

MONOGRAFIE ŚLĄSKIEGO CENTRUM WODY TOM 1

**AKTUALNE PROBLEMY GOSPODARKI WODNEJ**

***CURRENT PROBLEMS IN WATER MANAGEMENT***





MONOGRAFIE ŚLĄSKIEGO CENTRUM WODY

TOM 1

# AKTUALNE PROBLEMY GOSPODARKI WODNEJ

*CURRENT PROBLEMS  
IN WATER MANAGEMENT*

pod redakcją  
**Damiana Absalona**

Katowice 2018

# MONOGRAFIE ŚLĄSKIEGO CENTRUM WODY TOM 1

**Redaktor naukowy (Edited by):** Damian Absalon

**Recenzenci (Reviewers):**

Stanisław Czaja, Urszula Guzik, Mariola Krodkiewska, Magdalena Matysik,  
Jacek Rózkowski, Danuta Wojcieszynska

**Projekt okładki:** Patrycja Dzikowska

**Fotografie na okładce:** Andrzej Siudy, Damian Absalon

**ISBN 978-83-61695-46-2**

**Współpraca wydawnicza:** Drukarnia Advert, Chorzów, ul. Krakowska 21

**Nakład:** 250 egz.

**Publikację dofinansowano ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej w Katowicach**

**Treści zawarte w publikacji nie stanowią oficjalnego stanowiska organów Wojewódzkiego  
Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Katowicach**



Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej w KATOWICACH

# AKTUALNE PROBLEMY GOSPODARKI WODNEJ



MONOGRAFIE ŚLĄSKIEGO CENTRUM WODY

TOM 1

## CONTENTS

### **Preface**

*Damian Absalon* ..... 9

### **The water challenges in Upper Silesia Region – let's regard the quality of water as a common effort**

*Andrzej Woźnica, Damian Absalon, Marcin Libera, Bartosz Łozowski, Andrzej Siudy* ..... 11

### **Paradoxes of the world water management**

*Andrzej J. Witkowski* ..... 31

### **Blue-green infrastructure (b-gi): poorly known and underestimated capital of our cities**

*Leszek Trząski* ..... 47

### **Water importance to functioning of ecosystems in urban-industrial areas**

*Edyta Sierka, Ewelina Roszkowska, Gabriela Woźniak* ..... 59

### **Novel methods of surface water monitoring**

*Damian Absalon* ..... 71

### **Digital models of reservoirs – a tool to manage waters and ecosystem**

*Bartosz Łozowski, Rafał Ułańczyk* ..... 83

### **Automatic biodetection of chemical threats in water**

*Agnieszka Nowak, Andrzej Woźnica* ..... 103

### **The role of the Goczałkowice and Kozłowa Góra dam reservoirs during the floods in may and june 2010 in the light of the operating and maintenance instructions**

*Andrzej Siudy* ..... 115

### **Waterproof textiles**

*Katarzyna Bednarczyk, Marcin Libera* ..... 131

## SPIS TREŚCI

<b>Słowo wstępne</b> <i>Damian Absalon</i> .....	9
<b>Wyzwania związane z wodą na Śląsku – wspólnie zadbajmy o jakość wód</b> <i>Andrzej Woźnica, Damian Absalon, Marcin Libera, Bartosz Łozowski, Andrzej Siudy</i> .....	11
<b>Paradoksy światowej gospodarki wodnej</b> <i>Andrzej J. Witkowski</i> .....	31
<b>Błękitno-zielona infrastruktura (B-ZI): mało znany i niedoceniany kapitał naszych miast</b> <i>Leszek Trząski</i> .....	47
<b>Znaczenie wody dla funkcjonowania ekosystemów na terenach miejsko-przemysłowych</b> <i>Edyta Sierka, Ewelina Roszkowska, Gabriela Woźniak</i> .....	59
<b>Nowoczesne metody monitoringu wód powierzchniowych</b> <i>Damian Absalon</i> .....	71
<b>Cyfrowe modele zbiorników wodnych – narzędzie do zarządzania wodami i ekosystemem</b> <i>Bartosz Łozowski, Rafał Ulańczyk</i> .....	83
<b>Automatyczna biodetekcja zagrożeń chemicznych wody</b> <i>Agnieszka Nowak, Andrzej Woźnica</i> .....	103
<b>Rola zbiorników zaporowych Goczałkowice i Kozłowa Góra podczas powodzi w maju i czerwcu 2010 roku w świetle obowiązujących instrukcji eksploatacji i utrzymania zbiornika</b> <i>Andrzej Siudy</i> .....	115
<b>Tekstylnia wodoodporne</b> <i>Katarzyna Bednarczyk, Marcin Libera</i> .....	131





## Słowo wstępne

Oddajemy do Państwa rąk pierwszy tom „Monografii Śląskiego Centrum Wody”. Śląskie Centrum Wody – najmłodsza jednostka Uniwersytetu Śląskiego została powołana przez JM Rektora 21 września 2017 roku jako międzywydziałowy zespół badawczy prowadzący działalność naukowo-badawczą, badawczo-rozwojową, edukacyjną i popularyzatorską, związaną z badaniami wody i gospodarką wodną. Obszar zainteresowań badawczych i dydaktycznych Centrum obejmuje dziedziny i dyscypliny związane z fizycznymi, chemicznymi, biologicznymi i ekologicznymi aspektami nauk o wodzie, m. in.: potamologię, limnologię, hydrogeologię, hydrochemię, hydrobiologię, chemometrię.

Niniejsza książka zawiera subiektywny wybór zagadnień pod wspólnym tytułem „Aktualne problemy gospodarki wodnej” i odzwierciedla główne tematy nad którymi pracujemy w Śląskim Centrum Wody (SCW). Poza Autorami działającymi na co dzień w zespole SCW zaprosiliśmy do współpracy specjalistów z innych jednostek: Instytutu Ochrony Środowiska, Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Śląskiego Ogrodu Botanicznego. Wiele z prezentowanych w Monografii zagadnień przedstawiono podczas konferencji naukowej z okazji Światowego Dnia Wody, która odbyła się 22 marca 2018 roku na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego.

Otwierający monografię rozdział stanowi rodzaj deklaracji programowej SCW wobec wyzwań związanych z gospodarowaniem wodą w konurbacji śląskiej oraz w jej bliższym i dalszym otoczeniu. Autorzy postulują sięganie do sprawdzonych w nieodległej historii tych ziem wzorców oraz holistyczne podejście do problemów gospodarki wodnej.

Kolejny rozdział pt. „Paradoksy światowej gospodarki wodnej” wprowadza nas w świat kryzysów wodnych o zasięgu lokalnym i regionalnym. Autor wskazuje, że w skali globalnej przyczynami kryzysów wodnych mogą być warunki naturalne i niewielkie zasoby wodne, zmiany klimatyczne, zła organizacja gospodarki, w tym gospodarki wodnej oraz nieracjonalne rolnictwo i produkcja biopaliw. W krajach rozwijających się do dodatkowych i często zasadniczych przyczyn należą niekontrolowany wzrost populacji, urbanizacja, niestabilność polityczna i niedostateczna edukacja społeczeństwa.

W rozdziale poświęconym błękitno-zielonej infrastrukturze wracamy na zurbanizowane obszary Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii i jej wodnych problemów. Autor wskazuje na konieczność zmiany sposobu gospodarowania wodą w miastach, celnie podkreślając różnorakie korzyści płynące z takiego podejścia.

Funkcje i znaczenie wody dla ekosystemów na terenach miejsko-przemysłowych są przedmiotem kolejnego rozdziału monografii. Autorki doceniają częstokroć lekceważone ekosystemy antropogeniczne podkreślając wysoką wartość świadczonych przez nie usług.

W kolejnym rozdziale wskazano na coraz łatwiej dostępne technologie umożliwiające nowoczesny monitoring wód powierzchniowych, zarówno w zakresie ilości, jak i jakości wody. Jest to niezmiernie istotne przy prowadzeniu wszelkiego rodzaju działań naprawczych, jakich podejmuje się zespół SCW. Szczegółowy monitoring jest nam potrzebny na etapie stawiania diagnozy, a następnie kontroli wdrożonych działań.

Rozdział poświęcony cyfrowym modelom zbiorników wodnych pokazuje m. in. narzędzia stosowane przez zespół SCW w swoich działaniach naprawczych. Jest to przykład unikatowego podejścia do problemów związanych z jakością wody.

Podobnie unikatowym rozwiązaniem jest Automatyczny Biodetektor Toksyczności Ogólnej Wody (ABTOW), mogący stanowić element systemu wczesnego ostrzegania przed skażeniem wody. W rozdziale poświęconym biodetekcji zagrożeń chemicznych wody przedstawiono zalety takiego urządzenia.

Bardzo interesujące i niezwykle istotne ze względu na bezpieczeństwo publiczne zagadnienie zostało przedstawione w rozdziale poświęconym katastrofalnej powodzi z 2010 roku. Autor zaprezentował przede wszystkim skuteczność opracowanych procedur: instrukcji eksploatacji i utrzymania zbiornika zaporowego na przykładzie „Goczałkowic” i „Kozłowej Góry”.

Monografię kończy rozdział o... wodoodpornych tekstyliach. Ktoś zapyta, co mają tekstylia do gospodarki wodnej? Jednak ktokolwiek miał okazję pracować w terenie z pewnością docenia wodoodporne rozwiązania w tym zakresie. Współpracownicy SCW podczas prac terenowych na co dzień przekonują się o zaletach nowoczesnej odzieży funkcyjnej wykorzystującej tekstylia wodoodporne.

*Damian Absalon*

## WYZWANIA ZWIĄZANE Z WODĄ NA ŚLĄSKU – WSPÓLNIE ZADBAJMY O JAKOŚĆ WÓD

### *THE WATER CHALLENGES IN UPPER SILESIA REGION – LET'S REGARD THE QUALITY OF WATER AS A COMMON EFFORT*

*ANDRZEJ WOŹNICA<sup>1,5</sup>, DAMIAN ABSALON<sup>2,5</sup>, MARCIN LIBERA<sup>3,5</sup>,  
BARTOSZ ŁOZOWSKI<sup>1,5</sup>, ANDRZEJ SIUDY<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska*

<sup>2</sup>*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Nauk o Ziemi*

<sup>3</sup>*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Instytut Chemii*

<sup>4</sup>*Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów w Katowicach*

<sup>5</sup>*Śląskie Centrum Wody Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*

#### Streszczenie

Gospodarowanie wodą na obszarze Górnego Śląska napotyka na dwa skrajne wyzwania, którymi są nadmiar i niedobór wody, generowane zarówno przez czynniki naturalne jak i antropogeniczne, wynikające z gospodarowania zasobami wód na obszarach zlewni. Obserwowane negatywne zjawiska hydrologiczne wynikają również z 200-letniej eksploatacji węgla kamiennego powodującej osiadanie terenu, skutkujące lokalnie podtopieniami. Nie bez znaczenia jest również degradacja zaawansowanych systemów gospodarowania środowiskiem i zasobami wodnymi, obecnymi na Śląsku od okresu średniowiecza do czasu wzmożonej industrializacji na początku XX wieku. Prowadząc racjonalną gospodarkę wodną w zlewni można w znaczący sposób ograniczyć skutki wymienionych zjawisk. Poszukiwanie rozwiązań oraz łagodzenie skutków takich problemów, to jedno z zadań stojących przed interdyscyplinarnymi zespołami badawczo – rozwojowymi.

**Słowa kluczowe:** gospodarowanie wodą, woda w mieście, stawy paciorkowe

#### Wprowadzenie

Nadmiar i niedobór wody to paradoksalnie dwa główne problemy związane z gospodarowaniem wodą na obszarze Górnego Śląska. Co prawda wymienione skrajne sytuacje wynikają głównie z występujących okresowo zjawisk naturalnych jak wezbrania i niżówki, na które nie mamy wpływu, ale nie bez znaczenia na aktualny stan ma wpływ działalności człowieka. Prowadząc racjonalną gospodarkę

wodną w zlewni można w znaczący sposób ograniczyć skutki tych zjawisk. Wezbrania i susze są rozdzielone w czasie, a eliminacja lub ograniczenie skutków ich oddziaływania wymaga zastosowania rozbudowanych i jednocześnie skorelowanych działań zarządczych opierających się na świadomych poczynaniach wynikających z długoletnich obserwacji i analizy danych.

Poza problemami generowanymi przez zjawiska naturalne należy wskazać kilka podstawowych antropogenicznych przyczyn wpływających na gospodarowanie zasobami wód i obszarami zlewni. Należą do nich: uszczelnianie podłoża związane z zabudową terenu, zmiany rzeźby terenu, nieprawidłowości w planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, zanieczyszczenie wód powierzchniowych, niekontrolowany drenaż zlewni. Konsekwencją wymienionych działań są lokalne długo lub krótkotrwałe podtopienia lub deficyty wody. Ze względu na strategiczny charakter występujących problemów wyzwaniem jest ich rozwiązanie w oparciu o innowacyjne metody racjonalnego gospodarowania zasobami wód i środowiskiem wodnym.

