują liczne rodzaje utworów glebowych o zróżnicowanych klasach bonitacyjnych. Obszar zlewni cząstkowej rzeki Wisłok pokrywają w przeważającej części gleby słabo przepuszczalne brunatne i pyłowe oglejone oraz mady oglejone o składzie mechanicznym glin ciężkich i pyłów ilastych. Powstały one z utworów warstw podmagórskich, inno-ceramowych, cienkowieńskich warstw krośnieńskich i pyłów wodnego pochodzenia, będących utworami lessopodobnymi. Poza wymienionymi występują również w dolnej partii zlewni cząstkowej (rejon Rzeszowa) gleby średnio przepuszczalne brunatne i płowe, czarnoziemy, mady i rędziny o składzie mechanicznym glin lekkich i średnich lub utworów pyłowych, powstałe z glin zwałowych lekkich i lessów. Na terenie Beskidu Niskiego przeważają bardziej zwarte gleby gliniasto-pylaste i gliniasto-ilaste, będące najczęściej średnio i słabo szkieletowymi glebami brunatnymi wylugowanymi. Tworzą one żyzne na ogół siedliska górskich lasów bukowo-jodłowych lub kompleksy zbożowe górskie, czy też owsiano-ziemniaczano górskie [Witek, Koter 1975]. Kotliny Dołów Jasielsko-Sanockich pokryte są gliniasto-pyłowymi osadami aluwialnymi (madami). W dorzeczu górnej Wisły na Pogórzu Karpackim, obejmującym m.in.



Pogórze Strzyżowskie i część Pogórza Dynowskiego, podstawowym składnikiem pokrywy glebowej są bezszkieletowe pyłowo-ilaste gleby płowe oraz zbliżone do nich gleby brunatne wylugowane.

Znaczący jest udział użytków rolnych w całej zlewni rzeki Wisłok, gdyż wynosi on około 70%, z czego grunty orne zajmują 53,9%, sady 1,8%, a łąki i pastwiska 14,3%. Użytki leśne zajmują niewiele ponad 20% całej powierzchni zlewni. W górnych partiach zlewni, na obszarze Beskidu Niskiego udział łąk i pastwisk jest większy (25–30 %), są to głównie tereny nadrzeczne lub połoniny.

**Zbiornik wodny Głuchów i zlewnia potoku Graniczna.** W 1995 roku na terenie wsi Głuchów w województwie Podkarpackim wybudowano mały zbiornik wodny na potoku Graniczna. Przeznaczeniem obiektu jest umożliwienie prowadzenia gospodarki rybacko-wędkarskiej przez Polski Związek Wędkarski oraz umożliwienie wypoczynku i rekreacji.

Piętrzenie w zbiorniku uzyskano poprzez wykonanie wału ziemnego i monolitycznej konstrukcji mnicha z zamknięciem zasuwowym o świetle wynoszącym 1,0 m. Wykonano również upust stokowy na wypadek konieczności przeprowadzenia przepływów wezbraniowych.

Powstały zbiornik spowodował utworzenie się zalewu o powierzchni wynoszącej 1,50 ha, przy zachowanej rzędnej piętrzenia 193,60 m n.p.m. Objętość zbiornika w normalnych warunkach eksploatacji wynosi 22,6 tys. m<sup>3</sup>, a średnia głębokość to ok. 1,5 m. Długość zbiornika liczona w linii nurtu wynosi 640 m.

Długość potoku Graniczna od źródeł do zapory zbiornika w Głuchowie to zaledwie 2,6 km. Zapora zamyka zlewnię cząstkową o powierzchni 12,3 km<sup>2</sup>.

Zlewnia zbiornika Głuchów położona jest na obszarze Wysoczyzny Kańczuckiej. Źródła potoku mają swój początek na granicy Pogórza Dynowskiego i zachodniej części Wysoczyzny Kańczuckiej, graniczącej od północy z Rynną Podkarpacką.

Dominującymi utworami glebotwórczymi Wysoczyzny Kańczuckiej są utwory lessowe. Na nich rozwinęły się gleby brunatne właściwe, szarobrunatne i czarnoziemy. Wysokie walory produkcyjne tych gleb nie znajdują odzwierciedlenia w równie wysokich walorach hydrologicznych w zakresie wód podziemnych. Spełniają one warunki gleb infiltracyjno-retencyjnych. O przeciętnej przepuszczalności omawianych gleb dowodzą poprawne na ogół stosunki wodnotlenowe, o czym świadczy brak oglejenia w głębszych poziomach gleby [Dynowska, Maciejewski 1991]. Zlewnię zbiornika Głuchów pokrywają w przeważającej mierze grunty orne, które stanowią 58,5%. Użytki zielone zajmują 37,1%, a lasy zaledwie 1,1% powierzchni zlewni.

**Zbiornik wodny Brzoza Królewska i zlewnia potoku Tarlaka.** Zbiornik wodny w Brzozie Królewskiej w województwie Podkarpackim zlokalizowano w dolinie potoku Tarlaka. Obiekt powstał w 1978 roku z przeznaczeniem na miejsce wypoczynku i rekreacji, a także dla zabezpieczenia przeciwpożarowego wsi Brzoza Królewska oraz prowadzenia gospodarki rybacko-wędkarskiej przez

Polski Związek Wędkarski. Po 18-letnim okresie eksploatacji zostały przeprowadzone w zbiorniku prace odmulające. Obecnie zbiornik użytkowany jest przez „Ośrodek Wypoczynkowy Zalew”. Ogólna powierzchnia zalewu wynosi 6,13 ha, a objętość zbiornika przy rzędnej piętrzenia 195,20 m n.p.m. stanowi około 48,8 tys. m<sup>3</sup>. Średnia głębokość zbiornika wynosi około 1,7 m. Elementem piętrzącym jest zapora ziemna o długości 280 m i szerokości korony 10 m. Korpus zapory uszczelniony jest ekranem iłowym, połączonym z podłożem nieprzepuszczalnym. W korpus zapory wbudowano jaz żelbetowy o konstrukcji dokoowej, zaliczany do IV klasy budowli hydrotechnicznych. Sekcją przelewową stanowią trzy upusty o szerokości 2,20 m każdy. Upusty skrajne zamykane są zasuwami drewnianymi z wyciągami śrubowymi, natomiast upust środkowy ma szandory drewniane zakładane. Próg stały wykonano na rzędnej 194,30 m n.p.m.

Zlewnia ciekłu Brzóza Królewska znajduje się na w południowej części Wysoczyzny Kolbuszowskiej, na pograniczu z Rynną Podkarpacką. U podnóża Płaskowyżu Kolbuszowskiego rozciąga się płaska równina proluwalna. Powstała ona w okresie zlodowacenia środkowopolskiego z osadów wynoszonych z płaskowyżu przez rzeki, tworząc stożki napływowe. Równina ta jest silnie zawydmiona, tworząc tym samym największy na obszarze Kotliny Sandomierskiej kompleks wydmy.

W obszarze tym występują gleby odznaczające się dużą zmiennością w zakresie walorów produkcyjnych i hydrologicznych. Starsze, wyżej położone terasy okrywają zwykle plejstocenyjskie piaski luźne i słabo gliniaste oraz występujące w ich kompleksie piaski naglinowe i gliny zwałowe oraz zwietrzelinowe. Piaski luźne tworzą zwykle różne hydrotypy siedlisk borowych, a piaski gliniaste i naglinowe – uboższe siedliska lasu mieszanego. Piaski gliniaste lekkie i mocne naglinowe oraz gliny zwałowe i zwietrzelinowe są zwykle użytkowane rolniczo. Tworzą one dobre, a niekiedy bardzo dobre kompleksy gleb żyznoziemniaczanych.

Całkowita powierzchnia zlewni zamkniętej zaporaą zbiornika Brzóza Królewska wynosi 30,4 km<sup>2</sup>. Najwyższy punkt zlewni położony jest na wysokości 240,90 m n.p.m., a najniższy 195,30 m n.p.m. Zlewnię tę zajmują w 7,1% lasy, grunty orne w 28,1%, a użytki zielone w 62,7%. Niewiele ponad 2,1% stanowią tereny wiejskie i nieużytki.

**Zbiornik wodny Brzóza Stadnicka i zlewnia potoku Tarlaka.** Zbiornik wodny Brzóza Stadnicka położony jest w województwie Podkarpackim, 15 km na południowy zachód od Leżajska. Jest on bardzo niewielkim obiektem hydrotechnicznym. Wraz z położonym poniżej zbiornikiem w miejscowości Brzóza Królewska nie stanowią zabudowy kaskadowej ciekłu, gdyż odległe są od siebie o ponad 4 km. Objętość projektowana zbiornika wynosi zaledwie 7 tys. m<sup>3</sup>, przy rzędnej normalnego poziomu piętrzenia 214,00 m n.p.m. Powierzchnia zalewu jest równa 1,15 ha. Średnia głębokość zbiornika wynosi 0,6 m, a długość 193 m. Obiekt został wykonany na zlecenie gminy Żołynia i oddany do użytku w 1995

roku. Celem budowy było wykonanie zbiornika retencyjnego w naturalnej, zabagnionej dolinie potoku Tarlaka, stanowiącej nieużytek rolny.

Elementem piętrzącym wody tego potoku jest wał ziemny z trzysegmentowym jazem o świetle 3 x 1,33 m. W segmencie pierwszym próg stały wznosi się do poziomu piętrzenia, a w pozostałych dwóch segmentach umieszczono drewniane zamknięcia szandorowe. Jaz ten zaliczany jest do IV klasy budowli hydrotechnicznych.

Wykonane po okresie 7-letniej eksploatacji pomiary wykazały znaczne zmniejszenie się pojemności, będące wynikiem akumulacji na dnie zbiornika ponad 2300 m<sup>3</sup> osadów.

Zlewnia cząstkowa potoku Tarlaka zamknięta profilem zapory w Brzózce Stadnickiej mieści się całkowicie w zlewni niżej położonego zbiornika Brzózka Królewska. Wydzielona zlewnia zbiornika górnego ma powierzchnię 7,6 km<sup>2</sup>. Zlewnia ta ma charakter rolniczy, gdyż aż 64,4% jej powierzchni stanowią obszary użytkowane jako grunty orne. Kolejnym co wielkości zajmowanej powierzchni sposobem użytkowania terenu są łąki i pastwiska. Tereny zielone zajmują 27,3% powierzchni zlewni. Obszary wykorzystywane w gospodarce leśnej zajmują zaledwie 8,3% – są to niewielkie, oddalone od siebie kompleksy leśne.

**Zbiornik wodny Ożanna i zlewnia rzeki Złota.** Zbiornik wodny w miejscowości Ożanna na rzece Złotej został oddany do eksploatacji w 1978 roku. Budowa tego zbiornika miała na celu poprawę warunków wilgotnościowych przyległego terenu, wyrównanie przepływów rzeki Złotej, zabezpieczenie wody do celów gospodarczych i przeciwpożarowych okolicznych wsi, powstrzymanie erozji dennej rzeki Złotej, hodowlę ryb oraz umożliwienie rekreacji i uprawiania sportów wodnych.

Zapora ziemna o rzędnej korony 175,40 m n.p.m., zlokalizowana w km 5+600 rzeki Złotej, stanowi element piętrzący zbiornika. Powierzchniowy upust zbiornika stanowi betonowy jaz stały o wysokości piętrzenia 2,30 m i o szerokości przelewu 15 m. Objętość zbiornika przy rzędnej piętrzenia 172,90 m n.p.m. wynosi 252 tys. m<sup>3</sup>. Powierzchnia zalewu wynosi 18,00 ha, przy średniej głębokość zbiornika równej 1,40 m i długości około 950 m.

W 1998 roku zbiornik został odmulony. Przeprowadzone prace renowacyjne pozwoliły na usunięcie z dna zbiornika 26 tys. m<sup>3</sup> namulów.

Źródła rzeki Złotej znajdują się na wysokości 220 m n.p.m. w obrębie Płaskowyżu Tarnogrodzkiego. Przepływa ona przez Rynnę Podkarpacką i uchodzi do rzeki San. Całkowita długość rzeki Złotej wynosi 29,4 km. Drenuje ona zlewnię o powierzchni wynoszącej 152,7 km<sup>2</sup>. Zlewnia cząstkowa rzeki Złotej do zbiornika w Ożannie ma powierzchnię 136,3 km<sup>2</sup>. Zapora zbiornika w Ożannie zlokalizowana jest w km 5+600.

Zlewnię pokrywają w znacznej części gleby średnio przepuszczalne – brunatne i pyłowe, czarnoziemy, mady i rędziny o składzie mechanicznym glin

lekkich i średnich lub utworów pyłowych. Gleby te powstały z glin zwałowych lekkich, lessów lub zwierzelin. Występują również gleby łatwo przepuszczalne, wśród nich gleby brunatne i pararendziny o składzie mechanicznym piasków i glin szkieletowych [Dynowska, Maciejewski 1991].

W dnie doliny rzeki Złotej znajdują się obszary łąk, częściowo podmokłych. Łąki i użytki zielone stanowią 32,2%, a grunty orne 27,6% powierzchni zlewni. Powierzchnia zlewni zajęta przez lasy to 36,5%. Tereny zabudowane i nieużytki to pozostałe 3,7% powierzchni zlewni.

**Zbiornik wodny Niedźwiadek i zlewnia potoku Górno.** Głównym celem wybudowania w 1998 roku zbiornika w miejscowości Niedźwiadek było stworzenie rezerwy wody dla celów rolniczych oraz przeciwpożarowych, jak również umożliwienie rekreacji. Powstanie zbiornika wodnego umożliwiło poprzez przegrodzenie koryta potoku Górno, zaporą ziemną o długości 190 m oraz wybudowanie zapory bocznej o długości 200 m, stanowiącej prawy brzeg zbiornika. W zaporę czołową wkomponowany jest przelew powierzchniowy w formie upustu wieżowego. Upusty denne stanowią dwie rury o średnicy 600 mm zamykane zasuwami.

Objętość początkowa zbiornika wynosiła 124,5 tys. m<sup>3</sup>, przy utrzymanej rzędnej piętrzenia na poziomie 196,20 m n.p.m. Powstały zalew miał powierzchnię wynoszącą 8,10 ha. Średnia głębokość zbiornika wynosi 1,54 m. Długość zbiornika liczona w linii nurtu głównego to 550 m. Zbiornik zaliczany jest do IV klasy budowli wodnych.

Potok Górno jest lewobrzeżnym dopływem rzeki Trzebošnicy, która uchodzi do Sanu. Całkowita powierzchnia zlewni wynosi 23,4 km<sup>2</sup>, natomiast powierzchnia zlewni zamknięta przekrojem zapory zbiornika w Niedźwiadku 18,75 km<sup>2</sup>. Zapora zbiornika znajduje się w km 1+600 potoku o całkowitej długości 3,8 km. Koryto potoku ma głębokość średnią 1,5 m. W dnie znajdują się utwory piaszczyste z występującymi lokalnie łachami żwirów.

Zlewnia potoku Górno położona jest na terenie Płaskowyżu Kolbuszowskiego. Budują ją utwory trzeciorzędowe, będące krakowieckimi iłami mioceńskimi, występujące na głębokości 7-10 m. Nad iłami zalegają warstwy czwartorzędowe, składające się z piasków i glin zwałowych. Piaski drobnoziarniste zalegają na warstwie glin pylastych i zwięzłych. Miąższość warstwy piasków wynosi 1,5-2,0 m. Gleby występujące na obszarze zlewni potoku Górno odznaczają się dużą zmiennością w zakresie swoich walorów produkcyjnych i hydrologicznych.

Zlewnia w przeważającej powierzchni stanowi użytek leśny, obszary te stanowią 50% powierzchni zlewni. Łąki i użytki zielone stanowią 13,1%, a grunty orne 34,5% powierzchni zlewni.

**Zbiornik wodny Wapienica i zlewnia rzeki Wapienica.** Zbiornik wodny o pojemności 1100,0 tys. m<sup>3</sup> i zaporę oddano do eksploatacji w 1932 roku. Zapora betonowa typu ciężkiego znajduje się w km 17+770 rzeki Wapienicy

(licząc od jej ujścia do Hownicy). Pojemność użyteczna wynosi  $0,940 \text{ hm}^3$ , a pojemność martwa  $0,160 \text{ hm}^3$ . W zbiorniku nie przewidziano stałej pojemności przeciwpowodziowej. Zbiornik może przejąć część objętości fali powodziowej, której wartość jest zależna od chwilowego napełnienia.

Rzeka Wapienica o długości 23,0 km jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Hownicy. Zlewnia o powierzchni  $55,53 \text{ km}^2$  położona jest w górnej części północno-zachodniej części Beskidu Śląskiego. Teren zlewni wykazuje duże zróżnicowanie pod względem glebowym, co w znacznej mierze jest wynikiem różnorodności skal macierzystych, stanowiących podstawowy materiał glebotwórczy. Na ogół przeważają tu gleby mało urodzajne, przy czym główne ich typy stanowią bielice oraz gleby brunatne, a zwłaszcza bielicowo-brunatne, wytworzone z utworów pyłowych (lessowatych), dalej bagienne (mady), rędziny, poza tym tzw. gleby początkowego stadium rozwojowego [Dynowska, Maciejewski 1991].

Większość terenu zlewni – 97% porastają lasy mieszane występujące w postaci lasu świerkowego i bukowego. Można także zaobserwować takie gatunki drzew jak: jawor, klon, jesion, jodła i modrzew. Pozostała część powierzchni zlewni (2%) zajęta jest przez łąki i pastwiska i w bardzo małej mierze na grunty orne (1%), na których uprawia się rośliny zbożowe.

**Zbiornik wodny Cedzyna i zlewnia rzeki Lubrzanka.** Zbiornik wodny Cedzyna, znajdujący się w odległości 7 km na wschód od miasta Kielce w rejonie wsi Cedzyna w gminie Górno, został oddano do eksploatacji w 1973 roku. Zbiornik ten wybudowany w 11+000 km rzeki Lubrzanka jest obiektem rekreacyjnym. Ma on umożliwiać wypoczynek, wędkarstwo i uprawianie sportów wodnych mieszkańcom okolicznych miejscowości i Kielc. Drugorzędym celem inwestycji jest magazynowanie wody i wyrównywanie odpływów w okresie wegetacyjnym.

Utrzymanie na koronie przelewu stałego rzędnej normalnego piętrzenia na poziomie 260,00 m n.p.m. pozwala uzyskać pojemność zbiornika wynoszącą 1554 tys.  $\text{m}^3$  przy powierzchni zalewu równej 64,00 ha. Długość zbiornika wynosi około 2200 m. Zbiornik zaliczany jest do drugiej klasy budowli hydrotechnicznych.

Zlewnia potoku Lubrzanka położna jest na terenie Gór Świętorzyskich. Potok wypływa z piaskowców triasowych koło Zagnańska na wysokości ok. 360 m n.p.m. Płyynie obniżeniem między Bukową Górą a Pasmem Masłowskim, a dalej łączy się z potokiem Warkocz i potokiem Bielnianką. Od tego miejsca potok przybiera nazwę Czarnej Nidy, która wpływa do Nidy, będącej dopływem Wisły. Zlewnia Potoku Lubrzanka do przekroju wodowskazu w Cedzynie, zlokalizowanym w 12 km biegu potoku, wynosi  $140,7 \text{ km}^2$ . Zapora zbiornika w Cedzynie zamyka zlewnię o powierzchni  $140 \text{ km}^2$ .

Zlewnia pokryta jest glebami średnio przepuszczalnymi, czarnoziemami, madami i rędzinami o składzie mechanicznym glin lekkich i średnich lub utwo-

rami pyłowymi brunatnymi i pyłowymi. Występują tu również gleby łatwo przepuszczalne i słabo przepuszczalne. Gleby łatwo przepuszczalne to gleby brunatne i pararendziny o składzie mechanicznym piasków i glin szkieletowych, a gleby słabo przepuszczalne to brunatne i pyłowe oglejone, pseudooglejone gleby oraz mady o składzie glin ciężkich i pyłów ilastych [Dynowska, Maciejewski 1991].

W strukturze użytkowania obszaru zlewni przeważają lasy, zajmując 43% powierzchni zlewni. Łąki i użytki zielone stanowią 25,6%, a grunty orne 23,8% powierzchni zlewni. Obszary zurbanizowane i nieużytki rolne stanowią około 7,6% powierzchni zlewni.

## 2.2. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH STAWÓW RYBNYCH

Badania wykonano na czterech stawach rybnych użytkowanych przez gospodarstwa rybackie hodujące karpie. Stawy te zasilane są wodami ze zlewni różnych rzek, o odmiennych cechach fizjograficznych, co jest przyczyną zróżnicowania ilości oraz cech fizycznych zawieszin doprowadzanych wraz z wodą do stawów (zależnie od tego, czy doprowadzenie to jest bezpośrednie czy też przez doprowadzalniki). Charakterystykę badanych stawów przedstawia tabela 2.

**Tabela 2.** Charakterystyka badanych stawów rybnych  
**Table 2.** Characteristics of studies fish ponds

Nazwa stawu Name of the pond	Powierzchnia stawu Pond surface [ha]	Rzeka zasilająca Tributary	Długość doprowadzalnika Length of supply channel [m]	Średnica rury doprowadzającej Diameter of the supplying pipe [m]	Użytkownik User
„Dwójka”	3,75	Rudawa	170	0,45	Rybacka Stacja Doświadczalna UR w Krakowie
„Bez nazwy”	2,10	Wisła	1000	0,20	Zakład Ichtibiologii PAN W Gołyszcu
„Nierodek	2,15	Hłownica	600	0,30	Instytut Zootechniki w Grodźcu
„Topolowy”	0,60	Szreniawa	zasilanie bezpośrednio z rzeki supplied directly by the river	0,20	Państwowe Gospodarstwo Rybackie w Pławowicach

Średnia głębokość stawów rybnych waha się od 1,4 m do 1,6 m, a objętość zgromadzonej w nich wody od 9 do 56 tys. m<sup>3</sup>, co pokazuje tabela 3.

