

MONOGRAFIE
STUDIA
ROZPRAWY

M96

Łukasz Bąk

ZAMULANIE I OSADY MAŁYCH ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH NA WYŻYNIE KIELECKIEJ



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2017

MONOGRAFIE
STUDIA
ROZPRAWY

M96

Łukasz Bąk

**ZAMULANIE I OSADY
MAŁYCH ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH
NA WYŻYNIE KIELECKIEJ**

Kielce 2017

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M96

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE – INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

prof. dr hab. inż. Andrzej KULICZKOWSKI

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Szczepan Ludwik DĄBKOWSKI

prof. dr hab. inż. Jerzy RATOMSKI

Redakcja

Aneta STARZYK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2017

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-21-8

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7

tel./fax 41 34 24 581

e-mail: wydawca@tu.kielce.pl

www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

SPIS TREŚCI

Spis oznaczeń	5
1. Wprowadzenie	9
2. Tematyka, cel i zakres pracy	13
3. Charakterystyki procesu zamulania i osadów	15
3.1. Właściwości osadów	15
3.1.1. Charakterystyka składu granulometrycznego osadów	15
3.1.2. Gęstość objętościowa osadów	18
3.1.3. Gęstość właściwa osadów	21
3.1.4. Materia organiczna w osadach dennych	21
3.1.5. Właściwości chemiczne osadów	22
3.2. Wybrane wskaźniki charakteryzujące proces zamulania zbiorników wodnych	24
3.2.1. Zdolność zbiorników wodnych do trwałego przechwytywania rumowiska	24
3.2.2. Stopień i współczynnik zamulenia	27
4. Charakterystyka obiektów badawczych	28
4.1. Ogólne omówienie zbioru obiektów	28
4.2. Charakterystyka obiektów	30
4.2.1. Zbiornik Jaśle	30
4.2.2. Zbiornik Kaniów	31
4.2.3. Zbiornik Lubianka	32
4.2.4. Zbiornik Suchedniów	34
4.2.5. Zbiornik Umer	35
4.2.6. Zbiornik Wilków	36
4.2.7. Zbiornik Zachemie	37
4.2.8. Zbiornik Zalew Kielecki	38
5. Zakres i metodyka badań własnych	40
5.1. Zakres badań	40
5.2. Metodyka badań terenowych	41
5.2.1. Sondowanie badanych zbiorników zaporowych	41
5.2.2. Pobór próbek osadów	41
5.2.3. Pomiary hydrometryczne	42
5.3. Metodyka badań i analiz laboratoryjnych	43
5.3.1. Oznaczenie składu mechanicznego osadów	43
5.3.2. Oznaczenie wybranych właściwości fizycznych osadów dennych	43
5.3.3. Oznaczenie wybranych właściwości chemicznych osadów dennych	43
5.4. Metoda określania pojemności zbiorników, ilości i właściwości fizycznych osadów	44

5.4.1. Przygotowanie danych batymetrycznych do analizy	44
5.4.2. Wyznaczenie pojemności zbiornika i objętości osadów	44
5.4.3. Interpolacja przestrzenna właściwości fizycznych osadów w zbiornikach	45
6. Badania własne	46
6.1. Stan zamulenia małych zbiorników zaporowych	46
6.1.1. Wyniki pomiarów zamulenia małych zbiorników zaporowych	46
6.1.2. Analiza błędów oceny objętości osadów zatrzymanych w zbiorniku	55
6.1.3. Parametry fizjograficzne zlewni a zamulanie badanych zbiorników wodnych	60
6.1.4. Rozkład osadów w małych zbiornikach wodnych	64
6.1.5. Ocena możliwości wykorzystania wyników punktowych pomiarów grubości osadów do szacowania objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku	67
6.1.6. Zdolność małego zbiornika do trwałego zatrzymywania rumowiska unoszonego	70
6.1.7. Ocena możliwości wykorzystania pomiarów zamulenia zbiorników do oceny ilości rumowiska odpływającego ze zlewni	73
6.2. Wybrane właściwości fizyczne osadów	76
6.2.1. Skład granulometryczny osadów	76
6.2.2. Zawartość materii organicznej	85
6.2.3. Gęstość objętościowa i właściwa osadów	87
6.2.4. Ocena przydatności formuł do wyznaczenia początkowej gęstości objętościowej osadów	90
6.2.5. Wzór do obliczania początkowej gęstości objętościowej osadów	93
6.2.6. Wpływ czasu odsłonięcia osadów na ich gęstość	96
6.3. Wybrane właściwości chemiczne osadów	96
6.3.1. Zawartość wybranych pierwiastków w osadach dennych	96
6.3.2. Specjacja metali ciężkich	103
6.3.3. Możliwość wykorzystania osadów dennych	105
7. Wnioski	107
Literatura	110
Streszczenie	121
Summary	125

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Carpena E., Gmiero B., Fedrizzi G., Serra R.: Trace metals (Zn, Cu and Cd) in fish from rearing ponds of Emilia-Romagna region (Italy). *Science of the Total Environment* 141(1994), s. 139–146.
- [3] Linnik P.M., Zubenko I.B.: Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy metal compounds. *Lakes and Reservoirs Research and Management Journal* 5(1)(2000), s. 11–21.
- [4] Szalińska E.: Reservoirs as a trap for pollutants. W: NEAR curriculum in natural environmental science. Red. Dominik J., Chapman D., Loizeau J-L., Stanica A., Vignati D.A.L. *Terre & Environment* 88(2010), s. 205–209.
- [5] Szalińska E.: Rola osadów dennych w ocenie jakości środowiska wód kontynentalnych. Monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Inżynieria Środowiska 2011, s. 124.
- [6] Ambedkar G., Muniyan M.: Analysis of heavy metals in water, sediments and selected freshwater fish collected from Gadilam river, Tamilnadu, India. *International Journal of Toxicology and Applied Pharmacology* 2 (2)(2012), s. 25–30.
- [7] Jancewicz A., Dmitruk U., Sośnicki Ł., Tomczuk U., Bartczak A.: Wpływ zagospodarowania zlewni na jakość osadów dennych w wybranych zbiornikach zaporowych. *Ochrona Środowiska* 34(4)(2012), s. 29–34.
- [8] Darwish M.A.G.: Geochemistry of the High Dam Lake sediments, south Egypt: implications for environmental significance. *International Journal of Sediment Research* 28(2013), s. 544–559.
- [9] Zeng H., Wu J.: Heavy metal pollution of lakes along the Mid-Lower Reaches of the Yangtze River in China: Intensity, sources and spatial patterns. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10(2013), s. 793–807.
- [10] Program małej retencji dla województwa świętokrzyskiego. Świętokrzyski Zarząd i Urzędzeń Wodnych w Kielcach. Wrocław 2006, cz. II, s. 119.
- [11] Mikulski Z.: Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich. *Gospodarka Wodna* 1(1961), s. 461–463.
- [12] Dębski K.: Hydrologia kontynentalna, cz. I. WKŁ, Warszawa 1955, s. 402.
- [13] Graf W.: Hydraulic of sediment transport. McGraw-Hill, New York 1984, s. 513.
- [14] Brown C.B.: Discussion of Sedimentation in reservoirs by J. Witzig. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 69(1943), s. 1493–1500.
- [15] Brune G.M.: Trap efficiency of reservoirs. *Transactions of the American Geophysical Union* 34(1953), s. 407–418.