### **Problemy z nadmiarem wody**

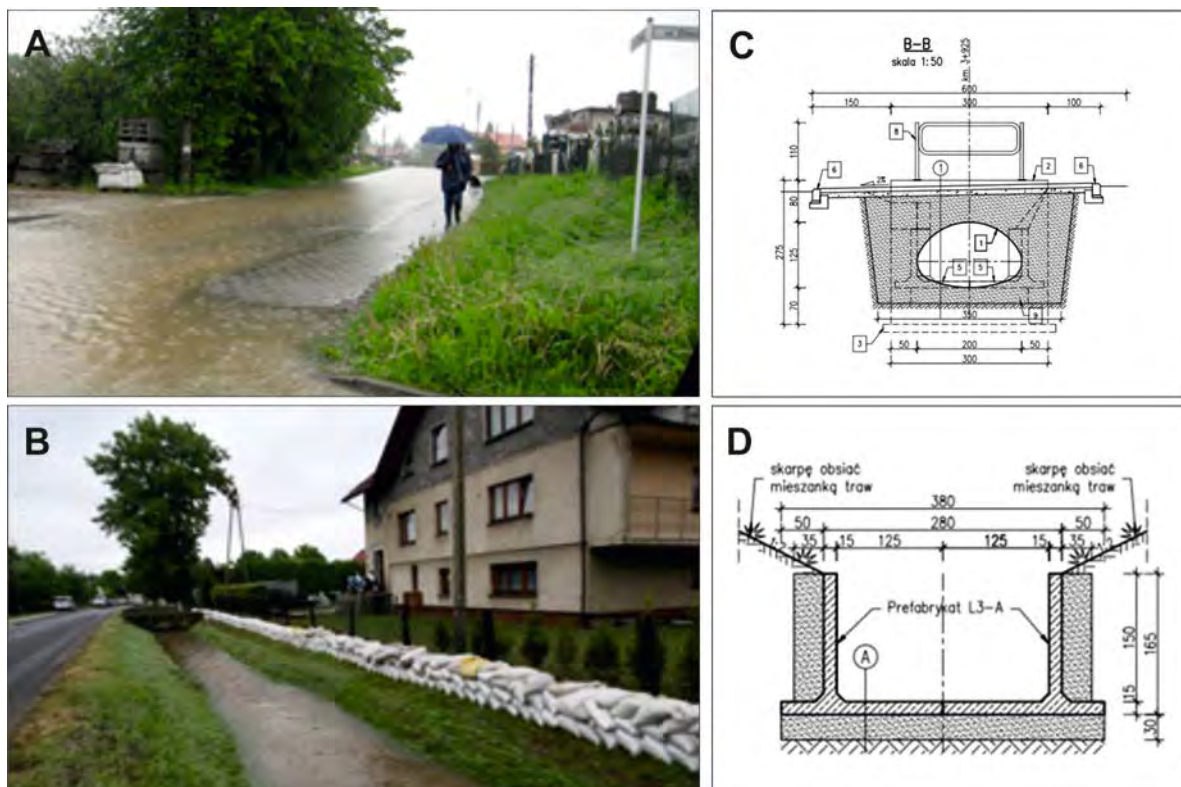
Zagadnienia powodzi w Polsce opisano w wielu publikacjach, m. in. w powstałych po ostatniej katastrofalnej powodzi monografiach (Maciejewski, Ostojki, Walczykiewicz, 2011; Maciejewski, Ostojki, Tokarczyk, 2011). Analizy Wojewódzkich Zespołów Zarządzania Kryzysowego w Polsce wskazują, że w 2010 roku 1000 gmin było zagrożonych powodziami. Ucierpiało 875 tys. ha użytków rolnych, 86500 budynków mieszkalnych, 2600 budynków użyteczności publicznej, ok. 2000 mostów i ponad 280 oczyszczalni ścieków (Borowska-Stefańska, 2015). Duże powodzie co prawa są rzadkie, jednak powodują ogromne straty materialne. Znacznie częstszym zjawiskiem są podtopienia, które dotyczą małych powierzchni ale sumarycznie mogą prowadzić do dużych strat w gospodarce.

Przyczyną podtopień na terenie Śląska jest często zmiana ukształtowania terenu związana z eksploatacją górnictwem złóż węgla kamiennego. Wydobywanie węgla prowadzi niejednokrotnie do powstawania tzw. niecek osiadania generujących w konsekwencji deformacje profilu podłużnego rzeki. W wyniku takich deformacji oraz niewielkiego spadku rzek następuje zawodnienie terenu i w konsekwencji zabagnianie i zalewanie (Gorol, 2011).

Oprócz deformacji profilu podłużnego rzek innymi specyficznymi zagrożeniami występującymi na Górnym Śląsku są osiadania terenu powodujące podtopienia. Przyczyną osiadania terenu jest najczęściej samolikwidacja wyrobisk chodnikowych i komorowych w zlikwidowanych kopalniach odbywająca się poprzez zawał stropu w wyrobiskach (ścianach). Przykłady tego typu oddziaływań obserwowane są powszechnie na Górnym Śląsku, gdzie w trakcie, a także po upływie wielu lat od zakończenia eksploatacji pojawiają się na powierzchni terenu różnego rodzaju deformacje nieciągłe w postaci zapadlisk, progów terenowych czy też osuwisk (Flisiak, Tajduś, 2001). Pogórnicznymi osiadaniami terenu na obszarze Górnośląskiego

Zagłębia Węglowego objęte jest ok. 1200 km<sup>2</sup> (Perski, 2000). Przykładowo średnia wysokość obszarów okolic Piekar Śląskich w okresie od 1881 do 1997 roku obniżyła się o 5,6 m, a największe zmiany obserwuje się na obszarach zlewni rzeki Brynicy (Dulias, 2005). Konsekwencją zmian ukształtowania terenu są zmiany przebiegu wododziałów lokalnych cieków, zmiany kierunków spływu powierzchniowego, czego następstwem może być podwyższenie zagrożenia powodziowego.

Lokalne krótkotrwałe podtopienia mogą być również powodowane przez gwałtowny spływ wód z powierzchni uszczelnionych (np. budynki, parkingi, jezdnie, chodniki) (ryc. 1). W połączeniu z niedrożnym lub źle zaprojektowanym systemem odprowadzania wód deszczowych może to prowadzić do znacznych strat materialnych w miastach i na ich obrzeżach. Przykładem takich problemów jest Potok Goczałkowicki, który przez lata traktowany był jako rów przydrożny, a jego zlewnia była sukcesywnie zabudowywana.



**Ryc. 1.** Podtopienia w Goczałkowicach w efekcie deszczy nawalnych z roku 2013 stanowiły ciągłe zagrożenie dla mieszkańców Goczałkowic (a i b). Proponowane rozwiązania ułatwiają spływ wód burzowych; c – projekt przepustu pod wjazdem do posesji którego duży przekrój ułatwia odprowadzanie wód z terenu gminy; d – ze względu na gęstą zabudowę konieczne było zaprojektowanie betonowego koryta potoku (na podstawie opracowań własnych)

**Fig. 1.** Inundations in Goczałkowice as a result of the heavy rains in 2013 were a constant threat for the residents of Goczałkowice (a and b). The proposed solutions facilitate storm water runoff; c – a culvert project under entries to the property, whose large cross-section facilitates the drainage of waters from the commune's area; d – due to the dense development it was necessary to design a concrete stream channel (based on own studies)

Archiwalne mapy potoku i jego zlewni wskazują że, wzdłuż jego trasy funkcjonowało wiele stawów hodowlanych, dziś zasypanych i zabudowanych. Dodatkowo ważnym problemem stał się niewystarczający przekrój koryta cieku oraz zdecydowanie za małe średnice przepustów na wjazdach do posesji. W efekcie tych zmian, w 2013 roku w Goczałkowicach po deszczu nawalnym doszło do zalania licznych posesji, co spowodowało duże straty materialne. Jedynym skutecznym środkiem do odprowadzenia znacznych ilości wód opadowych było zaprojektowanie żelbetowego koryta o przekroju prostokątnym oraz zaproponowanie przebudowy istniejących przepustów na wykonane na indywidualne zamówienie rury z żywic poliestrowych wzmocnione włóknem szklanym GRP.

Wysokie ceny gruntów w miastach powodują, że zabudowywane są tereny, które ze względu na swoje położenie powinny stanowić naturalne tereny zalewowe położone w dnach dolin rzek. Najbardziej spektakularnym przykładem takich działań jest posadowienie osiedla Krzyki we Wrocławiu, gdzie duże osiedle mieszkaniowe wybudowano na terenach zalewowych Odry. Generuje to wysokie koszty budowy obwałowań i przepompowni koniecznych do utrzymania bezpieczeństwa ludzi zamieszkujących te tereny.

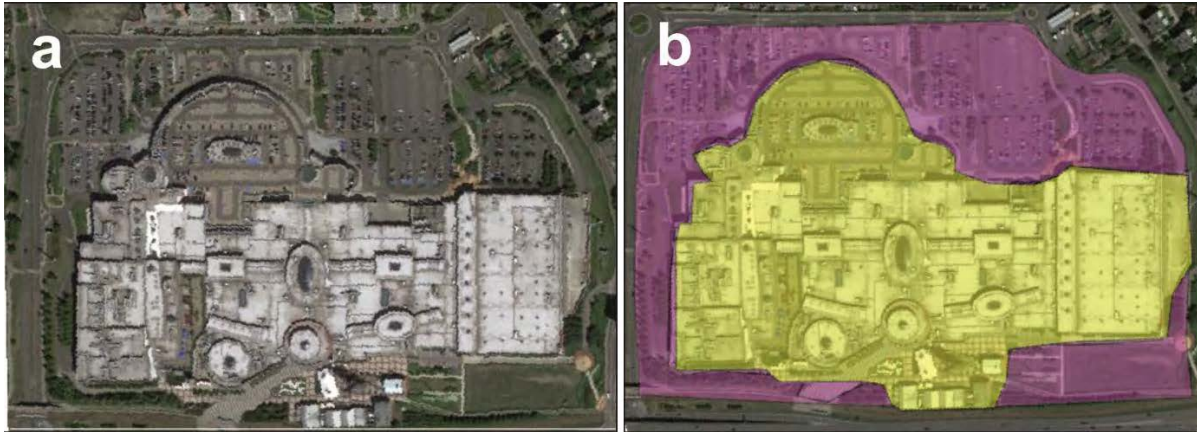
### **Problemy z niedoborem wody**

Miasta ze względu na swoją specyfikę wynikającą z gęstej zabudowy i dużej powierzchni obszarów uszczelnionych znacząco przyczyniają się do przyspieszenia spływu powierzchniowego i zmniejszenia retencji, co w konsekwencji może prowadzić do deficytów wody. Te duże powierzchnie nieprzepuszczalne, to głównie dachy budynków, parkingi, drogi. W ostatnich 25 latach pojawiły się duże obiekty wyposażone w ogromne parkingi, czyli sklepy wielkopowierzchniowe. Jedną z większych galerii handlowych w Polsce i w konurbacji śląskiej „Silesia” zajmuje obszar około 20 ha (ryc. 2.) Po opadach nawalnych, gdy spada na przykład jednorażowo 50 mm deszczu, do kanalizacji burzowej trafia w krótkim czasie około 10 tys. m<sup>3</sup> wody. Odpowiada to objętości stawu o powierzchni 1 ha i głębokości 1m. W przypadku takich powierzchni woda nie wsiąka do gleby, nie zasila zasobów wód podziemnych tylko spływa szybko systemem kanalizacji burzowych do cieków, których koryta nie są w stanie w krótkim czasie przejąć takich objętości wody. Skutkuje to nieprzewidywalnymi powodziąmi, które określane są jako powódzie miejskie (urban flood).

Ważnym czynnikiem ograniczającym zasoby wód podziemnych na Śląsku jest przemysł wydobywczy. W wyniku działalności górniczej dochodzi do drenażu wód podziemnych i powierzchniowych, które następnie są wypompowywane z kopalni i odprowadzane do sieci hydrograficznej. Na drenaż zlewni wpływa również pobór wód podziemnych przeznaczonych do spożycia oraz odwadnianie obiektów podziemnych.



Innym poważnym czynnikiem ograniczającym zasoby wód jest ich zanieczyszczenie przez zasolone wody kopalniane zrzucane do wód powierzchniowych. Prowadzi to do znaczącego przekroczenia dopuszczalnych norm zasolenia wody. Przykładowo u ujścia Gostyni występuje prawie 100-krotne przekroczenie dopuszczalnej przewodności (wynikające z zawartości chlorków i siarczanów).



**Ryc. 2** Obraz z lotu ptaka (Google Earth) sklepu wielkopowierzchniowego „Silesia” w Katowicach z parkingiem (a) oraz powierzchnia parkingu (fioletowy) i dachu sklepu (żółte). Dach to około 10 ha parking 10 ha łączna powierzchnia szczelna to około 20 ha

**Fig. 2.** A bird's eye view (Google Earth) on large shopping center "Silesia" in Katowice with parking lot (a) and parking area (purple) and shopping center roof (yellow). The roof area is about 10 ha, parking lot area is 10 ha, total tight area is about 20 ha

Nadrzędnym celem prowadzenia nowoczesnej gospodarki wodnej na tym terenie jest stworzenie systemów pełniących funkcje kontroli powodziowej i uzupełniania zasobów wód podziemnych, stabilizacji koryt rzecznych, ochrony przed skutkami opadów nawaalnych, oczyszczania wody i podnoszenia bioróżnorodności. Za prowadzeniem takiej gospodarki przemawiają: wysoka wartość usług ekosystemowych świadczonych przez obszary podmokłe, wartości kulturowe, potencjał rekreacyjny i turystyczny (turystyka industrialna), łagodzenie skutków i adaptacja obszarów do zmian klimatu (ryc. 3).

Kategoria	Potencjalna korzyść	Kategoria	Potencjalna korzyść
<b>Usługi zaopatrzeniowe</b>		<b>Usługi kulturowe</b>	
Produkcja żywności	++	Dziedzictwo kulturowe	++
Produkcja energii	+	Rekreacja i turystyka	++
Utrzymanie różnorodności genetycznej	+	Wartość krajobrazowe	++
Wspieranie biochemicznych procesów środowiskowych	++	<b>Usługi wspierające</b>	
Zioła, farmaceutyki naturalne	+	Tworzenie gleb	++
Zasoby krajobrazowe	++	Produkcja pierwotna (fotosynteza)	++
Zasoby wodne	++	Krążenie biogenów	++
<b>Usługi regulacyjne</b>		Krążenie wody	++
Kontrola jakości powietrza	+	Bioremediacja	++
Kontrola klimatu	++		
Kontrola jakości wody	++		
Kontrola zagrożeń naturalnych	++		
Kontrola występowania szkodników	0		
Regulacja erozji gleby	+		
Oczyszczanie wody i przetwarzanie odpadów	++		
Zapyłanie	0		

++	Potencjalny znaczący wpływ pozytywny
+	Potencjalny wpływ pozytywny
0	Niewielki wpływ
-	Potencjalny wpływ negatywny
--	Potencjalny znaczący wpływ negatywny
?	Brak wskazań do oceny

**Ryc. 3.** Usługi ekosystemowe: zaopatrzeniowe, regulacyjne, kulturowe i wspierające świadczone przez ekosystemy wodne. **Źródło:** wg Baker et al., 2013

**Fig 3.** Ecosystem services: supply, regulatory, cultural and support services provided by aquatic ecosystems. **Source:** according to Baker et al., 2013

### Dobre praktyki w gospodarce wodnej na górnym śląsku w czasach historycznych

Zrównoważona gospodarka wodna od średniowiecza prowadzona była na tych terenach przez Cystersów (Rudy Raciborskie), właścicieli ziemskich z rodów Piastów Cieszyńskich, Turzonów, Promniców i Hochbergów (Pszczyna), Donnersmarcków (Świerklaniec, Bytom).