**Tabela 3.** Podstawowe parametry badanych stawów rybnych  
**Table 3.** Basic parameters of studied fish ponds

Nazwa stawu Pond name	Powierzchnia stawu Pond surface [ha]	Średnia głębokość stawu Average pond depth [m]	Objętość stawu Pond capacity [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]
„Dwójka”	3,75	1,5	56,2
„Bez Nazwy”	2,1	1,4	29,4
„Nierodek	2,15	1,6	34,4
„Topolowy”	0,60	1,5	9,0

Wszystkie badane stawy zalewane są wodą na przełomie marca i kwietnia, a ryby odławiane są w październiku. Zalewanie stawów trwa zazwyczaj cztery do pięciu dni, ze względu na dogodne warunki dostępu do wody, bywają bowiem takie stawy, w których woda do zalewania pochodzi ze spływów wód gruntowych, wód roztopowych i wówczas gromadzenie wody przed zarybieniem stawu trwać może kilka tygodni. We wszystkich badanych stawach, tak zwanych stawach towarowych, zarybianych narybkiem na „handlówkę”, hodowano karpie w tym samym stadium rozwoju. Obsada stawów oraz intensywność karmienia ryb były analogiczne, tj. około 1000–1200 ryb na hektar stawu, karmienie co drugi dzień paszą zbożową, kukurydzą lub śrutą pokarmową zawsze w tych samych, wydzielonych, miejscach stawu. Przez cały okres hodowlany do stawów dopływała świeża woda rzeczna, ze względu na ubytki wody przez jej parowanie i przesiąki przez groble stawowe, a także ze względu na konieczność zapewnienia dla życia ryb niezbędnej ilości tlenu. W okresie badań mierzono ilość wody wpuszczanej do stawu oraz jej zmącenie. Należy zaznaczyć, że wloty do stawów są jednak zamykane w okresach przejścia wód wezbraniowych w rzekach zasilających, co ma istotne znaczenie, gdyż eliminuje nadmierne wypływanie stawów [Madeyski 1998].

### 3. POMIARY I PROGNOZA ZAMULANIA MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH

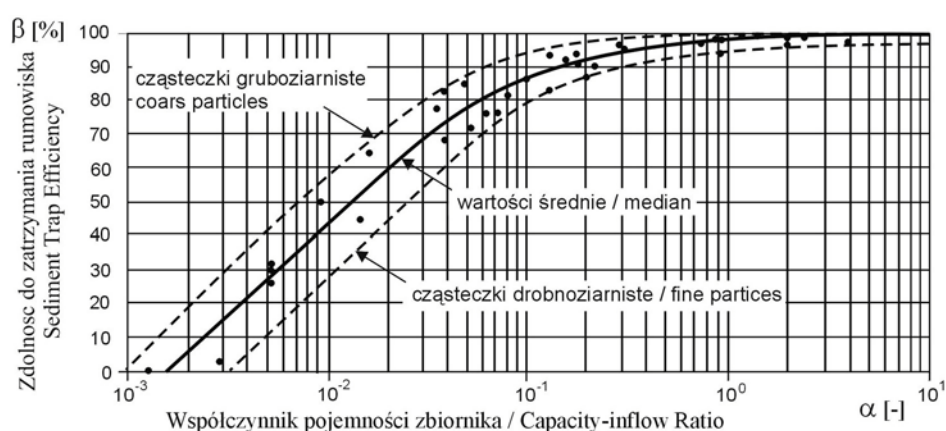
Zasadniczym czynnikiem ograniczającym prawidłową eksploatację zbiorników wodnych jest zamulanie, powodujące redukcję ich pojemności. Według Hartunga [1959] zbiornik nie spełnia już swojej funkcji, jeżeli jego pojemność zostanie zmniejszona o 80%. Stąd istotne jest posiadanie informacji dotyczącej żywotności istniejącego lub projektowanego zbiornika. Umożliwi ona zaplanowanie prac renowacyjnych polegających, między innymi na odmuleniu zbiornika, umożliwiając racjonalną eksploatację obiektu.

Według obowiązujących „Wytycznych instruktażowych” [Wiśniewski, Kutrowski 1973], dotyczących prognozy zamulenia zbiorników wodnych, w pierwszym etapie wykonuje się prognozę wstępną, traktowaną jako szacunkową, a następnie przeprowadza się prognozę szczegółową. Prognoza wstępna zamulania zbiorników wymaga określenia trwałej zdolności projektowanego zbiornika do zatrzymywania rumowiska unoszonego, oznaczanej jako parametr  $\beta$  i nazywanej również zdolnością akumulacyjną rumowiska lub współczynnikiem akumulacji rumowiska. Zdolność akumulacyjna rumowiska określa jaką część dopływającego rumowiska do zbiornika zostanie w nim trwale zatrzymana. Ustalenie tej zdolności na podstawie bilansu transportu rumowiska wymaga określenia objętości zamulonej zbiornika wodnego i ilości rumowiska do niego dopływającego. Intensywność transportu rumowiska można określić metodą bezpośrednią lub pośrednią. Znając średnią roczną objętość rumowiska dopływającego do zbiornika, można za pomocą wyznaczonej zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska określić przybliżone średnie roczne zamulenie. Trudność stwarza wyznaczenie zdolności akumulacyjnej rumowiska małych zbiorników wodnych. Określenie wartości  $\beta$  małych zbiorników retencyjnych według istniejących metod często jest niemożliwe lub jest obciążone znacznym błędem. Według „Wytycznych instruktażowych...” [Wiśniewski, Kutrowski 1973] zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska należy wyznaczać z nomogramu Łopatina. W polskiej praktyce inżynierskiej stosowany jest również nomogram Brune’a (rys. 2) [Łajczak 1995].

Nomogramy Łopatina i Brune’a przedstawiają związek parametru  $\beta$  i współczynnika pojemności zbiornika ( $\alpha$ ) określającego czas zatrzymywania



wody w zbiorniku. Współczynnik ten wyznaczany jest jako stosunek pojemności zbiornika do objętości średniego rocznego dopływu wody do zbiornika. Drozd [Dąbkowski i in. 1982] przedstawił zależność zdolności akumulacyjnej zbiornika w funkcji współczynnika pojemności, z uwzględnieniem wielkości ziaren rumowiska dostarczanego do zbiorników. Metoda Drozda została opracowana na podstawie badań zbiorników typu jeziorowego obszarów równinnych Ukrainy. Pomimo to jest ona powszechnie stosowana w pracach projektowych, dotyczących zbiorników zlokalizowanych na terenie Polski.

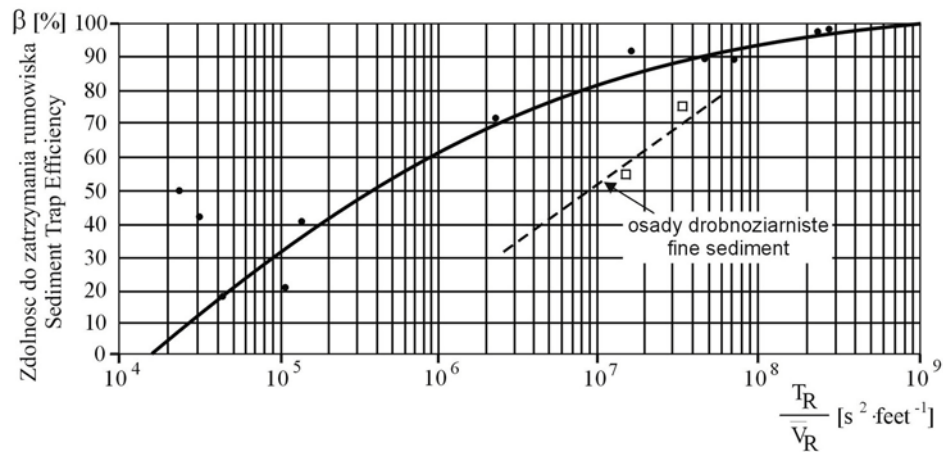


**Rysunek 2.** Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska według Brune'a  
**Figure 2.** Sediment trap efficiency of water reservoir according to Brune

Spośród innych wskaźników można wymienić współczynnik będący stosunkiem pojemności zbiornika do powierzchni zlewni, wykorzystany w metodzie Brune'a-Allena i Browna [Heinemann 1984]. Karaušev [Dąbkowski i in. 1982] przedstawił natomiast zdolność akumulacyjną zbiornika w zależności od uziarnienia i charakterystyki rumowiska unoszonego dostarczanego do zbiornika. Churchill [Heinemann 1984] uzależnił zdolność do trwałej retencji rumowiska od współczynnika określanego jako stosunek czasu zatrzymania wody w zbiorniku do średniej prędkości przepływu wody w zbiorniku (rys. 3).

Gay [Heinemann 1984] uzależnia parametr  $\beta$  od prędkości opadania ziaren rumowiska (*settling velocity*) i czasu zatrzymania wody w zbiorniku. Kolejne prace badawcze nad zdolnością akumulacyjną zbiornika wprowadzają dodatkowe wskaźniki, coraz częściej uwzględniając jeden z zasadniczych, jakim jest wielkość ziaren dostarczanego rumowiska. Są to na przykład opracowania Dendy'ego [1974], Chena [1975], Curtisa i McCuena, Warda, Haana i Barfielda [Heinemann 1984] dotyczące parametru  $\beta$ , w których uwzględniony został

wpływ wielkości dopływu wody do zbiornika, pojemności zbiornika i wielkości odpływu.



**Rysunek 3.** Zdolność zbiornika wodnego do trwałej retencji rumowiska według Churchill, gdzie:  $T_R$  – czas zatrzymania wody w zbiorniku [s];  $\bar{V}_R$  – średnia prędkość przepływu wody przez zbiornik [ $s^2 \cdot \text{feet}^{-1}$ ] ( $1 s^2 \cdot \text{feet}^{-1} = 3,2808 s^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )

**Figure 3.** Sediment trap efficiency of water reservoir according to Churchill, where:  $T_R$  – time of water retention in reservoir [s];  $\bar{V}_R$  - mean flow velocity in reservoir [ $s^2 \cdot \text{feet}^{-1}$ ] ( $1 s^2 \cdot \text{feet}^{-1} = 3,2808 s^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )

Cytowane opracowania zezwalają na ustalenie wartości parametru  $\beta$  w zależności od odpowiedniego wskaźnika. Znajomość zdolności do trwałej retencji materiału unoszonego i średniej rocznej dostawy rumowiska do zbiornika umożliwia określenie średniego rocznego zamulenia zbiornika. Wielkość osadów określona dla rozpatrywanego okresu, na podstawie ustalonego parametru  $\beta$ , zakłada niezmienność zdolności do trwałej retencji materiału unoszonego w kolejnych latach analizowanego okresu. Na podstawie przeprowadzonych prac polskich badaczy [Wiśniewski, Kutrowski 1972; Łajczak 1994] stwierdzono, że w przypadku dużych zbiorników wodnych uzyskane wyniki obliczeń można potraktować jako poprawne, gdyż wartość parametru  $\beta$  nie ulega redukcji lub zmniejsza się zaledwie o kilka procent w ciągu kilkudziesięciu lat eksploatacji.

Spośród wymienionych metod służących wyznaczeniu zdolności zbiornika do trwałej retencji materiału unoszonego najczęściej stosowane są w Polsce metody Łopatina, Brune'a i Hartunga. Dysponując danymi dotyczącymi wielkości zamulenia zbiornika i wielkości transportu rumowiska do niego dostarczanego, można wyznaczyć rzeczywistą jego zdolność do trwałej retencji rumowi-

ska unoszonego. Zdolność ta określona jest jako stosunek całkowitej objętości rumowiska unoszonego zatrzymanego w zbiorniku ( $R_z$ ) w rozpatrywanym okresie i całkowitej objętości rumowiska unoszonego doprowadzonego do zbiornika ( $\Sigma R$ ) w tym samym okresie:

$$\beta_{rz} = 100 \cdot R_z / \Sigma R \quad [\%] \quad (1)$$

Małe zbiorniki retencyjne charakteryzują często niską wartością współczynnika pojemności. Niejednokrotnie jest ona niższa od 1,5% [Michalec 2003a]. Określona zdolność akumulacyjna rumowiska, dla tak niskich wartości współczynnika pojemności, wynosi od kilku czterdziestu procent [Bednarczyk, Michalec 2001, 2002].

Według „Wytycznych instruktażowych” prognozę szczegółową zamulania zbiornika wodnego należy opracować stosując formułę Gončarova [Wiśniewski, Kutrowski 1973]:

$$Z_t = V_p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{R_1}{V_p} \right)^t \right] \quad (2)$$

gdzie :

- $Z_t$  – objętość odkładów [ $m^3$ ] po upływie „t” lat,
- $V_p$  – początkowa pojemność zbiornika [ $m^3$ ],
- $R_1$  – objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji [ $m^3$ ],
- t – czas eksploatacji.

Formuła ta, jak większość metod empirycznych, spośród których można wymienić metody Šamova i Łapszenkova, bazuje na wzorze Ortha [Bogárdi 1974].

Określenie zamulonej objętości zbiornika ( $V_z$ ) po „t” latach eksploatacji według wzoru Šamova [1959] wymaga określenia końcowej objętości odkładów w zbiorniku ( $V_k$ ) po wykształceniu w nim nowego koryta rzeki, a także ustalenia objętości odkładów rumowiska po pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ):

$$V_z = V_k \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{R_1}{V_k} \right)^t \right] \quad (3)$$

Otrzymanie właściwych wyników obliczeń prognozujących zamulenie według wzoru Gončarova (2) i Šamova (3) uzależnione jest od poprawnego wyznaczenia objętości odkładów rumowiska po pierwszym roku eksploatacji  $R_1$ .

Objętość tę można wyznaczyć ze wzoru:

$$R_1 = \frac{\beta \cdot R_u}{\rho_0} \quad (4)$$

gdzie:

- $R_u$  – średnia roczna masa rumowiska dopływająca do zbiornika [t],
- $\beta$  – zdolność zbiornika do trwałego zatrzymywania rumowiska [-],
- $\rho_0$  – gęstość objętościowa osadów [ $t \cdot m^{-3}$ ].

Łapszenkov opracował natomiast wzór umożliwiający obliczenie objętości odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym ( $Z_t$ ) po upływie „t” lat eksploatacji, uwzględniając charakterystykę zamulania zbiornika, określaną na podstawie średniej rocznej koncentracji rumowiska w wodzie wpływającej do zbiornika i z niego wypływającej. Wzór Łapszenkova ma postać:

$$Z_t = V_n \left[ 1 - e^{-\frac{t}{E}} \right] \quad (5)$$

gdzie:

- $Z_t$  – objętość odkładów [ $m^3$ ] po upływie „t” lat,
- $V_n$  – pojemność „zamuleniowa” zbiornika [ $m^3$ ], równa różnicy pojemności początkowej zbiornika ( $V_p$ ) i objętości koryta rzeki w obrębie zbiornika ( $V_{rz}$ ),
- $E$  – charakterystyka zamulania zbiornika obliczana ze wzoru:

$$E = \frac{V_n}{\varepsilon \cdot R_1} \quad (6)$$

w którym:

$$\varepsilon = \frac{\rho_0 - \rho'}{\rho_0} \quad (7)$$

gdzie:

- $\rho_0$  – średnia roczna koncentracja rumowiska unoszonego w wodzie wpływającej do zbiornika [ $g \cdot m^{-3}$ ],
- $\rho'$  – średnia roczna koncentracja rumowiska unoszonego w wodzie wypływającej ze zbiornika [ $g \cdot m^{-3}$ ].

W prognozie zamulenia pomocnym może być wyznaczenie intensywności zamulania, wyrażonej wielkością średniej rocznej objętości rumowiska okładanej w zbiorniku. Na podstawie intensywności zamulania można oszacować wielkość odkładów w rozpatrywanym przedziale czasu. Intensywność zamulania wyznaczyć można za pomocą wzorów Schoklitscha [1956] i Piečinoва [1968] lub za pomocą średniego rocznego stopnia zamulenia.

Obliczenie średniej rocznej objętości rumowiska (R), zatrzymanego w zbiorniku według formuły Schoklitscha, wymaga określenia powierzchni przekroju poprzecznego zbiornika w jego części cofkowej ( $F_1$ ) i przekroju poprzecznego najbliższej zapory ( $F_2$ ) oraz średniej rocznej objętości rumowiska (T) dopływającego do zbiornika. Wzór Schoklitscha [1956] ma postać:

$$R = T \cdot \left[ 1 - \left( \frac{F_1}{F_2} \right)^{0,33} \right] \quad (8)$$

Piećinow [1968] określił natomiast zależność umożliwiającą obliczenie średniej rocznej objętości rumowiska (R) zatrzymanego w zbiorniku, uwzględniającą początkową pojemność zbiornika ( $V_p$ ), średnie zmaczenie dopływającej wody (p) i współczynnik pojemności zbiornika ( $\alpha$ ), charakteryzujący wyrównanie przepływu przez zbiornik. Wzór Piećinowa [1968] ma postać:

$$\frac{R}{V_p} = \frac{9,3}{10^3} \frac{p^{0,94}}{(\alpha)^{0,85}} \quad (9)$$

Stopień zamulenia zbiornika określane jest jako stosunek objętości rumowiska zatrzymanego, do pojemności początkowej zbiornika i najczęściej wyrażany jest w procentach. Określenie średniego rocznego stopnia zamulenia możliwe jest na podstawie pomiarów zamulania.

Wyniki badań zamulania kilkunastu małych zbiorników retencyjnych, położonych w dorzeczu Górnej Wisły, umożliwią scharakteryzowanie przebiegu procesu zamulania oraz dokonane oceny możliwości prognozowania zamulania za pomocą wzorów empirycznych.

### 3.1. METODYKA BADAŃ ZAMULANIA

Objętość odkładów rumowiska w zbiornikach została określona na podstawie pomiarów wielkości zamulenia, wykonanych z łodzi przy użyciu sondy drążkowej lub echosondy Hummin Bird 1000. Pomiarów wykonywano w przekrojach poprzecznych oraz metodą punktów rozproszonych. Dokładność pomiarów wysokości dna wynosiła  $\pm 3$  cm i odpowiadała grubości stopki sondy drążkowej, zapobiegającej wbiciu w warstwę osadu, co zgodnie z założeniami metodycznymi podanymi przez Rauscha i Heinemanna [1984] odpowiada dokładności pomiarów zmian wysokości dna. Wyniki pomiarów głębokości w zbiornikach zostały naniesione na powykonawcze przekroje poprzeczne. Następnie określono powierzchnie odkładów w przekrojach i znając odległości pomiędzy kolejnymi przekrojami określono objętość odkładów w zbiorniku.

W trakcie pomiarów zamulenia pobrano próby osadów dennych. Próby pobrano w części przyzaporowej, środkowej i cofkowej każdego zbiornika.

W każdym z punktów pobierano próbę z powierzchni osadów (warstwa górna) i z głębokości około 0,4 m pod powierzchnią osadów (warstwa dolna). Na podstawie analiz sześciu prób określono skład granulometryczny i średnią arytmetyczną gęstość objętościową osadów dennych.

### 3.2. OCENA INTENSYWNOŚCI ZAMULANIA

Wyniki pomiarów zamulania zbiorników retencyjnych Krempna, Rzeszów, Zesławice, Maziarnia, Głuchów, Brzózka Stadnicka, Brzózka Królewska, Ożanna, Niedźwiadek, Wapienica, Cedzyna i Cierpisz umożliwiły określenie stopnia zamulania (tab. 4).

Badane zbiorniki wodne charakteryzują się intensywnym zamulaniem w porównaniu do średnich i dużych zbiorników zaporowych w Polsce. Jak podaje Cyberski [1970], największą redukcją pojemności charakteryzują się zbiorniki karpackie, a średnie roczne tempo zamulania średnich i dużych zbiorników wybudowanych w Polsce mieści się w przedziale 0,02–0,58% [Łajczak 1995]. Wartość średniego rocznego stopnia zamulenia, wynosząca 0,58%, dotyczy zbiornika wodnego w Rożnowie. Łajczak [1995] podaje, że zbiornik ten do 1990 roku, tj. po blisko 50 latach pracy, utracił 28% początkowej objętości.

Pomimo wysokich wartości średniego rocznego stopnia zamulenia badanych zbiorników wodnych, nie mogą one zostać sklasyfikowane według kryterium podanego przez Hartunga [1959]. Spowodowane jest to znacznym zróżnicowaniem wartości średniego rocznego stopnia zamulenia  $\bar{S}_z$  (tab. 4), które wynoszą od 0,06% (zbiornik Wapienica) do 6,38% (zbiornik Brzózka Stadnicka). Natomiast według Hartunga [1959], średnia roczna strata pojemności wynosi dla zbiorników dużych 0,25%, dla zbiorników średnich 0,5%, a dla małych 3,0%.

Wzrastająca wartość stopnia zamulenia zbiorników w poszczególnych latach eksploatacji, w których wykonano pomiary zamulenia, przedstawia przyrost objętości zamulonej zbiorników w czasie. Na podstawie stopnia zamulenia można określić wielkość zamulenia zbiornika i stwierdzić jaka jego część objętości została wyłączona z eksploatacji. Wzrastająca objętość odkładów rumowiska jest zasadniczym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie gospodarcze zbiorników. Według Hartunga [1959] stopień zamulenia wynoszący 80% jest wartością, powyżej której zbiornik wodny nie spełnia swojej funkcji. Na podstawie danych w tabeli 2 i średniego rocznego stopnia zamulenia można stwierdzić, przyjmując w dużym uproszczeniu proporcjonalny w czasie przebieg zamulania, że zbiorniki o wysokim średnim rocznym stopniu zamulenia zostaną zamulone w 80% w bardzo krótkim czasie. Najwyższym stopniem zamulenia charakteryzują się zbiorniki retencyjne Brzózka Stadnicka i Rzeszów, a ich zamulenie wynoszące 80% zostanie osiągnięte po odpowiednio 16. i ponad 12. latach eksploatacji. Najwolniej natomiast zamulany jest zbiornik Wapienica. Zostanie on zamulony w 80% po upływie okresu znacznie dłuższego niż 1000 lat.