- [16] Morris H.M.: *Applied Hydraulics in Engineering*. The Ronald Press Co., New York 1963, s. 450.
- [17] Heinemann H.G.: A new sediment trap efficiency Curve form small reservoirs. *Water Resource Bulletin*. 17(5)(1981), s. 825–830.
- [18] Ward A.D., Trimble S.W.: *Environmental Hydrology*. Second Edition. A CCR Press Company. London 2004, s. 473.
- [19] Brański J.: Ocena denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów transportu rumowiska unoszonego. *Prace Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 6(1975), s. 5–55.
- [20] Gładki H., Madeyski M.: Transport rumowiska w korycie rzeki Raby w przekroju Stróża i Proszówki. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich* 14(1975), s. 117–131.
- [21] Gładki H.: Związek pomiędzy ilością materiału unoszonego a przepływem na obszarze karpackiego dorzecza Wisły. W: *Studia i badania w zakresie budownictwa rolniczego i gospodarki wodnej w rolnictwie*. Kraków PAN (1979), s. 3–17.
- [22] Brański J.: Sediment run-off from the catchment area of the Carpathian rivers. *Acta Hydrobiol* 1(1980), s. 89–100.
- [23] Ciupa T.: Wpływ zagospodarowania terenu na odpływ i transport fluwialny w małych zlewniach na przykładzie Sufragańca i Silnicy, Wydawnictwo Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego Jana Kochanowskiego. Kielce 2009, s. 251.
- [24] Łajczak A.: Zróżnicowanie transportu zawiesiny w Karpackiej części Dorzecza Wisły. Wrocław Ossolineum, Dokumentacja Geograficzna IGiPZ PAN 5(1989), s. 85.
- [25] Ali Kokpinar M., Burcu Altan-Sukarya A., Yurdagal Kumcu S.: Assessment of sediment yield estimations for large watershed areas: a case study for the Seyhan, Demirköprü and Hirfanlı reservoirs in Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 60(11–12)(2015), s. 2189–2203.
- [26] Asselman N.E.M.: Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234(2000), s. 228–248.
- [27] Horowitz A.J., Chemist R.: The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: A matter of temporal resolution. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, Reno NV(2002), s. 1–3.
- [28] Khanchoul K., Jansson M.B.: Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 90(3)(2008), s. 227–236.
- [29] Fuladipana M., Makvandi A.: Application of the usbr equation for surveying balance of sediment yield in Dez river branches in Iran. *Environment Protection Engineering* 39 (3)(2013), s. 186–195.
- [30] Dąbkowski S.L., Skibiński J., Żbikowski A.: *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982, s. 533.
- [31] Popek Z.: *Warunki ruchu rumowiska wleczonego w małej rzece nizinnej*. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2006, s. 230.
- [32] Dębski K.: *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski*. Warszawa, *Prace i Studia KGW PAN* 2(1)(1959), s. 477–481.

- [33] Reniger A.: Zagadnienia erozji gleb w Polsce. *Prace i Studia KGW PAN* (1959), s. 439–460.
- [34] Du Boys D.: Le Rhône et les rivières à lit affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées* 5(18)(1897), s. 141–195.
- [35] Schoklitsch A.: Über die verkleinerung der Geschiebe in Flussläufen. *Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. in Wien*. 142(1933), s. 343–366.
- [36] Meyer-Peter E., Müller R.: Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research* (1948), s. 39–64.
- [37] Engelund F., Hansen H.: Hydraulic resistance in alluvial streams. *Journal of Hydraulic Division* 92(2)(1966), s. 315–326.
- [38] Engelund F., Hansen E.: A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, Denmark 1972, s. 65.
- [39] Dąbkowski S.L.: O przydatności niektórych wzorów empirycznych do określania intensywności wleczenia. *Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego* 106(1972), s. 47–62.
- [40] Ackers P., White W.R.: Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of Hydraulic Division* 99(11)(1973), s. 2041–2060.
- [41] Yang C.T.: Incipient motion and sediment transport. *Journal of Hydraulic Division* 99(10)(1973), s. 1679–1704.
- [42] Skibiński J.: Próba ilościowej oceny intensywności transportu rumowiska wleczanego w rzekach środkowej Polski. *Zeszyty Naukowe SGGW-AR. Rozprawy Naukowe* 74(1976), s. 111.
- [43] Van Rijn L.C.: Bed load transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 110(10)(1984), s. 1431–1456.
- [44] Wiśniewski B.: Dokładność pomiarów zamulenia zbiorników wodnych (artykuł dyskusyjny). *Gospodarka Wodna* 3(1975), s. 84–86.
- [45] Salas J.D., Shin H.S.: Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(4)(1999), s. 339–350.
- [46] Głowski R., Parzonka W., Kempański J., Eckstädt H.: Charakterystyka reologiczna procesu sedymentacji i erozji namulów rzecznych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4(2)(2007), s. 47–60.
- [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* 4(1)(2007), s. 149–157.
- [48] Parzonka W., Głowski R., Kreft A.: Wstępna ocena cech dynamicznych namulów z jeziora Dąbie. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4(2)(2007), s. 149–157.
- [49] Głowski R., Parzonka W.: Erozyjna charakterystyka drobnoziarnistych osadów o cechach spoistych z jeziora Dąbie. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 9(2008), s. 297–306.
- [50] Senze M., Kowalska-Górska M., Zięba E.: Bioakumulacja miedzi, niklu, kadmu, ołowiu i cynku w osadach dennych zbiornika Owiesno (województwo dolnośląskie). *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Biologia i Hodowla Zwierząt* LX(577)(2010), s. 125–133.
- [51] Krumbein W.C.: Size frequency distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 4(2)(1934), s. 65–77.