Początek rozwoju gospodarki stawowej w Polsce datuje się na XV wiek, ale pierwsze stawy hodowlane powstawały już wcześniej, prawdopodobnie w oparciu o liczne w tym obszarze starorzecza Małej Wisły, Odry i mniejszych rzek w ich dorzeczach. Szybki rozwój hodowli ryb na tych terenach wiąże się z osiedleniem na ziemiach polskich Cystersów. Na przełomie XV i XVI wieku Kazimierz II, książę cieszyński, zainicjował budowę stawów i rozwój rybactwa w Księstwie Pszczyńskim. W 1490 roku rozpoczął trwającą 40 lat budowę stawu łąckiego o powierzchni ponad 200 ha (*Historia Pszczyny*, brak daty wydania). W XV wieku silny rozwój osadnictwa na Śląsku i Małopolsce zdynamizował proces powstawania stawów. Zwiększająca się liczba mieszkańców miast, powodowała wzrost zapotrzebowania na ryby, szczególnie w obliczu powszechnie obowiązujących postów i traktowania potraw rybnych jako postnych. W tym czasie na Górnym Śląsku pojawiło się kilka ośrodków gospodarki stawowej takich jak rybnicko-pszczyński i kluczborsko-lubliniecki, które zaopatrywały w ryby między innymi Kraków. (Brylski, brak daty wydania).



Gospodarka stawowa była ukierunkowana głównie na produkcję ryb. Przykładowo dochody „panów na Pszczynie” w 1536 roku wynosiły 139,7 tys. złotych węgierskich, z czego  $\frac{2}{3}$  pochodziło z gospodarki stawowej. Przeliczając na wartość współczesną, stanowiło to około 65 mln PLN dochodu z gospodarki rybackiej. Według K. Musioła (1936) z dużego stawu na wschód od Pszczyny (prawdopodobnie Zarzinaer) pozyskiwano około 200 kop ryb. Zakładając, że waga 1 ryby do konsumpcji to 1,2 kg a powierzchnia Zarzinaera (ryc. 4a) mierzona na podstawie map Wrede’go, to około 68,5 ha, można oszacować, że wydajność stawu wynosiła około 210 kg ryb z ha. Wskazuje to na produkcję ekstensywną, ale wydajność tych stawów była jak na tamte czasy duża w porównaniu do produkcji ryb w Czechach i na Morawach, która wynosiła w tym okresie około 40 kg ryb z ha (Lhotský, 2010).

Obecnie na terenie Górnego Śląska znajduje się około 12 tys. zbiorników wodnych o łącznej powierzchni około 18 tys. hektarów. W okresie od XVI do końca XVIII wieku powierzchnia ta była jednak znacznie większa. W tym okresie, przy zakładanej wydajności, produkcja ryb wynosiła znacznie ponad 720 ton rocznie. Obecnie rola gospodarki rybackiej na omawianym terenie została znacząco ograniczona i prowadzona jest głównie przez koła Polskiego Związku Wędkarskiego.

Od średniowiecza do końca XVIII wieku działalność gospodarcza była silnie uzależniona od hydroenergii. Istniejące na tym terenie stawy rybne pełniły również funkcje energetyczne, służąc jako rezerwuary wody do napędu kół wodnych. W końcu XVIII w. na obszarze Górnego Śląska zlokalizowanych było ponad 250 kół wodnych, które pełniły rolę napędów żaren młyńskich, dmuchaw i młotów w kuźniach oraz pił w tartakach. Stosowane w tamtych czasach rozwiązania hydrotechniczne i rozmieszczenie zbiorników wodnych zobrazowane na mapach (ryc. 4a), wskazują również na funkcje przeciwpowodziowe i ograniczające skutki suszy. Niektóre z nich mogą służyć za wzór rozwiązań w budowie współczesnych systemów małej retencji.

Do takich dobrych praktyk gospodarowania wodami, wypracowanych w przeszłości, należą systemy stawów paciorkowych budowane na ciekach i w dolinach potoków. Stawy paciorkowe zbudowane są z minimum trzech lub więcej kaskadowo ułożonych zbiorników wodnych, połączonych ze sobą ciekami. Systemy te składały się w przeszłości z kilku do kilkunastu zbiorników o powierzchni od 1 do 10 ha. Analiza map historycznych wskazuje, że tego typu zbiorniki dominowały na Górnym Śląsku do około 1800 roku. Obecna struktura powierzchni zbiorników w regionie również wskazuje na dominującą rolę małych zbiorników (rys. 4b). Systemy stawów paciorkowych pełniły także funkcje przeciwpowodziowe o czym świadczy duży udział zbiorników suchych oraz grobli w poprzek dolin potoków spowalniających spływ wód. Oprócz funkcji przeciwpowodziowych, retencji wody i rybackich systemy te spełniały ważną rolę rezerwuaru gatunków zwierząt i roślin, determinując dużą bioróżnorodność obszaru. Ze względu na dużą liczbę tych stawów należy podkreślić ich rolę w gromadzeniu zasobów wód. Liczba istniejących obecnie stawów o powierzchni od 1 do 10 ha na

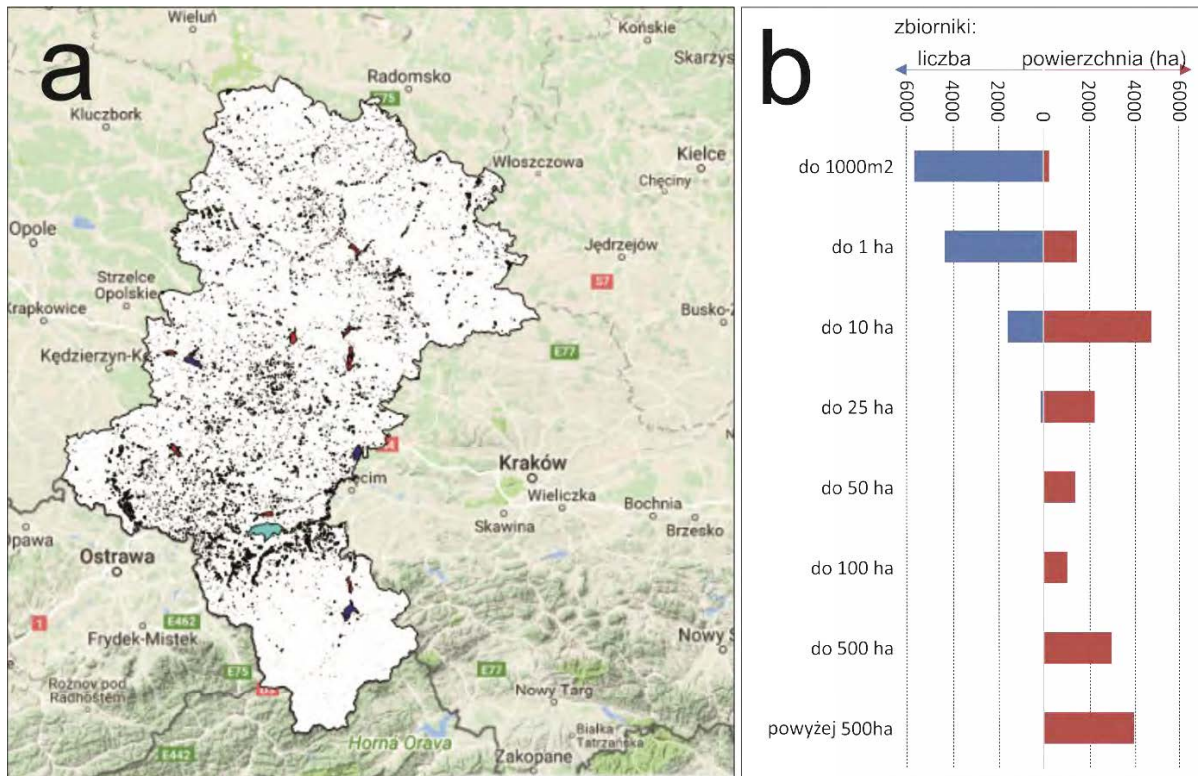
analizowanym obszarze wynosi ponad 1600, zgodnie z danymi Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej. Łączna powierzchnia uwzględnionych zbiorników wynosi około 4730 ha (ryc. 5). Przyjmując, że średnia głębokość tych zbiorników wynosi 1 m, można oszacować ich zdolność retencyjną na 47 mln m<sup>3</sup> wody, co stanowi około 40% zdolności retencyjnej Zbiornika Goczałkowickiego.



**Ryc. 4.** Fragment mapy Śląska von Wrede (rejon Pszczyny) z roku 1748 i mapy Śląska stworzone na podstawie map Hammera i von Massenbacha (Schlenger, 1933): a – stawy wokół Pszczyny czerwoną strzałką oznaczono staw Zarziner (Jankowicki); żółta strzałka wskazuje Pszczynę; b – stawy paciorkowe pomiędzy Radostowicami i Czarkowem

**Fig. 4.** A extract of the map of Silesia (Pszczyna region) in 1748, maps of Silesia created on the basis of Hammer and von Massenbach maps (Schlenger, 1933): a – ponds around Pszczyna with a red arrow marked the Zarziner pond (Jankowicki); the yellow arrow indicates Pszczyna; b – bead ponds between Radostowice and Czarkow

Postępujący rozwój przemysłu i związana z tym urbanizacja spowodowała spadek jakości wód w tym rejonie. W 1867 roku na obszarze łąk w dolinie rzeki Gostyni powstała oczyszczalnia gruntowo-korzeniowa oczyszczająca jej wody. Składała się ona z wału ziemnego przegradzającego dolinę, jazu iglicowego zbudowanego na rzece i dwóch młochów regulujących dopływ wody do poletek oczyszczalni. System biologiczny stanowiły dwa poletka o powierzchni około 10 i 5,8 ha (ryc. 6) z drenażem rozsączającym i zbierającym. Oczyszczona woda była odprowadzona kanałem zbiorczym do koryta Gostyni.



**Ryc. 5.** Zbiorniki wodne województwa śląskiego a – rozmieszczenie zbiorników na Śląsku, b – struktura ilościowa i powierzchniowa zbiorników. **Źródło:** opracowanie własne na podstawie danych KZGW

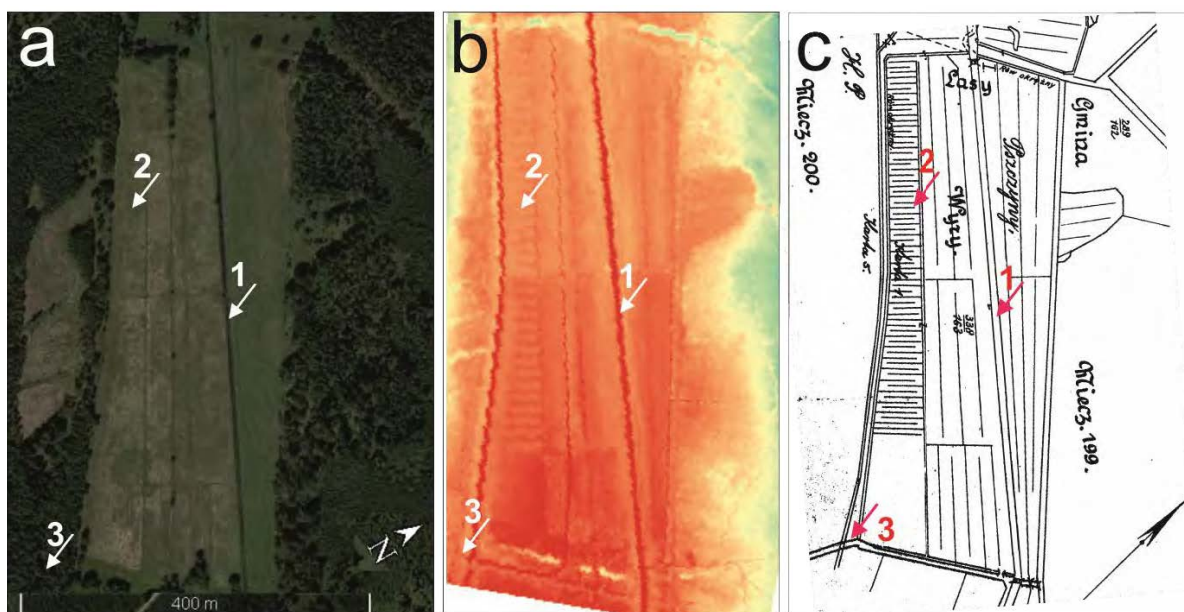
**Fig. 5.** Water reservoirs of the Silesia Voivodship – distribution of reservoirs, b – quantitative and surface structure of reservoirs. **Source:** own study based on KZGW data

Zbiorniki w przeciągu wieków ewoluowały zmieniając swoje funkcje. Przykładem takiej ewolucji może być Jezioro Paprocańskie będące jednym z najstarszych, istniejących do tej pory zbiorników zaporowych w Polsce, zlokalizowany w Lasach Pszczyńskich na południowo-zachodnich obrzeżach miasta Tychy. Zbiornik powstał prawdopodobnie na początku XVIII wieku dla potrzeb Huty Paprockiej, dla której napędzał 2 ośmiostopniowe koła wodne służące do napędu pracy młotów i młotów kuźni. Z przeprowadzonych badań wynika, że Jezioro Paprocańskie jest starsze niż dotychczas sądzono, gdyż widnieje już na mapach Christiana Friedricha von Wrede, które pochodzą z okresu 1747-1753. Zbiornik był historycznie zasilany przez Gostynię. W XIX wieku został jednak przebudowany ze względu na zmniejszenie zapotrzebowania na wodę do wytwarzania energii dla huty. Obniżono wówczas o dwa metry poziom piętrzenia, zbiornik częściowo oddzielono wałem od Gostyni umożliwiając uzupełnianie zbiornika jej wodami z użyciem jazu zlokalizowanego w północno zachodniej części zbiornika. Zbiornik był również zasilany ze zlewni leśnej, korytem tak zwanej Starej Gostyni od południowo-wschodniej części akwenu. Od tego czasu zbiornik przyjął funkcje hodowlane. Kolejną zmianą w zbiorniku było zlikwidowanie jazu w 1980 roku i ostateczne odcięcie od zasilania wodami Gostyni, spowodowane przez duży spadek jakości jej wód w związku



z eksploatacją górniczą i odprowadzanie zasolonych wód z kopalni „Bolesław Śmiały”. Obecnie zbiornik pozostaje oddzielony od rzeki Gostyni i zasilany jest ze zlewni leśnej, korytem tak zwanej Starej Gostyni, od południowo-wschodniej części akwenu.