**Tabela 4.** Objętość odkładów rumowiska i stopień zamulenia badanych zbiorników w poszczególnych latach eksploatacji**Table 4.** Volume of deposited sediment and silting ratio of the studied reservoirs in individual years of operation

Zbiornik Reservoir	Pojemność pierwotna Initial capacity [m <sup>3</sup> ]	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operation	Objętość zamulenia Volume of deposits [m <sup>3</sup> ]	Stopień zamulenia S <sub>z</sub> [%]	Średni roczny stopień zamulenia Mean annual silting ratio $\bar{S}_z$ [%]
Krempna	119 100	1986	15	35 665	29,95	2,00
	112 000	1996	9	27 041	24,14	
		1997	10	30 464	27,20	
		1998	11	34 637	30,93	
		1999	12	38 002	33,93	
		2000	13	40 144	35,84	
		2002	15	44 200	39,46	
		2003	16	44 901	40,09	
Zesławice	228 000	1968	2	26 968	11,83	3,00
		1969	3	70 425	30,89	
		1970	4	75 780	33,24	
		1971	5	76 251	33,44	
		1974	8	86 192	37,80	
		1983	17	116 091	50,92	
Maziarnia	3 860 000	1999	10	504 876	13,08	1,16
		2002	13	609 600	15,79	
		2003	14	625 300	16,20	
Rzeszów	1800 000	1986	13	1 188 000	66,00	5,07
Głuchów	22570	2002	7	4126	18,28	2,61
Brzóza Stadnicka	5150	2002	7	2300	44,66	6,38
Brzóza Królewska	48970	2002	17	4184	8,54	0,50
Ożanna	252 000	1998	20	26 000	10,32	0,48
		2003	25	30 206	11,99	
Niedźwiadek	124 500	2003	5	3214	2,58	0,52
Wapienica	1 100 000	1967	36	24 250	2,20	0,06
		2003	71	46 800	4,25	
Cierpisz	34500	1990	34	15 000	43,48	1,25
		2001	11	6100	17,68	1,50
		2003	13	6745	19,55	
Cedzyna	1 550 000	1999	26	145 000	9,35	0,36
		2003	30	168 500	10,87	

### 3.3. OKREŚLENIE ZDOLNOŚCI MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH DO ZATRZYMANIA RUMOWISKA

Zdolność do zatrzymywania rumowiska zbiorników retencyjnych: Krempna, Maziarnia, Wapienica i Cierpisz wyznaczono z nomogramów Łopatina [Wiśniewski, Kutrowski 1973], Brune'a [1953], Drozda [Dąbkowski i in. 1982], Brune'a i Allena, Browna, Gottschalka [Batuca, Jordaan 2000] i Churchilla [Heinemann 1984]. W celu oceny poprawności wyznaczenia wartości  $\beta$  z nomogramów i wzorów obliczono rzeczywistą zdolność do zatrzymywania rumowiska badanych zbiorników wodnych. W tym celu określono ilość rumowiska dopływającego do wymienionych zbiorników retencyjnych. Ilość tę dopływającą do zbiorników Krempna, Maziarnia, znajdujących się na ciekach objętych obserwacjami hydrologicznymi, określono według danych hydrologicznych tj. przepływu średniego dobowego ( $Q$ ) i odpowiadającej mu koncentracji rumowiska unoszonego, określonej w punkcie stałego poboru próby wody ( $P_p$ ). Obliczenia transportu zostały przeprowadzone według „Wytycznych do opracowania materiałów rocznikowych z zakresu rumowiska unoszonego” [Fal 1968] i metodyki przedstawionej przez Brańskiego [1968]. Przeprowadzono je według tzw. metody normalnej. Brakujące dane złączenia uzupełniono, wykorzystując opracowane zależności koncentracji rumowiska unoszonego w funkcji przepływu. Metoda normalna oparta jest na obliczeniu codziennej wartości unoszenia  $U_i$  [ $g \cdot s^{-1}$ ], będącej iloczynem codziennych wartości złączenia  $P_p$  [ $g \cdot m^{-3}$ ] 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:

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

gdzie:

- R – transport rumowiska [Mg],
- t – ilość dni w miesiącu.

Na podstawie uzyskanych wartości unoszenia  $U_i$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ], będących iloczynem natężenia przepływu w rzece i koncentracji rumowiska, obliczono transport dobowy, miesięczny i roczny w rozpatrywanym okresie obserwacyjnym.

Ilość transportowanego rumowiska można również określić tzw. metodą uproszczoną, skracającą zdecydowanie czas obliczeń [Opracowanie wyników... 1982]. Przy stosowaniu metody uproszczonej 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 tzw. metody normalnej są znacznie zaniżone w stosunku do wyników obliczeń wykonanych na podstawie zagęszczonych pomiarów złączenia [Froehlich 1975].



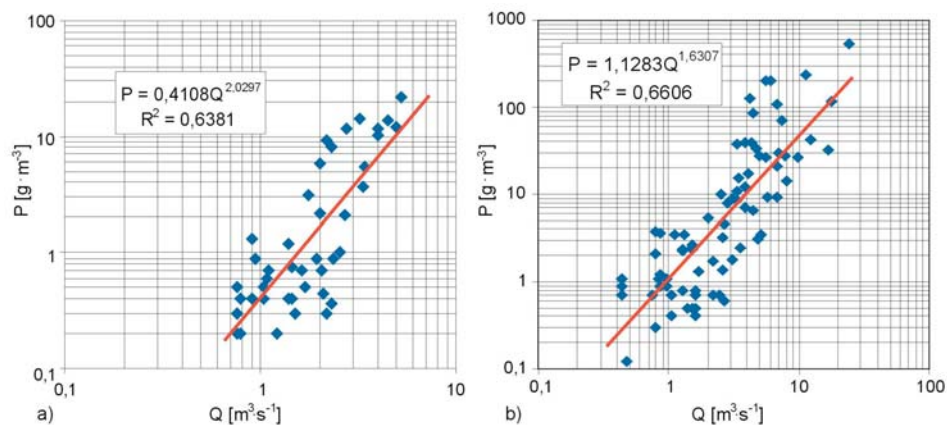
Stosowanie powyższych metod obliczeniowych wymaga znajomości koncentracji rumowiska unoszonego i natężenia przepływu z każdego dnia z godz. 7<sup>00</sup> [Łajczak 1989]. Brakujące wartości koncentracji rumowiska unoszonego uzupełnia się metodą interpolacji. Łajczak podaje przetestowane metody interpolacji 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], jak i Gładki i Madeyski [1975] stwierdzają, że metoda normalna i uproszczona dają wyniki obliczeń znacznie zaniżone w stosunku do uzyskanych na podstawie zagęszczonych pomiarów zmaczenia.

Uwzględniając zmienność natężenia procesów erozyjnych w ciągu roku wydzielono, zgodnie z metodyką podaną przez Bednarczyka [1994] następujące sezony hydrologiczno-meteorologiczne: wiosennych roztopów, letnich deszczy ulewnych, jesiennych niżówek i zimy. Wykreślone krzywe zależności  $P_p = f(Q)$  dla każdego z tych sezonów posłużyły określeniu ilości unoszonego rumowiska przy braku obserwacji batymetrycznych. Przykładowe zależności  $P_p = f(Q)$ , opracowane dla przekroju pomiarowego w rzece Wisłoce, zamieszczono na rysunku 4.

W obliczeniach transportu rumowiska unoszonego, opartych na punktowych pomiarach batymetrycznych, uwzględniono koncentrację rumowiska w całym przekroju poprzecznym rzeki. Jednak punktowy pomiar batymetryczny koncentracji rumowiska unoszonego nie jest reprezentatywny i nie przedstawia rzeczywistej koncentracji w całym przekroju poprzecznym rzeki. Pomiar koncentracji rumowiska w przekrojach poprzecznych rzek, będących dopływami do zbiorników wodnych Krempna i Maziarnia, wykonano na różnych głębokościach wyznaczonych pionów hydrometrycznych w przekroju wodowskazowym. Koncentrację rumowiska unoszonego pomierzono przyrządem fotooptycznym Portable Suspended Solids and Turbidity Monitor System 770 firmy Partech.



**Rysunek 4.** Zależności funkcyjne przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska unoszonego w wydzielonych sezonach hydrologiczno-meteorologicznych w przekroju pomiarowym w rzece Wisłoce; a) sezon jesiennych niżówek, b) sezon letnich deszczy nawalnych

**Figure 4.** Functional dependencies for mean daily flows and corresponding suspended sediment concentrations in separate hydrological and meteorological seasons in gauging-section in River Wisłok; a) autumn low discharges of flow, b) summer heavy rainfalls

Na podstawie wyników pomiarów koncentracji rumowiska unoszonego w całym przekroju pomiarowym rzek badanych zbiorników ustalono współczynniki korekcyjne „k”, będące ilorazem średniej koncentracji rumowiska unoszonego w profilu poprzecznym rzeki ( $P_m$ ) i koncentracji rumowiska unoszonego w miejscu stałego poboru próby ( $P$ ). Współczynniki „k”, określone dla przekrojów pomiarowych w rzece Wisłoce (zbiornik Krempna) i w rzece Łęg (zbiornik Maziarnia), wynoszą odpowiednio 0,906 i 1,148. Przykładową zależność przedstawiono na rysunku 5.

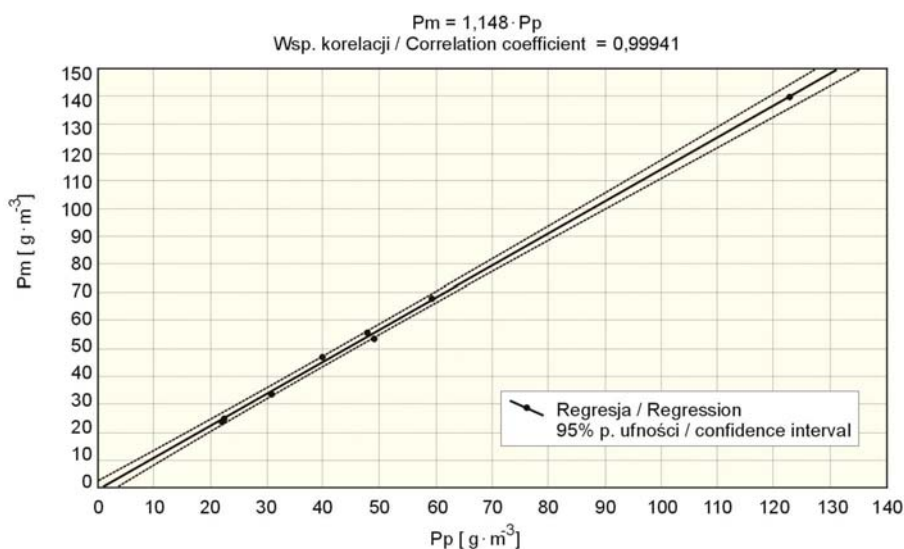
Ilość rumowiska unoszonego dopływającego do zbiorników retencyjnych Wapienica i Cierpisz, ze względu na brak danych hydrologicznych, określono metodą DR-USLE. Metoda DR-USLE umożliwia obliczenie średniej rocznej ilości rumowiska transportowanego przez rzekę poprzez uwzględnienie wielkości dostawy do koryta rzecznej produktów erozji w zlewni, obliczonej równaniem USLE [Wischmeier, Smith 1965]:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot C \cdot S \cdot P \quad (11)$$

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 [ $\text{Je} \cdot \text{rok}^{-1}$ ],  
 K – podatność gleby na erozję [ $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Je}^{-1}$ ],  
 L – bezwymiarowy współczynnik długości zbocza,  
 C – bezwymiarowy współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania,  
 S – bezwymiarowy współczynnik spadku zbocza,  
 P – bezwymiarowy współczynnik zabiegów przeciwoerozyjnych.



**Rysunek 5.** Zależność regresyjna pomiędzy koncentracją zmaczenia w przekroju ( $P_m$ ) a koncentracją zmaczenia w punkcie ( $P_p$ ) ustalona dla rzeki Łęg

**Figure 5.** Regression relation between concentration of suspended sediment in section ( $P_m$ ), and concentration of suspended sediment in point ( $P_p$ ), established for the River Łęg

Ilość produktów erozji dostarczana do koryta rzecznego została wyznaczona za pomocą parametru DR (*delivery ratio*) według Roehla [1962]. Średnia roczna masa rumowiska dopływającego do zbiorników Wapienica i Cierpisz, określona za pomocą równania DR-USLE, wynosi odpowiednio  $691,1 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$  i  $559,8 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

Zdolność do zatrzymywania rumowiska zbiorników retencyjnych: Krempana, Maziarnia, Wapienica i Cierpisz wyznaczoną z nomogramów zamieszczono w tabeli 5. Wartości  $\beta$  z nomogramów Łopatina, Brune'a i Drozda zostały wyznaczone dla obliczonych współczynników pojemności zbiorników  $\alpha$  (tab. 1). Wartości  $\beta$  z nomogramów Brune'a i Allena, Browna i Gottschalka wyznaczone dla obliczonych współczynników zlewniowych zbiorników C/W, będących ilo-

czynami pojemności zbiornika C i powierzchni zlewni W. Współczynniki zlewniowe badanych zbiorników retencyjnych wynoszą:  $678 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$  – zbiornik Krempna,  $16\,567 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$  – zbiornik Maziarnia,  $633 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$  – zbiornik Wapienica,  $19\,809 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$  – zbiornik Cierpisz. Zdolność do zatrzymywania rumowiska z nomogramu Churchilla wyznaczono w funkcji wskaźnika sedymentacji, będącego stosunkiem czasu zatrzymywania wody w zbiorniku do średniej prędkości przepływu wody przez zbiornik. Wskaźnik sedymentacji badanych zbiorników wynosi:  $2,3 \cdot 10^6 \text{ s}^2 \cdot \text{feet}^{-1}$  – zbiornik Krempna,  $4,3 \cdot 10^8 \text{ s}^2 \cdot \text{feet}^{-1}$  – zbiornik Maziarnia,  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ s}^2 \cdot \text{feet}^{-1}$  – zbiornik Wapienica,  $6,9 \cdot 10^6 \text{ s}^2 \cdot \text{feet}^{-1}$  – zbiornik Cierpisz.

**Tabela 5.** Zdolność zbiorników do zatrzymywania rumowiska ( $\beta$ ) ustalona metodami empirycznymi

**Table 5.** Sediment trap efficiency of reservoirs ( $\beta$ ) established by empirical methods

Zbiornik Reservoir	Zdolność zbiorników do zatrzymywania rumowiska unoszonego [%] wg Sediment trap efficiency [%] according to						
	Łopatin	Brune	Drozd	Brune-Allen	Brown	Gottschalk	Churchill
Krempna	24,0	16,5	–	2,5	12,5	5,1	69,3
Maziarnia	91,0	84,8	87,0	11,0	77,7	75,0	97,0
Wapienica	77,0	67,7	75,0	13,0	80,6	79,0	100,0
Cierpisz	15,0	12,0	–	2,4	11,7	5,0	77,7

Poprawność oznaczenia wartości  $\beta$  można ocenić jedynie przez porównanie jej z rzeczywistą wartością ( $\beta_{rz}$ ) [Michalec 2004]. Określenie rzeczywistej zdolności do zatrzymywania rumowiska badanych czterech zbiorników retencyjnych wymaga dysponowania objętością rumowiska dopływającego i zatrzymanego w pierwszym roku eksploatacji. Ze względu na brak pomiarów w pierwszych latach eksploatacji, wartość tę wyznaczono w sposób przybliżony, przekształcając równanie Gončarova i obliczając objętość osadów po pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ). Obliczono ją na podstawie wyników pomiarów zamulania, wykonanych w kolejnych latach eksploatacji zbiorników retencyjnych, tj. w 18. roku dla zbiornika Krempna, 14. roku dla zbiornika Maziarnia, 71. roku dla zbiornika Wapienica i w 34. roku dla zbiornika Cierpisz. Obliczona ilość dopływającego rumowiska i objętość osadów rumowiska w pierwszym roku eksploatacji zbiorników została zamieszczona w tabeli 6. Średnią gęstość objętościową osadów rumowiska określono na podstawie wyników oznaczeń sześciu prób pobranych w każdym ze zbiorników. Znajomość tej gęstości umożliwiła przeliczenie masy transportowanego rumowiska na objętość. Wartość  $\beta_{rz}$  wynosi dla zbiornika retencyjnego Krempna 77,1%, dla zbiornika Maziarnia 86,9%, dla zbiornika Wapienica 95,6%, a dla zbiornika Cierpisz 99% (tab. 6).

**Tabela 6.** Rzeczywista dolność zbiorników do zatrzymywania rumowiska -  $\beta_{rz}$ **Table 6.** Real sediment trap efficiency of reservoirs -  $\beta_{rz}$ 

Zbiornik Reservoir	$R_1$ [m <sup>3</sup> ]	Ilość transportowanego rumowiska dostarczona w pierwszym roku eksploatacji wg Amount of transported sediment delivered in first year of operation according to [t·rok <sup>-1</sup> ]		Średnia gęstość objętościowa osadu Mean mud volumetric density $\rho$ [t·m <sup>-3</sup> ]	$\beta_{rz}$ [%]
		DR-USLE	Pomiar Measurement		
Krempna	3529,5	–	5630,7	1,23	77,1
Maziarnia	52069,7	–	98866,5	1,65	86,9
Wapienica	691,1	919,1	–	1,29	95,9
Cierpisz	559,8	743,6	–	1,315	99,0

Według „Wytycznych instruktażowych” z zakresu prognozowania zamulania [Wiśniewski, Kutrowski 1973] zaleca się stosowanie nomogramu Łopatina we wstępnej prognozie zamulania. W przypadku małych zbiorników retencyjnych nomogram ten ma ograniczone zastosowanie, gdyż dotyczy on większych zbiorników spełniających następujące kryteria: wartość współczynnika pojemności zbiornika  $\alpha$  musi być większa od 0,15%, a próg części upustowej zapory powinien być wzniesiony co najmniej 10 m nad poziom dna koryta w przekroju zapory. W przypadku małych zbiorników wodnych, charakteryzujących się niskimi wartościami współczynnika pojemności (zbiornik Krempna –  $\alpha = 0,372\%$ , zbiornik Cierpisz –  $\alpha = 0,278\%$ ), określona wartość  $\beta$  z nomogramu Łopatina jest znacznie niższa od  $\beta_{rz}$ . Zdolność do zatrzymywania rumowiska zbiorników Krempna i Cierpisz, określona z nomogramu Łopatina wynosi odpowiednio: 24% i 15% (tab. 3), a obliczona  $\beta_{rz}$  wynosi odpowiednio: 77,1% i 99,0%. Ustalenie z nomogramu Drozda wartości  $\beta$  tych zbiorników okazało się niemożliwe, gdyż nie mieściły się one w przedziale podanym przez Drozda.

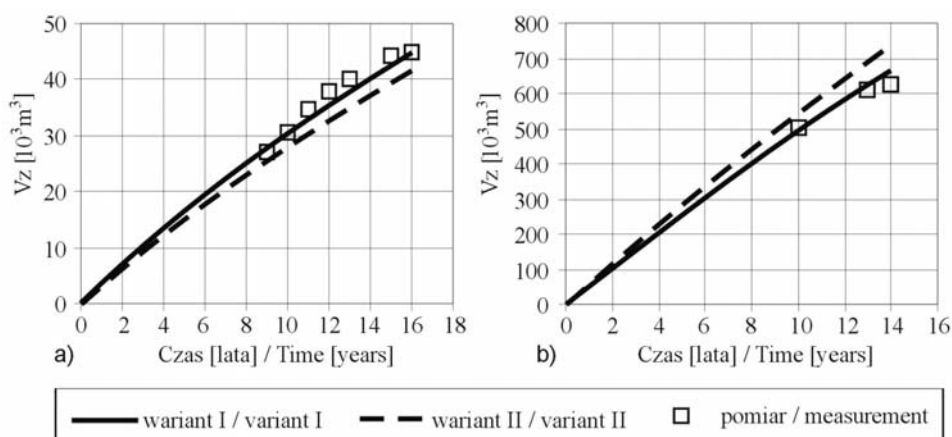
Wartości  $\beta$  określone według nomogramu Brune’a i Allena dla czterech badanych zbiorników są wielokrotnie niższe od  $\beta_{rz}$ . Podobnie jak, w przypadku nomogramu Łopatina, również stosując nomogramy Browna i Gottschalka w przypadku zbiorników Krempna i Cierpisz otrzymano niższe wartości  $\beta$  od  $\beta_{rz}$ . Jedynie metoda Churchilla umożliwia otrzymanie zbliżonych wartości  $\beta$  do wartości  $\beta_{rz}$ .

### 3.4. PROGNOZA ZAMULANIA

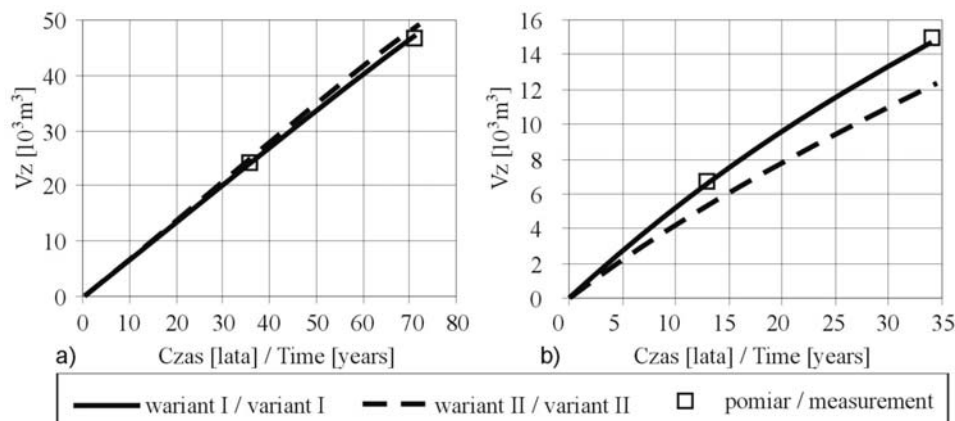
Prognozę zamulania zbiorników retencyjnych Krempna: Maziarnia, Wapienica i Cierpisz opracowano, stosując wzory Gončarova [Wiśniewski, Kutrowski 1973] Šamova [1959] i Łapszenkova [Dąbkowski i in. 1982] oraz na podstawie określonej intensywności zamulania według wzorów Schoklitscha i Piečinoва.

W prognozie zamulenia przyjęto zdolność do zatrzymywania rumowiska określoną z nomogramu Churchilla i określoną z bilansu rumowiska ( $\beta_{rz}$ ). Obliczono zatem w dwóch wariantach objętość osadów rumowiska w pierwszym roku eksploatacji zbiorników ( $R_1$ ), a wyniki obliczeń objętości osadów rumowiska porównano z wynikami pomiarów zamulenia. W wariantcie pierwszym obliczono objętość osadów rumowiska w pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ), uwzględniając rzeczywistą zdolność do zatrzymywania rumowiska ( $\beta_{rz}$ ), a w wariantcie drugim określono ją z nomogramu Churchilla. Wyniki obliczeń prognozowanego zamulenia zbiorników retencyjnych: Krempna i Maziarnia oraz Wapienica i Cierpisz przedstawiono na odpowiednio na rysunkach 6 i 7.

Prognozowana objętość osadów rumowiska w wariantcie pierwszym jest zbieżna z wynikami pomiarów zamulania. Zbieżność ta wynika z przyjęcia rzeczywistej zdolności do zatrzymywania rumowiska. W przypadku projektowanego zbiornika nie można wyznaczyć  $\beta_{rz}$ , lecz jak wynika z wykresów na rysunkach 6 i 7, przyjmując  $\beta$  z nomogramu Churchilla, można uzyskać zadowalające wyniki prognozy na podstawie drugiego wariantu. Średnia różnica wyników obliczeń objętości osadów rumowiska w wariantcie drugim i wyników pomiarów zamulania wynosi: 10,4% dla zbiornika retencyjnego Krempna, 13,0% dla zbiornika retencyjnego Maziarnia, 5,1% dla zbiornika retencyjnego Wapienica i 21,9% dla zbiornika retencyjnego Cierpisz.