- [52] Folk R.L., Ward W.C.: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27(1957), s. 3–26.
- [53] Ratomski J.: Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich. Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2012, s. 149.
- [54] Little W.C., Mayer P.G.: Stability of channel beds by armoring. *Journal of Hydraulic Division* 102(1976), s. 1647–1661.
- [55] Bąk Ł., Dąbkowski S.L.: Spatial distribution of sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development* 19(VII–XII)(2013), s. 13–22.
- [56] Michalec B.: Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie. Rozprawy* 328(2008), s. 193.
- [57] Górski D., Popek Z., Banasik K., Hejduk Ł.: Impact of small reservoir on reduction of solid transport. W: Prediction and reduction of diffuse pollution, solid emission and extreme flows from rural areas: case study of small agricultural catchments. Red. Banasik K., Øygarden L., Hejduk L. Warszawa SGGW (2011), s. 219–232.
- [58] Carvalho N.O., Júnior N.P.F., Coutinho dos Santos P.M., Lima, J.E.F.W.: Reservoir Sedimentation Assessment Guideline. Brazilian Electricity Regulatory Agency. Hydrological Studies and Information Department. Brasilia 2000, s. 76.
- [59] Lane E.W., Koelzer V.A.: Density of sediments deposited in reservoirs. Report No. 9. US Interdepartmental. Committee, Corps of Engineers: St.-Paul, Minnesota 1943, s. 101.
- [60] Komura S.: Discussion of “Sediment transportation mechanics: introduction and properties of sediment”. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings Paper* 3405(1963), s. 263–266.
- [61] Lara J.M., Pemberton E.L.: Initial unit weight of deposited sediments. *Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference. USDA-ARS Miscellaneous Publication* 970(1963), s. 818–845.
- [62] Ferrari R.L.: 2001 Lake made sedimentation survey. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, Colorado 2008, s. 146.
- [63] Samadi Boroujeni H., Fathi-Moghadam M., Shafaei-Bejestan M.: Investigation on bulk density of deposited sediment in Dez Reservoir. *Trends in Applied Science Research* 4(3)(2009), s. 148–157.
- [64] Verstraeten G., Poesen J.: Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields. *Earth Surf. Process. Landforms* 26(2001), s. 375–394.
- [65] Wiśniewski B.: Zamulenie zbiorników wodnych w Polsce oraz próba jego prognozy na podstawie intensywności denudacji. *Archiwum Hydrotechniki* 16(4)(1969), s. 481–504.
- [66] Cyberski J.: Badania akumulacji rumowiska w zbiornikach retencyjnych w Polsce. *Gospodarka Wodna* 2(1970), s. 43–46.
- [67] Dendy F.E.: Distribution of sediment deposits in small reservoirs. *Transactions of the ASAE* 25(1)(1982), s. 100–104.
- [68] Heinemann H.G.: Volume – Weight of reservoir sediment. *Journal of the Hydraulics Division* 88(5)(1962), s. 181–190.
- [69] Morris G.L., Fan J.: Reservoir Sedimentation Handbook. Electronic Version 1.04. McGraw-Hill Book Company, New York 2010, s. 805.

- [70] Batuca G.D., Jordaan M.J.: Silting and desilting of reservoirs. Rotterdam, Netherlands. A.A. Balkema 2000, s. 353.
- [71] Lara J.M., Sanders J.I.: The 1963–64 Lake Mead survey. U.S. Bureau of Reclamation, Report REC-OCE-70-21 1970, s. 172.
- [72] Lara J.M.: The 1967 Altus Reservoir sediment survey. U.S. Bureau of Reclamation, Report REC-ERC-71-21 1971, s. 41.
- [73] Ortt Jr., R.A., Kerhin R.T., Wells D.V., Cornwell J.: Bathymetric survey and sedimentation analysis of Loch Raven and Prettyboy Reservoirs. Maryland Geological Survey. Coastal and Estuarine Geology Program. File Report 99-04(2000), s. 89.
- [74] Lovell J.P.B., Ledger D.C., Davies M., Tipper J.C.: Rate of sedimentation in the North Esk Reservoir, Midlothian. Scottish Journal of Geology 9(1973), s. 57–61.
- [75] Ledger D.C., Lovell J.P.B., Cuttle S.P.: Rate of sedimentation in Kelly Reservoir, Strathclyde. Scottish Journal of Geology 16(1980), s. 281–285.
- [76] Duck R.W., McManus J.: Sediment yields in lowland Scotland derived from reservoir surveys. Transactions of the Royal Society of Edinburgh (Earth Sciences) 78(1987), s. 369–377.
- [77] Duck R.W., McManus J.: Relationships between catchment characteristics, land use and sediment yield in the Midland Valley of Scotland. W: Soil Erosion on Agricultural Land. Red. Boardman J., Foster I.D.L., Dearing J.A. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, UK (1990), s. 285–299.
- [78] Banach M.: Morfodynamika strefy brzegowej zbiornika Włocławek. Prace Geograficzne 161(1994), s. 181.
- [79] Kozielska-Sroka E., Chęć M.: Właściwości osadów dennych jeziora Czorsztyńskiego w aspekcie wykorzystania w budownictwie ziemnym. Górnictwo i Geoinżynieria 1(2009), s. 369–375.
- [80] Kozielska-Sroka E., Michalski P., Zydrón T.: Uwarunkowania geotechniczne i hydrodynamiczne transformacji północnej strefy brzegowej zbiornika Czorsztyn-Niedzica w trakcie jego eksploatacji. Pieniny-Zapora-Zmiany-Monografie Pienińskie 2(2010), s. 63–82.
- [81] Pikul K., Mokwa M.: Wpływ osadnika wstępnego na proces zamulania zbiornika Głównego. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 17(40)(2008), s. 185–193.
- [82] Koś K., Zawisza E.: Ocena przydatności osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego do budowy uszczelnień w składowiskach odpadów komunalnych. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus 11(4)(2012), s. 49–60.
- [83] Madeyski M.: Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie. Rozprawy 236(1998), s. 94.
- [84] Bucher D.R., Labadz J.C., Potter W.R., White P.: Reservoir sedimentation rates in the Southern Penine Region, UK. W: Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs. Red. Duck R.W., McManus J. Chichester Wiley (1992), s. 73–92.
- [85] Kabata-Pendias A., Pendias H.: Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 1999, s. 400.
- [86] Bąk Ł., Górski J., Rabajczyk A.: Content of Heavy Metal Compounds in Bottom Sediments of the Suchedniów Water Reservoir. Ecological Chemistry and Engineering A 20(7–8)(2013), s. 757–769.

- [87] Bąk Ł., Dąbkowski S.Ł., Szymczuk P.: Zamulenie i stan ekologiczny osadów dennych małych zbiorników wodnych. W: *Hydrologia w Ochronie i Kształtowaniu Środowiska*. Red. Magnuszewski A. Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN. Warszawa II(2014), s. 285–298.
- [88] Bąk Ł., Górski J., Szeląg B.: Preliminary assessment of silting and the quality of bottom sediments in a small water reservoir. *Journal of Water and Land Development* 20(IV–VI)(2014), s. 47–53.
- [89] Benes P., Gjessing E.T., Steinnes E.: Interaction between humans and trace elements in fresh water. *Water Research* 10(1976), s. 711–716.
- [90] Tsai L.J., Yu K.C., Chang J.S., Ho S.T.: Fractionation of heavy metals in sediment cores from the Ell-Ren River, Tajwan. *Water Science and Technology* 37(6–7)(1998), s. 217–224.
- [91] Buykx J.C., Bleijenberg M., Van Den Hoop M.A.G.T., Loch J.P.G.: The effect of oxidation and acidification on the speciation of heavy metals in sulfide-rich freshwater sediments using a sequential extraction procedure. *Journal of Environmental Monitoring* 2(2000), s. 23–27.
- [92] Madeyski M., Michalec B., Tarnawski M.: Zamulenia małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Seria monografie 2008, s. 77.
- [93] Tessier A., Campbell P.G., Bisson M.: Sequential procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51(1979), s. 844–851.
- [94] Rauret G.: Workshop and sequential extraction in sediment and soil. *Selected papers. International Journal of Environmental Analytical Chemistry (special issue)* 51(1993).
- [95] Namieśnik J., Jamrugiewicz Z.: *Fizykochemiczne metody kontroli zanieczyszczeń środowiska*. Warszawa WNT 1998, s. 464.
- [96] Świetlik R.: Znaczenie pojęcia „specjacja” w chemii środowiskowej. *Wiadomości Chemiczne* 52(1998), s. 7–8.
- [97] Niedzielski P.: *Narzędzia i koncepcja analizy specjacyjnej*. Poznań Wydawnictwo Naukowe UAM 2007, s. 122.
- [98] Calmano W., Hong J., Förstner U.: Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science and Technology* 28(8–9)(1993), s. 223–235.
- [99] Bojakowska I.: Kryteria oceny zanieczyszczeń osadów wodnych. *Przegląd Geologiczny* 49(3)(2001), s. 213–218.
- [100] Kabata-Pendias A.: *Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb*. IUNG. Biblioteka Monitoringu Środowiska 1995, s. 41.
- [101] Gill M. A.: Sedimentation and useful life of reservoirs. *Journal of Hydrology* 44(1979), s. 89–95.
- [102] Trimble S.W., Bube K.P.: Improved reservoir trap efficiency prediction. *The Environmental Professional* 12 (1990), s. 255–272.
- [103] Verstraeten G., Poesen J.: Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography* 24(2)(2000), s. 219–251.