Tereny zlewni zbiornika „Paprocany” były przez wiele lat silnie zagospodarowane i ważne gospodarczo ze względu na funkcje energetyczne (tartak, huta), a następnie hodowlane (Woźnica i in., 2017). Potrzeby gospodarcze przyczyniły się do budowy licznych urządzeń hydrotechnicznych oraz regulacji Gostyni i potoków w jej zlewni. Powstałe w przeszłości elementy zagospodarowania terenu zlewni, obecnie niejednokrotnie zdegradowane mają istotny wpływ na jakość wody w Jeziorze Paprocańskim.



**Ryc. 6.** Teren gruntowo-korzeniowej oczyszczalni ścieków na Mieczysku 200 w dolinie Gostyni: a – obraz satelitarny 2018 rok, Google Earth; b – numeryczny obraz terenu (2012); c – kopia oryginalnej dokumentacji technicznej z okresu remontu systemu w 1933 r. Strzałkami zaznaczono istotne elementy oczyszczalni: 1 – koryto Gostyni, 2 – drenaż rozsączający i zbierający, 3 – kanał zbiorczy

**Fig. 6.** The area of the root-sewage treatment plant at Mieczysko 200 in the Gostynia valley: a – satellite image in 2018, Google Earth; b – digital elevation model (2012); c – a copy of the original technical documentation from the time of system renovation in 1933. Arrows marked essential elements of the treatment plant: 1 – Gostynia bed, 2 – drainage and collection drainage, 3 – collection channel

## **Drogi wodne na Śląsku**

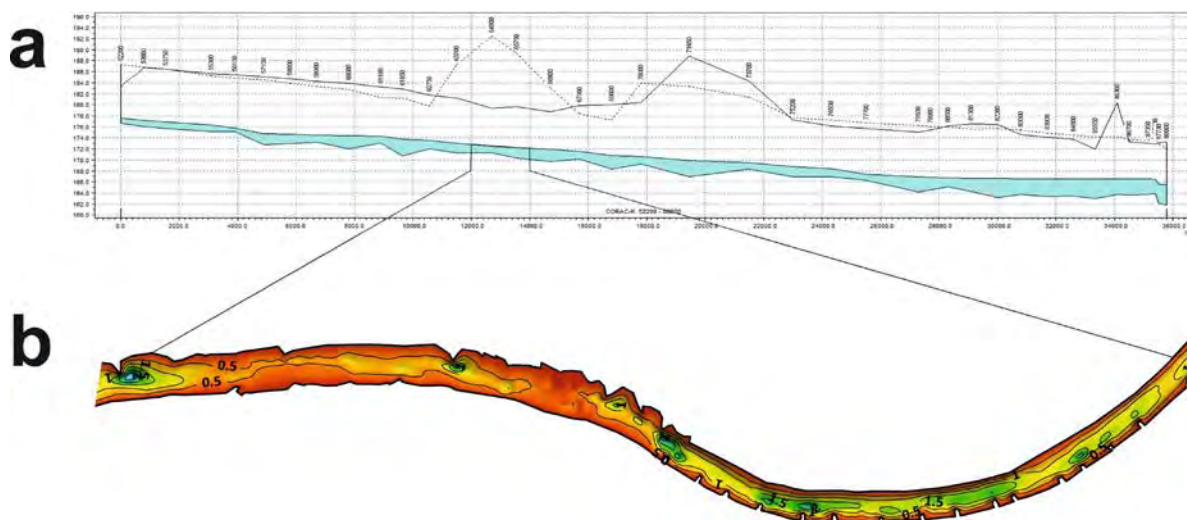
Gospodarka wodna to także transport wodny, którego dynamiczny rozwój przypada na Śląsku na XIX wiek. Europę przecinały w tym okresie liczne kanały, budowano jazy i śluzy, dzięki którym rzeki stawały się głównymi magistralami transportu towarów w Europie. Transport wodny na Górnym Śląsku to głównie żegluga na Odrze. Już w XIII wieku opisywane są frachty soli i śledzi żaglowymi barkami ze Szczecina do Wrocławia. Miasta nadodrzańskie uzyskują prawa do prowadzenia żeglugi na Odrze i tak na przykład w roku 1511 król Władysław Jagiellończyk, potwierdzając Głogowowi jego dawne przywileje, przyznaje mu prawo do posiadania na Odrze trzech „statków”. W XV wieku w Raciborzu powstaje port i księżęca komora celna, pobierającą stałe podatki od flisaków. W 1586 przywilej cesarza Rudolfa II Habsburga porządkuje żeglugę na Odrze. Do końca XIX wieku Racibórz był dobrze prosperującym miastem portowym. W połowie XVIII wieku po Odrze pływały już liczne statki żaglowe o różnych typach ożaglowania.

Kolejna ważna regulacja prawna dotycząca żeglugi na Odrze miała miejsce w 1812 r. Wówczas tak zwanym Protokołem Bogumińskim ustalono między innymi takie parametry, jak szerokość i głębokość rzeki poczynając już od Raciborza. Według protokołów bogumińskich Odra miała znaczenie gospodarcze jako źródło potencjalnego dochodu z podatków, opłat rzecznych, portowych i transportowych oraz znaczenie militarne w kontekście transportu dla zjednoczonych już wówczas Prus. Państwo pruskie zapisało w dokumencie gotowość przejęcia na siebie obowiązków kosztownych regulacji i zarządu rzeki (po raz pierwszy na tak dużą skalę). W protokole z 1819 r. wskazano, że wszelkie budowle regulacyjne, zatem również wykonane jako zabezpieczenie brzegów prywatnych, obciążać powinny jedynie państwo. Zapewniano tym samym jednolitość w sposobie zabudowy rzeki, a przede wszystkim środki finansowe na prowadzenie koniecznych robót.

7 lipca 1819 r. w małej nadodrzańskiej wiosce Bohumin (dziś Republika Czeska, tuż przy granicy z Polską) powstał protokół prezentujący pierwszy jednolity plan regulacji całej Odry. Zakładał on zmniejszenie szkodliwego działania przekopów poprzez zaprojektowanie trasy regulacyjnej zgodnej z naturalnym biegiem rzeki, usunięcie płycizn, wytworzenie rosnącej szerokości normalnej. Co ważne roboty miały być wykonywane na koszt państwa, co zapewniało jednolite i stałe finansowanie robót. Dzięki tym działaniom już w 1843 r. osiągnięto znaczną poprawę głębokości tranzytowych i wydłużenie okresu nawigacyjnego. Po II wojnie światowej żegluga na tym odcinku Odry prawie zamarła. W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku incydentalnie spławiane były ładunki ponadgabarytowe.

Obecnie śródlądowe drogi wodne to według przepisów ustanowionych przez odpowiednie organa państwowe wodne szlaki komunikacyjne, na których bez przeszkód może odbywać się żegluga czyli ruch statków. Odpowiednie rozporządzenia określają, które śródlądowe wody powierzchniowe uznane są za żeglowne. Oznacza to, że koryto rzeki bądź kanału jest wolne od przegród (jazy,

tamy) lub istnieją budowle hydrotechniczne (śluzy, pochylnie) umożliwiające pokonanie piętrzenia bądź innych różnic poziomów pomiędzy odcinkami szlaku żeglownego (np. pomiędzy jeziorami). Naturalnie każdy z tych szlaków ma swoje parametry określające maksymalną wielkość i zanurzenie statków, które mogą nim pływać.



**Ryc. 7.** Przekrój podłużny Odry na odcinku od Raciborza do Kędzierzyna Koźła z widoczną 12 metrową różnicą poziomów na odcinku 56 km (a); fragment mapy batymetrycznej tego odcinka (b)

**Fig. 7.** Longitudinal section of the Odra river on the section from Raciborz to Kędzierzyn Koźle with a visible 12-meter difference in levels on the section of 56 km (a); extract of the bathymetric map of this section (b)

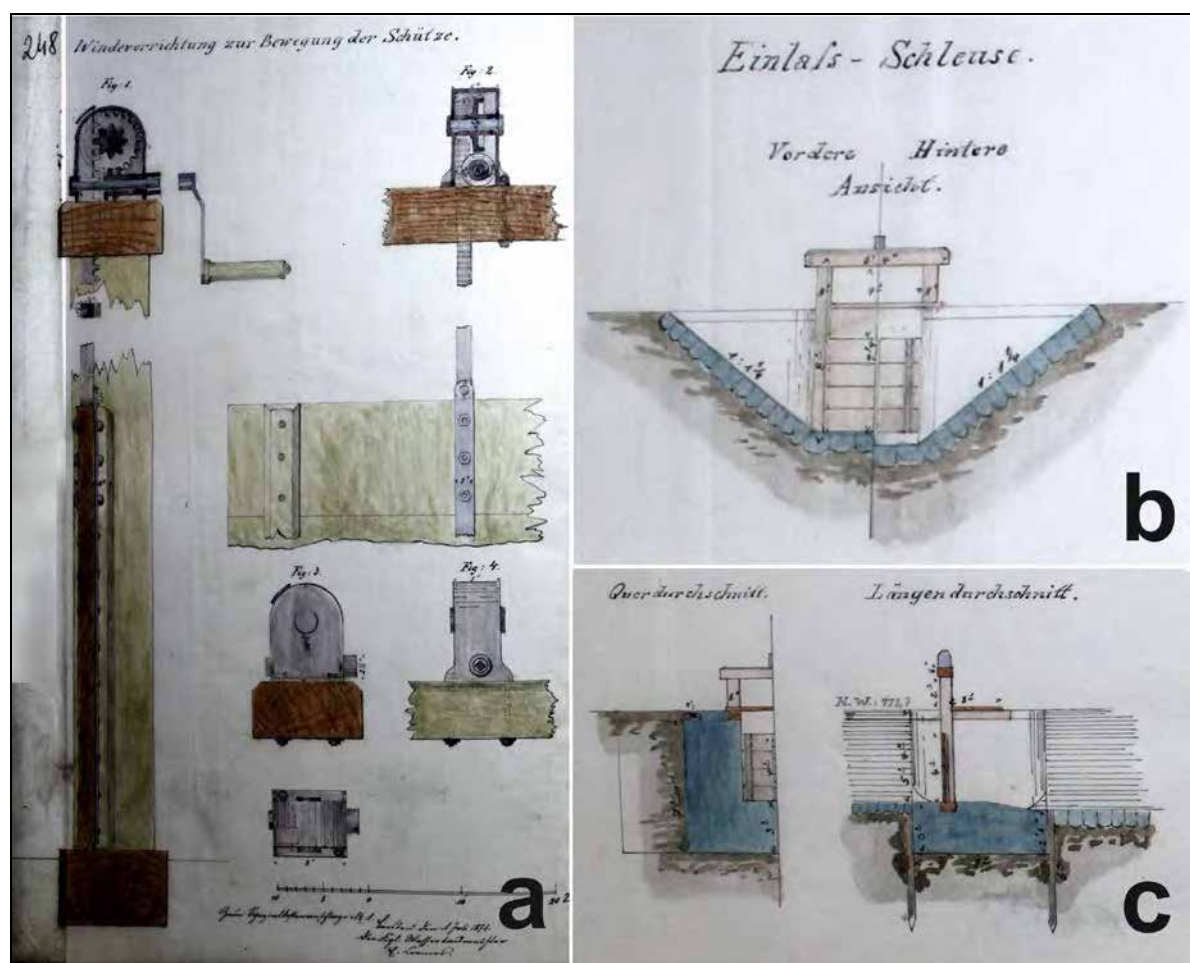
Górny swobodnie płynący odcinek Odry od ujścia Olzy (granica państwa 27,7 km) do Raciborza (km 55,2) nie jest drogą wodną uznaną za żeglowną. Natomiast od Raciborza do Koźła (km 95,6) jest drogą wodną uznaną za żeglowną o najniższej klasie żeglowności, tzn. I a, przyjętej jako droga wodna o znaczeniu wyłącznie turystycznym. Odra na odcinku od granicy państwa do Koźła pokonuje spadek ok. 24,0 m. Szerokość koryta zwierciadła wody średniej rocznej wynosi 61,0 m na odcinku od ujścia Olzy do Raciborza i 63,0 m od Raciborza do Koźła. Celem regulacji tego odcinka Odry było uzyskanie przeciętnej głębokości tranzytowej 0,3-0,6 m. Bieg rzeki po regulacji pozostał bardzo kręty. Występują tu 43 łuki o promieniach mniejszych od 600,0 m. Jedynie na odcinku od Raciborza do Koźła dopuszcza się ruch statków, jednak po każdorazowym indywidualnym uzyskaniu pozwolenia Urzędu Żeglugi Śródlądowej w Kędzierzynie-Koźlu. W celu zabezpieczenia przed powodzią miasta Racibórz od km 43,5 do km 55,0 zbudowano lateralnie biegnący do Odry Kanał Ulga o długości 8,28 km, którego wymiary umożliwiają jego późniejsze uzeglownienie. Górny odcinek Odry od ujścia Olzy do Koźła to także „brakujące połączenie”, jakie po stronie polskiej występuje na międzynarodowym szlaku żeglugowym E-30, a zarazem element przyszłej drogi wodnej Odra – Dunaj.