**Rysunek 6.** Prognoza zamulania zbiorników: a) Krempna, b) Maziarnia  
**Figure 6.** Forecast of reservoir silting: a) Krempna, b) Maziarnia



**Rysunek 7.** Prognoza zamulania zbiorników: a) Wapienica, b) Cierpisz  
**Figure 7.** Forecast of reservoir silting: a) Wapienica, b) Cierpisz

Wzór Gončarova opisuje zamulenie w kolejnych latach w funkcji pojemności zbiornika. Šamov przedstawił natomiast formułę opisującą przyrost osadów rumowiska w funkcji końcowej objętości odkładów w zbiorniku ( $V_k$ ) po wykształceniu w nim nowego koryta rzeki. W tabeli 5 zamieszczono wyniki obliczeń objętości  $V_k$  oraz obliczonej wzorem Šamova objętości odkładów rumowiska, którą porównano z wynikami pomiarów zamulania. W obliczeniach zamulenia wzorem Šamova objętość odkładów rumowiska w pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ) obliczono jak w wariantcie drugim w metodzie Gončarova, tj. przyjmując zdolność do zatrzymywania rumowiska ( $\beta$ ), określoną z nomogramu Churchilla.

Zastosowanie wzoru Łapszenkova wymaga dysponowania średnimi rocznymi koncentracjami rumowiska unoszonego w wodzie wpływającej i wypływającej ze zbiornika. Ze względu na brak tych danych nie dokonano weryfikacji tego wzoru.

Intensywność zamulania wyznaczona ze wzorów Schoklitscha i Piečinova określa średnią roczną objętość rumowiska unoszonego odłożoną w zbiorniku. Schoklitsch określił intensywność zamulania w funkcji średniej rocznej objętości rumowiska unoszonego dostarczanego do zbiornika i w funkcji powierzchni przekroju poprzecznego zbiornika w jego części cofkowej i najbliższej profilu zapory. Obliczona intensywność zamulania według Schoklitscha wynosi:  $5396,2 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$  dla zbiornika Krempna,  $62\,625,8 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$  dla zbiornika Maziarnia,  $452,9 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$  dla zbiornika Wapienia i  $151,6 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$  dla zbiornika Cierpisz. Wyniki obliczeń zamulenia zbiorników w poszczególnych latach zamieszczono w tabeli 7.

Ograniczenie możliwości zastosowania wzoru Piečinova wynika z konieczności dysponowania średnią koncentracją rumowiska w wodzie dopływającej do zbiornika retencyjnego. Obliczeń zamulenia według wzoru Piečinova nie wykonano dla zbiorników Wapienica i Cierpisz ze względu na brak danych

pomiarowych koncentracji rumowiska w dopływach do tych zbiorników. Obliczone zamulenie wzorem Piećinova dla zbiorników Kremarna i Maziarnia, dla średniej koncentracji rumowiska wynoszącej odpowiednio:  $20,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  i  $193,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , zamieszczono w tabeli 7.

**Tabela 7.** Prognoza zamulenia zbiorników według wzorów Šamova, Schoklitscha i Piećinova

**Table 7.** Forecast of reservoir silting according to Šamov's, Schoklitsch's and Piećinov's equations

Zbiornik Reservoir	Lata eksploatacji Years of operation	Objętość zamulenia wg Volume of sediment acc. to				Różnica wyników [%] Difference of results [%]		
		Pomiar measurement $V_{Zm} [\text{m}^3]$	Šamov $V_{Zš} [\text{m}^3]$	Schoklitsch $V_{Zs} [\text{m}^3]$	Piećinov $V_{Zp} [\text{m}^3]$	$V_{Zš} / V_{Zm}$	$V_{Zs} / V_{Zm}$	$V_{Zp} / V_{Zm}$
Kremarna	15	35 665	39 217	80 943	6747	9,96	126,95	-81,08
	9	27 041	25 522	48 566	4048	-5,62	79,60	-85,03
	10	30 464	27 971	53 962	4498	-8,18	77,13	-85,24
	11	34 637	30 351	59 358	4948	-12,37	71,37	-85,71
	12	38 002	32 664	64 754	5398	-14,05	70,40	-85,80
	13	40 144	34 911	70 150	5848	-13,04	74,75	-85,43
	15	44 200	39 217	80 943	6747	-11,27	83,13	-84,74
	16	44 901	41 278	86 339	7197	-8,07	92,29	-83,97
Maziarnia	10	504 876	543 164	626 258	6794	7,58	24,04	-98,65
	13	609 600	690 596	814 135	8029	13,29	33,55	-98,68
	14	625 300	738 258	876 761	8646	18,06	40,21	-98,62
Wapienica	36	24 250	25 360	16 305	–	4,58	-32,76	–
	71	46 800	49 452	32 157	–	5,67	-31,29	–
Cierpisz	34	15 000	12 180	5154	–	-18,80	-65,64	–
	11	6100	4536	1667	–	-25,64	-72,67	–
	13	6745	5294	1971	–	-21,51	-70,78	–

Wyniki obliczeń wielkości zamulenia badanych zbiorników retencyjnych według wzorów Gončarova i Šamova, w których  $\beta$  określona została z nomogramu Churchilla, są najbliższe do uzyskanych z pomiarów. Największą zbieżność wyników obliczeń z wynikami pomiarów otrzymano w przypadku zbiornika Wapienica, natomiast wielkości zamulenia zbiornika Cierpisz są z biegiem lat coraz bardziej zaniżone (ujemne wartości różnicy wyników w tabeli 7). Obliczenie zamulenia zbiornika w Rzeszowie wzorami Šamova i Gončarova nie dają pozytywnego wyniku.

Wzory Schoklitscha, Piećinova nie znajdują zastosowania w prognozowaniu zamulenia badanych małych zbiorników retencyjnych, wskazują na to wartości różnicy wyników (tab. 7) wynoszące kilkadziesiąt procent.



## **4. JAKOŚĆ OSADÓW I MOŻLIWOŚCI ICH PRZYRODNICZEGO WYKORZYSTANIA**

Właściwości fizyczne i reologiczne decydują o możliwości i sposobie wydobycia osadów z dna, a właściwości chemiczne o ewentualnym ich przyrodniczym wykorzystaniu (ważna jest dokładna analiza obecności w osadach m.in. metali ciężkich). Badane stawy rybne położone są w okolicach Krakowa i Bielska-Białej, a zbiorniki wodne o pojemności od 60 tys. do 3,8 mln m<sup>3</sup>, które były omówione w poprzednich rozdziałach, zlokalizowane są na obszarze Małopolski i Podkarpacia. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że własności reologiczne świadczą o szybkim przebiegu procesu zagęszczania, rzędu kilku godzin do kilku dni, uniemożliwiając usunięcie osadów z dna stumieniem wody. Obciążenie osadów metalami ciężkimi jest nieznaczne, a obecność w nich mikro- i makroelementów jest korzystna dla organizmów roślinnych. W związku z tym wydobyte osady mogą być wykorzystane rolniczo pod wszystkie uprawy polowe. Dozwolone jest wzbogacenie osadami gruntów rolniczych pod uprawy roślin zbożowych, okopowych oraz użytkowanie pastwiskowe.

### **4.1. CECHY FIZYCZNE OSADÓW ZBIORNIKOWYCH I STAWOWYCH**

Rumowisko dostarczane i deponowane w zbiornikach i stawach rybnych jest niejednorodną, wielofrakcyjną mieszaniną materiału terygenicznego, którego cechy mogą być opisane różnymi charakterystykami, takimi jak wielkość i kształt ziaren, ciężar objętościowy, skład granulometryczny, koncentracja cząstek stałych, zawartość części organicznych. Wyniki badań osadów z jezior i zbiorników wskazują, że istotny wpływ na ich cechy fizyczne odgrywa czas i miejsce ich zalegania, okresowe odsłonięcie namulów spod lustra wody i wystawienie ich na działanie warunków atmosferycznych. Zwrócono uwagę na zmiany gęstości objętościowej namulów na długości zbiornika, wynikające z procesu segregacji ziarnowej oraz na zmiany tej gęstości wraz ze wzrastającą głębokością osadów, będące efektem procesu zagęszczania i konsolidacji [Tarnawski 2003].

Należy jednak pamiętać, że osady w zbiornikach (zwłaszcza osady iłowe) ulegają z czasem rozdrobieniu pod wpływem działania warstw wyższych. Naj-

większemu rozdrobieniu ulegają osady gliniaste, a znacznie mniejszemu piaszczyste [Prytkowa 1969].

Do najważniejszych czynników decydujących o ich ciężarze objętościowym należy zaliczyć skład granulometryczny, grubość warstwy osadów, głębokość z jakiej pobrano próbkę, wiek osadów i sposób eksploatacji zbiornika. Zagadnieniem tym zajmowali się liczni badacze [Heinemann 1962; Madeyski 1998; Prytkowa 1969].

Chaćatran [cyt. za Dąbkowskim i in. 1982] stwierdził na podstawie analizy 35 prób osadów pobranych z różnych głębokości, że ciężar objętościowy osadów zwiększa się wraz z głębokością oraz ze wzrostem zawartości cząstek piaszczystych o  $\Phi > 0,05$  mm. Jednakże opracowana przez niego formuła uzależnia ciężar objętościowy tylko od uziarnienia osadów i ma postać:

$$\gamma = 0,8 + 0,165R^2 \quad (12)$$

gdzie:

$\gamma$  – ciężar objętościowy [ $T \cdot m^3$ ].

$R$  – zawartość cząstek piaszczystych [-].

Z formuły tej wynika, że minimalny ciężar objętościowy może wynosić  $0,8 T \cdot m^3$ .

Heinemann [1962] uzależnił wielkość ciężaru objętościowego od głębokości, z której pobrano próbkę oraz od zawartości cząstek gliniastych o  $\Phi < 0,002$  mm:

$$\gamma = 1,688y - 0,888P + 98,8 \quad (13)$$

gdzie:

$\gamma$  – ciężar objętościowy suchego osadu [funt  $\cdot$  stopa<sup>-3</sup>].

$y$  – głębokość, z której pobrano próbkę (w stopach).

$P$  – zawartość cząstek gliniastych [%].

Formuła ta, tak jak poprzednia, nie uwzględnia zawartości cząstek organicznych.

Na podstawie wielu prób pobranych ze zbiorników o różnym sposobie eksploatacji, o różnej grubości osadów i o różnym ich wieku Lene i Koelzer [cyt. za Dąbkowskim i in. 1982] ustalili zależność osadów od ich wieku, podając formułę:

$$\rho_0 = \rho_{01} + 16 \log T \quad (14)$$

gdzie:

$\rho_0$  – gęstość masy osadów zalegających przez okres  $T$  lat [ $kg \cdot m^3$ ],

$\rho_{01}$  – gęstość masy osadów po pierwszym roku eksploatacji zbiornika [ $kg \cdot m^3$ ].

Istotne jest także określenie stopnia rozdrobnienia osadów, czyli współczynnika  $k_v$ . Uzależnia on stosunek ciężaru objętościowego na głębokości  $\gamma_y$  od ciężaru objętościowego na powierzchni osadów ( $\gamma_0$ ) przy stałych warunkach uziarnienia, od zawartości cząstek organicznych i od zasolenia. Stopień rozdrobnienia osadów oblicza się wzorem:

$$k_v = 1 + ay^x \quad (15)$$

gdzie:

- y – głębokość położenia próby [m],
- a – współczynnik równy 0,27,
- x – współczynnik zależny od uziarnienia  $d_{50}$  wyrażonego w mm:

$$x = \frac{0,064}{d_{50}^{0,27}} \quad (16)$$

Formuła (15) uwzględnia wpływ grubości warstwy i jej uziarnienia na stopień rozdrobnienia osadów.

Jeśli się uwzględni zależność (15) i (16), to formuła na określenie ciężaru objętościowego przybiera postać:

$$\gamma_y = \gamma_0 \left( 1 + ay^x \right) \quad (17)$$

co pozwala na określenie ciężaru objętościowego na głębokości y.

Prytkowa [1969] zastosowała formułę (17) do oceny materiału badawczego uzyskanego przez nią na podstawie badań zbiorników Północnego Kaukazu. Wykazała ona, że w 59 próbach na 64 badanych różnice pomiędzy danymi z pomiarów i z obliczeń nie przekraczały  $\pm 20\%$ , a większe różnice występowały tylko w przypadku prób pobranych z wierzchniej warstwy osadów. Stwierdziła też, że stopień rozdrobnienia osadów przebiega tak samo w zbiornikach dużych i małych, jeśli nie wystąpiło znaczne przesuszenie namulów. Poprzez przekształcenie formuły (15) można określić wartość średniego współczynnika rozdrobnienia osadów w całym zbiorniku. Warunkiem jest jednak, aby osad charakteryzował się jednorodnym uziarnieniem w całej warstwie. W zależności od rozkładu osadów na długości zbiornika może wystąpić następujący sposób ich rozłożenia:

- równomiernie rozłożony osad:

$$k = 1 + \frac{a}{x+1} \cdot h_{sr}^x \quad (18)$$

- nierównomiernie rozłożony osad:

$$k = 1 + \frac{a}{(x+1)^2} \cdot h_{sr\ max}^x \quad (19)$$

gdzie:

$h_{sr}$  – średnia grubość osadów w zbiorniku [cm],

$h_{sr\ max}$  – największa ze średnich grubości osadów w przekrojach [cm].

Uwzględniając formuły (18) i (19), można określić ciężar objętościowy osadów w zbiorniku dla przypadku:

– równomiernego rozkładu osadów na długości zbiornika:

$$\gamma_{sr} = \gamma_{0\ sr} \left( 1 + \frac{a}{y+1} \cdot h_{sr}^x \right) \quad (20)$$

– nierównomiernego rozkładu osadów:

$$\gamma_{sr} = \gamma_{0\ sr} \left( 1 + \frac{a}{(y+1)^2} \cdot h_{sr\ max}^x \right) \quad (21)$$

gdzie:

$\gamma_{sr}$  – średni ciężar objętościowy osadów zbiornika [ $T \cdot m^{-3}$ ],

$\gamma_{0\ sr}$  – średni początkowy ciężar objętościowy osadów [ $T \cdot m^{-3}$ ] [Bednarczyk, Madeyski 2002].

Istotną rolę w określeniu składu granulometrycznego osadów zbiornikowych i stawowych odgrywa procentowa zawartość części organicznych. Z wielu badań wynika, że zawartość ta w osadach rzecznych wynosi do 10%, ale w osadach zbiornikowych już powyżej 10%, a w osadach stawów rybnych nawet do 25% [Madeyski 1998]. Części organiczne odgrywają znaczącą rolę w łączeniu się namulów osadzanych w zbiornikach w większe flokuły i agregaty.

Wielu autorów [Van Rijn 1993, Madeyski 1998, Mokwa 2002] stwierdziło istotny wpływ zawartości materii organicznej w namulach na ich właściwości reologiczne oraz na przebieg procesu osadzania i konsolidacji. Wchodząca w skład osadów materia organiczna pochodzi z organizmów zwierzęcych, bądź roślinnych. Rozkład organizmów przyczynia się do wydłużenia czasu konsolidacji osadów, gdyż powstające pęcherzyki gazu zmniejszają ciężar osiadającej warstwy, spowalniając tym samym proces osadzania i zwiększając porowatość osadu. Warstwy świeżo osadzonych namulów z dużą zawartością materii organicznej mają większą grubość niż warstwy powstałe z osadów jej pozbawionych [Van Rijn 1993]. Żywe organizmy mogą przyczyniać się do wzmacniania struktury osadów (sklejania cząstek) lub ich osłabiania (rozpulchnianie struktury). Sklejanie cząstek gruntu przez wydzieliny żywych organizmów przyczynia się do ich biostabilizacji i zmniejsza szorstkość hydrauliczną powierzchni osa-

dów, zwiększając ich odporność erozyjną [Głowski 2000]. Zawartość materii organicznej wpływa również na koncentrację graniczną odpowiadającą pojawieniu się właściwości ciała nienewtonowskiego. Koncentracja graniczna ( $C_{V,LIM}$ ) przejścia mieszaniny z reżimu właściwości newtonowskich do nienewtonowskich wyraźnie się zmniejsza ze wzrostem ilości materii organicznej. Oznacza to, że w gruntach o dużej zawartości części organicznych pojawiają się wcześniej własności nienewtonowskiej mieszaniny. Wyniki takie otrzymał Madeyski [1998] dla badanych osadów stawów rybnych ( $O_R = 25\%$ ), określając zależność funkcyjną,  $C_{V,LIM} = f(O_R)$  z wysokim współczynnikiem korelacji ( $r = 0,95$ ). Podobny wpływ części organicznych zawartych w namule na  $C_{V,LIM}$ , stwierdzili Parzonka [1968], Parzonka i Kempniński [1991] oraz Mokwa [2002], badając osady rzeki Odry zawierające do 20% materii organicznej.

Skład granulometryczny osadów zbiornikowych i stawowych określa się najczęściej klasyczną metodą areometryczną Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego. Metoda ta oparta jest na dodatku 1,5 g bezwonnego węgla sodu ( $Na_2CO_3$ ) do roztworu zawiesiny glebowej w kolbie. Węgiel sodu działa jako deflokulant i powoduje rozbicie flokuł i agregatów na części elementarne. W związku z tym zastosowanie deflokulanta zmienia kształt krzywych uziarnienia. Jest to tym istotniejsze, że na bazie tej metody klasyfikuje się grunty na podstawie tak zwanego trójkąta Fereta. Również przebieg procesu sedymentacji cząstek stałych badany w kolumnach jest odmienny dla cząstek zdeflokuowanych i zflokuowanych.

Dlatego też w badaniach składu granulometrycznego osadów zbiornikowych i stawowych przeprowadzonych metodą Prószyńskiego w jednej wersji dodano przepisową ilość węgla sodu, a w drugiej wersji określono skład bez tego dodatku.

#### 4.2. CECHY REOLOGICZNE OSADÓW ZBIORNIKOWYCH I STAWOWYCH

Znajomość cech reologicznych osadów zbiornikowych i stawów niezbędna jest między innymi do określenia sposobu ich usuwania z dna. Charakterystyka reologiczna mieszaniny ciecz– ciało stałe (a taką mieszaniną są przecież osady zbiornikowe) była szeroko opisywana przez Parzonkę [1974, 1977, 1986, 1991] oraz innych autorów [Migniot 1968; Kembłowski 1973; Schramm 1998]. Przypomniane zostaną podstawowe pojęcia i wiadomości potrzebne do określenia cech reologicznych oraz charakterystyki procesu sedymentacji i zagęszczania osadów dennych.

##### a) Modele reologiczne

Stosuje się modele reologiczne cieczy, których parametry nie zależą od czasu ścinania. Modele te uzależniają naprężenia styczne w ruchu laminarnym  $\tau$  od prędkości deformacji  $G$ . Dotyczy to mieszanin o konsystencji płynnej. W najprostszym przypadku cieczy o lepkości  $\eta$  obowiązuje model Newtona:

$$\tau = \eta G \quad (22)$$

Wykres reologiczny (tzw. krzywa płynięcia) płynu newtonowskiego sporządzony w układzie współrzędnych  $\tau = f(G)$  jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych.

Jeśli koncentracja objętościowa  $C_V$  jest większa od granicznej koncentracji objętościowej  $C_{V\text{Lim}}$  stosować można dwuparametrowy model Bingham'a:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot G \quad (23)$$

gdzie  $\tau_0$  jest reologicznym progiem płynięcia.

Jeśli natomiast  $C_V$  jest znacznie większa od  $C_{V\text{Lim}}$ , konieczne jest zastosowanie wieloparametrowego modelu reologicznego – na przykład trzyparametrowego modelu Herschela-Bulkleya:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot G^n \quad (24)$$

b) Zmienność parametrów reologicznych z koncentracją

#### **Ciecz Newtona**

Zmienność lepkości zawiesin newtonowskich z koncentracją jest charakteryzowana najczęściej wzorem Einsteina-Kahna

$$\eta = \eta_0 (1 + K \cdot C_V) \quad (25)$$

gdzie  $K$  waha się od 2,5 dla cząstek kulistych do 50–100 dla cząstek silnie asymetrycznych, przy czym namuły badane przez Parzonkę [1991] miały wartość  $K$  od 7 (namuły pylaste) aż do 55 (namuły ilaste).

Parzonka stwierdził, że obszar liniowego wzrostu lepkości z koncentracją kończy się po wzroście lepkości początkowej (wody) o 3–4 razy. Dalszy wzrost lepkości jest już nieliniowy, charakterystyczny dla nienewtonowskiego zachowania się zawiesiny.

#### **Ciecze nienewtonowskie**

Wszystkie parametry reologiczne modeli nienewtonowskich rosną wyraźnie ze wzrostem koncentracji objętościowej  $C_V$ , z wyjątkiem liczby strukturalnej  $n$ , która maleje ze wzrostem  $C_V$ . Dla cieczy Bingham'a otrzymano następujące zależności:

$$\tau_0 \approx B \cdot C_V^i \quad (26)$$

$$\eta_p \approx A \cdot C_V^j \quad (27)$$

gdzie:

$A, B$  – stałe charakterystyczne dla danej substancji,

$C_V$  – koncentracja objętościowa.

Z zależności tych wynika, że zarówno próg płynięcia ( $\tau_0$ ), jak i lepkość plastyczna ( $\eta_p$ ) są proporcjonalne do wielkości podanych we wzorach (26) i (27).

Obie potęgi  $i, j$  mają dla namulów wartości zbliżone (4,5–5,0) [Migniot 1968]. Badania Parzonki [1977] wykazały jednak większe zróżnicowanie wartości potęgi  $i$ . Osiąga ona wartości 4 do 11 dla gruntów ilastych, pylastych i namulów zbiornikowych. Z tych samych badań wynika, że wartość granicznej koncentracji objętościowej  $C_{VLim}$  (przy której mieszanina ciecz–ciało stałe traci właściwości cieczy newtonowskiej i osiąga właściwości cieczy nienewtonowskiej) zależy głównie od uziarnienia i wynosi dla przykładu 3–8% dla namulów ilastych i 6–15% dla namulów pylastych.

Na podstawie wykresów zależności  $\tau_0 = f(C_V)$  można określić wartości koncentracji granicznej  $C_{VLim}$  (wg metody zaproponowanej przez Parzonkę [1977]) oraz koncentracji erozyjnej  $C_{VE}$  przy  $\tau_0 = 1,5$  Pa [Migniot 1968], przy której mieszanina przechodzi z tzw. reżimu łatwej erozji do reżimu trudnej erozji. Reżim łatwej erozji dotyczy przypadku, w którym osady można usunąć strumieniem wody. W reżimie trudnej erozji konieczne jest zastosowanie do odspojenia osadu pogłębiarek ze spulchniaczami mechanicznymi lub sprzętu do ciężkich robót ziemnych.