- [104] Bednarczyk T., Michalec B.: Reduction in sediment trap efficiency of small reservoirs during their operation. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu* 438(2002), s. 325–334.
- [105] PN-EN ISO 748:2009. Hydrometria. Pomiar natężenia przepływu cieczy w korytach otwartych z wykorzystaniem młynków hydrometrycznych lub pływaków. Warszawa PKN 2009, s. 17.
- [106] Szwed F.: Prędkość średnia w pionach hydrometrycznych trzypunktowego pomiaru. *Gospodarka Wodna* 4(1965), s. 144–147.
- [107] Brański J.: Transport rumowiska rzeczno i denudacja powierzchni zlewni. W: *Atlas Hydrologiczny Polski*. Red. Stachy J. Warszawa. Wydawnictwo Geologiczne II(1987), s. 567–574.
- [108] Młynarczyk Z., Słowik M.: Zmiany natężenia transportu materiału zawieszonego w dolnym odcinku Odry. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 58(2007), s. 109–134.
- [109] PN-R-04032:1998. Gleby i utwory mineralne – Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego. Warszawa PKN 1998, s. 12.
- [110] Folk R.L.: *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas 1974, s. 182.
- [111] Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R.: *Sedymentologia*. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa 1976, s. 613.
- [112] PN-EN 12880:2004. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody. Warszawa PKN 2004, s. 11.
- [113] Jamali M.H., Kazi T.G., Arain M.B., Afridi H.I., Jalbani N., Memon A.U.R., Ansari R., Shah A.: The feasibility of using an industrial sewage sludge produce in Pakistan as agricultural fertilizer used for cultivation of *Sorgum Bicolor* L. *Archives of Agronomy and Soil Science* 53(6)(2007), s. 659–671.
- [114] Jordan F., Barney A.: Hydrographic Survey methods for determining reservoir volume. *Environment Modeling & Software* 23(2008), s. 139–146.
- [115] Marmol U.: Modelowanie reprezentacji powierzchni topograficznej z wykorzystaniem metody geostatystycznej. *Geodezja: półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie* 8(2)(2002), s. 259–270.
- [116] El-Shejmy N., Valeo C., Habib A.: *Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation and Applications*. Norwood Artech House 2005, s. 270.
- [117] Zawadzki J.: Wykorzystanie metod geostatystycznych w badaniach środowiskowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*. Warszawa 2005, s. 134.
- [118] Namysłowska-Wilczyńska B.: *Geostatystyka. Teoria i zastosowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2006, s. 354.
- [119] Zawadzki J.: *Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2011, s. 132.
- [120] Łajczak A.: Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły. *Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*. WPW, Warszawa 1995, s. 105.
- [121] Bodulski J., Górski J.: Evolution and prediction of silting in reservoir Cedzyna on the Lubrzanka river. *Journal of Water and Land Development* 10(2006), s. 133–149.

- [122] Majewski W., Walczykiewicz T.: Zrównoważone gospodarowanie zasobami wodnymi oraz infrastrukturą hydrotechniczną w świetle prognozowanych zmian klimatycznych. IMGW, Warszawa 2012, s. 337.
- [123] Mazur A.: Ocena skuteczności działania zbiornika wstępnego na rzece Por. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 1(IV)(2013), s. 299–310.
- [124] Jaskuła J., Wicher-Dysarz J., Dysarz T., Sojka M.: Modelowanie transportu rumowiska w zbiorniku Jezioro Kowalskie na rzece Główniej. Inżynieria Ekologiczna 43(2015), s. 131–138.
- [125] Hänsel H.: Podstawy rachunku błędów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1965, s. 144.
- [126] Mikhail E.M.: Observations and least squares. Dun-Donnelley Publishing. New York 1976, s. 497.
- [127] NOS.: NOS Hydrographic surveys specification and deliverables. U.S. Department of Commerce 2015, s. 193.
- [128] Byrnes M.R., Baker J.L., Li F.: Quantifying potential measurement errors and uncertainty associated with bathymetric change analysis. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note (CHETN). U.S. Army Corps of Engineers 2002, s. 17.
- [129] Zar J.H.: Biostatistical Analysis. Prentice Hall. New Jersey 1999, s. 663.
- [130] Li J., Heap A.D.: A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Ecological Informatics 6(2011), s. 228–241.
- [131] Hernandez-Stefanoni J.L., Ponce-Hernandez R.: Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: Comparison of spatial interpolation methods. Environmental Monitoring and Assessment. 117(2006), s. 307–334.
- [132] Ratomski J., Stonawski J.: Metodyka pomiarów i dokładność metod obliczeniowych kubatury czaszy dużych zbiorników retencyjnych. Gospodarka Wodna 3(1991), s. 64–67.
- [133] Froehlich W.: Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej. Wrocław, Ossolineum, Prace Geograficzne IGiPZ PAN 114(1975), s. 122.
- [134] Słupik J.: Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych. Prace Geograficzne IGiPZ PAN 142(1981), s. 98.
- [135] Froehlich W.: Ekstrapolacja wskaźników denudacji w świetle mechanizmów erozji i transportu fluwialnego w zlewniach fliszowych Karpat. Przegląd Geograficzny 58(1–2)(1986), s. 89–98.
- [136] Walling D.E.: Linking in field to the river: sediment delivery from agricultural land. W: Soil erosion on agricultural land. Red. Boardman J., Foster I.D.E., Dearing J.A. Chicester, John Wiley&Sons (1990), s. 129–152.
- [137] Krzemień K.: Odprowadzanie materiału rozpuszczonego i zawiesiny z pogórskiej zlewni Starej Rzeki i Dworskiego Potoku. W: Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego Progu Karpat między Rabą a Uszwicą. Red. Kaszowski L. IG UJ Kraków (1995), s. 227–239.
- [138] Russell M.A., Walling D.E., Hodgkinson R.A.: Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. Journal of Hydrology 252(2001), s. 1–24.