W minionym półwieczu w zasadzie przebadano wszystkie możliwe warianty rozbudowy Odry powyżej Koźła, odzwierciedlające ówczesny poziom wiedzy oraz poglądy na żeglugę śródlądową i jej rolę w systemie transportowym kraju. Jednak w dotychczasowych opracowaniach nigdy nie sprecyzowano konkretnego terminu budowy drogi wodnej Odra-Dunaj. Szczegółowa analiza techniczno-ekonomiczna, przeprowadzona przez Hydroprojekt Wrocław sp. z o.o. w „Studium drogi wodnej Odry na odcinku Koźle-Ostrawa przy uwzględnieniu etapowej realizacji zbiornika Racibórz oraz obiektów ochrony przeciwpowodziowej doliny Odry od Raciborza do Koźła” wykazała, że optymalnym wariantem trasy żeglugowej Koźle – Ostrawa jest wariant kanału żeglownego równoległego do rzeki. W wariacie tym droga wodna rozpoczyna się od śluzy stopnia wodnego Koźle i biegnie Odrą do ujścia Bierawki w Bierawie, a następnie prawobrzeżnym kanałem lateralnym do śluzy Dziergowice, skąd w wykopie przechodzi do kanału ulgi w Raciborzu (*vis-a-vis* Miedoni). Stabilizacja zwierciadła wody pomiędzy Dziergowicami i Raciborzem następowałaby przy pomocy kolejnego stopnia wodnego Racibórz Dolny, którego awanport o długości 1700,0 m łączyłby jednocześnie kanał ulgi z planowaną śluzą.

### **Atut regionu: duża jeziorność**

Duża liczba zbiorników wodnych na obszarze Górnego Śląska umożliwia ich wykorzystania jako terenów rekreacyjnych, obszarów atrakcyjnych przyrodniczo i przede wszystkim jako ważne zasoby wody dla regionu. Na obszarze Śląska znajduje się największe skupisko sztucznych zbiorników w Polsce o średniej jeziorności 2,74%, określane mianem Górnośląskiego Pojezierza Antropogenicznego (GPA) (Rzetała, 2008). Zagospodarowanie tych zbiorników obejmuje między innymi działania zmierzające do utrzymania i (lub) przywrócenia zasad zrównoważonej gospodarki wodnej. Według autorów działania na terenie GPA należy poszerzyć o zbiorniki zlokalizowane w rejonie zachodniej Małopolski jak również w Kraju morawsko-śląskim w Republice Czeskiej w dorzeczu górnej Odry, co daje szansę na rozwój współpracy transgranicznej.

Zbiorniki GPA to ważne obiekty śląskiego dziedzictwa kulturowego i przemysłowego. Materialnym obrazem tego dziedzictwa od czasów średniowiecza są groble, stawy i inne istniejące dotąd na tym terenie urządzenia hydrotechniczne jak również dokumentacja techniczna (ryc. 8) i zintegrowane metody zarządzanie gospodarką wodną. Zbiorniki GPA mają duży potencjał w łagodzeniu skutków zmian klimatycznych. Należy jednak pamiętać, o ich dużej wrażliwość na zmiany klimatyczne. Przyczyna tej wrażliwości to mała głębokość zbiorników, która prowadzi do szybkiego wzrostu temperatury wody, co sprzyja zakwitowi sinic i glonów.



**Ryc. 8.** Rysunki techniczne XIX-wiecznych urządzeń hydrotechnicznych z obszaru księstwa pszczyńskiego (Górny Śląsk). **Źródło:** zbiory Archiwum Państwowego w Katowicach dokumenty z Archiwum książęcego

**Fig. 8.** Technical drawings of nineteenth-century hydrotechnical devices from the area of the Duchy of Pless (Pszczyna, Upper Silesia). **Source:** collections of the State Archives in Katowice documents from the Archives of the Duke

## Rozwiązania

### Propozycja 1 – Zwiększenie retencji

Uniwersalnym rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie skutków opisywanych problemów jest utrzymanie i odpowiednie zagospodarowanie naturalnych obszarów retencyjnych. Dotyczy to szczególnie systemów małej retencji, których historyczna i współczesna obecność na tym terenie została opisana w poprzednich rozdziałach. Konieczne są działania związane nie tylko z utrzymaniem istniejących systemów dużej i małej retencji, ale także ich odbudowa i rozbudowa. Należy pamiętać, że koszty związane z funkcjonowaniem takich obiektów nie zamykają się z końcem ich budowy lub rekonstrukcji, ale muszą być ponoszone w czasie eksploatacji w celu utrzymania należytego stanu technicznego.

Działania nowoczesnych systemów zarządzania i gospodarowania wodami powinny wynikać z innowacyjnych rozwiązań opartych na wiedzy zarówno historycznej



jak i współczesnej. Wypracowanie najlepszych praktyk takiego zarządzania wymaga między innymi zgromadzenie jak najszerszych danych na temat istniejących obiektów, ich zinwentaryzowanie i należyte zarchiwizowanie. Inwentaryzacja powinna być wieloaspektowa i obejmować analizy własnościowe i prawne, parametry hydrologiczne, hydrotechniczne, potencjał gospodarczy (rekreacja, rybołówstwo), potencjał ekologiczny i przyrodniczy (wartość usług ekosystemowych, ocena bioróżnorodności) oraz analizę przyczynowo skutkową negatywnych zjawisk w zlewni oparta na DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response). Na bazie zgromadzonych danych możliwa będzie analiza umożliwiająca podejmowanie decyzji środowiskowych dotyczących szeroko rozumianej gospodarki wodnej.

### ***Propozycja 2 – Rekonstrukcja systemów stawów paciorkowych***

Odbudowa stawów paciorkowych może być sposobem na budowę systemów małej retencji na Śląsku. Zbiorniki te powinny być wielofunkcyjne i obejmować: przeciwdziałanie suszom i powodziom, hodowlę ryb oraz rekreację. Ważną funkcją tych obiektów powinno być kształtowanie przyrody dla wzbogacania bioróżnorodności i związany z tym wzrost walorów krajobrazowych. Takie wielofunkcyjne zbiorniki budowane na jednym cieku znacząco poprawią poziom zasobów wodnych w naszym rejonie. Należy podkreślić, że zbiorniki o powierzchni w zakresie 1-10 ha są obecnie najliczniejszą grupą na terenie Śląska i jak wynika z analiz część z nich jest pozostałością po historycznych systemach stawów paciorkowych. Szacowana objętość retencyjna tych zbiorników na Śląsku wynosi około 47 mln m<sup>3</sup> wody, co jest porównywalne do objętości retencyjnej dużych zbiorników, takich jak Pogoria IV czy Dzieńkowice (około 52 km<sup>3</sup>). Duże rozproszenie małych zbiorników na całym obszarze powoduje jednak, że ich oddziaływanie jest znacząco większe (retencja, działania przeciwpowodziowe, usługi ekosystemowe, przeciwdziałanie skutkom zmian klimatycznych). Wśród najważniejszych usług ekosystemowych systemów zbiorników paciorkowych należy wymienić: produkcję żywności (ryby), zwiększenie zasobów wodnych, utrzymanie bioróżnorodności gatunkowej i genetycznej, kontrolę jakości wody, ochronę dziedzictwa kulturowego.

### ***Propozycja 3 – Racjonalna gospodarka wodna oparta na wiedzy***

Prowadzenie racjonalnej gospodarki wodnej oparta na dostępnej wiedzy to idea, która przez długie lata przyświecała gospodarzom terenów Śląska. Współczesne rozwiązania powinny wykorzystywać nowoczesne systemy analizy zasobów i jakości wód oraz modelowanie matematyczne do zarządzania jakością wód i gospodarowania zasobami wodnymi. Nowoczesne zarządzanie to także gospodarowanie zasobami przyrodniczymi, zwiększanie bioróżnorodności, a także kierunkowe wykorzystanie istniejących zasobów do promowania działań proekologicznych i ekoturystyki. Priorytetowym dla regionu powinno być promowanie jego dziedzictwa przemysłowego między innymi poprzez eksponowanie istniejących na tym terenie zabytków hydrotechniki.

### ***Propozycja – 4 Inwentaryzacja zbiorników wodnych***

Dla oceny potencjału zbiorników wodnych GPA konieczny jest jednolity sposób badania i oceny potencjału zbiorników. Ocena powinna być wieloaspektowa i obejmować takie elementy jak: parametry hydrologiczne, stan techniczny obiektów, ocena stanu zagospodarowania zlewni, wielosezonowa ocena jakości wód, potencjał ekologiczny, potencjał rekreacyjny, organizacja przestrzenna wokół analizowanego obiektu, usługi ekosystemowe świadczone przez ekosystem zbiornika. Wyniki analiz określających potencjał zbiorników powinny być istotnym czynnikiem decydującym o sposobie ich zagospodarowania. Analizy należałoby rozpocząć od inwentaryzacji zasobów obejmujących zarówno stan biotyczny jak i abiotyczny zbiorników oraz warunki panujące w zlewni. Dla określenia zasobów wód konieczna jest analiza objętości zbiorników, ocena rezerwy powodziowej (możliwości podpiętrzania wody w zbiornikach), ocena miąższości osadów dennych i ocena batymetryczna. Konieczna jest również ocena powierzchni zlewni zbiorników oraz wyodrębnienie czynników zmian środowiskowych oraz związanych z nimi presji wpływających na stan analizowanych wód.

### ***Propozycja 5 – Edukacja***

Ważnym elementem wpływającym na gospodarkę wodną jest postawa społeczeństwa, które jest ostatecznym użytkownikiem wód. Jest to szczególnie ważne w aspekcie zanieczyszczeń wprowadzanych do wód z gospodarstw domowych, nieodpowiedzialnego zagospodarowania przestrzeni czy też uszczelniania powierzchni terenu. W tym przypadku edukacja jest jednym z podstawowych elementów prowadzenia dialogu społecznego i akceptacji niezbędnych, często niepopularnych działań.

Ważne jest, aby uświadomić jak największej części społeczeństwa jakie wyzwania są związane z gospodarowaniem wodami przez pryzmat przyczyn i skutków różnych działań. Edukacja w tym zakresie ułatwi zrozumienie przyczyn ciągłych zmian środowiskowych i wywołanych nimi presji.

### **Podsumowanie**

Racjonalne gospodarowanie wodami w oparciu o nowoczesne metody techniki i zarządzania wymaga wykorzystania wiedzy i doświadczeń z różnych dziedzin nauki. Wyzwanie stanowi wypracowanie kompromisu obejmującego multidyscyplinarne podejście do różnych aspektów gospodarki wodnej. Złożoność problemów wynikająca z wieloczynnikowego charakteru zjawisk oraz strategiczny charakter gospodarki wodnej wymaga rozważnego, opartego na wiedzy podejścia do kształtowania szeroko rozumianego środowiska wodnego. Osiągnięcie mierzalnych efektów poprawy stanu wód wymaga czasu, szczególnie kiedy prowadzona jest renaturyzacja ekosystemów wodnych. Często preferowane są rozwiązania które mają prowadzić do szybkiego osiągnięcia celu. Szybkie efekty w przypadku racjonalnego gospodarowania wodami często mają charakter doraźny, uwzględniają tylko wybrane funkcje zbiorników, a ostatecznie w dłuższej perspektywie czasu mogą mieć negatywny wpływ na stan wód.

Wśród proponowanych i wdrażanych rozwiązań jest wykorzystanie kompetencji interdyscyplinarnych zespołów naukowo-badawczych i wdrożeniowych składających się ze specjalistów różnych dziedzin i dyscyplin nauki i gospodarki związanych z gospodarowaniem wodami. Zasadniczym celem funkcjonowania takich zespołów powinna być koordynacja działań związanych z gospodarką wodną i działania na rzecz zrównoważonego gospodarowania środowiskiem wodnym w oparciu o najlepsze praktyki i wiedzę.

W grudniu 2017 roku powstało Śląskie Centrum Wody Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, które zrzesza hydrologów, hydrogeologów, hydrobiologów, biologów, specjalistów modelowania środowiska i chemii środowiska oraz chemometryków, hydrotechników z Wydziałów Biologii i Ochrony Środowiska, Wydziału Nauk o Ziemi i Instytutu Chemii. Zespół zainicjowany na bazie projektu POIG ZiZOZap, podjął się już realizacji wielu projektów badawczych i wdrożeniowych związanych z gospodarką wodną, korzystając z doświadczeń jego członków (Gwiazda i in., 2014; Łozowski i in., 2014. Kliś i in., 2014, Woźnica i in., 2017).