### 4.3. CECHY CHEMICZNE OSADÓW ZBIORNIKOWYCH I STAWOWYCH

Badanie cech chemicznych obejmowało określenie procentowej zawartości przyswajalnego fosforu metodą Schachtschablera, przyswajalnego potasu metodą Egnera-Riehma, odczynu pH oraz obecności metali ciężkich w osadach (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr) metodą spektrofotometrii ASA. Określono także procentową zawartość części organicznych poprzez wyżarzenie osadu. Z literatury wiadomo bowiem [Kyzioł 1994; Kostecki 2000], że części organiczne osadów mogą absorbować niektóre metale ciężkie. Dlatego przeprowadzono próbę określenia zależności funkcyjnej między ilością metali ciężkich i zawartością części organicznych, a także między ilością metali ciężkich i granulacją próbki osadów reprezentowaną przez frakcję spławianą i średnicę charakterystyczną  $d_{50}$ .

Jedne z pierwszych opracowań składu chemicznego osadów dennych przedstawili Pasternak i Gliński, badając osady 12 największych zbiorników zaporowych Polski Południowej [Pasternak 1969; Pasternak, Gliński 1972]. Najbardziej zanieczyszczonym zbiornikiem okazał się zbiornik Turawa na Małej Panwi. Z badań wynikało, że zawartości wanadu (371 ppm) i cynku (135 ppm) przekraczają kilkakrotnie wartości tych pierwiastków w osadach stawów, a nawet w glebach. Stężenia pierwiastków w osadach względnie czystych zbiorników układają się w następujący szereg:  $Mn > Ba > V > Zn > Sr > Cu > Cr > Ni > Pb > Co$ . Ujawnił się również znaczący wpływ dopływającej do zbiornika

zawiesiny na poziom akumulacji metali, stwierdzono znaczne ilości metali w osadach cofki i części środkowej obiektów. Najwyższe stężenia metali zaobserwowano również w osadach środkowej części jeziora Zegrzyńskiego, szeregując je wg porządku  $Cd > Cu > Zn > Pb > Ni$  [Wojtkowska 1998], natomiast zbiornik w Rzeszowie charakteryzuje się odwrotną proporcjonalnością zawartości metalu w osadzie do odległości miejsca poboru próby od zapory [Koszelnik 1999]. Taki rozkład zanieczyszczeń zgodny jest z segregacją ziarnową w obrębie zbiornika. Wysokie współczynniki korelacji stwierdzono dla zawartości w osadzie pyłów ze stężeniem Cd oraz dla zawartości ilów i stężeń Mn w osadach zbiornika Dobczyckiego [Szarek-Gwiazda 1998], potwierdzając wysokie wartości kompleksu sorpcyjnego tych minerałów. Pierwiastki te były jednak w najmniejszym stopniu akumulowane w osadzie, wyższe zawartości wykazywały Cu i Zn, a największe Fe i Pb.

Najbardziej zagrożonymi skażeniem są osady ze zbiorników na obszarach silnie uprzemysłowionych. Na wpływ emisji przemysłowych z Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego narażony jest zbiornik Rybnik zlokalizowany w Rybnickim Zagłębiu Węglowym. Głównym pierwiastkiem zanieczyszczającym osad jest kadm, jego udział w ogólnym zanieczyszczeniu sięga ponad 70%, dyskwalifikując możliwości wykorzystania materiału dennego [Loska i in. 1997].

Poddanym silnej antropopresji jest również zbiornik Włocławski na Wiśle. Wobec problemów ze statecznością zapory i różnych koncepcji ratowania zbiornika, skład chemiczny osadów dennych stał się tematem badań i opracowań. Zawartość kadmu w osadach tego zbiornika sięga 12,8 ppm, przekraczając wartości tła geochemicznego ponad 25-krotnie. Zakres chromu wynosi od 2 do 295 ppm, przy wartościach naturalnych rzędu 10 ppm. Również stężenia innych metali ciężkich (rtęci, miedzi, ołowiu, niklu, wanadu) wskazują na silne zanieczyszczenie materiału dennego i przekraczają wartości graniczne uznane jako nieszkodliwe dla organizmów żywych. Wyliczono, że w drobnoziarnistych osadach tego zbiornika znajduje się około 190 ton kadmu, 7600 ton chromu, 4200 ton miedzi, 46 ton rtęci, 2200 ton ołowiu i 15000 ton cynku [Bojakowska i in. 2000]. W osadach wykryto również obecność pierwiastków promieniotwórczych pochodzenia antropogenicznego: cezu, uranu, toru, radu. Ich stężenia nie odbiegają jednak od wartości charakterystycznych dla tego typu osadów, są one jednak wyższe niż w osadach niezanieczyszczonych zbiorników [Kwapuliński 1973, Kwapuliński i in. 1990].

Podsumowując, można się w pełni zgodzić z wnioskiem Pasternaka i Glińskiego [1972], że zawartości mikroelementów w osadach dennych zależą od sytuacji geochemicznej zlewni, od składu ziarnowego i od odległości akwenu od emiterów zanieczyszczeń.



#### **4.4. MOŻLIWOŚĆ PRZYRODNICZEGO WYKORZYSTANIA OSADÓW DENNYCH ZBIORNIKOWYCH I STAWOWYCH**

Możliwość przyrodniczego zagospodarowania osadów zbiornikowych i stawowych zależy od ich cech fizycznych i chemicznych, natomiast sposób wydobywania osadów z dna zależy głównie od ich cech reologicznych i od zagęszczenia. Sposoby określenia cech reologicznych, o reometrii, o cechach mieszanin gruntowo-wodnych przedstawiono w poprzednim rozdziale. Natomiast o technikach wydobywania osadów z dna pisało już wielu autorów [Dąbkowski i in. 1982, Scheuerlein 1999, Tarnawski 2003].

Badania osadów dennych zbiorników wodnych są przeprowadzane przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska w ramach sporządzanych corocznie raportów o stanie środowiska. Celem tych badań jest kontrola zawartości metali ciężkich w zdeponowanych osadach oraz śledzenie zmian koncentracji pierwiastków śladowych w czasie [Bojakowska, Sokołowska 1996].

Przyrodnicze wykorzystanie niekontrolowanych chemicznie osadów dennych wiąże się z ryzykiem zwiększenia w środowisku glebowym zawartości substancji szkodliwych, w tym metali ciężkich. Stopień zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi w Polsce jest nadal jeszcze niewielki. Do oceny planowanych do wykorzystania osadów dennych można np. zastosować rygorystyczne kryteria oceny zanieczyszczeń gleby, służące jej ochronie. Kryteria te zostały określone przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska i Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach [Kabata-Pendias 1995]. Wytyczne te określają wskaźniki oceny zanieczyszczenia jako maksymalne, dopuszczalne wartości metali ciężkich w powierzchniowej warstwie gleby (tab. 8). Kryteria stopni zanieczyszczenia gleb wg Instytutu Upraw, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach wyróżniają pięć stopni zanieczyszczenia gleb, omówione poniżej.

Stopień 0 – gleby niezanieczyszczone o naturalnych zawartościach metali śladowych. Gleby te mogą być przeznaczone pod wszystkie uprawy ogrodnicze i rolnicze, zgodnie z zasadami racjonalnego wykorzystania rolniczej przestrzeni produkcyjnej, zwłaszcza pod uprawy roślin przeznaczonych dla dzieci i niemowląt. Obszary z takimi glebami należy objąć szczególną ochroną.

Stopień I – gleby o podwyższonej zawartości metali. Gleby te mogą być przeznaczone pod wszystkie uprawy polowe do pełnego użytkowania rolniczego, z wyłączeniem upraw roślin do produkcji żywności o szczególnie małej zawartości pierwiastków i substancji szkodliwych.

Stopień II – gleby słabo zanieczyszczone. Na glebach takich zachodzi już obawa chemicznego zanieczyszczenia roślin. Wykluczyć więc należy przede wszystkim niektóre uprawy ogrodnicze, jak np. sałata, szpinak, kalafior, marchew. Dozwolona jest uprawa roślin zbożowych, okopowych, pastewnych i wszystkich roślin przemysłowych oraz użytkowanie pastwiskowe.

**Tabela 8.** Graniczne zawartości metali ciężkich w glebach o różnych stopniach zanieczyszczenia [Kabata-Pendias 1995]  
**Table 8.** Limit contents of heavy metals in soils of various pollution levels [acc. to Kabata-Pendias 1995]

Metal Metal	Grupa gleb Soil group	Stopień zanieczyszczenia gleb [mg·kg <sup>-1</sup> ] Level of soil pollution [mg·kg <sup>-1</sup> ]					
		0	I	II	III	IV	V
Pb	a	20	70	100	500	2500	>2500
	b	40	100	250	1000	5000	>5000
	c	60	200	500	2000	7000	>7000
Zn	a	50	100	200	700	1500	> 1500
	b	70	150	300	1000	3000	>3000
	c	100	250	500	2000	5000	>5000
Cu	a	10	30	50	80	300	>300
	b	20	50	80	100	500	>500
	c	25	70	100	150	750	>750
Cd	a	0,3	1,5	2	3	5	>5
	b	>0,5	2	3	5	10	>10
	c	1,0	3	5	10	20	>20
Ni	a	10	30	50	100	400	>400
	b	25	50	75	150	600	>600
	c	50	75	100	300	1000	>1000
Cr	a	20	40	80	150	300	>300
	b	30	60	150	300	500	>500
	c	50	80	200	500	1000	>1000

Stopień III – gleby średnio zanieczyszczone. Wszystkie uprawy na takich glebach narażone są na skażenie. Dopuszczalna jest uprawa roślin zbożowych, okopowych i pastwnych pod warunkiem okresowej kontroli poziomu metali w konsumpcyjnych częściach roślin. Zalecane są uprawy roślin przemysłowych i traw nasiennych. Wody gruntowe mogą być narażone na zanieczyszczenie metalami ciężkimi, w tym szczególnie kadmem, cynkiem i niklem. W przypadku pastwisk należy także kontrolować pobieranie metali ciężkich przez zwierzęta.

Stopień IV – gleby silnie zanieczyszczone. Gleby takie, szczególnie gleby lekkie powinny być wyłączone z produkcji rolniczej i zagospodarowywane w inny sposób (zadarnienie, zadrzewienie). Na glebach lepszych należy uprawiać jedynie rośliny przemysłowe (len, konopie, wiklina), w zależności od ich wymagań siedliskowych. Produkcja materiału siewnego zbóż i traw możliwa jest pod warunkiem kontroli stopnia skażenia. Dopuszcza się też produkcję ziemniaków dla przemysłu spirytusowego (spirytus energetyczny) i rzepaku do produkcji oleju technicznego. Wykorzystanie na pastwiska należy ograniczać. Zaleca się zabiegi rekultywacyjne, a przede wszystkim wapnowanie i wprowadzanie substancji organicznej.

Stopień V – gleby bardzo silnie zanieczyszczone. Gleby tej klasy powinny być całkowicie wyłączone z produkcji rolniczej i użytkowania pastwiskowego. Należy liczyć się z potrzebą zabiegów rekultywacyjnych. Konieczne jest zadrzewianie i zadarnianie takich gleb, między innymi ze względu na zagrożenie przenoszenia zanieczyszczeń wraz z pyłami glebowymi. Na odpowiednich glebach można uprawiać rośliny przemysłowe, podobnie jak na glebach o IV stopniu zanieczyszczenia.

Wykorzystanie tych wytycznych do oceny jakościowej osadów zbiornikowych jest szczególnie korzystne, gdyż oprócz zróżnicowania kwasowości i granulometrii, wytyczne podają charakterystykę każdego stopnia zanieczyszczenia, obejmującą możliwości ich rolniczego wykorzystania.

Grupa a – gleby bardzo lekkie, zawierające mniej niż 10% części spławialnych oraz gleby zawierające 10–20% części spławialnych, charakteryzujące się pH w KCl niższym od 5,5.

Group a – very light soils, containing less than 10% particles of wash load and soil containing 10–20% of particles of wash load of pH in KCl lower than 5,5.

Grupa b – gleby zawierające 10 - 20 części spławialnych o pH > 5,5 oraz gleby zawierające powyżej 20% części spławialnych i o pH < 5,5.

Group b – soils containing 10-20% of particles of wash load and pH >5,5 and soil containing more than 20% of particles of wash load and pH <5,5.

Grupa c – pozostałe gleby, tj. zawierające ponad 20% części spławialnych i pH > 5,5.

Group c – other soils i.e. containing more than 20% of particles of wash load and pH >5,5.

Należy również wspomnieć, że Państwowy Instytut Geologiczny wprowadził geochemiczną klasyfikację osadów dennych, opartą na zawartości metali ciężkich w wyseparowanej frakcji osadów ( $d < 0,2\text{mm}$ ) (tab. 7). Przyjmuje się, że frakcja ta, którą stanowią cząstki gruntów spoistych (iły, pyły), odzwierciedla ilości metali ciężkich w środowisku ze względu na właściwości adhezyjne. Jednak drobniejsze frakcje ziarnowe charakteryzują się wyższą zawartością metali śladowych w porównaniu do grubszych frakcji tej samej próbki [Bojakowska, Sokołowska 1996]. Dlatego wykorzystywanie do badań najdrobniejszych frakcji osadów prowadzi do zawyżenia wyników oznaczeń laboratoryjnych. Ze względu na standaryzację metod oznaczania pierwiastków jak i prewencyjny charakter monitoringu geochemicznego, opracowania kartografii geochemicznej i klasyfikację osadów oparto jednak na stężeniu pierwiastków w ilasto-pylastych frakcjach namulów. Klasyfikacja ta była pierwszą próbą standaryzacji wyników badań osadów dennych. Mimo zastrzeżeń i wątpliwości stosowana była do oceny corocznych wyników badań osadów wód płynących i stojących objętych monitoringiem prowadzonym przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska. W latach późniejszych, wzorując się na klasyfikacji kanadyjskiej i amerykańskiej, wprowadzono 4-klasową klasyfikację osadów wodnych opartą na warto-

ściach progowych uwzględniających szkodliwy wpływ zakumulowanych w osadach zanieczyszczeń na organizmy wodne (tab. 9) [Bojakowska 2001]. Tak więc:

I klasa – to osady niezanieczyszczone, w których zawartość żadnego ze szkodliwych składników nie przekracza wartości progowej TEL (*threshold effect levels*), przy której nie obserwuje się szkodliwego wpływu pierwiastków śladowych i toksycznych związków organicznych na organizmy wodne;

II klasa – to osady miernie zanieczyszczone, w których zawartość chociaż jednego ze szkodliwych składników jest wyższa od wartości TEL, a zawartość wszystkich składników jest niższa od zawartości PEL (*probable effects level*), a więc od stężeń, przy których szkodliwe oddziaływanie na organizmy wodne występuje sporadycznie;

III klasa – to osady średnio zanieczyszczone, w których zawartość chociaż jednego szkodliwego składnika przekracza graniczną zawartość dla osadów II klasy. Są to więc osady, w których zanieczyszczenia są obecne w stężeniach, przy których szkodliwe oddziaływanie na wodne organizmy jest często obserwowane, lecz zawartość szkodliwych pierwiastków jest niższa od dopuszczalnej zawartości, wymaganej dla oczyszczonych osadów według kryteriów amerykańskich, holenderskich czy niemieckich;

IV klasa – to osady bardzo zanieczyszczone, w których chociażby dla jednego składnika przekroczona jest dopuszczalna zawartość określona dla osadów klasy III.

**Tabela 9.** Klasyfikacje jakościowe osadów dennych stosowane przez Państwowy Instytut Geologiczny [Bojakowska 2001]

**Table 9.** Qualitative classification of bottom sediments applied by the Polish Geological Institute [Bojakowska 2001]

Pierwiastek Chemical elements	1998				2001			
	Tło geochemiczne Geochemical background	Klasy / Classes			Klasy / Classes			
		I	II	III	I	II	III	IV
		Wartości progowe / Treschold value (mgkg <sup>-1</sup> )						
Arsen / Arsenic	<5	<10	<20	<50	7	30	70	>70
Kadm / Cadmium	<0,5	<1	<5	<20	0,7	3,5	6	>6
Chrom / Chromium	5	<20	<100	<500	50	100	400	>400
Miedź / Copper	6	<20	<100	<200	20	100	300	>300
Ołów / Lead	10	<50	<200	<500	30	100	200	>200
Rtęć / Mercury	<0,05	<0,1	<0,5	<1,0	0,2	0,7	0,7	>0,7
Nikiel / Nickel	5	<30	<50	<100	16	40	50	>50
Cynk / Zinc	48	<200	<1000	<2000	125	300	1000	>1000

Namuly zaliczone do I i II klasy, tj. osady niezanieczyszczone i miernie zanieczyszczone mogą być dowolnie zagospodarowywane w środowisku wodnym i lądowym. Mogą więc być deponowane w wyznaczonych akwenach,

składowane na polach refulacyjnych, stosowane do użyznienia gleb, względnie wykorzystywane do odtwarzania uszkodzonych i nadbudowy nadbrzeży lub grobli. Osady III klasy charakteryzujące się wyższą zawartością szkodliwych składników mogą być relokowane w zbiorniku wodnym w wyznaczonych miejscach. Natomiast ich zagospodarowanie na lądzie może być realizowane tylko w ograniczonym stopniu ze względu na nadmierne stężenia niektórych szkodliwych składników, które ograniczają wykorzystanie osadów tylko pod uprawy przemysłowe, a niekiedy wykluczają całkowicie ich rolnicze zagospodarowanie

#### **4.5. CHARAKTERYSTYKA FIZYCZNA, REOLOGICZNA I CHEMICZNA OSADÓW Z BADANYCH STAWÓW RYBNYCH I MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH**

Badania rozkładu ziarnowego i cech fizycznych osadów wskazują, że zarówno w zbiornikach wodnych, jak i w stawach rybnych następuje bardzo wyraźna segregacja ziarnowa osadów. Najgrubsze ziarna (głównie rumowisko niespoiste) osadzają się tuż przy ujściu rzeki do zbiornika lub tuż przy mnichu wlotowym do stawu rybnego i tworzą charakterystyczny stożek usypowy. Rumowisko drobniejsze osadza się w centralnej i dalszej części zbiornika. Wzrost powierzchni przekroju poprzecznego w miarę zbliżania się do zapory czołowej i związane z tym zmniejszanie się prędkości strumienia powoduje klasyfikację ziarnową rumowiska w obrębie zbiornika. Zjawisko to, charakterystyczne dla niskich koncentracji wody rzecznej, może być zaburzone przez:

- prądy gęstościowe, które pojawiają się przy występowaniu znacznej różnicy koncentracji cząstek stałych w wodzie wprowadzanej do zbiornika i wodzie w samym zbiorniku [Graf 1984],

- znaczne wahania zwierciadła wody w zbiorniku, które zmieniając położenie ujścia rzeki do zbiornika, powodują istotną zmianę warunków sedymentacji. Takie zjawisko opisał Parzonka [1974] w zbiorniku Lubachów [Parzonka 1991].

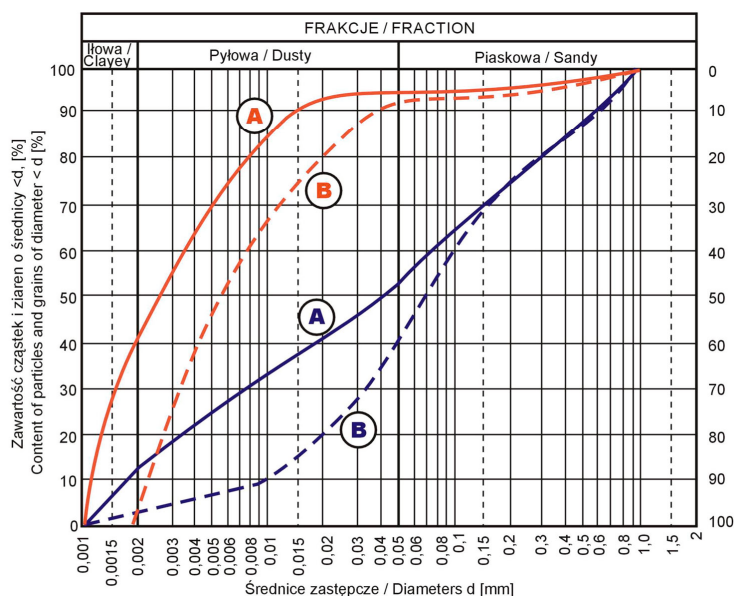
Metodę określającą ciężar objętościowy  $\gamma_0$  osadów w zależności od grubości warstwy osadów, wieku osadu i głębokości, z jakiej pobrano osady, omówiono w rozdziale dotyczącym cech fizycznych osadów zbiornikowych, postanowiono zastosować do określenia tego parametru w osadach stawowych. Wyniki przedstawiono w tabeli 10 [Bednarczyk, Madeyski 2002].

Skład granulometryczny osadów dennych zależy wyraźnie od zastosowanej metody jego oznaczenia. Dodatek deflokulanta  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stosowany w metodzie Prószyńskiego zgodnie z normą budowlaną wyraźnie zmienia kształt krzywej uziarnienia, a tym samym podstawę do klasyfikacji grup mechanicznych gruntu na podstawie trójkąta Fereta [PN-86/B-02480 1986]. Dla przykładu przedstawiono na rysunku 8 zróżnicowanie przebiegu krzywych granulometrycznych. Przebieg tych krzywych uziarnienia określono dla osadów pobranych z poszczególnych stref zbiornika Niedźwiadek na potoku Górno. Analiza gra-

nulometryczna pobranych osadów została przeprowadzona z dodatkiem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (linia ciągła – oznaczona symbolem A) i bez tego dodatku (linia przerywana – oznaczona symbolem B).