- [139] Ciupa T.: Procesy fluwialne w zlewni o wysokim stopniu urbanizacji na przykładzie Kielc. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*. SGGW Warszawa 12(1)(2003), s. 24–34.
- [140] Figuła K.: Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu. *Wiadomości IMUZ* 3(6)(1966), s. 131–145.
- [141] Froehlich W.: The role of land use in varying the suspended load during continuous rainfall (Kamienica Nawojowska catchment, Flysch Carpathians). *Geographia Polonica* 41(1978), s. 27–37.
- [142] Richards K.S.: Drainage basin structure, sediment delivery and the response to environmental change. W: *Sediment flux to basins: causes, controls and consequences*, Special Publications. Red. Jones S.J., Frostick L.E. London 2002, s. 149–160.
- [143] Gao P., Pasternack G.B., Bali K.M., Wallender W.W.: Suspended–sediment transport in an intensively cultivated watershed in southeastern California. *Catena* 69(3)(2007), s. 239–25.
- [144] Starkel L., Pietrzak M., Łajczak M.: Wpływ zmian użytkowania ziemi i wzrostu częstotliwości ekstremalnych opadów na obieg wody i erozję oraz ochronę zasobów przyrodniczych Karpat. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich* 54(2007), s. 19–31.
- [145] Ciupa T.: Znaczenie dróg na obszarze zurbanizowanym w kształtowaniu odpływu i transportu fluwialnego (Kielce). *Landform Analysis* 19(2012), s. 17–28.
- [146] Bąk Ł., Dąbkowski S.L.: Spatial distribution of sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development* 19(VII–XII)(2013), s. 13–22.
- [147] Beer C.E., Farnham C.W., Heinemann H.G.: Evaluating sedimentation prediction techniques in western Iowa. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 9(6)(1966), s. 828–833.
- [148] Reed D.L., Hoffman S.A.: Sediment deposition in Lake Clarke, Lake Aldred and Conowingo Reservoir, Pennsylvanian and Maryland, 1910–1993. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 964048 (1997), s. 14.
- [149] Dosekocz A.: Dokładność obliczania pola powierzchni ze współrzędnych płaskich prostokątnych. *Acta Scientiarum Polonorum, Geodesia et Descriptio Terrarum* 10(3)(2011), s. 29–44.
- [150] Snyder N.P., Rubin D.M., Alpers C.N., Childs J.R., Curtis J.A.: Estimating accumulation rate and physical properties of sediment behind a dam: Englebright Lake, Yuba River, northern California. *Water Resources Research* 40(2004), s. 1–19.
- [151] Walling D.E., Webb B.W.: The reliability of suspended load data. In *Erosion and Sediment Transport Measurement (Proceedings of the Florence Symposium)*. Publication No. 133, IAHS, Wallingford (1981), s. 177–194.
- [152] Phillips J.M., Webb B.W., Walling D.E., Leeks G.J.L.: Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes* 13(1999), s. 1035–1050.
- [153] Kocel K.: Osady denne stawów jako wskaźnik zmian zaistniałych w środowisku przyrodniczym doliny Rudy. W: *Scripta Rudensia* 7. Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich (1997), s. 75–84.
- [154] Klimek K.: Geomorfologiczne zróżnicowanie koryt karpackich dopływów Wisły. *Folia Geographica, Series Geographica-Physica* 12(1979), s. 35–47.

- [155] Froehlich W.: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin w górskiej zlewni fliszowej. Wrocław, Ossolineum, Prace Geograficzne IGiPZ PAN 143(1982), s. 144.
- [156] Froehlich W.: The carrying out of suspended and dissolved load in the Kamienica Nawojowska and Łubinka catchment basins during the flood in 1970. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*. 6(1982), s. 105–119.
- [157] Ciupa T.: Współczesny transport fluwialny w zlewni Białej Nidy. Kielce WSP 1991, s. 150.
- [158] Banasik K.: Model sedymentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej. Warszawa, SGGW 1994, s. 120.
- [159] PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania. Warszawa PKN 2006, s. 19.
- [160] Ligęza S., Smal H.: Skład granulometryczny osadów dennych zbiornika wód zrzutowych Zakładów Azotowych Puławy. *Acta Agrophysica* 1(2)(2003), s. 271–277.
- [161] Bojarski A., Mazoń S., Opaliński P., Przecherski P., Wolak A.: Charakterystyka czasy zbiornika Goczalkowice do celów modelowania i oceny procesów sedymentacyjnych osadów. *Gospodarka Wodna* 8(2014), s. 283–258.
- [162] Skwierawski A., Sidoruk M.: Zawartość metali ciężkich w profilach osadów dennych antropogenicznie przekształconego zbiornika Płociduga w Olsztynie. *Proceedings of ECOpole* 5(1)(2011), s. 309–315.
- [163] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki. Tom 2 modele liniowe i nieliniowe. Kraków StatSoft 2007, s. 868.
- [164] Bojarski A., Mazoń S., Wolak A.: Badanie procesu załadowania zbiornika w aspekcie weryfikacji jego pojemności i oceny stanu jakościowego. *Materiały Sympozjum Ogólnokrajowego Hydrotechnika XIV* (2012), s. 101–116.
- [165] Wolska L., Mędrzycka K.: Ocena ekotoksyczności osadów dennych z portów morskich w Gdańsku i Gdyni. *Ochrona Środowiska* 31(1)(2009), s. 49–52.
- [166] Sałata A., Bąk Ł., Dąbek L., Ozimina E.: Assessment of the degree of pollution of sediments from the rainstorm sewer system in the urbanised catchment. *Desalination and Water Treatment* 57(3)(2016), s. 1327–1335.
- [167] Gałka B., Wiatkowski M.: Charakterystyka osadów dennych zbiornika zaporowego Młyny oraz możliwość rolniczego ich wykorzystania. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 4(32)(2010), s. 53–63.
- [168] Bojakowska I., Sokołowska G.: Geochemiczne klasy czystości osadów wodnych. *Przegląd Geologiczny* 46(3)(1998), s. 49–54.
- [169] Turekian K.K., Wedepohl K.H.: Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bulletin of Geological Society of America* 72(1961), s. 175–192.
- [170] Müller G.: Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau* 79(1979), s. 778–783.
- [171] Grabiński T.: Podstawy kwantyfikacji zmiennych przestrzennych. W: *Badania przestrzenne rynku i konsumpcji*. Red. Młynarski S. Warszawa PWN 1992, s. 249.
- [172] Mojena R.: Hierarchical grouping methods and stopping rule: an evolution. *Computer Journal* 20(1977), s. 359–363.
- [173] Omulska-Mróż B., Sadkowski K.: Zanieczyszczenie spływów opadowych z dróg szybkiego ruchu w Polsce. *Ochrona Środowiska* 2(1991), s. 3–84.