## Literatura

- Baker J., Sheate W. R., Phillips P., Eales R., 2013. Ecosystem services in environmental assessment – Help or hindrance?, *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier Inc., 40(1): 3-13. DOI: 10.1016/j.eiar.2012.11.004.
- Borowska-Stefańska M., 2015. Zagospodarowanie terenów zagrożonych powodzią w wybranych miastach województwa łódzkiego. *Prace geograficzne*, 140: 57-77. DOI: 10.4467/20833113PG.15.004.3533.
- Brylski H., (brak daty wydania), *Rybnictwo i wędkarstwo*. Dostępne na: <http://przyroda.katowice.pl/pl/czowiek-i-przyroda/uytkowanie-przyrody/rybnictwo> [dostęp: 14 kwietnia 2018].
- Dulias R. 2005. Krzywe hipsograficzne obszaru osiadań górniczych (na przykładzie okolic Piekar Śląskich) [w:] Kotarba A., Krzemień K., Święchowicz J. *Współczesna ewolucja rzeźby Polski, VII Zjazd Geomorfologów Polskich*. IGiGP UJ, Kraków.
- Flisiak M.C.J., Tajduś A., 2001. Wpływ niepodszadzonych wyrobisk przyszybowych na deformacje powierzchni. Available at: [home.agh.edu.pl/~cala/papers/2001\\_01.doc](http://home.agh.edu.pl/~cala/papers/2001_01.doc) [Accessed: 4 February 2018].
- Gorol M. 2011. Post-exploitation deformations of a river profile. *Górnictwo i geologia*, 6(4).
- Gwiazda R., Woźnica A., Łozowski B., Kostecki M., Flis A. 2014. Impact of waterbirds on chemical and biological features of water and sediments of a large, shallow dam reservoir. *Oceanological and Hydrobiological Studies* Vol. 43(4): 418-426. DOI: 10.2478/s13545-014-0160-9.
- Historia Pszczyny (brak daty). Dostępne na: <http://www.pszczyna.info.pl/pl/historia-pszczyny/strona/2> [dostęp: 15 kwietnia 2018].
- Kliś C., Łozowski B., Ułańczyk R., Szot M., 2014. Model ELCOM/CAEDYM dla zbiornika goczalkowickiego. *Gospodarka Wodna* Vol. 8: 306-307.
- Lhotský R., 2010. The role of historical fishpond systems during recent flood events. *Journal of Water and Land Development*, 14(1): 49-65. DOI: 10.2478/v10025-011-0005-5.
- Łaszczycza P., Augustyniak M., Miguła P., Woźnica A., Pasierbiński A., 2013. System diagnozowania i prognozowania stanu środowiska zbiorników zaporowych działających w obszarach Natura 2000. *Gospodarowanie w dolinach rzecznych na obszarach Natura 2000*, Pawluśkiewicz B. (red.), Wydawnictwo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, 01: 147-160.
- Łaszczycza P., Augustyniak M., Pasierbiński A., Małkowski E., Kwaśniewski M., Woźnica A., Miguła P., 2014. Innowacyjne metody monitoringu jako przyszłość zintegrowanych analiz środowiskowych w racjonalnym gospodarowaniu zasobami wodnymi. *Gospodarka Wodna*, 8: 292-295.

- Łozowski B., Małkowski E., Woźnica A., Łaszczyca P., Gwiazda R., Koprowski R., Wróbel Z., Pszczeliński L., Siudy A., Pasierbiński A., Migula P., 2014, Badania ichtiofauny jako podstawa racjonalnej gospodarki rybackiej i zarządzania zbiornikiem zaporowym na przykładzie zbiornika goczalkowickiego. *Gospodarka Wodna* 8: 308-311
- Maciejewski M., Ostojki M.S. Tokarczyk T.(red.), 2011. Monografia powodzi 2010. Dorzecze Odry, PWN, Warszawa.
- Maciejewski M., Ostojki M.S. Walczykiewicz T. (red.), 2011. Monografia powodzi maj-czerwiec 2010. Dorzecze Wisły, PWN, Warszawa.
- Musiół L., 1936. Pszczyna monografia historyczna. Wyd. Magistrat miasta Pszczyna.
- Perski Z., 2000. Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do określania dynamiki i zasięgu górniczych deformacji terenu na przykładzie wybranych obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [w:] S. Ostaficzuk (red.), *Z prac Katedry Geologii Podstawowej WNoZ, Uniw. Śl., 8, Sosnowiec*: 9-39.
- Rzętała M., 2008. Funkcjonowanie zbiorników wodnych oraz przebieg procesów limnicznych w warunkach zróżnicowanej antropopresji. Edited by Jankowski Andrzej. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.
- Schlenger H., 1933. *Geschichtlicher Atlas von Schlesien. Friderizianische Siedlungen rechts der Oder bis 1800 auf Grund der Aufnahmen von Hammer und von Massenbach.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Woźnica A, Łozowski B., Ułańczyk R., Absalon D., Sitek S., Czekaj J., Siudy A., Migula P., Pszczeliński Ł., Jarosz W., Zarychta A., Małkowski E., Pasierbiński A., 2017. Wieloaspektowe podejście do zagadnień związanych z jakością wody w zbiornikach Górnośląskiego Pojezierza Antropogenicznego na przykładzie Jeziora Paprocańskiego w Tychach [w:] Sierka E., Nadgórska-Socha A. *Aktualne Problemy Ochrony Środowiska. Ocena Stanu, Zagrożenia Zasobów i Stosowane Technologie.*
- Woźnica A., Łozowski B., Ułańczyk R., Absalon D., Sitek S., Czekaj J., Siudy A., Migula P., Pszczeliński Ł., Jarosz W., Zarychta A., Małkowski E., Pasierbiński A., 2017. Program rekultywacji Jeziora Paprocańskiego i działań naprawczych w jego zlewni jako przykład kompleksowego podejścia do problemu jakości wody w małych akwenach [w:] R. Wiśniewski (red.) *Ochrona i rekultywacja jezior.* Wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział Toruń, Toruń: 169-180.

## **Abstract**

Water management in the Upper Silesia area faces two extreme challenges, which are excess and water scarcity, generated both by natural and anthropogenic factors resulting from the management of water resources and river basin areas in an unbalanced manner. The negative influence caused, among others 200 years of hard coal mining causing settlement of the area, resulting in locally flooding. The degradation of advanced environmental and water management systems, present in Silesia from the Middle Ages to increased industrialization at the beginning of the 20th century, is also not without significance. Conducting rational water management in the basin can significantly reduce the effects of these phenomena. Searching for solutions and mitigating the effects of such problems is one of the tasks faced by interdisciplinary research and development teams.

**Key words:** water management, water in the city, bead ponds

## PARADOKSY ŚWIATOWEJ GOSPODARKI WODNEJ

### PARADOXES OF THE WORLD WATER MANAGEMENT

ANDRZEJ J. WITKOWSKI

*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Nauk o Ziemi*

#### Streszczenie

W rozdziale zwrócono uwagę na problemy światowej gospodarki wodnej, w tym lokalne kryzysy wodne. Przedstawiono przykłady takich kryzysów, ich przyczyny i skutki. Wskazano też w jaki sposób można takim kryzysom zapobiegać. W tym kontekście zaprezentowano przykłady paradoksów w lokalnej i regionalnej gospodarce wodnej zwracając uwagę na niezwykle ważne aspekty dotyczące relacji dostępności zasobów i stopnia ich wykorzystania. Wskazano, że w skali globalnej przyczynami kryzysów wodnych mogą być warunki naturalne i niewielkie zasoby wodne, zmiany klimatyczne, zła organizacja gospodarki wodnej oraz nieracjonalne rolnictwo i produkcja biopaliw. W krajach rozwijających się do dodatkowych i często zasadniczych przyczyn zaliczono niekontrolowany wzrost populacji, urbanizację, niestabilność polityczną i niedostateczną edukację. Przedstawiono przykłady krajów o wysokim deficycie wodnym, w których jednak woda jest praktycznie dostępna dla wszystkich obywateli. W tym kontekście zaopatrzenie w wodę i gospodarkę wodną Izraela i Singapuru uznano za wzorcowe. Na przeciwnym biegunie znajduje się szereg państw (np. Somalia, Nigeria, Wenezuela, Nepal, Indonezja) o znacznie większych zasobach wodnych, ale cechujących się ograniczoną dostępnością ludności do dobrej jakości wody pitnej i lokalnymi kryzysami humanitarnymi wynikającymi głównie z niestabilnej sytuacji politycznej. Przedstawiono także istotne problemy racjonalizacji zużycia wody w rolnictwie będącym głównym konsumentem wody w skali globalnej (70% całkowitego jej zużycia). Zwrócono uwagę na powiązany z rolnictwem problem tzw. śladu wodnego i wirtualnej wody.

**Słowa kluczowe:** kryzysy wodne, przyczyny i skutki, zrównoważona gospodarka wodna, paradoksy

Niemal każdego dnia media informują nas o zbliżającym się światowym kryzysie wodnym, o lokalnych i międzynarodowych konfliktach dotyczących wody, wręcz o wojnach o wodę. W tym kontekście rodzi się szereg takich pytań jak:

- czy rzeczywiście czeka nas kryzys wodny, a może już jest?
- jaka jest lub może być jego przyczyna?
- jakie są lub czekają nas jego skutki?
- co robimy lub powinniśmy zrobić w przyszłości by takiemu kryzysowi zapobiec lub przynajmniej zminimalizować jego skutki?

Obecnie w wielu regionach świata notujemy przykłady istotnych problemów w gospodarce wodnej dotyczących przede wszystkim kwestii zaopatrzenia ludności w dobrej jakości wodę pitną oraz sprostanii zapotrzebowaniu na wodę rozwijającego się rolnictwa, hodowli i przemysłu. Konsekwencją rosnącego zapotrzebowania na wodę jest zubożenie wielkości zasobów i ich degradacja jakościowa, często prowadzące do lokalnych kryzysów wodnych oraz wręcz do katastrof ekologicznych.

Obecnie szereg wielkich miast na całym świecie (np. Meksyk, Los Angeles, Sao Paulo Dżakarta, Katmandu, wielkie miasta Indii, Tokio, Kair, Pekin, Kapsztad) cierpi na brak wody. Aktualnym przykładem może być 4. milionowy Kapsztad w RPA, będący pierwszym na świecie dużym miastem, w którym może praktycznie zabraknąć wody. W styczniu 2018 roku stwierdzono, że wody w Kapsztadzie wystarczy na 90 dni – i na dzień 22 kwietnia wyznaczono tzw. „dzień zero”, który następnie przesunięto na 11.05.2018, a później na – 09.07.2018 (Welch, 2018). Władze zapowiadały wprowadzenie limitu wody w ilości 25 l/d, tj. mniej niż zwykle używamy w czasie 4. minutowej kąpieli pod prysznicem. Paradoksalnie, w 2015 roku organizacja największych metropolii świata działających na rzecz ochrony klimatu (C40) wyróżniła Kapsztad za sprawne zarządzanie wodą oraz dbałość o środowisko i zrównoważony rozwój (Orłowski, 2018). Co było przyczyną, że w ciągu 3 lat sytuacja w mieście zmieniła się diametralnie? Otóż aktualna sytuacja wynikała zarówno z przyczyn obiektywnych (zmniejszenie opadów), ale przede wszystkim ze złej gospodarki wodą i zwiększonego jej poboru. W latach 1995-2018 liczba mieszkańców wzrosła z 2,4 mln do 4,3 mln, czyli o prawie 80%, a pojemność zbiorników wodnych w tym czasie – zwiększyła się jedynie o 15%. Kapsztad w ponad 98% zaopatrywany był w wodę z wód powierzchniowych. Zmniejszenie się zasobów wód powierzchniowych, przy jednoczesnym zaniedbaniu inwestycji w dodatkowe źródła zaopatrzenia w wodę (ujęcia wód podziemnych, odsalanie wód słonych) spowodowało zaistniałą krytyczną sytuację zmuszającą do podjęcia restrykcyjnego ograniczenia zużycia wody, jak i nowe inwestycje w gospodarkę wodną. Aktualnie buduje się 4 nowe instalacje do odsalania wody, nowe ujęcia wód podziemnych a także bardziej efektywne instalacje do ponownego wykorzystania ścieków. Jednak koszty takich inwestycji są znaczne. Wybudowanie w Kapsztadzie jednej instalacji do odsalania wody morskiej i produkcji wody pitnej o wydajności 450 mln litrów dziennie szacowane jest na 1,3 mld \$ (van Vuuren, 2015).



Przykład Kapsztadu powinien być ważnym ostrzeżeniem dla wielu krajów i miast zaniedbujących racjonalny i zrównoważony rozwój gospodarki wodnej w obliczu możliwego kryzysu wodnego.

W tym kontekście należałoby się zastanowić nad przyczynami lokalnych, o mniejszej lub większej skali, kryzysów wodnych i ich skutkami.

W skali globalnej jedną z przyczyn mogą być warunki naturalne i niewielkie zasoby wodne, zmiany klimatyczne, zła organizacja gospodarki, w tym gospodarki wodnej oraz nieracjonalne rolnictwo i produkcja biopaliw. Natomiast w krajach rozwijających się dodatkowymi i często zasadniczymi przyczynami są:

- niekontrolowany wzrost populacji,
- urbanizacja – przepływ ludności ze wsi do miast,
- niestabilność polityczna, w tym korupcja i marnotrawienie funduszy pomocowych,
- problemy religijne,
- słaba edukacja.

Skumulowanym efektem negatywnego oddziaływania wymienionych czynników jest często katastrofalne zanieczyszczenie oraz zubożenie zasobów wód powierzchniowych i podziemnych prowadzące do wspomnianych kryzysów wodnych. Wynika z tego, że niestety lokalne kryzysy wodne mają swe źródło nie tylko w ograniczonej ilości wody i jej deficycie, ale również, w wielu przypadkach głównie, w fatalnej gospodarce i zawirowaniach politycznych.