**Tabela 10.** Porównanie średniego ciężaru objętościowego osadów w stawach rybnych obliczonego wg wzoru (10) z wartościami pomierzonymi  
**Table 10.** Comparison of mean volumetric weight of muds in fish ponds, calculated acc. to formula (10) with measured values

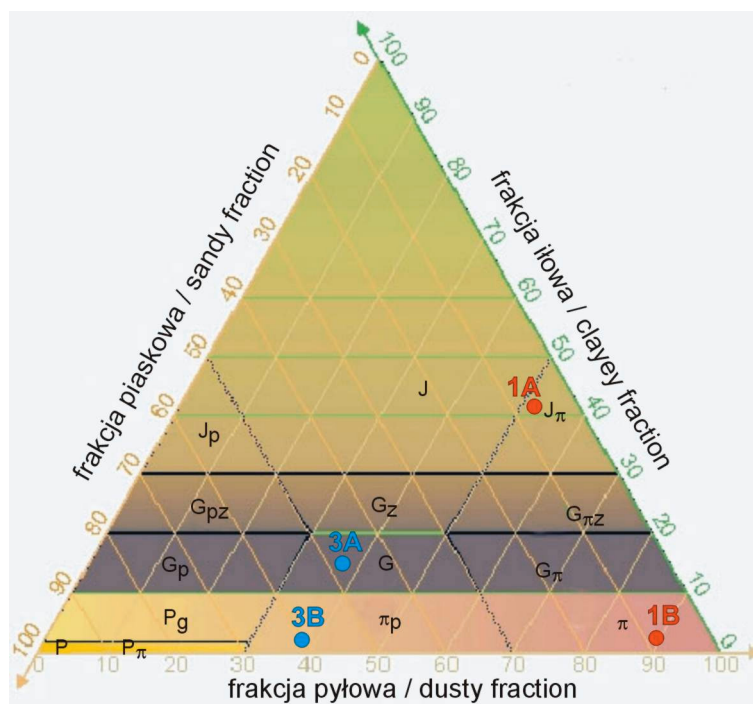
Nazwa stawu Name of pond	Rzeka zasilająca Supplying river	Średnia głębokość Average depth [m]	Ciężar objętościowy wierzchniej warstwy (wg pomiarów) Volumetric weight of upper layer (measured values) [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Ciężar objętościowy osadów (wg. obliczeń) Volumetric weight of muds (calculated values) [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
Dwójka	Rudawa	1,50	1544	1617
Bez nazwy	Wisła	1,40	1612	1714
Nieródek	Ołownica	1,60	1598	1862
Topolowy	Szreniawa	1,50	1875	1911



**Rysunek 8.** Krzywa uziarnienia w przekroju badawczym zbiornika Niedźwiadek (kolor niebieski linii – przekrój wlotowy do zbiornika, kolor czerwony linii – przekrój wylotowy ze zbiornika) A – z dodatkiem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , B – bez dodatku  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

**Figure 8.** Granulometric curve in the examined section of the Niedźwiadek reservoir (blue color of line – inflow section, red color line - outflow section of the reservoir) A – with addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , B – without addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Kolejny rysunek (rys. 9) przedstawia określenie rodzaju gruntu z wykorzystaniem trójkąta Fereta zgodnie z Polską Normą [PN-86/B-02480 1986]. Próbką pobrana w części wlotowej do zbiornika Niedźwiadek (3) w stanie naturalnym została zaklasyfikowana do pyłu piaszczystego ( $\pi_p$ ). Po przeprowadzeniu badania areometrycznego z wykorzystaniem deflokulanta  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  można zauważyć znaczący jego wpływ na zmianę zawartości poszczególnych frakcji gruntu w próbce oraz na proces opadania poszczególnych frakcji. Grunt po rozbiciu agregatów należy zaliczyć do glin. Wyraźniejsze różnice w klasyfikacji grup mechanicznych gruntu wykazała próbka (1) pobrana w strefie wylotowej (pryzaporowej) badanego zbiornika. Otrzymane zawartości poszczególnych frakcji w próbkach ze stabilizatorem klasyfikują badany osad do iltu pylastego, natomiast przy braku zastosowania deflokulanta określenie rodzaju gruntu wskazuje, że osad należy do grupy pyłów.



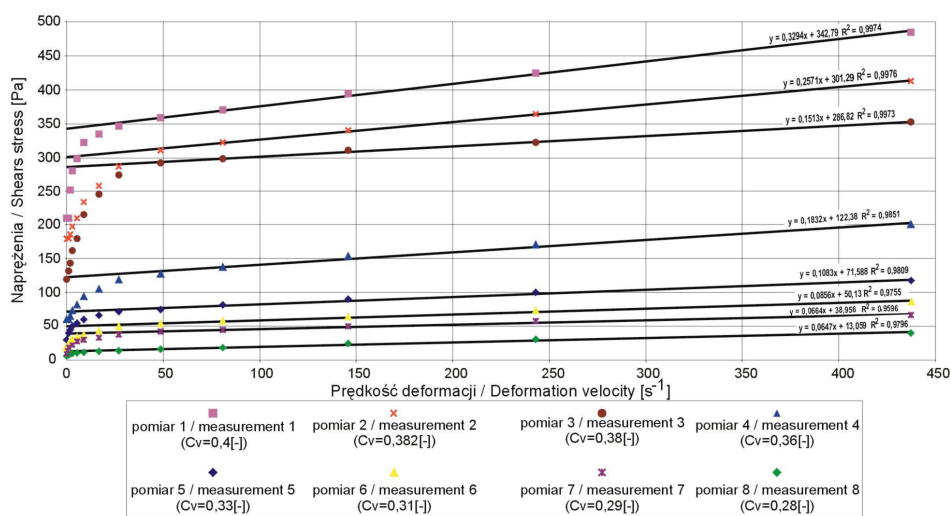
**Rysunek 9.** Określenie rodzaju gruntu wg trójkąta Fereta dla przykładowych próbek osadów ze zbiornika Niedźwiadek (1 – przekrój wylotowy zbiornika, 3 – przekrój wlotowy zbiornika) A – z dodatkiem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , B – bez dodatku  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

**Figure 9.** Determination of kind of the soil acc. to Feret triangle for characteristic mud samples taken from the Niedźwiadek reservoir (1 – outflow section of the reservoir, 3 – inflow section of the reservoir) A – with addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , B – without addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Określenie czasu sedymentacji na podstawie badań próbek zdeflokulowanych, dla których opracowano krzywe uziarnienia i określono rodzaj gruntu, wykazały znaczące różnice w stosunku do próbek niepoddanych działaniu deflokulanta. Podobne różnice wykazał Parzonka [1994] w szeroko zakrojonych badaniach osadów dennych ze zbiornika Fergoug w Algierii.

Ocenę właściwości reologicznych osadów zbiornikowych i stawowych przeprowadzono za pomocą wiskozymetru rotacyjnego typu Couette'a-Searle'a Rheotest 2. Nie stwierdzono zjawisk zniekształcających pomiar, takich jak sedymentacja cząstek stałych w czasie pomiaru, czy wpływ tiksotropii.

Pomiary przeprowadzono dla wielu różnych koncentracji objętościowych mieszaniny osad-woda, wykonując od 5 do 10 rozcieńczeń. Badania rozpoczęto od próbki w stanie naturalnym lub do niego zbliżonym. Odczytując dla danej prędkości deformacji (G) wartość naprężeń ścinających ( $\tau$ ), określono przebieg tzw. pseudokrzywej płynięcia. Charakterystyczne przebiegi pseudokrzywych, uzyskane w wyniku pomiarów badanych osadów mają wyraźną długą część liniową, która uzasadnia wyrównanie wszystkich pseudokrzywych płynięcia dwuparametrowym modelem Bingham'a. Przykład pseudokrzywych płynięcia dla jednej z prób badanych osadów zbiornikowych (zbiornik w Krempej, strefa wlotowa, warstwa górnej – Kr I G) oraz ich aproksymacji przedstawia rysunek 10.

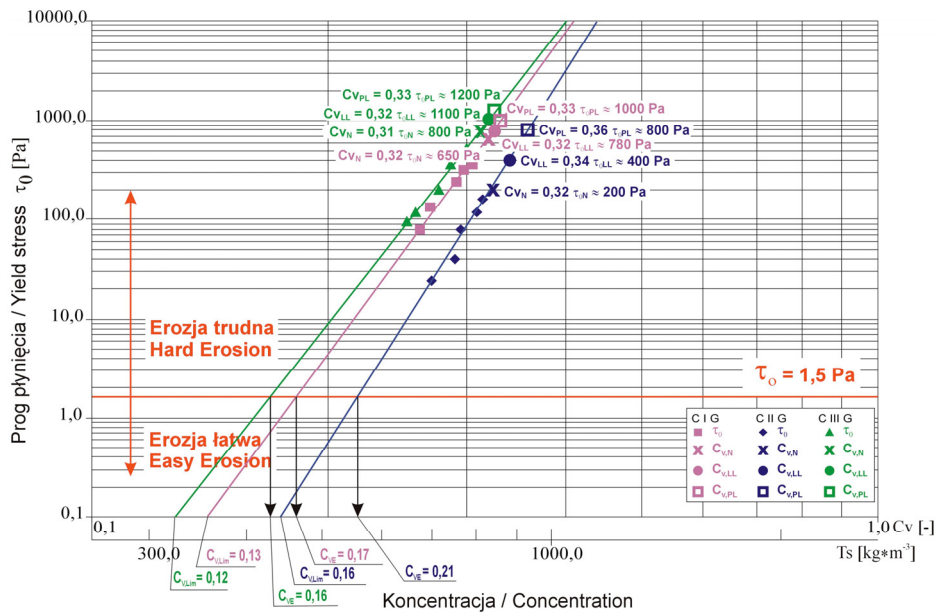


**Rysunek 10.** Przykład aproksymacji pseudokrzywej płynięcia modelem Bingham'a (próbka osadu ze zbiornika w Krempej I G – strefa wlotowa, warstwa górna) [Tarnawski 2003]  
**Figure 10.** Example of approximation of flow pseudocurve by Bingham's model (mud sample from the Reservoir Krempeja IG – inflow zone, upper layer) [Tarnawski 2003]



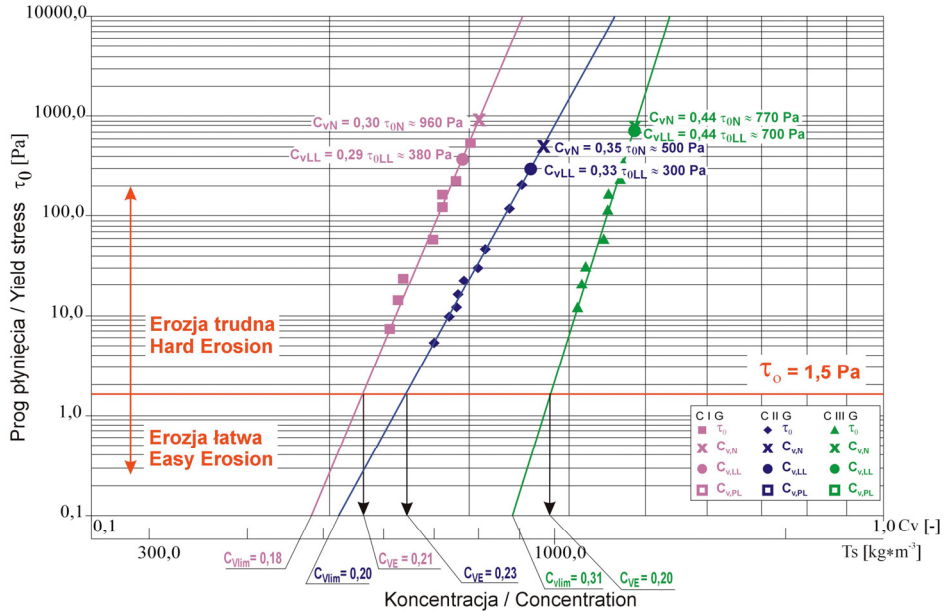
Model Binghamu ujmuje bardzo istotny parametr reologiczny jakim jest próg płynięcia ( $\tau_0$ ). Ten ustalony parametr umożliwia właściwą charakterystykę, m.in. odporność erozyjną odłożonych osadów. Znajomość parametrów reologicznych umożliwia więc określenie ich zmienności przy różnych koncentracjach składnika stałego w mieszaninie.

Według metodyki Parzonki [1977] przedstawienie zależności prędkości deformacji (G) od naprężeń ( $\tau_0$ ) dla danych koncentracji mieszaniny ( $C_V$ ) na wykresie o skalach logarytmicznych, umożliwia aproksymację linią prostą i wyznaczenie tak zwanej koncentracji objętościowej granicznej ( $C_{V,LIM}$ ). Wartość ta określa zmianę właściwości mieszaniny – przejście z reżimu newtonowskiego do reżimu nienewtonowskiego zachowania się mieszaniny. Rysunki 11 i 12 przedstawiają zależności  $C_V$  od  $\tau_0$  przykładowo dla górnych warstw osadów pobranych odpowiednio w zbiorniku w miejscowości Zesławice i Cierpisz. Na wykres naniesiono również wartości koncentracji naturalnej ( $C_{V,N}$ ), jak i koncentracji odpowiadającej granicy płynności ( $C_{V,LL}$ ) oraz granicy plastyczności ( $C_{V,PL}$ ).



**Rysunek 11.** Wykres zależności progu płynięcia ( $\tau_0$ ) od koncentracji objętościowej ( $C_V$ ) dla osadów ze zbiornika w Zesławicach, warstwa górna [Tarnawski 2003]

**Figure 11.** Diagram of relation yieldstress ( $\tau_0$ ) versus volume concentration ( $C_V$ ) for muds from Zesławice reservoir, upper layer [Tarnawski 2003]



**Rysunek 12.** Wykres zależności progę płynięcia ( $\tau_0$ ) od koncentracji objętościowej ( $C_V$ ) dla osadów ze zbiornika w Cierpiszu, warstwa górna [Tarnawski 2003]

**Figure 12.** Diagram of relation yieldstress ( $\tau_0$ ) versus volume concentration ( $C_V$ ) for muds from Cierpisz reservoir, upper layer [Tarnawski 2003]

Uzyskane w wyniku badań reometrycznych zależności  $\tau_0 = f(C_V)$  potwierdzają ustaloną przez Parzonkę [1986] zależność koncentracji granicznych od uziarnienia osadów. Koncentracja ta wzrasta wraz ze wzrostem średnicy nominalnej ( $d_{50}$ ) osadów. W przypadku osadów zbiornika w Zesławicach w których lokalizacja wysp i znaczne odkłady w strefie wlotowej zaburzają proces segregacji ziarnowej, największe  $d_{50}$  jak i  $C_{V,LIM}$  mają osady ze strefy środkowej zbiornika. W zbiornikach w Cierpiszu, Bagnach Rzeszowskich i Krempnej zmienność średnic  $d_{50}$  i koncentracji granicznej na długości zbiornika odpowiadają przebiegającemu bez zakłóceń procesowi segregacji ziaren [Tarnawski 2003, 2007]. Uzyskane wartości  $C_{V,LIM}$  są większe niż uzyskane przez Parzonkę dla osadów zbiorników algierskich [1986], ale są zbliżone do wyników badań dotyczących osadów ze zbiorników Sautet i Lubachów [Parzonka 1974], jak również dla osadów ze stawów rybnych badanych przez Madeyskiego [1998, 1999]. Badane przez Parzonkę i Kempnińskiego [1992; Parzonka 1994] osady jeziorowe wykazywały zbieżność zależności  $\tau_0 = f(C_V)$  w zakresie naprężeń

odpowiadających granicy płynności ( $\tau_{0,LL}$ ) wynoszących 150–400 Pa. Zakres naprężeń  $\tau_{0,LL}$  określony dla osadów stawowych był większy i zawierał się między 130 a 700 Pa [Madeyski 1998], ale największe wartości sięgające 600–1500 Pa uzyskano dla namulów górnego stanowiska jazu w Brzegu Dolnym na Odrze [Głowski i in. 1995, Głowski i in. 2005]. Badane osady z małych zbiorników wodnych wykazują tendencję do zbieżności zależności naprężeń od koncentracji, lecz nie jest ona tak wyraźna i następuje dla wyższych wartości naprężeń. Również koncentracje granicy płynności odpowiadają szerszemu zakresowi naprężeń ( $\tau_{0,LL} = 200\text{--}1200$  Pa).

Z przedstawionych zależności wyznaczono również wartość koncentracji erozyjnej ( $C_{V,E}$ ) odpowiadającej naprężeniom równym 1,5 [Pa]. Wartość proggu płynięcia ( $\tau_0 = 1,5$  Pa) ustalona została przez Mignota [Parzonka, Kempniński 1992] jako granica między reżimem łatwej i trudnej erozji osadów przez strumień płynącej wody.

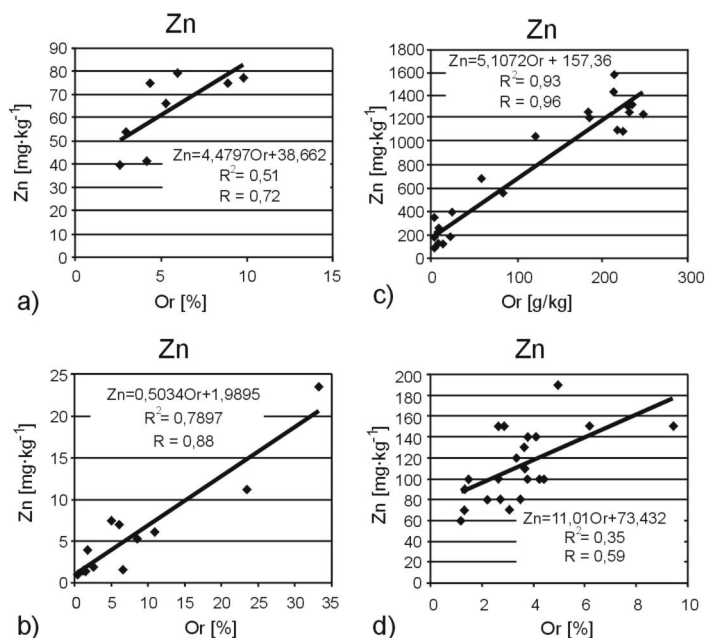
Dokładne wyniki cytowanych badań chemicznych osadów zbiornikowych, a także stawowych, jak również innych zbiorników wodnych przedstawiono w opracowaniach [Madeyski 1998; Tarnawski 2003; Madeyski, Tarnawski 2006a; Madeyski, Tarnawski 2006b; Florencka, Tarnawski 2007]. Omawiając cechy chemiczne osadów zbiornikowych, wspomniano o przeprowadzonej próbie określenia zależności funkcyjnej między ilością metali ciężkich oraz granulacją osadów a zawartością części organicznych. Taką próbę wykonano dla osadów ze zbiorników w Krempnej oraz dodatkowo w Majdanie Sopockim (zbiorniku wybudowanym na rzece Sopot w okolicach Tomaszowa Lubelskiego), a także dla namulów silnie zanieczyszczonego zbiornika w Rybniku (na rzece Ruda i Macyna), które zostały opracowane a zbiornik szczegółowo opisany przez Kosteckiego i Kowalskiego [2004]. Wyniki porównano również z osadami jednego ze stawów rybnych w okolicach Krakowa [Madeyski, Tarnawski 2006b].

Dla wspomnianych zbiorników określono funkcyjną zależność między metalami ciężkimi i częściami organicznymi. Przykładowe zależności dla Zn i Pb zestawiono na rysunkach 13 i 14. Wynika z nich, że taka zależność jest wyraźna, a wartości współczynników korelacji mieszczą się w przedziale: dla zbiornika w Krempnej od 0,65÷0,75; w Majdanie Sopockim od 0,74÷0,93; w Rybniku 0,84÷0,96. Słabe natomiast zależności stwierdzono, badając osady ze stawu rybnego – najwyższe wartości współczynnika korelacji R na poziomie 0,59 dla Zn i dla zbiornika w Zesławicach ( $R = 0,54$  dla Pb).

Analizując moc zależności metali ciężkich i zawartości części spławianych w osadach dennych, można ze względu na współczynniki korelacji uszeregować

je w ciągu malejące. I tak, dla zbiornika w Krempnej szereg ten ma postać  $Cr > Zn > Cu > Pb$ ,  $Ni > Cd$ , dla Majdanu Sopockiego  $Cu, Cr > Zn$ ,  $Ni > Pb > Cd$ , dla stawu rybnego  $Ni > Cu > Pb > Zn, Cd, Cr$ , dla zbiornika w Zesławicach  $Ni > Cu > Zn > Pb > Cd, Cr$ . Najsilniej skorelowane z częściami spławianymi w pierwszych dwóch zbiornikach są  $Cr$  i  $Zn$  a najslabiej  $Cd$ . W kolejnych dwóch zbiornikach powtarza się jedynie słaba korelacja kadmu z najdrobniejszymi frakcjami osadu.

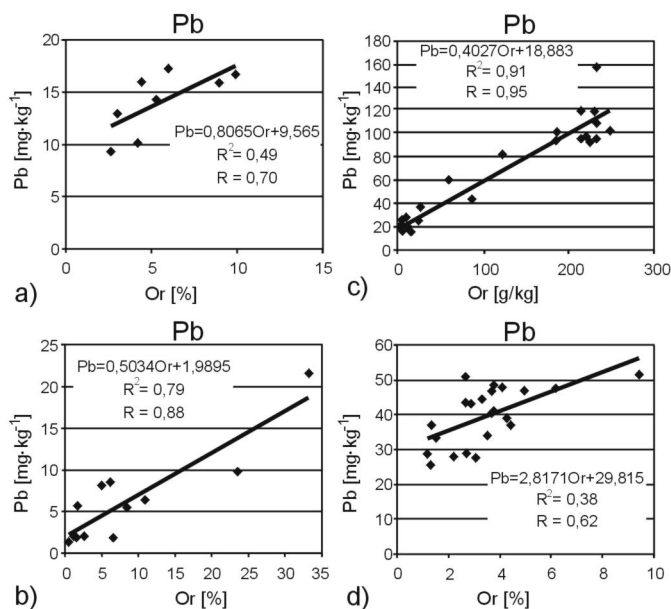
Podjęto również próbę określenia korelacji między zawartością metali ciężkich a wartością średnicy  $d_{50}$ , uznając ją za charakterystyczną dla całej próbki osadu. Charakter związku korelacyjnego dla tych zmiennych jest słaby – wartości współczynników korelacji są na poziomie statystycznie nieistotnym.