- [174] Bąk Ł., Górski J., Górski K., Szelać B.: Zawartość zawiesin i metali ciężkich w wybranych falach ścieków deszczowych w zlewni miejskiej. *Ochrona Środowiska* 32(2)(2012), s. 49–52.
- [175] Bojakowska I., Gliwicz T., Małecka K.: Wyniki geochemicznych badań osadów wodnych Polski w latach 2003–2005. Inspekcja Ochrony Środowiska. Warszawa 2006, s. 136.
- [176] Gierszewski P.: Koncentracja metali ciężkich w osadach zbiornika wrocławskiego jako wskaźnik hydrodynamicznych warunków depozycji. *Landform Analysis* 9(2008), s. 79–82.
- [177] PN-EN 1997-1:2008. Projektowanie geotechniczne – Zasady ogólne. Warszawa PKN 2008, s. 152.
- [178] Kabata-Pendias A.: Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb. IUNG. Biblioteka Monitoringu Środowiska 1995, s. 41.
- [179] Dąbkowski S.L., Bąk Ł., Górski J., Sałata A.: Raport końcowy z realizacji projektu badawczego NR N N305 2999040 pt. „Jakość osadów w zbiornikach retencyjnych i ich wpływ na stan i dostępność zasobów wodnych (na przykładzie woj. świętokrzyskiego). Warszawa–Kielce 2014, s. 190 (maszynopis).

STRESZCZENIE

Zamulanie i osady małych zbiorników retencyjnych na Wyżynie Kieleckiej

Zakres i metody badań

W pracy przedstawiono wyniki badań zamulenia oraz wybranych właściwości fizycznych i chemicznych osadów dennych ośmiu małych zbiorników zaporowych zlokalizowanych w zlewniach rzek Kamienna i Nida. Położone są one na ciekach niekontrolowanych hydrologicznie – stąd trudności w ustaleniu ilości rumowiska dopływającego do zbiorników. Ilość tę ustala się w oparciu o metody pośrednie, np. Reniger-Dębskiego czy Brańskiego, ale uzyskane wartości należy traktować jako szacunkowe.

Podstawą analiz były badania prowadzone na zbiorniku Suchedniów w latach 2010–2016, a na pozostałych obiektach (zbiorniki Jaśle, Kaniów, Lubianka, Umer, Wilków, Zachełmie i Zalew Kielecki) w latach 2012–2016. Obejmowały one pomiary batymetryczne czasz zbiorników, pobór i analizę próbek osadów dennych pod kątem właściwości fizykochemicznych, pomiary prędkości i koncentracji rumowiska unoszonego w przekrojach hydrometrycznych położonych na wlocie i wylocie ze zbiornika. Pomiary hydrometryczne wykonano z łodzi wyposażonej w zintegrowany system do pomiaru głębokości i położenia punktów pomiarowych, w skład którego wchodziła echosonda dwukanałowa oraz odbiornik *DGPS*. Próbki osadów dennych w stanie quasi-nienaruszonym pobrano przy użyciu pobieraka typu *Becker*. Skład pierwiastkowy osadów oznaczono metodą *WDXRF* z wykorzystaniem spektrometru *AXIOS*, natomiast oznaczenia frakcji metali ciężkich wykonano metodą *BRC*. Zmącenie oznaczono metodą filtracyjną i fotoelektryczną.

W trakcie sześcioletniego cyklu badawczo-pomiarowego pobrano do badań i analiz łącznie 510 rdzeni osadów, z których 285 podzielono na warstewki o grubości 10 cm (po podziale uzyskano 503 próbki) i przeanalizowano je pod kątem składu mechanicznego, gęstości objętościowej, gęstości właściwej oraz zawartości materii organicznej. Pozostałe 225 rdzeni podzielono w analogiczny sposób i w każdej uzyskanej warstewce określono zawartość *Pb*, *Cr*, *Cd*, *Cu*, *Ni*, *Zn*, *Fe*, *Mn*, *Hg* i *Co*. W okresie badań wykonano około 40 serii pomiarów ekspedycyjnych koncentracji rumowiska unoszonego w strumieniu płynącej wody. Szerokie spektrum wykonanych badań i analiz pozwoliło dodatkowo na ilościową ocenę wielkości denudacji odpływowej zlewni badanych zbiorników. Ocenę tę wykonano przede wszystkim w oparciu o pomiary ilości osadów w badanych małych zbiornikach wodnych oraz szczegółowe rozpoznanie ich gęstości objętościowej.

Cechy małych zbiorników wodnych i ich zlewni

Badane małe zbiorniki zaporowe stanowią zbiór obiektów zróżnicowany pod względem cech morfologicznych oraz hydrologicznych, jak również lokalizacji

i rodzaju urządzeń upustowych. Różnią się też długością okresu istnienia (od 10 do 36 lat). Charakteryzują się one niewielką pojemnością (mniejszą od 1 mln m³) i powierzchnią zalewu (wynoszącą przy *NPP* od 1,3 ha do 30 ha). Średnia ich głębokość waha się od około 1,41 m do 3,02 m, a maksymalna nie przekracza 6,50 m (tabela 4-1). Na zbiornikach Jaśle, Kaniów, Lubianka, Wilków, Zachełmie i Zalew Kielecki przez cały rok, z wyjątkiem okresów przepływu wód wielkich, utrzymuje się stały poziom piętrzenia. Natomiast w zbiornikach Suchedniów i Umer na okres zimowy obniża się zwierciadło wody odpowiednio o 0,35 m i 0,30 m. Na żadnym ze zbiorników nie jest prowadzona intensywna gospodarka rybacka.

Zlewnie zamknięte zaporami badanych akwenów wykazują znaczne zróżnicowanie cech fizjograficznych oraz pokrycia i użytkowania terenu, czyli parametrów mających istotny wpływ na wielkość i intensywność procesów erozji gleb, a tym samym wielkość denudacji. Lasy zajmują od 44,3% do przeszło 90% całkowitej powierzchni zlewni. Grunty rolne (pola orne, trwałe użytki zielone, złożone systemy upraw i działek) stanowią od 4,2% do 53,2%, zaś zabudowa luźna, tereny komunikacyjne i przemysłowe zajmują od około 0,1% do 17,0% powierzchni (tabela 4-1). W zlewniach badanych zbiorników dominują gleby o niewykształconym profilu, których zasięg pokrywa się z występowaniem kompleksów leśnych, oraz gleby brunatne. Średnie wzniesienie zlewni waha się od 288 m n.p.m. do 371 m n.p.m., a ich średni spadek zawiera się w przedziale 0,26–6,70%. Zlewnie zbiorników Suchedniów i Zalew Kielecki należą do najbardziej przeobrażonych przez człowieka.

Zamulenie i właściwości fizykochemiczne osadów małych zbiorników zaporowych

Uzyskane wyniki wskazują na umiarkowane tempo załadowania badanych zbiorników. W trakcie swojego funkcjonowania, trwającego od 10 do 36 lat, utraciły one od nieco ponad 2% do przeszło 19% swojej początkowej pojemności – średni roczny stopień ich zamulenia zawierał się w przedziale od 0,15% do 0,60% (tabela 6-1), przy czym średnie roczne tempo utraty pojemności zbiorników zlokalizowanych w zlewniach o dominującym udziale lasów i użytków zielonych było ponad dwukrotnie wolniejsze od średniej dla pozostałych obiektów.

Do prognozowania średniego rocznego stopnia zamulenia (S_{zs}) małych zbiorników wodnych opracowano modele oparte o parametry fizjograficzne zlewni – wzory (6-5) i (6-6). Na podstawie analizy miar dopasowania modeli można uznać, że otrzymane zależności w sposób zadowalający opisują te procesy i mogą być stosowane do oceny wielkości S_{zs} dla zbiorników o zbliżonych parametrach technicznych oraz zamykających zlewnie podobne do badanych.