Doskonałym przykładem mogą być dane zawarte w tabeli 1, przedstawiające wybrane państwa o zróżnicowanym deficycie wody (według klasyfikacji M. Falkenmark, 1989). Według tej, być może kontrowersyjnej i niedoskonałej, klasyfikacji dostępność wody ponad 1700 m<sup>3</sup> / mieszkańca / rok jest zdefiniowana jako próg, powyżej którego niedobór wody występuje tylko nieregularnie lub lokalnie i generalnie może świadczyć o obfitości wody. Dostępność wody poniżej tego poziomu jest przyczyną powstawania niedoboru wody o różnym stopniu dolegliwości. Dostępność w zakresie 1700 – 1000 m<sup>3</sup> / mieszkańca / rok świadczy o niskich zasobach wody i może być przyczyną regularnie pojawiającego się tzw. stresu wodnego, negatywnie oddziałującego na gospodarkę danego kraju. Dostępność wody w granicach od poniżej 1000 do 500 m<sup>3</sup> / mieszkańca / rok świadczy o deficycie wody, który jest istotnym ograniczeniem rozwoju gospodarczego kraju, przy negatywnym wpływie na zdrowie i jakość życia ludzi. Dostępność wody poniżej 500 m<sup>3</sup>/mieszkańca/ świadczy o absolutnym deficycie wody będącym główną przeszkodą dla normalnego funkcjonowania gospodarki i może decydować o zagrożeniu dla życia mieszkających tam ludzi. Zgodnie z tą klasyfikacją szereg krajów mieści się w zakresie absolutnego deficytu wodnego (np. Kuwejt, Zjednoczone Emiraty Arabskie, Libia, Arabia Saudyjska, Singapur). Jednak woda w tych krajach jest dostępna dla wszystkich, a jej zużycie na potrzeby komunalne – zróżnicowane (od poniżej 100 do ponad 500 l/osobę/24h). W tej grupie krajów znajdują się Zjednoczone Emiraty Arabskie, które przy niskich zasobach odnawialnych wód mają najwyższe na świecie indywidualne zużycie wody na cele komunalne,

tj. ponad 500 l/osobę/24h (tab. 1). Na przeciwnym biegunie znajdują się takie państwa jak, Somalia czy Nigeria o znacznie większych zasobach wodnych, ale cechujących się ograniczoną dostępnością ludności do dobrej jakości wody pitnej i lokalnymi kryzysami humanitarnymi wynikającymi głównie z niestabilnej sytuacji politycznej (wojny wewnętrzne o podłożu politycznym i religijnym). Paradoksalne jest także to, iż znajdująca się w tej grupie państw Nigeria posiada jedne z największych na świecie złóż ropy naftowej i potencjalnie jest bogatym państwem mogącym zapewnić wszystkim mieszkańcom dostateczną ilość wody, podobnie jak bogate w ropę państwa Półwyspu Arabskiego. Analogicznym przykładem może być Wenezuela, która mimo olbrzymich zasobów ropy naftowej jest obecnie w absolutnym chaosie i kryzysie humanitarnym. Skutkiem błędnej polityki i nakładających się zmian klimatycznych (susza) jest obecny kryzys wodny w tym kraju, mimo ogólnie dużych, jednak nierównomiernie rozłożonych, zasobów wodnych.

W zestawieniu w tabeli 1 na szczególną uwagę zasługują dwa państwa, tj. Izrael i Singapur, w których zaopatrzenie w wodę i gospodarkę wodną należy uznać za wzorcowe. Kluczem do sukcesu tych krajów jest zrównoważona i nowoczesna gospodarka wodna. Kraje te, przy deficytowych zasobach odnawialnych wody potrafiły z powodzeniem rozwijać alternatywne źródła wody zarówno na potrzeby gospodarki komunalnej, jak i rolnictwa. W przypadku Izraela, borykającego się dawniej z problemami w zaopatrzeniu w wodę, w wyniku wprowadzania nowoczesnych technologii, racjonalnej gospodarki wodnej w miastach i w rolnictwie, problem ten aktualnie nie istnieje. Kraj ten można uznać za światowego lidera nowoczesnej gospodarki wodnej wskazującego drogę do rozwiązywania i unikania kryzysów wodnych związanych z brakiem wody. W Izraelu obecnie dominującą rolę w zaopatrzeniu w wodę pitną odgrywa woda z odsalania wód słonych (85%), a jedynie 15% to naturalne wody podziemne i powierzchniowe. Natomiast w Singapurze aktualna struktura źródeł zaopatrzenia w wodę jest jeszcze bardziej interesująca, bowiem 40% wody – to tzw. „NEWater” – pochodząca z nowoczesnego, wielostopniowego oczyszczania ścieków (przewiduje się, że w 2030 roku będzie to aż 50%), 25% to wody z odsalania (przewiduje się, że w 2030 roku będzie to 50%), a 25% stanowią wody powierzchniowe (z opadów). Pozostałe 10% wody pochodzi z importu z sąsiedniej Malezji (PUB Singapore Water Story, 2018).

**Tabela 1.** Zestawienie państw o największym deficycie wody i zróżnicowanych jej zasobach według klasyfikacji M. Falkenmark (wg Z. Hrkal, 2017) (z uzupełnieniami autora)  
**Table 1.** List of countries with the largest water scarcity and diversified resources according to the M. Falkenmark classification (acc. to Z. Hrkal, 2017) (with author's additions)

Państwo	Wielkość rocznych zasobów odnawialnych (m <sup>3</sup> /osobę/rok)	Wielkość zasobów wg klasyfikacji Falkenmark	Zaopatrzenie w wodę	Komunalne zużycie wody (l/osobę/d)
Kuwejt	30	absolutny deficyt <500m <sup>3</sup> /osobę	woda dostępna dla całej populacji	197
Zjednoczone Emiraty Arabskie	174			544
Libia	275			113
Arabia Saudyjska	325			226
Jordania	381			90
Singapur	471			151
Izrael	969			deficyt
Maroko	1100	niskie	76	
Polska	1839*	obfitość > 1700m <sup>3</sup> /osobę	kryzys humanitarny	96**
Wielka Brytania	3337			149
Somalia	3206 obecnie ok. 1000			11
Nigeria	5952			36
Wenezuela	41 886			230 (obecnie lokalne racjonowanie)

\* wg Gutry-Korycka i inni, 2014

\*\* wg GUS w 2015 r.

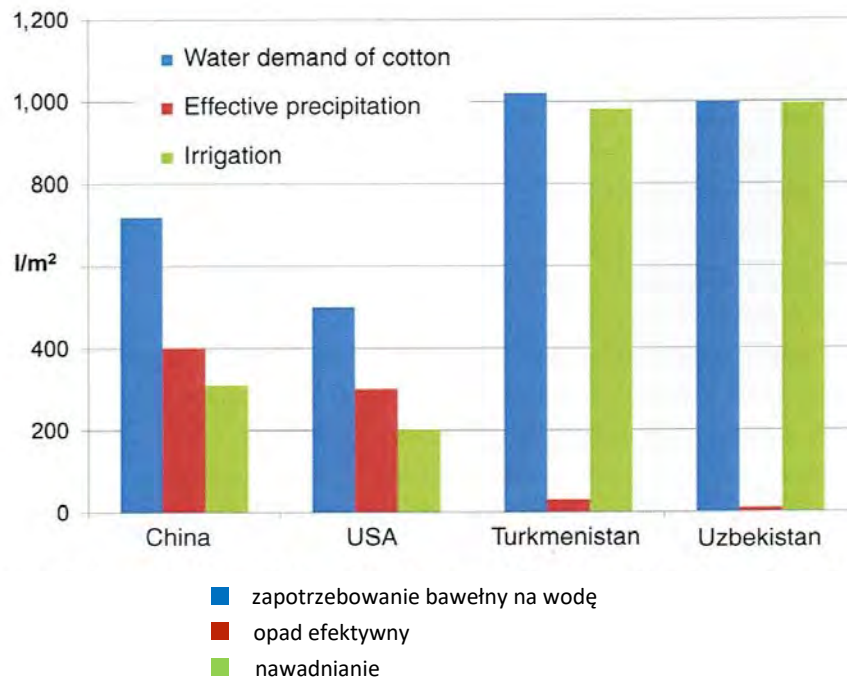
Podobnie bogate państwa Półwyspu Arabskiego (Arabia Saudyjska, Kuwejt, Zjednoczone Emiraty Arabskie, Oman), mimo absolutnego deficytu wody słodkiej pochodzącej ze źródeł odnawialnych, praktycznie nie mają większych problemów z odpowiednim komunalnym zaopatrzeniem w wodę. Realizacja właściwej i racjonalnej gospodarki wodnej wynika nie tylko z statusu gospodarczego kraju i jego zasobów naturalnych (np. ropy naftowej), ale ze stabilnej sytuacji politycznej. Dobitym tego przykładem jest, sąsiadujący z Arabią Saudyjską i Omanem, Jemen o niestabilnej sytuacji politycznej (wojna domowa, konflikty na tle religijnym i terroryzm), w którym obecnie mamy do czynienia z kryzysem humanitarnym, a 80% populacji ma bardzo ograniczony dostęp do dobrej jakości wody pitnej. Problem ten dotyczy nie tylko krajów Bliskiego Wschodu, ale wielu innych krajów w Afryce (np. wspomniana Nigeria), Azji (np. poradzieckie państwa Azji Centralnej, Nepal, Indonezja) czy Ameryce Południowej (np. wspomniana Wenezuela).

W kontekście deficytu wody należałoby się zastanowić – z czym związane jest największe zużycie wody w skali globalnej. Odpowiedź jest jednak w miarę prosta. Otóż okazuje się, że jest to rolnictwo, które odpowiada za 70% całkowitego zużycia wody (FAO, 2015).

Z rolnictwem ściśle wiąże się problem tzw. śladu wodnego (Hoekstra, Hung, 2002) i wirtualnej wody (Allan, 1997). Ślad wodny, pojęcie wprowadzone przez prof. Arjena Hoekstrę w 2002 roku, jest skumulowaną miarą ilości wody zużytej do produkcji każdego z używanych przez nas towarów lub wykonywanych usług. Można go zmierzyć dla pojedynczego procesu, takiego jak uprawa ryżu, bawełny, czy produkcja ubrań, butów, samochodów itp. Ślad wodny może też informować o ilości wody zużywanej do danej produkcji w skali danej dziedziny gospodarki, kraju lub globalnie (Hoekstra, Chapagain, 2008). W zależności od potrzeb, ślad wodny może być mierzony w metrach sześciennych na tonę produkcji, na hektar użytków rolnych, w innych jednostkach funkcjonalnych. Ślad wodny ma trzy komponenty: zielony, niebieski i szary. Zielony ślad wodny – to zużyta woda pochodząca z opadów atmosferycznych. Ślad wodny niebieski – zużywana woda pozyskana z zasobów wód powierzchniowych lub podziemnych (np. nawadnianie w rolnictwie). Szary ślad wodny związany jest z zanieczyszczeniem wód powstającym w procesie powstawania produktu, a jego miarą jest ilość słodkiej wody potrzebnej do rozcieńczenia powstałych zanieczyszczeń do poziomu spełniającego określone normy jakościowe (np. normy dla wód pitnych). Ślad wodny pomaga nam lepiej zrozumieć, w jakich konkretnych celach ograniczone globalne zasoby wody słodkiej są zużywane i w konsekwencji zanieczyszczane.

Ze śladem wodnym związane jest ściśle pojęcie wirtualnej wody (często używane zamiennie). Ślad wodny de facto jest to wirtualna woda zawarta w każdym z rozpatrywanych produktów lub usług. Stąd pojęcie wirtualnej wody, które nawiązuje do tzw. wirtualnego handlu wodą. Koncepcję wirtualnej wody, a właściwie jej wirtualnego handlu, zaprezentował w 1997 roku prof. John A. Allan'a. Koncepcja ta opierała się na idei eksportu i importu wirtualnej wody zawartej w każdym z produktów o zróżnicowanym śladzie wodnym. Importując żywność, której wyprodukowanie wymaga dużej ilości wody kraje o niskich zasobach wodnych mogą oszczędzać własne zasoby wodne (Hoekstra, Hung, 2002). Aktualnie szacunki FAO (2012) wskazują, że na wyprodukowanie dziennej racji żywnościowej potrzeba od ok. 1000 litrów (przy diecie bezmięsnej) do ok. 3500 litrów wirtualnej wody (przy diecie mięsnej). Na początku XXI wieku każda osoba w Ameryce Północnej i Unii Europejskiej konsumowała dziennie co najmniej 3 m<sup>3</sup> tzw. wirtualnej wody w importowanej żywności, w porównaniu z 1,4 m<sup>3</sup> w Azji i 1,1 m<sup>3</sup> w Afryce (Zimmer, Renault, 2003). Zgodnie z przewidywaniami FAO (2009) dla zapewnienia światowego bezpieczeństwa żywnościowego w 2050 roku produkcja żywności musi wzrosnąć o 60%, co oczywiście zwiększy zapotrzebowanie na wodę. Dodatkowym elementem wpływającym na zwiększenie zapotrzebowania na wodę dla nawadniania upraw będzie też ocieplenie klimatu, mogące doprowadzić do zwiększenia parowania szacowanego na ok. 17% (Chartles, Sood, 2013). Jeżeli

założymy, że ludność świata wzrośnie do 2050 roku o ok. 2 mld i na wyprodukowanie dziennej racji żywnościowej potrzebne będzie jedynie ok. 1000 litrów wody to zapotrzebowanie na wodę wzrośnie o ok. 730 km<sup>3</sup>, co jest równoważne ok. 70-letniemu rocznemu zużyciu wody przez Polskę. Przy wysokobiałkowej diecie mięsnej byłby to wzrost aż o ok. 2200-2500 km<sup>3</sup>. Czy możliwy jest tak duży wzrost zużycia wody? Wydaje się to wątpliwe bez racjonalizacji i optymalizacji światowej gospodarki wodnej. Bardzo duże rezerwy tkwią w samym rolnictwie. Nieuwzględnianie problematyki śladu wodnego w rolnictwie i prowadzenie nieracjonalnej gospodarki wodnej może prowadzić do niekorzystnych zmian środowiskowych lub wręcz do katastrof ekologicznych. Dobitym tego przykładem jest absurdalna uprawa bawełny w byłych republikach radzieckich położonych w Azji Centralnej, w zlewni Jeziora (a właściwie Morza) Aralskiego. Przy dużym zapotrzebowaniu bawełny na wodę i niskich opadach, dostawy wody były rekompensowane przez sztuczne nawadnianie z rzek dopływających do Jeziora Aralskiego (ryc. 1), co spowodowało dramatyczne skutki dla samego jeziora i jego okolicy.



**Ryc. 1.** Porównanie naturalnych warunków dla uprawy bawełny dla największych producentów

*Fig. 1. Comparison of natural conditions for cotton cultivation for the largest producers*

**Źródło/Source:** Hrkal, 2017

Kolejnym przykładem może być uprawa, wymagającego dużo wody, ryżu w państwach o nieodpowiednich warunkach i małych zasobach wodnych. W tabeli 2 przedstawiono dwa skrajne przykłady upraw ryżu w Wietnamie (o niskim śladzie wodnym – 638 m<sup>3</sup>/t) i Pakistanie (o ponad czterokrotnie większym śladzie wodnym – 2874 m<sup>3</sup>/t). Pakistan importując ryż z Wietnamu z każdą toną importowałałby dodatkowo 638 m<sup>3</sup> wody, jednocześnie oszczędzając 2874 m<sup>3</sup> wody z własnych

zasobów wodnych. Racjonalna gospodarka rolna i ograniczanie w krajach o deficycie wody upraw o dużym zapotrzebowaniu na wodę może ograniczyć niepotrzebny eksport wirtualnej wody do krajów o dużych zasobach wodnych, i odwrotnie.