**Rysunek 13.** Zależności korelacyjne Zn i materii organicznej w osadach zbiorników:

a) Krempna, b) Majdan, c) Rybnik, d) staw rybny [Madeyski, Tarnawski 2006b]

**Figure 13.** Correlation between Zn and organic matter in bottom sediments from water reservoirs: a) Krempna, b) Majdan, c) Rybnik, d) fish pond [Madeyski, Tarnawski 2006b]



**Rysunek 14.** Zależności korelacyjne Pb i materii organicznej w osadach zbiorników:

a) Kremarna, b) Majdan, c) Rybnik, d) staw rybny [Madeyski, Tarnawski 2006b]

**Figure 14.** Correlation between Pb and organic matter in bottom sediments from water reservoirs: a) Kremarna, b) Majdan, c) Rybnik, d) fish pond [Madeyski, Tarnawski 2006b]

#### 4.6. OCENA MOŻLIWOŚCI PRZYRODNICZEGO WYKORZYSTANIA OSADÓW DENNYCH BADANYCH STAWÓW RYBNYCH I MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH

Chemiczną ocenę jakości osadów dennych badanych zbiorników wodnych przeprowadzono, kierując się wytycznymi oceny skażenia gleb ustalonymi przez Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach [Kabata-Pendias 1995] oraz klasyfikacją opracowaną przez Państwowy Instytut Geologiczny (PIG) i stosowaną przez Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska (PIOŚ) [Bojakowska 2001]. Do porównań z wartościami granicznymi wykorzystano wartości maksymalne i średnie ilości metali ciężkich, stwierdzone w badanych próbkach osadu. W tabeli 11 zamieszczono wyniki analiz chemicznych właściwości osadów, wykonanych standartowymi, uznanymi w literaturze metodami i opisanymi w metodyce badań. Wyniki przedstawiają m.in. ilości metali ciężkich oraz pierwiastków przyswajalnych, określone jako wartość średnią dla osadów z dna zbiorników wodnych Zesławice, Cierpisz, Bagna Rzeszowskie, Wilcza Wola i Kremarna.

**Tabela 11.** Właściwości chemiczne osadów dennych badanych małych zbiorników wodnych

**Table 11.** Chemical properties of bottom sediments of examined small water reservoirs

Badana cecha Investigated property		Jednostka Unit	Średnia wartość w osadach zbiornika Mean value in reservoir sediments				
			Zesławice	Cierpisz	Bagna Rzeszowskie	Wilcza Wola	Krempna
metale ciężkie heavy metals	Cr	ppm	18,50	15,6	30,80	12,20	10,40
	Ni		16,20	5,8	23,20	23,4	52,90
	Cu		10,73	1,92	27,60	4,30	50,80
	Zn		72,88	64,58	157,80	20,50	76,50
	Cd		0,48	0,85	1,30	0,20	0,030
	Pb		20,02	5,42	23,80	7,90	17,50
	Mn		396,83	81,67	617,50	488,80	1004,00
	Fe		15868	7285	20620	17185	28077
	Sr		21,70	0,75	5,90	4,20	10,30
pH	H <sub>2</sub> O		7,77	5,55	6,80	5,00	3,80
	KCl		7,42	5,00	6,40	4,30	3,60
	N	%	0,02	0,13	0,31	0,10	0,36
	C		1,83	0,92	4,17	0,54	2,77
	P		0,01	0,03	0,04	0,01	0,02
makroelementy makro-elements	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg/100g	1,23	3,90	9,50	1,90	1,00
	K		10,02	3,92	14,90	3,50	12,60
	Mg		8,45	4,72	18,00	5,50	9,20

Wyniki oceny przydatności osadów zbiornikowych i stawowych do ich rolniczego wykorzystania wiążą się z porównaniem tabel 6, 7 i 9, w których przedstawiono wartości średnie metali ciężkich w namulach badanych zbiorników, a także aktualnie obowiązujące w Polsce wymogi dotyczące granicznych zawartości metali ciężkich w glebach o różnych stopniach zanieczyszczenia.

I tak, *osady zbiornika w Zesławicach* wykazują nieznaczny stopień zanieczyszczenia. Ilości większości metali ciężkich utrzymują się na poziomie 0 stopnia wg IUNG, jedynie maksymalne zawartości Zn (129,9 ppm) i Cd (0,9 ppm) powodują, że należy przyjąć I stopień zanieczyszczenia, odpowiadający glebom o podwyższonej zawartości mikroskładników. Podwyższone stężenie cynku jest również powodem przyjęcia II klasy osadów (miernie zanieczyszczonych) w klasyfikacji stosowanej przez PIG i PIOŚ. Najsilniej osady zanieczyszczają Zn i Cd, jednak ich stężenia nie są na poziomie wartości toksycznych. Jak podaje Lis i Pasieczna [1995a], wartości Cd dla gleb uprawnych wynoszą 1–5 ppm, a zawartość toksyczna jest wyższa od 5 ppm. Gleby okolic Krakowa zawierają średnio 0,7 ppm Cd, natomiast w zbiornikowych osadach dennych

średnie stężenie kadmu wynosi 1,1 ppm. Przedział wartości Zn w glebach z okolic Krakowa wynosi od 6 aż do 3664 ppm, z wartością średnią 73 ppm, ale jest ponad 2-krotnie niższa niż określona średnia zawartość Zn w osadach dennych rzek okolic Krakowa (168 ppm). Tło geochemiczne cynku mieści się w granicach od 6 do około 200 ppm. Podwyższone wartości tego pierwiastka w rejonie Krakowa wynikają z budowy geologicznej oraz z charakteru gleb. Główną przyczyną zanieczyszczenia tego rejonu jest także wpływ czynników antropogenicznych. Zaobserwowano bowiem spadek koncentracji zanieczyszczeń w miarę zwiększania odległości od głównego źródła emisji, którym jest Huta im. Sendzimira [Gorlach i in. 1994].

Badane *osady zbiornika w miejscowości Cierpisz*, na rzece Tuszynka Duża, podobnie jak osady ze zbiornika w Zesławicach wykazują podwyższone wartości cynku i kadmu. Maksymalna wartość Zn wynosząca 208,5 ppm przy średniej wynoszącej 64,58 ppm oraz maksymalna dla kadmu 2,8 ppm, przy średniej na poziomie 0,85 ppm, kwalifikują te osady do II stopnia zanieczyszczenia wg IUNG. Stężenia pozostałych metali śladowych pozostają na poziomie stopnia zerowego. Właśnie zawartości Zn i Cd oraz niklu decydują o zakwalifikowaniu materiału dennego do osadów miernie zanieczyszczonych (II klasa) wg oceny stosowanej przez PIOŚ. Wartość średnia chromu 15,6 ppm jest znacznie wyższa od wartości średniej dla osadów wodnych Polski wynoszącej 6 ppm, ale równocześnie jest znacznie mniejsza od wartości granicznej dla gleb uprawnych ( $\leq 100$  ppm) [Lis, Pasieczna 1995b].

*Zbiornik Bagna Rzeszowskie* znajduje się na północ do Rzeszowa. Wartości tła geochemicznego metali ciężkich występujących w tym rejonie wynoszą: Cr, Ni 10–20 ppm, Cd < 1, Cu 20–40 ppm, Zn 100–200 ppm, a dla Pb 25–50 ppm [Lis, Pasieczna 1995b]. Wartości wszystkich badanych metali prócz Cr wskazują na przyjęcie II klasy – osady miernie zanieczyszczone wg oceny jakościowej stosowanej przez PIG. Zawartość chromu w namulach jest na poziomie odpowiadającym osadom niezanieczyszczonym (I klasa). W klasyfikacji wprowadzonej przez IUNG o ogólnej przynależności osadu do II stopnia zanieczyszczenia decyduje zawartość w osadzie cynku, natomiast pozostałe metale są na poziomie I stopnia, a niska zawartość Pb wskazuje na brak skażenia tym pierwiastkiem.

*Osady ze zbiornika w miejscowości Wilcza Wola* charakteryzują się najniższymi wartościami zawartości metali śladowych. Metoda oceny osadów wodnych stosowana przez PIOŚ wykazała najmniejsze zanieczyszczenie, klasyfikując osady do najwyższej I klasy. Zanieczyszczenie osadów zbiornika z Wilczej Woli jest tak małe, że wartości wszystkich metali śladowych są niższe niż wartości graniczne dopuszczające glebę do wykorzystywania pod produkcję ekologiczną [Tarnawski, Michalec 2006]. Jedynie graniczne zawartości metali w glebach o różnych stopniach zanieczyszczenia wg IUNG wykazały, że wartości Cd i Ni są na poziomie I stopnia zanieczyszczenia, a nie jak to się ma w przypadku pozostałych pierwiastków na poziomie 0 stopnia. I stopień wska-

zuje na podwyższoną zawartość metali, jednakże materiał glebowy może być wykorzystywany pod wszystkie uprawy polowe, z wyłączeniem upraw roślinnych o szczególnie małej zawartości substancji szkodliwych.

Materiał odłożony w *zbiorniku w Krempiej* został pobrany i zbadany pod względem zawartości składników chemicznych. O ogólnej ocenie wykorzystującej stopnie zanieczyszczenia wg IUNG decydują wartości niklu i miedzi. Wartościom stężeń tych pierwiastków należy przypisać II stopień zanieczyszczenia. Przy ostatecznej ocenie należy uwzględnić maksymalną wartość Cu wynoszącą 78,6 ppm. Znacznie niższą zawartość miedzi charakteryzuje tło geochemiczne wynoszące dla obszaru lokalizacji zbiornika w Krempiej: dla gleb od 10–20 ppm, a dla osadów 18 ppm [Lis, Pasieczna 1995b]. Wartości te wskazują na podwyższoną zawartość tego mikrośladnika w osadach dennych, ale wartości te są dopuszczalne dla gruntów użytkowanych rolniczo, dla których przedział tolerancji wynosi od 50–150 ppm, a oddziaływanie toksyczne Cu zaobserwowano przy wartościach tego pierwiastka w glebie powyżej 200 ppm.

Zgodnie z klasyfikacją opracowaną i stosowaną przez Państwowy Instytut Geologiczny oraz Inspektorat Ochrony Środowiska, jak również z wytycznymi opracowanymi przez Instytut Upraw i Nawożenia Gleb zawartość metali ciężkich w osadach badanych stawów rybnych jest niewielka. Stężenia mikroelementów w namulach dennych stawów rybnych charakteryzują się niskimi wartościami kwalifikującymi osady do I klasy wg PIG oraz do 0 i I stopnia zanieczyszczenia wg IUNG. Osady wydobyte z dna stawów mogą być w pełni wykorzystane pod uprawy roślin. Na uwagę zasługuje fakt zwiększonych, w stosunku do osadów zbiornikowych, wartości materii organicznej sięgających nawet 25% oraz makroelementów w osadach, wpływających korzystnie na żyzność wykorzystywanego materiału mineralnego, pozyskanego podczas prac renowacyjnych stawów rybnych.

Stężenia metali ciężkich w osadach badanych zbiorników były podobne do stężeń stwierdzonych w innych zbiornikach o małym stopniu zanieczyszczenia, np. Solina, Myczkowce [Pasternak, Gliński 1972], czy osadach zbiornika Dzieżno Małe [Kostecki i in. 1998]. Były one natomiast zdecydowanie niższe od stężeń występujących w osadach zbiorników i rzek narażonych na silną antropopresję, zlokalizowanych w regionach o wysokim rozwoju przemysłu, dużej gęstości zaludnienia np. stężeń metali w osadach zbiornika Goczalkowice [Kwapuliński i in. 1991] i Kozłowa Góra [Reczyńska-Dutka 1985], narażonych na wpływ emisji przemysłowych Górnego Śląska – zbiornik Rybnik [Loska i in. 1994], czy rzeki Wisły [Helios-Rybicka 1986] i rzeki Odry [Wardas i in. 1991]. Podsumowując można stwierdzić, że osady denne z małych zbiorników wodnych są osadami nieskażonymi pierwiastkami śladowymi. Na podstawie przeprowadzonej analizy z wykorzystaniem różnych metod oceny, określić należy stan ich zanieczyszczenia jako niezanieczyszczony do zanieczyszczonego umiarkowanie, tj. niestanowiący zagrożenia przy ewentualnym wykorzystaniu przyrodniczym.



## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Wysokim tempem zamulania charakteryzują się zbiorniki: Krempna, Rzeszów, Zesławice, Brzoza Stadnicka. Stopień zamulenia zbiorników: Maziarnia, Głuchów i Cierpisz po 7–11 latach wynosi kilkanaście procent i wskazuje na średnie tempo zamulania. Najniższym tempem zamulania charakteryzuje się zbiornik Wapienica i Brzoza Królewska. Pierwszy ulega powolnemu zamuleniu ze względu na niewielkie natężenie procesów erozyjnych w zlewni, która w 97% pokryta jest lasem. Zbiornik Brzoza Królewska ma ograniczoną ilość rumowiska jaka może do niego dopływać. Przyczynia się do tego zbiornik Brzoza Stadnicka, położony powyżej.

Małe zbiorniki retencyjne charakteryzują się niskimi wartościami współczynnika pojemności  $\alpha$  i niskimi wartościami współczynnika zlewniowego C/W. Dlatego też zdolność do zatrzymywania rumowiska wyznaczona z nomogramów Łopatina, Brune'a, Brune'a i Allena, Drozda, Browna i Gottschalka jest znacznie niższa od wartości rzeczywistej określonej z bilansu rumowiska dopływającego i zatrzymanego w zbiorniku. Stosowanie nomogramu Łopatina, zalecanego przez „Wytyczne instruktażowe”, w przypadku małych zbiorników retencyjnych nie jest wskazane, pomimo spełnienia warunków ograniczających jego zastosowanie. Zdolność do zatrzymywania rumowiska małych zbiorników retencyjnych można wyznaczyć z nomogramu Churchilla.

Opracowanie szczegółowej prognozy zamulania wymaga dysponowania danymi dotyczącymi przepływów średnich dobowych i odpowiadających im koncentracji rumowiska. W przypadku braku tych danych ilość rumowiska dopływającego do zbiornika retencyjnego można określić metodą DR-USLE.

Zbieżność obliczonych wartości otrzymanych ze wzorów Šamova i Gončarova z wynikami pomiarów zamulania klasyfikuje te metody do najtrafniejszych w obliczeniach zamulenia zbiorników. Dokładność obliczeń uzależniona jest od poprawnego ustalenia wielkości odkładów w pierwszym roku eksploatacji. W przypadku małych zbiorników wodnych wzory Šamova i Gončarova znakomicie spełnią swoje zadanie, służąc weryfikacji prognozy istniejącego, eksploatowanego obiektu, z zastrzeżeniem, że dysponuje się właściwie wyznaczoną objętością odkładów w zbiorniku po pierwszym roku eksploatacji. Można ją wyznaczyć na podstawie obliczonej objętości rumowiska unoszonego i zdolności do zatrzymywania rumowiska, określonej z nomogramu

Churchilla. Metody Schoklitscha i Piečínova nie powinny być stosowane w obliczeniach zamulania małych zbiorników retencyjnych.

Przeprowadzone wielowątkowe badania jakości osadów i możliwości ich przyrodniczego wykorzystania dotyczące opisanych wyżej małych zbiorników i stawów rybnych nasuwają następujące wnioski:

1. W badanych zbiornikach wodnych i stawach rybnych następuje wyraźna segregacja ziarnowa osadów. Za wlotem do zbiornika lub stawu odkładają się najgrubsze frakcje transportowane przez ciek, a w miarę zbliżania się do zapory czołowej (mnicha wylotowego) odkładają się coraz drobniejsze frakcje.

2. Zawartość składu ziarnowego umożliwia najkorzystniejsze dobranie obszaru wykorzystania osadów w celu poprawy mechanicznych właściwości gleby. Spoiste, bardzo drobnoziarniste osady powinny być stosowane na glebach luźnych, natomiast osad luźny na glebach ciężkich, poprawiając w ten sposób stosunki powietrzno-wodne w wierzchniej warstwie gleby. Skład mechaniczny osadów odpowiada glebom obszaru zlewni zamkniętych profilem zapory. Przedstawiona metoda określania średniego ciężaru objętościowego, opracowana dla zbiorników wodnych daje zadowalające wyniki również w stawach rybnych. Wykazane niewielkie różnice między wartościami pomierzonymi i obliczonymi mogą wiązać się z małymi średnicami osadów stawowych w porównaniu do osadów zbiornikowych. Potwierdza to fakt, że cząstki ilaste ulegają większemu rozdrobnieniu. Różnice mogą też wynikać z większej zawartości części organicznych w osadach stawów rybnych niż w osadach zbiornikowych.

3. Potwierdzają się zauważone wcześniej zdolności absorpcji metali ciężkich przez części organiczne zawarte w osadach dennych.

4. W wyniku przeprowadzonych badań nie stwierdzono istotnego związku granulacji osadu dennego (udziału drobnych frakcji) z zawartością w nim metali ciężkich.

5. Sprawom sedymentacji unosiny w zbiornikach w dalszym ciągu należy poświęcić wiele uwagi i badań. Pomiary granulometrii osadów należy przeprowadzać zarówno w stanie naturalnym (bez deflokulanta) jak i zgodnie z wymogami normy budowlanej (z dodatkiem deflokulanta). Zastosowanie bowiem węgla wapnia ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) do analizy wg metody Prószyńskiego zgodnie z Polską Normą zmienia kształt krzywych uziarnienia. Jest to tym istotniejsze, że na bazie tej metody klasyfikuje się typ gleby, stosując trójkąt Fereta. Również przebieg procesu sedymentacji jest odmienny dla cząstek sflokułowanych i deflokulowanych, co zostało potwierdzone podczas badań w kolumnach sedymentacyjnych.

6. Badania reologiczne osadów zbiornikowych potwierdziły prawidłowości, mówiące że:

– pojawienie się właściwości cieczy nienewtonowskiej w badanych osadach zbiornikowych i stawowych następuje po upływie kilku minut do kilku godzin;

– przejście z reżimu erozji łatwej do reżimu erozji trudnej następuje także w krótkim czasie (kilka godzin do kilku dni);

– natomiast przejście mieszaniny wodno-gruntowej z konsystencji płynnej do miękkoplastycznej może nastąpić po upływie kilku miesięcy lub kilku lat. Znajomość tych charakterystycznych czasów zagęszczania jest konieczna dla prawidłowego doboru systemu i urządzeń do odmulenia zbiorników wodnych.

7. Obciążenie osadów metalami ciężkimi jest nieznaczne. Zgodnie z wynikami zawartości metali ciężkich, osady denne mogłyby po wydobyciu być wykorzystane rolniczo, pod wszystkie uprawy polowe, do pełnego użytkowania rolniczego z wyłączeniem upraw roślin ogrodowych (tj. sałata, szpinak, kalafior, marchew) oraz roślin do produkcji żywności o szczególnie małej zawartości pierwiastków i substancji szkodliwych. Dozwolona jest uprawa roślin zbożowych, okopowych, pastewnych i wszystkich roślin przemysłowych oraz użytkowanie pastwiskowe. Rolnicze wykorzystanie osadów stawowych jest możliwe również ze względu na korzystną ilość substancji organicznych oraz przyswajalnego fosforu i potasu. Wątpliwe są natomiast walory użytkujące badanych osadów zbiornikowych. Planując ich rolnicze wykorzystanie, wskazane byłoby wzbogacenie masy osadów w makroskładniki przyswajalne dla roślin. Rolniczym zagospodarowaniem osadów nie są jednak zainteresowani lokalni rolnicy. Przykładem są wcześniejsze prace odmulające przeprowadzane w zbiornikach w Krempnej, Ześlavicach i Cierpisz. Władze lokalne, jak i rolnicy indywidualni zainteresowani byli jednak do wykorzystania tego materiału gruntowego jedynie do celów nierolniczych. Wydobyty urobek został wykorzystany do niwelacji lokalnych zagłębień terenu i pod obszary zielone. Osuszony i zagęszczony namuł stanowił również materiał budujący nowe nadbrzeża zbiornika, a także, w przypadku zbiorników rekreacyjnych, np. wyspy, urozmaicające krajobraz. Osady zbiornikowe mogą stanowić dobry materiał do rekultywacji obszarów zdegradowanych przemysłowo. Może być on podbudową nowej warstwy gleby wykształconej na powęglowych i pożużlowych hałdach, jak również może stanowić warstwę przykrywającą nieeksploatowane i poddane rekultywacji wysypiska śmieci.

## BIBLIOGRAFIA

- Batuca G. D., Jordaan M. J. Jr. *Silting and desilting of reservoirs*. A.A.Balkema. Rotterdam 2000, Netherlands, s. 353.
- Bednarczyk T. *Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie nr 291, Inżynieria Środowiska z. 15, Kraków 1994, s. 7–18.
- Bednarczyk T., Madeyski M. *Wstępna ocena doprowadzonych namulów do stawów o zróżnicowanym zasilaniu*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, s. Melioracje XXXIV, nr 189, 1990, s. 83–92.
- Bednarczyk T., Madeyski M. *Określenie ciężaru objętościowego osadów dennych stawów rybnych*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Inżynieria Środowiska, z. 23, 2002, s. 301–308.
- Bednarczyk T., Michalec B. *Wpływ akumulacji rumowiska w małym zbiorniku wodnym na warunki eksploatacji*. Materiały Konferencyjne „Mała Retencja w Kształtowaniu Środowiska”, Wrocław 1996a, s. 220–228.
- Bednarczyk T., Michalec B. *Appraisal of suspended load being carried into the small water reservoir*. Materiały konferencyjne VI-th Conference „The Contemporary Problems of Hydroengineering” Szklarska Poręba 1996b, s. 309–320.
- Bednarczyk T., Michalec B. 1997. *Sezonowość dostawy materiału unoszonego do małego zbiornika karpackiego*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. 13 Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997, s. 15–20.
- Bednarczyk T., Michalec B. *Określenie zdolności małych zbiorników wodnych do trwałego zatrzymywania rumowiska unoszonego*. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie, Inżynieria Środowiska, nr 382, Kraków 2001, z. 21 s. 113–120.
- Bednarczyk T., Michalec B. *Reduction in sediment trap efficiency of small reservoirs during their operation*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, seria Konferencje XXXVI, nr 438, 2002, s. 325–334.
- Bednarczyk T., Michalec B., Tarnawski M. *Intensywność zamulania małych zbiorników wodnych*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 393, ser. Inżynieria Środowiska, z. 23, 2002, s. 275–282.
- Bogárdi J. *Sediment transport in alluvial streams*. Akadémiai Kiadó, Budapest 1974.
- Bojakowska I. *Kryteria oceny zanieczyszczenia osadów wodnych*. Prz. Geol., vol. 49, nr 3, 2001.
- Bojakowska I., Gliwach T., Sokołowska G., Strzelecki R., Wołkowisz S. *Pierwiastki śladowe i promieniotwórcze w osadach zbiornika Włocławskiego*. Przegląd Geologiczny, vol. 49, nr 9, 2000.
- Bojakowska I., Sokołowska G. *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych w latach 1994–1995*. Państwowy Inspektorat Ochrony Środowiska, 1996.
- Bolesta W. *Zamulanie zbiorników zaporowych i sposoby przeciwdziałania*. Gospodarka Wodna, z. 7, 1966.
- Brański J. *Zmęczenie wody i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich*. Prace PIHM, z. 95, Warszawa 1968, s. 49–66.
- Brune G. M. *Trap efficiency of reservoirs*. Transactions, American Geophysical Union, No 34, 1953, s. 407–418.