Rozmieszczenie grubości warstwy osadów w czasach badanych zbiorników było zróżnicowane i często odmienne w zbiornikach podobnych do siebie pod względem rodzaju i lokalizacji urządzeń upustowych oraz kształtu rzutu poziomego czaszy. W zbiornikach Lubianka i Zalew Kielecki największa objętość osadów została odłożona w sektorach położonych w części wlotowej oraz przyzaporowej (rys. 6-13). Natomiast w zbiornikach Jaśle, Kaniów, Wilków i Zachełmie objętość osadów wzrastała zgodnie z kierunkiem przepływu (rys. 6-13).

Zdolność badanych zbiorników do trwałego przechwytywania unosin (β_{rz}) kształtuje się w przedziale od 71% do 95% (tabela 6-5) i wykazuje silny, statystycznie istotny związek ze współczynnikiem pojemności i współczynnikiem zlewniowym. Jednakże wartości parametru β_{rz} odczytane z nomogramów i obliczone ze wzorów opracowanych dla małych zbiorników wodnych odbiegają znacząco od wartości rzeczywistych. Największą zgodność wyników uzyskano w przypadku metod zaproponowanych przez Brune'a i Morrisa dla zbiorników, których wartość parametru α jest większa od 2%. Natomiast dla zbiorników o wartości współczynnika $\alpha < 2\%$ wartości β_{rz} są większe o 14–27 punktów procentowych od uzyskanych metodą Brune'a i metodą Morrisa (tabela 6-5).

Ze względu na brak możliwości jednoznacznego wskazania wzoru lub nomogramu pozwalającego wyznaczyć zdolność małego zbiornika do trwałego zatrzymywania rumowiska unoszonego podjęto próbę rekalkulacji równania zaproponowanego przez Browna. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano zależność opisaną wzorem (6-8). Zależność ta może być stosowana w przypadku zbiorników o zbliżonych charakterystykach do badanych.

W małych zbiornikach zaporowych odkładany jest głównie materiał pylasty i piaszczysty, który łącznie stanowił ponad 96% masy namułu tworzącego osady denne. Charakteryzuje się on, w zależności od warunków sedymentacji panujących w obrębie zbiornika, dobrym ($0,35 < GSO < 0,50$) lub bardzo złym wysortowaniem ($GSO > 1$) (rys. 6-23), a krzywe jego uziarnienia nachylone są w kierunku frakcji drobniejszych ($GSK > 0$) (rys. 6-24). Gęstość objętościowa osadów zmienia się w szerokim zakresie od $232 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ do $1739 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (rys. 6-32), w zależności od strefy zbiornika. Najmniejszą gęstością charakteryzują się osady wierzchnie odłożone w dolnej i środkowej części zbiornika, w składzie których dominował materiał pylasty i ilasty, a największą – osady piaszkowe akumulowane w przewodzie w jego górnych partiach. Wykazano, że średnica d_{50} osadów oraz silnie z nią skorelowana gęstość objętościowa zmieniają się na długości zbiornika, a zmienność ta może być opisana zależnością krzywoliniową o wysokiej wartości współczynnika determinacji ($r^2 > 0,79$) (rys. 6-34).

W literaturze przedmiotu można odnaleźć kilka zależności do określania gęstości początkowej osadów, np. w funkcji ich uziarnienia. Przeprowadzone badania i analizy wykazały ograniczone możliwości ich stosowania do predykcji gęstości osadów akumulowanych w małych zbiornikach zaporowych. Różnice wyników otrzymanych na podstawie bezpośrednich pomiarów i analizowanych wzorów są znaczące (rys. 6-38–6-41). Gęstości obliczone ze wzorów były od 58% do nawet 224% wyższe od uzyskanych z pomiarów terenowych (tabela 6-8). Dlatego podjęto próbę budowy własnego modelu regresyjnego służącego do przewidywania początkowej gęstości osadów (ρ_{op}) w małych zbiornikach wodnych. Parametrem mającym największy wpływ na prognozę ρ_{op} była przeciętna średnica ziaren d_{50} ($r = 0,93$), a opracowaną zależność przedstawia wzór (6-13).

O sposobie zagospodarowania osadów dennych decydują między innymi ich właściwości chemiczne, a w szczególności obecność pierwiastków śladowych.

Ocenę zanieczyszczenia osadów metalami ciężkimi wykonuje się np. w oparciu o indeks geoakumulacji I_{geo} , który pozwala wyodrębnić siedem klas jakości danego środowiska: od 0 do 6. Przy czym 6 stopień oznacza stukrotne wzbogacenie osadów w badany pierwiastek w odniesieniu do wartości tła. Z wieloletnich badań nad osadami dennymi małych zbiorników wodnych wynika, że zanieczyszczone są one w przewadze *Cr*, *Ni*, *Pb* i *Cd*. Indeks geoakumulacji (I_{geo}) dla tych pierwiastków przyjmuje najczęściej wartości większe od >2 (tabela 6-11). Wyniki analizy ANOVA pozwoliły stwierdzić, że osady denne zbiorników zlokalizowanych na terenach aglomeracji miejskich charakteryzowały się najgorszym stanem chemicznym spośród badanych. O złym stanie chemicznym osadów tych zbiorników decydowała przede wszystkim zawartość *Pb*, *Cd* i *Cu*.

SUMMARY

Silting and bottom sediments of small water reservoirs in the Kielce Upland

Investigations scope and methods

The study presents the results of investigations into siltation and selected physical and chemical properties of bottom sediments from eight small dam reservoirs. They are located in the catchments of the Kamienna and Nida rivers, on water courses that are not hydrologically controlled. Consequently, it is difficult to find the quantity of sediment delivery into the reservoirs. The debris quantity is established using indirect methods, e.g. Reniger-Dębski or Brański methods, but the values that are obtained should be considered as estimates only.

The analysis was based on the investigations carried out on the Suchedniów reservoir in the years 2010–2016, and on the other reservoirs, namely Jaśle, Kaniów, Lubianka, Umer, Wilków, Zachełmie and Zalew Kielecki in the years 2012–2016. The investigations included bathymetric measurements of reservoir bowls, collection of samples of bottom sediments, and the analysis of their physico-chemical properties, measurements of the suspended sediments concentration and transportation rate at the hydrometric sections at the reservoir inlet and outlet. Hydrometric measurements were taken from a boat equipped with an integrated system for depth measurements and measurement point location. The system included a dual frequency echo-sounder and a DGPS receiver. Samples of bottom sediments were collected in a quasi-undisturbed state using a *Becker* sampler. Elemental composition of the sediments was determined with the WDXRF method using a *PANalytical AXIOS* spectrometer. The *BRC* method was employed to determine the heavy metal fraction. Filtration and photoelectric methods were used to measure turbidity.