- Chen C. N. *Design of sediment retention basins*. Proceedings of the National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control, Lexington, Kentucky 1975, s. 285–298.
- Cyberski J. *Badania akumulacji rumowiska w zbiornikach retencyjnych w Polsce*. Gospodarka Wodna nr 2, 1970.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982.
- Dendy F. E. *Sediment trap efficiency of small reservoirs*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol.17, No 5, 1974, s. 898–908.
- Dynowska I., Maciejewski M. *Dorzecze górnej Wisły. Część I, II*. PWN, Warszawa–Kraków 1991.
- Dziewoński Z. *Rolnicze zbiorniki retencyjne*. PWN, Warszawa 1973.
- Fal B. *O sezonach hydrologicznych w Polsce*. Wiad. Służby Hydrol.-Meteorol., z. 74, 1968.
- Figuła K. *Problemy gospodarki wodnej na ziemiach górskich*. Zeszyty Probl. Post. Nauk Roln. nr 14, 1958, s. 23–35.
- Florence N., Tarnawski M. *Changeability of heavy metal concentration in bottom sediment profiles in a chosen fish pond*. Geomatics and Environmental Engineering. Vol. 1, no. 1, 2007, s. 23–28.
- Froehlich W. *Dynamika transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej*. Prace Geograf. IGiPZ PAN, 1975, z. 114.
- Gładki H., Madeyski M. *Transport rumowiska w korzytce rzeki Raby w przekroju Stróża i Przeszówki*. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, nr 14, 1975.
- Głowski R. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu sedymentacji, zagęszczania i erozji osadów drobnoziarnistych*. Rozprawa doktorska, AR we Wrocławiu, 2000.
- Głowski R., Kempniński J., Parzonka Wł. *Zamulanie koryta Odry powyżej stopnia Brzeg Dolny*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, z. 270, 1995.
- Głowski R., Parzonka Wł., Madeyski M., Tarnawski M. *Evaluation of mud sedimentation, consolidation and erosion conditions in small storage reservoirs and fish ponds*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 2005, Nr 420, ser. Inżynieria Środowiska, z. 26, s. 391–404.
- Gorlach E., Gambuś F., Brydak K. *Zawartość metali ciężkich w glebach i roślinach łąkowych wokół Huty im. T. Sendzimira*. Acta Agr. et Silv. ser. Agr. XXXII, 1994.
- Graf W. A. *Hydraulic of reservoir sedimentation*. Ecole Polytechn. Feder. Lausanne. Laborat. d'Hydrauliques, 1984.
- Hartung F. *Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren*. Wasserwirtschaft, 1, 1959.
- Heinemann H. G. *Volume – Wright of reservoir sediment*. J. Hydr. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Engng. No. 5, 1962, s. 27–34.
- Heinemann H. G. *Reservoir trap efficiency* [in:] *Erosion and Sediment Yield*. Geo Books, Norwich 1984, s. 201–218.
- Helios–Rybicka E. *Rola mineralów ilastych w wiązaniu metali ciężkich przez osady rzeczne górnej Wisły*. Zesz. Nauk. AGH, nr 1050, Geologia 32. Rozpr. Hab., Kraków 1986.
- Kabata-Pendias A. *Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb*. IUNG, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1995.
- Kemblowski Z. *Reometria płynów nienewtonowskich*, WNT, Warszawa 1973.
- Kostecki M. *Metale ciężkie w osadach dennych zbiorników zaporowych*. Materiały Konferencji Naukowej Odra 2000, Karpacz 2000.
- Kostecki M., Domurad A., Kowalski E., Kozłowski J. *Badania limnograficzne zbiornika zaporowego Dzierżno Małe cz. III metale ciężkie w osadach dennych zbiornika*. Arch. Ochr. Środ. vol 24, nr 2, 1998.
- Kostecki M., Kowalski E. *Alokacja metali ciężkich w osadach dennych zbiornika rybnickiego*. Arch. Ochrony Środow. PAN, vol. 30, nr 4, 2004, s. 53–62.
- Koszelnik P. *Metale ciężkie w zbiorniku rzeszowskim zanieczyszczające osad denny*. Zjazd Naukowy PTChem i SITPChem, Rzeszów 1999.

- Kwapuliński J. *Cumulation of radioactive substance in dam reservoirs*. Asta Hydrobiol., nr 15, 1973, s. 215–225.
- Kwapuliński J., Wierchuła D., Sarosiek J. *The a Accumulation of Cs and Ra by aquatic plants in the Goczałkowice Reservoir and growing in the shore*. Acta Hydrobiol., nr 32, 1990, s. 131–137.
- Kwapuliński J., Wiechuła D., Anders B. *The occurrence of selected heavy metals in bottom sediments in the Goczałkowice Reservoir (southern Poland)*. Acta Hydrobiol., 33, 1991, s. 177–186.
- Kyzioł J. *Minerały ilaste jako sorbent metali ciężkich*. Prace i Studia IPS PAN, nr 43, 1994.
- Lapszenkov W. S. *Rasczot zailenija podpiertych bieraw*. Gidrotechnicheskoe Stroitelstwo, Nr 3, 1957.
- Lis J., Pasieczna A. *Atlas geochemiczny Krakowa i okolic*. Skala 1:100 000. PIG, 1995a.
- Lis J., Pasieczna A. *Atlas geochemiczny Polski*. Skala 1:250 000. PIG, 1995b.
- Loska K., Cebula J., Pelczar J., Wierchuła D., Kwapuliński J. *Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation index to evaluate the content of Cd, Cu and Ni in the Rybnik water reservoirs in Poland*. Water, Air and Soil Pollution, nr 93, 1997.
- Loska K., Wiechuła D., Pelczar J., Kwapuliński J. *Occurrence of heavy metals in the waters of a heated reservoir (the Rybnik Reservoir, southern Poland)*. Acta Hydrobiol., 36, 1994, s. 267–279.
- Łajczak A. *Wpływ pomiaru, obliczeń i okresu obserwacji na wartość miar transportu zawiesiny na przykładzie rzek w polskich Karpatach*. Gospodarka Wodna nr 6, 1989.
- Łajczak A. *The rates of silting and the useful lifetime of dam reservoirs in the Polish Carpathians*. Zeitschrift fuer Geomorph., 38 (2), 1994.
- Łajczak A. *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. 8, 1995.
- Madeyski M. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, rozprawy, z. 236, 1998.
- Madeyski M. *Reologia osadów stawowych*. Zesz. Nauk. AR Kraków, s. Inżynieria Środowiska, z.18, 1999, s. 37–47.
- Madeyski M., Tarnawski M. *Wstępna ocena ilości i jakości osadów dennych wydzielonej części zbiornika wodnego „Besko” na rzece Wisłok*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich PAN, Kraków, nr 4/1, 2006a, s. 101–110.
- Madeyski M., Tarnawski M. *Ocena stanu ekologicznego osadów dennych wybranych małych zbiorników wodnych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich PAN, Kraków, nr 4/3, 2006b, s. 107–116.
- Michalec B. *Ocena stopnia zamulenia małych zbiorników karpaccich na tle natężenia transportu rumowiska unoszonego i wleczzonego*. Rozprawa doktorska AR Kraków, Katedra Inżynierii Wodnej, 2001.
- Michalec B. *Analiza procesu zamulania małych zbiorników wodnych*. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, z. 2(2), 2003a, s. 35–46.
- Michalec B. *An attempt to classify of water reservoirs based on capacity inflow ratio*. Acta horticulturae et regioteecturae. Mimoriadne číslo. Ročník 6. 2003b, s. 134–136.
- Michalec B. *Próba prognozy zamulenia małego zbiornika wodnego na cieku niekontrolowanym hydrologicznie*. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, z. 3(1), 2004, s. 63–71.
- Migniot C. *Etude des propriétés physiques de différents sédiments sous des actions hydrodynamiques*. La Houille, Blanche, nr 8, 1968, s. 591–620.
- Mioduszewski W. 1997. *Small retention and protection of water resources*. Gospodarka Wodna, nr 3, 1997, s. 66–70.
- Mokwa M. *Sterowanie procesami fluwialnymi w korytach rzek przekształconych antropogenicznie*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, rozprawy, nr CLXXXIX, 2002.

- „Opracowanie wyników pomiarów rumowiska unoszonego do wydawnictw rocznikowych – wskazówki”. Wyd. IMGW, Warszawa 1982.
- Parzonka W. *Reologiczne zachowanie się jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych*. Rozprawa habilitacyjna, IPUW, Wrocław 1968.
- Parzonka W. *Ocena zmienności właściwości fizycznych i reologicznych osadów ze zbiorników wodnych Sautet i Lubachów*. Arch. Hydrotechniki, t. XXI, z. 4, 1974.
- Parzonka W. *Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych*. Skrypty AR we Wrocławiu, nr 179, 1977.
- Parzonka W. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka transportu zawiesiny rzecznej o wysokiej koncentracji w obrębie kaskady zbiornikowej*. Arch. Hydrotechniki, t. XXXIII, z. 4, 1986, s. 377–396.
- Parzonka W. *Erozja, transport i sedimentacja rumowiska w rzekach i zbiornikach*. Materiały XI Ogólnopolskiej Szkoły Hydrauliki PAN, IBW Gdańsk 1991, s. 81–99.
- Parzonka W. *Deposition and erosion of fine sediments in reservoirs*. Lecture during the Tempus course of Erosion. SGGW, Warszawa 1994.
- Parzonka W., Kempniński J. *Reologiczna ocena procesu sedimentacji i osadzania namulów jeziornych*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, melioracje, XLI, 1991, s. 55–64.
- Parzonka W., Kempniński J. *Charakterystyka reologiczna namulów jeziornych*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 212, Melioracje XLI, 1992.
- Pasternak K. *The properties of sediments of the dam at Porąbka*. Acta Hydrobiol., z. 12, 1969, s. 161–376.
- Pasternak K., Gliński J. *Występowanie i akumulacja mikroskładników w osadach dennych zbiorników zaporowych południowej Polski*. Acta Hydrobiol. nr 14/3, 1972, s. 225–255.
- Piečninov D. *Wyčislenie zailienija malych vodochranilišč*. Sympozjum Aktualnych Problemów Regulacji Rzek i Ruchu Rumowiska, Budapeszt 1968.
- Polska Norma PN-86/B-02480 1986. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- Porozumienie z dnia 21.12.1995 roku zawarte między Wicepremierem Rady Ministrów, Ministrem Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej a Ministrem Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa dotyczące współpracy w zakresie programu małej retencji, (<http://www.mos.gov.pl/dzw/dokumenty/>).
- Prytkowa M. J. *Zailenje malych vodochranilisc stiepnj pasti sievierneho Kavkaza i jego razcot*. Trudy Lab. Ozierowiedienija. IZD. Leningradsogo Uniwiersiteta, 1969, s. 130–140.
- Radczuk L. *Informacja hydrologiczna dla celów projektowania małych zbiorników retencyjnych*. Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Mała retencja wodna”, Informacje Naukowe i Techniczne nr 1, 1997.
- Rausch D. L., Heinemann H. G. *Measurement of reservoir sedimentation [in:] Erosion and Sediment Yield: Some Methods of Measurement and Modeling*. 1984, s. 179–200.
- Reczyńska-Dutka M. *Ecology of some waters in the forest-agricultural basin of the River Brynica near the Upper Silesian Industrial Region*. 3. Chemical composition of the water. Heavy metals. Acta Hydrobiol., 27, 1985, s. 451–464.
- Renowacja zbiornika rekreacyjnego na rzece Wisłoka w miejscowości Krempna. 1987. Dokumentacja Techniczna, maszynopis, Jasło.
- Roehl J. *Sediment source area, delivery ratios and influencing morphological factors*. IAHS publ. 59, 1962, s. 202–213.
- Šamov G. I. *Rečnyje nanosy*. Gidrometeoizdat, Leningrad 1959.
- Scheuerlein H. *Reservoir sedimentation*. Contribution to the Tempus Course an Sediment Transport – Theory and practical applications. Warsaw 1999, s. 10–15.
- Schoklitsch A. *Handbuch des Wasserbaues*. T. I, Wien 1956.
- Schramm G. *Reologia*. Podstawy i zastosowanie. Ośrodek Wydawn. Nauk. PAN, Poznań 1998.

- Szarek-Gwiazda E. *The effect of abiotic factors on the content and mobility of heavy metals in the sediment of a eutropic dam reservoir (Dobczyce Reservoir, southern Poland)*. Acta Hydrobiol. nr 40, 1998, s. 121–129.
- Tarnawski M. *Charakterystyka osadów dennych w niektórych małych zbiornikach wodnych*. Rozprawa doktorska AR Kraków, Wydz. Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej 2003.
- Tarnawski M. *Evaluation of possibilities of bottom sediment removal in result of rheological and sedimentary investigations*. Acta horticulturae et regiotecturae, roč. 10, č. 2, 2007.
- Tarnawski M., Michalec B. *Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów dennych zbiornika wodnego w Wilczej Woli*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich PAN, Kraków, vol. 3/1, 2006, s. 31–43.
- Van Rijn L. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and costal seas*. Acta publications – I, 11, Amsterdam 1993.
- Wardas M., Helios-Rybicka E., Pytel M. *Metale ciężkie i ich formy wiązania w osadach dennych rzeki Odry*. Mat. Konf. „Geologiczne aspekty ochrony środowiska”. Kraków 1991.
- Wischmeier H. W., Smith D. D. *Predicting rainfall erosion losses-a guide from cropland east of the Rocky Mountains*. USDA, Agriculture Handbook, No. 282, 1965, s. 47.
- Wiśniewski B., Kutrowski M. *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej*. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytoczne instruktażowe, Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa 1973.
- Witek T., Koter M. *Mapa glebowo-rolnicza Polski w skali 1:1000000*. Wyd. Geolog., Warszawa 1975.
- Wojtkowska M. 1998. *Metale ciężkie w toni wodnej i osadach dennych jeziora Zegrzyńskiego*. Mater. Konf. „Ochrona jakości i zasobów wód, zasady racjonalnej gospodarki wodą”. Zakopane–Kościelisko 1998, s. 109–117.
- Założenia techniczno-ekonomiczne „Łęg – Przyrwa”. Sprawozdanie techniczne i część opisowa, maszynopis, Biuro Projektów Wodnych Melioracji w Rzeszowie, Rzeszów 1973.
- Żbikowski A., Żelazo J. *Ochrona środowiska w budownictwie wodnym*. Materiały informacyjne. Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Agencja Wydawnicza „Falstaff”, Warszawa 1993, s. 155.

Prof. dr hab. inż. Marek Madeyski  
Dr inż. Bogusław Michalec  
Dr inż. Marek Tarnawski  
Uniwersytet Rolniczy  
Katedra Inżynierii Wodnej  
Al. A. Mickiewicza 24/28  
30-059 Kraków  
tel. (0-48-12) 633-53-42,  
e-mail rmmadeys@cyf-kr.edu.pl  
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl  
e-mail rmtarnaw@cyf-kr.edu.pl



## ZAMULANIE MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH I JAKOŚĆ OSADÓW

### Streszczenie

Przyczyną ograniczającą żywotność zbiorników wodnych są procesy erozyjne w zlewniach. Znaczna ilość dostarczonych do rzek produktów erozji zostaje odłożona w sztucznych zbiornikach zaporowych. Określenie wielkości zamulenia małych zbiorników retencyjnych w czasie ich eksploatacji i wskazanie właściwych metod prognozowania zamulenia jest szczególnie istotnym zagadnieniem inżynierskim, zwłaszcza wobec realizowanego programu małej retencji. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów zamulenia dwunastu małych zbiorników retencyjnych znajdujących się w dorzeczu Górnej Wisły. Określony średni stopień zamulenia badanych zbiorników retencyjnych wynosi od 0,06% do 6,38%. Przedstawiono szczegółową prognozę zamulenia czterech wybranych zbiorników wodnych, dwóch znajdujących się na ciekach kontrolowanych hydrologicznie – zbiorniki Krempna i Maziarnia oraz dwóch zlokalizowanych na ciekach nieobjętych obserwacjami hydrologicznymi. Celem pracy jest ocena możliwości prognozowania zamulenia małych zbiorników retencyjnych za pomocą wzorów empirycznych Gončarova i Šamova oraz na podstawie określonej intensywności zamulania według wzorów Schoklitscha i Piečinoва. Wyznaczono współczynniki pojemności  $\alpha$  i współczynniki zlewniowe  $C/W$  badanych zbiorników, które umożliwiły określenie zdolności do zatrzymywania rumowiska z nomogramów Łopatina, Brune'a, Drozda, Brune'a i Allena, Browna, Gottschalka i Churchilla. Stwierdzono, że jedynie z nomogramu Churchilla można prawidłowo wyznaczyć zdolność małych zbiorników retencyjnych do zatrzymywania rumowiska, która jest najbliższa wartościom rzeczywistym, określonym z bilansu rumowiska dopływającego i zatrzymanego w zbiorniku.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że prognoza zamulenia badanych zbiorników retencyjnych określona za pomocą wzorów Gončarova i Šamova, w których  $\beta$  określona została z nomogramu Churchilla, jest najbliższa wynikom pomiarów. Ze względu na znaczne różnice wyników pomiarów zamulenia i wyników prognozy zamulenia opracowanej za pomocą wzorów Schoklitscha i Piečinoва, wzory te nie powinny być stosowane w obliczeniach zamulenia małych zbiorników retencyjnych.

Badania procesu zamulania nie powinny ograniczać się do określenia ilości materiału dopływającego do zbiornika wodnego lub stawu rybnego, lecz powinny również uwzględniać badania właściwości fizycznych, chemicznych i reologicznych osadów. Określenie tych właściwości osadów umożliwić może podjęcie decyzji o sposobie ich wydobycia, a następnie ich zagospodarowania lub utylizacji.

Ze względu na wysokie tempo zamulania małych zbiorników wodnych i stawów rybnych muszą one być odmulane po stosunkowo krótkim czasie użytkowania.

Wieloletnie badań umożliwiły przedstawienie wyników ich właściwości fizycznych, chemicznych i reologicznych osadów dennych w małych zbiorników wodnych oraz niektórych stawach rybnych. Właściwości fizyczne i reologiczne decydować bowiem mogą o możliwości i sposobie wydobycia osadów z dna, a właściwości chemiczne o ewentualnym ich przyrodniczym wykorzystaniu (ważna jest dokładna analiza obecności w osadach m. in. metali ciężkich). Badane stawy rybne położone były w okolicach Krakowa i Bielska-Białej, a zbiorniki wodne o pojemności od 60 tys. do 3,8 mln m<sup>3</sup> zlokalizowane były na obszarze Małopolski i Podkarpacia. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że własności reologiczne świadczą o szybkim przebiegu procesu zagęszczania (rzędu kilku godzin do kilku dni), uniemożliwiając usunięcie osadów z dna przy użyciu metod hydrotransportu. Natomiast obciążenie osadów metalami ciężkimi jest nieznaczne, a obecność w nich mikro- i makroelementów jest korzystna dla organizmów roślinnych. W związku z tym wydobyte osady mogą być wykorzystane rolniczo, pod wszystkie uprawy polowe. Dozwolone jest wzbogacenie osadami gruntów rolniczych pod uprawy roślin zbożowych, okopowych oraz użytkowanie pastwiskowe.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, staw rybny, zamulanie, model reologiczny, zanieczyszczenie metalami ciężkimi

## SILTING OF SMALL WATER RESERVOIRS AND QUALITY OF SEDIMENTS

### *Summary*

*Erosive processes are the limitative vitality of water reservoirs in catchment areas. Considerable quantity of the delivered erosion products to rivers are deposited in artificial barrage reservoirs. Qualification of the silting volume of small retention reservoirs in time of their operation and indication of the proper methods of silting forecast is a particularly essential engineering question especially in relation of the realized programme of small retention. The measurements results of silting of twelve small retention reservoirs being in the river-basin of the Upper Vistula were introduced in this paper. The determined mean silting degree of studied reservoirs carries out from 0,06 % to 6,38 %. Detailed silting forecast of four chosen water reservoirs was presented, two situated on water-courses with hydrological control - reservoirs Krempna and Maziarnia, and two situated on water-courses not included hydrological observations. The aim of the paper is appraisal of the possibility of silting forecast of small retention reservoirs by help of Gončarov's and Šamov's empirical formulas and on the basis of the determined intensity of silting according to Schoklitsch's and Piečinov's formulas. The capacity-inflow ratios -  $\alpha$ , capacity-watershed ratios -  $C/W$  of studied water reservoirs were marked. This coefficients made it possible to qualify of ability to trapping of sediments according to nomographs of Lopatin, Brune, Drozd, Brune and Allen, Brown, Gottschalk and Churchill. It was affirmed, that sediment trap efficiency of small retention reservoirs closest real value, determined from the balance the sediment incoming and deposited in the reservoir, can be received from Churchill's nomograph.*

*In the result of carried out calculations it was stated, that the results of silting forecast of studied retention reservoirs by help of Gončarov's and Šamov's formulas, in which  $\beta$  was determined from Churchill's nomograph are closest to the value obtained from measurements. However Schoklitsch's and Piečinov's methods should be not applied in the calculations of silting of small retention reservoirs.*

*Investigations of the silting process should not be restricted to appraisal of material quantity flowing into the reservoir or fish ponds but physical, chemical and rheological properties of sediments should also be considered. Determination of these properties of sediments may contribute to undertaking a decision as to the system of their removal, subsequent management or utilization. With regard the high silting rate of small water reservoirs and fish ponds these must be desilted after a relatively short period of operation. Long years' investigations permitted presentation of investigation study results on physical, chemical and rheological*

*properties of deposited bottom sediments of small water reservoirs and some fish ponds.*

*Physical and rheological properties can decide about the possibilities and way of sediment removal from the bottom, whereas chemical properties decide about their possible utilization in nature (an exact analysis of heavy metal presence in sediments is very important). The examined fish ponds are located in the vicinity of Krakow and Bielsko-Biala, and water reservoirs of storage volume from 60 thousand to 3,8 million m<sup>3</sup> are located on the Little Poland and Subcarpathian territory. The investigation results permit to state that rheological properties give evidence of fast progress of mud consolidation (a few to over ten days) and in consequence of no possibility of sediment removal from the bottom by the stream. On the other hand, the content of heavy metal in sediments is low and presence of micro- and macro elements in them is positive. In connection of it the removed sediments may be used in agriculture in the possible plant cultivations. Enrichment of agricultural soils under grain and root crops and on pastures is admitted.*

**Key words:** *small water reservoir, fish pond, silting, rheological model, heavy metals pollution*

### ***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 ÖKOLOGIE DES LÄNDLICHEN 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 Länge von 3000 Zeichen (1 Druckseite) nicht übersteigen sollte.

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

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