In the six-year period of research and measurement taking, 510 sediment cores were collected altogether to run tests and make analyses. Out of that number, 285 cores were divided into small sections of 10 cm, which produced 503 samples. They were analysed with respect to mechanical composition, bulk density, specific density and the organic matter content. The remaining 225 cores were sectioned as above to determine, for each of those, the content of *Pb*, *Cr*, *Cd*, *Cu*, *Ni*, *Zn*, *Fe*, *Mn*, *Hg* and *Co*. In the period of concern, approx. 40 series of field measurements were conducted concerning the concentration of sediments suspended in the water flow. Additionally, a wide range of tests and analyses made it possible to conduct a quantitative analysis of the magnitude of outflow denudation from the catchments of the reservoirs under investigation. The assessment was based primarily on the measurements of the quantity of sediments in the reservoirs, and a detailed study of sediment bulk density.

Characteristics of small water reservoirs and their catchments

Small dam reservoirs of concern are a collection of structures that differ in morphological and hydrological features, location, and also the type of discharge facilities. Additionally, their length of operation varies from 10 to 36 years. The reservoirs have small capacity (lower than 1 million m³) and surface area (which ranges from 1.3 ha to 30 ha at average water damming). Their average depth varies from approx. 1.41 m to 3.02 m, whereas the maximum depth does not exceed 6.50 m (Table 4-1). A constant water damming level is kept in Jaśle, Kaniów, Lubianka, Wilków, Zachełmie and Zalew Kielecki reservoirs all throughout the year, except for periods of high water flow. However, in Suchedniów and Umer reservoirs, the water table level is lowered for the winter season by 0.35 m and 0.30 m, respectively. None of the reservoirs is intensively used as a fishery site.

The catchments of the dam reservoirs of concern show high diversity in physiographic features, and also land cover and use. They are the parameters that substantially affect the magnitude and intensity of soil erosion processes, and thereby denudation magnitude. Forests cover from 44.3% to more than 90% of the total area of the catchments. Farmland (arable land, permanent pastures, crops areas and gardens) constitutes from 4.2% to 53.2%. Low density development, transport systems and industrial sites make up from approx. 0.1% to 17.0% of the area (Table 4-1). In the catchments of the reservoirs of concern, soils with undeveloped horizons, the stretch of which coincides with woodland complexes, and also brown soils are prevalent. Mean catchment elevation ranges from 288 m a.s.l. to 371 m a.s.l., and the longitudinal gradient varies 0.26–6.70%. The catchments of Suchedniów and Zalew Kielecki reservoirs are among the most man-transformed areas.

Siltation and physico-chemical properties of sediments of small dam reservoirs

The observations indicate a moderate rate of the siltation of the reservoirs of concern. Over the period they have been in operation, namely from 10 to 36 years, the reservoirs have lost from over 2% to more than 19% of their original capacity. Their annual silting ranged from 0.15% to 0.60% (Table 6-1). The mean annual loss of capacity of the reservoirs located in the catchments with prevalent forests and green land was more than two times slower than the average for the other objects.

To predict mean annual silting ratio (S_{zs}) of small water reservoirs, models were developed based on physiographic parameters of the catchment – formulas (6-5) and (6-6). The analysis of measures of model fit led to the statement that the dependences derived describe the processes in a satisfactory manner, and can be applied to the assessment of S_{zs} magnitude for reservoirs with similar technical parameters and similar catchments.

The distribution of sediments in reservoir bowls was diversified. Often, the reservoirs having sluices comparable with respect to the type and location, and also the similar shape of the bowl plan view showed different distribution. In Lubianka

and Zalew Kielecki reservoirs, the highest volume of sediments was deposited in the sectors located in the inlet and dam adjacent parts (Fig. 6-13). Conversely, in Jasło, Kaniów, Wilków and Zachełmie reservoirs, the sediment volume increased along the flow direction (Fig. 6-13).

Sediment trap efficiency of the studied reservoirs (β_{rz}) vary from 71% to 95% (Table 6-5). A strong statistically significant relationship is observed between the reservoir ability, and the capacity index and the catchment index. However, the values of parameter β_{rz} obtained from nomograms and computed from formulas developed for small water reservoirs differ considerably from the actual values. The highest congruence of results was found using the methods proposed by Brune and Morris for the reservoirs whose parameter α value is greater than 2%. If the value of coefficient $\alpha < 2\%$, β_{rz} values were 14–27 percentage point higher than those obtained using the Brune and Morris methods (Table 6-5).

Due to the fact that it is not possible to unambiguously indicate a formula or a nomogram that would allow the determination of the ability of a small reservoir to permanently intercept suspended sediments, an attempt was made to recalibrate the equation proposed by Brown. The computations conducted for the study resulted in obtaining the dependence expressed by formula (6-8). The dependence is applicable to reservoirs with similar characteristics.

It was shown that in small dam reservoirs, dust and sand were the main deposited materials, altogether they constituted over 96% of the mass of the substrate making the bottom sediments. Depending on sedimentation conditions prevalent within the reservoir, the substrate is characterised by good ($0.35 < GSO < 0.50$) or very bad sorting ($GSO > 1$) (Fig. 6-23), and the substrate grain size curves are inclined towards finer fractions ($GSK > 0$) (Fig. 6-24). The volumetric density of the sediments varies largely, namely from $232 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1739 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Fig. 6-32). The lowest density was found in upper sediments deposited in the lower and central parts of the reservoir, in the composition of which dust and clayey materials were dominant. Sand sediments, accumulated largely in the upper part of the reservoir, showed the highest density. It was demonstrated that the diameter d_{50} of the sediments, and the volumetric density highly correlated to the diameter, vary over the reservoir length. This dependence can be written in the form of a curvilinear equation with a high value of coefficient of determination ($r^2 > 0.79$) (Fig. 6-34).

The literature on the subject provides some dependences for the original density of sediments, e.g. in the form of a function of their grain features. The investigations and analyses revealed a limited possibility of their application to predictions of the density of sediments accumulated in small dam reservoirs. The results obtained from direct measurements and the formulas of concern show significant differences (Figs. 6-38–6-41). The densities calculated on the basis of the formulas were from 58% to as much as 224% higher than those obtained from field measurements (Table 6-8). Therefore, an attempt was made to develop a dedicated regression model for predictions of the initial density (ρ_{op}) of sediments in small water reservoirs. The parameter that affected ρ_{op} prediction to the greatest

extent was the mean grain diameter d_{50} ($r = 0.93$). The dependence is expressed by formula (6-13). High congruence of predicted values and measurements (the prediction mean error was $-26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, whereas the mean square error amounted to $162 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) indicates the applicability, for predictive purposes, of the derived dependence to small reservoirs with similar characteristics.

The management of bottom sediments depends, among others, on sediment chemical properties, in particular, the occurrence of trace elements. The assessment of sediment contamination by heavy metals can be performed using the geoaccumulation index I_{geo} . On the basis of the index, it is possible to differentiate seven environmental quality classes, from 0 to 6, of a given site. It should be noted that class 6 indicates 100 – fold enrichment of the sediments with a given element compared with the background value. Multi-year investigations into bottom sediments of small water reservoirs indicate that they are mostly contaminated by *Cr*, *Ni*, *Pb* and *Cd*. The geoaccumulation index for those elements most often takes the values greater than $I_{geo} > 2$ (Table 6-11). The ANOVA analysis results demonstrated that out of the examined bottom sediments, those originating from the reservoirs located in urban areas are characterised by the worst chemical conditions. The content of *Pb*, *Cd* and *Cu* was the main factor contributing to bad chemical condition.