**Tabela 2.** Wielkość zużycia wody (ślad wodny i zasilanie) w produkcji ryżu (w m<sup>3</sup>/t) (2000-2004)

*Table 2.* The amount of water consumption (water footprint and recharge) in rice production (in m<sup>3</sup> / t) (2000-2004)

Państwo	„Ślad wodny” (Water footprint)				Źródło wody (Percolation)		
	Zielony	Niebieski	Szary	Łącznie	Opady	Nawadnianie	Łącznie
Wietnam	308	203	127	638	420	277	697
Pakistan	421	2364	88	2874	248	1394	1642

*Źródło/Source:* Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., 2011

Istotnym elementem racjonalizacji zużycia wody w rolnictwie powinno być także minimalizowanie strat wody w związku z nieefektywnym nawadnianiem, zaprzestanie forsowania upraw i intensywnego tradycyjnego nawadniania w obszarach półsuchych i suchych (IWMI, 2007) oraz szersze stosowanie ścieków do nawadniania, po ich odpowiednim oczyszczeniu. W kwestii śladu wodnego powinno się dążyć do wprowadzania w życie idei produktów o pozytywnym bilansie wodnym tj. produktów, przy których produkcji ilość zużytej wody i wytworzonych ścieków (ślad wodny) jest zbilansowana przez minimalizowanie bezpośredniego zużycia wody, recykling ścieków oraz inwestycje proekologiczne producenta dla zrównoważenia pobieranej ilości wody ze środowiska. Przykładem takiego produktu jest piwo Costa Rica’ Imperial Silver, reklamowane przez producenta jako pierwsze na świecie piwo z pozytywnym bilansem wodnym (<http://imperialbeer.com/>).

Z rolnictwem, problemami z wyżywieniem i wodą ściśle wiąże się kontrowersyjna produkcja biopaliw. Produkcja ta może wywierać negatywny wpływ na środowisko (niszczenie lasów deszczowych, zwiększona emisja gazów cieplarnianych, zwiększone zużycie wody, ograniczenie produkcji żywności i wzrost jej cen). Według niektórych szacunków produkcja i spalanie biopaliwa cechuje się ujemnym bilansem energetycznym i ekologicznym i w niektórych przypadkach gorszym w stosunku do produkcji i spalaniu paliw kopalnych. Badania przeprowadzone na podstawie danych z lat 1989-2007 przez W.K. Kellogg Long Term Ecological Research (Food or Fuel? Biofuels Inefficient, Study Suggests. Energy Policy Information Center, 2010) sugerują, że uprawa roślin pod biopaliwa jest o 36% mniej efektywna energetycznie niż w celu produkcji żywności. Europejskie firmy poszukują 3,9 mln hektarów gruntów w Afryce pod uprawę roślin na biopaliwa w celu realizacji unijnych zobowiązań, aby biopaliwa do 2020 roku stanowiły 10% zużywanych

paliw (Cotula et al., 2009). Wprowadzenie w życie planowanej produkcji biopaliw na świecie wymaga dodatkowych 30 mln hektarów gruntów i 180 km<sup>3</sup> wody. Aktualnie przeciętnie na wyprodukowanie 1 litra biopaliwa potrzebne jest ok. 2500 l wody, tj. tyle ile potrzeba na wyprodukowanie dziennej racji żywnościowej dla 1 osoby (UNESCO, 2009).

Kolejnym ważnym czynnikiem prowadzącym do zwiększenia dostępności wody jest unowocześnianie sieci dystrybucji wody i eliminacja niekontrolowanych wycieków (ryc. 2). Straty na sieciach wodociągowej są często olbrzymie, szczególnie w wielkich aglomeracjach. Straty wody z miejskich systemów wodociągowych sięgają często 50%, w większości krajów europejskich – około 20-40 %, natomiast w Kairze – około 60% (Hazony, 2015). Niezwykle pozytywnymi wyjątkami są takie miasta jak Singapur, w którym straty w sieci wodociągowej wynoszą obecnie jedynie 5% (PUB Singapore Water Story, 2018) czy Jerozolima, o 6% stratach (w niektórych dzielnicach straty wynoszą jedynie 3%) (Hazony, 2015) i Hong Kong, o 7% stratach. Szacuje się (UNESCO, 2012), że ok. 250 do 500 milionów m<sup>3</sup> wody pitnej rocznie jest tracone w wielu mega miastach. Uniknięcie tych strat stanowiłoby dodatkową wodę pitną dla 10 do 20 milionów ludzi. Ocenia się, że wycieki w sieci miasta Meksyk dochodzą do 85 mln litrów dziennie. Duże straty w systemach zaopatrzenia w wodę dotyczą nie tylko krajów rozwijających się, ale i krajów wysoko rozwiniętych. Przykładem może tu być akwedukt Delaware dla zaopatrzenia w wodę Nowego Jorku, w którym straty sięgają ok. 135 mln litrów dziennie, czyli znika woda dla ok. 0,5 mln mieszkańców (Hazony, 2015).



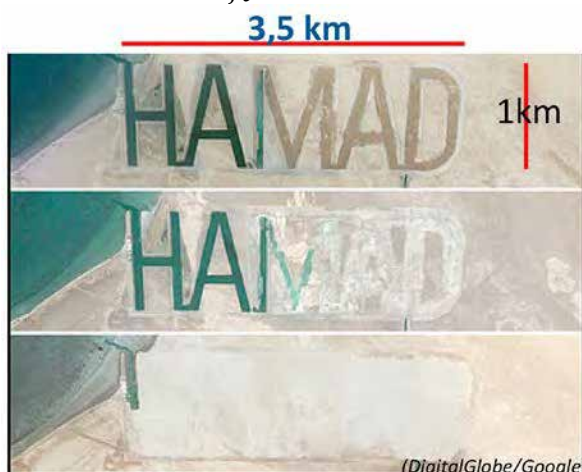
**Ryc. 2.** Przykład wycieków z sieci wodociągowej.

*Fig. 2. Example of leaks from the water supply network. Źródło/Source: Shutterstock.com.*

Niestety, wprowadzanie nowoczesnej gospodarki wodnej, alternatywnych źródeł wody pitnej i racjonalnego gospodarowania istniejącymi zasobami wody słodkiej, wymaga często dużych nakładów inwestycyjnych. Z przytoczonych przykładów wynika, że znacznie mniej problemów z wodą mają państwa bogate. Niekiedy posiadanie dużych funduszy nie idzie w parze z racjonalną gospodarką wodną.



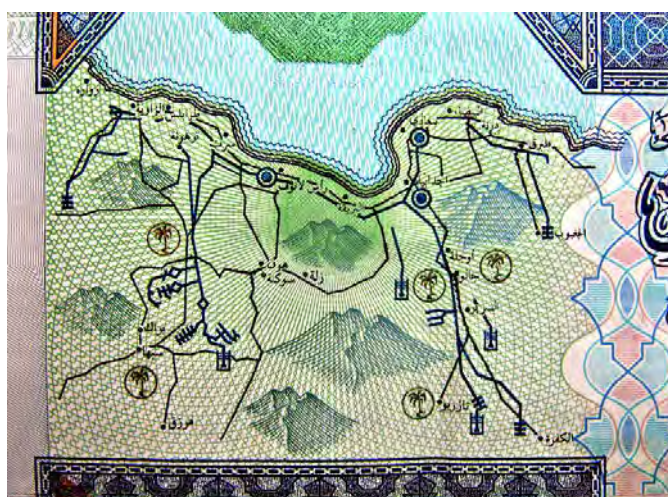
Przykładem absurdalnego wydawania pieniędzy na wręcz paranoiczne pseudo inwestycje powiązane z gospodarką wodną jest wykonanie na pustynnej wyspie Futaisi imienia szejka Abu Dabi „HAMAD”. Ten widoczny z kosmosu napis tworzyły litery o długości ok. 1km będące kanałami wypełnionymi wodą. Budowę tego kuriozalnego napisu rozpoczęto w 2005 roku, a po 5 latach wszystkie kanały zostały wykonane i częściowo napełnione wodą. Koszt budowy szacowany na ponad 22 mln \$. Po ukazaniu się w 2011 r. w „The Sun” artykułu o tym napisie rozpoczęto również kosztowne jego usuwanie (Fitch, 2013) (ryc. 3). Za pieniądze wydane można było wybudować bardziej przyteczne obiekty związane z gospodarką wodną jak ujęcia, oczyszczalnie ścieków lub stację odsalania wód.



**Ryc. 3.** Zdjęcia satelitarne wyspy Futaisi w styczniu 2010 (u góry), kwiecień 2012 (w środku) i czerwiec 2012 (u dołu)

**Fig. 3.** Satellite images of the Futaisi island in January 2010 (top), April 2012 (in the middle) and June 2012 (bottom)

**Źródło/Source:** DigitalGlobe/Google, Fitch, 2013



**Ryc. 4.** Plan systemu rurociągów na banknocie 20 dinarów libijskich

**Fig. 4.** Pipeline plan on the 20 Libyan dinars banknote

**Źródło/Source:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Wielka\\_Sztuczna\\_Rzeka#/media/File:Great\\_Manmade\\_River.\\_Libya.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Wielka_Sztuczna_Rzeka#/media/File:Great_Manmade_River._Libya.jpg)



Innym nieco mniej kontrowersyjnym przykładem olbrzymiej inwestycji w gospodarce wodnej jest tzw. „wielka sztuczna rzeka” w Libii. Jest to gigantyczny projekt inżynierski obejmujący największą na świecie podziemną sieć rurociągów (2820 km) oraz 1300 studni (o głębokości od 80 do 500 metrów). System ten jest w stanie dostarczać do Trypolisu, Bengazi i innych miast Libii do 6,5 mln m<sup>3</sup> wody pitnej dziennie. Budowę systemu rozpoczęto w połowie lat 80-tych XX wieku, a pierwsze dostawy wody rozpoczęto w 1989 r. Koszty tego niedokończonego projektu, nazywanego przez byłego przywódcę Libii Mu’ammar al-Kaddafi’ego „ósmym cudem świata” szacowano na ponad 25 mld \$. Problem w tym, że system ten eksploatuje nieodnawialne (reliktowe) zasoby wód podziemnych występującymi pod piaskami Sahary i będące częścią największego na świecie transgranicznego systemu wodonośnego, tzw. „Nubian Sandstone Aquifer System”, o powierzchni ok. 2,2 mln km<sup>2</sup>. Położony w granicach 4 państw: Egiptu, Libii, Czadu i Sudanu jest intensywnie eksploatowany. W konsekwencji może doprowadzić do przeeksploatowania zbiornika oraz wzrostu zasolenia wód. Według władz libijskich wody ujmowane tym systemem powinno wystarczyć na ok. 1000 lat, jednak według szacunku niezależnych ekspertów, przy tak dużym poborze, zasoby te mogą wyczerpać się po 50 – 100 latach.

Kwestia oszczędzania wody dotyczy także każdego z nas. Szacuje się, że dla codziennego użytku dla ludzi wystarczy 20 m<sup>3</sup>/rok. Jednak często zużywamy niepotrzebnie dużo cennej wody pitnej. Nieracjonalnie używana jest do podlewania trawy i ogrodu, a także w wielu codziennych czynnościach. Jeżeli w gospodarstwie domowym mamy do dyspozycji jedynie dobrej jakości wodę pitną i niestety musimy nią podlewać trawę i ogród wówczas wystarczy czynność tę wykonać przed 10-tą rano i po 19-tej oszczędzając ok. 230 l cennego surowca dziennie. Bez zmniejszenia komfortu życia możemy oszczędzać wodę w naszym codziennym funkcjonowaniu. Wystarczy nie myć zębów przy otwartym kranie (oszczędność ok. 600 l miesięcznie) i naprawić przeciekającą sfluczkę (oszczędność do 350 l dziennie) (<http://imperialbeer.com/>). Być może brzmi to paradoksalnie, ale Hugo Chaves (były prezydent borykającej się z problemami z wodą Wenezueli) nawoływał do oszczędzania wody i nie śpiewania podczas kąpieli pod prysznicem, która nie powinna trwać dłużej niż 3 minuty.

W tym kontekście ważny jest też problem ceny wody. Bowiem niestety, gdy woda jest praktycznie za darmo lub bardzo tania, to nie ma motywacji do jej oszczędzania. Często przytaczany jest tzw. (diament – woda). Filozofowie już w czasach Sokratesa i Platona rozważali "paradoks wartości" ([https://en.wikipedia.org/wiki/Paradox\\_of\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Paradox_of_value)). W swojej dokumentacji dialogu Sokratejskiego Platon pisze: "Tylko to, co rzadkie, jest cenne; i "woda", która, jak mówi Pindar, jest "najlepsza ze wszystkich rzeczy, jest również najtańsza ". Innymi słowy, chociaż woda jest cudowna i niezbędna – jest obfita, dlatego ma niską wartość ekonomiczną (Arad Ltd, 2017).

Doskonałym, jednak raczej smutnym przykładem braku motywacji do oszczędzania wody i energii, z uwagi na jej bardzo niską cenę, są Indie. Paradoksalnie

jedną z przyczyn kryzysu wodnego w Indiach jest tzw. "zielona rewolucja" i związane z nią intensywne nawadnianie pól, nawet w obszarach suchych, praktycznie nie nadających się do upraw potrzebujących dużej ilości wody (np. ryżu). Darmowa woda, dotowana elektryczność i odwiercenie milionów studni umożliwia prawie bezkosztowe pompowanie olbrzymich ilości wód podziemnych, prowadzące do przeeksploataowania zbiorników wód podziemnych i drastycznego obniżenia poziomu wód podziemnych oraz ich zanieczyszczenie, między innymi arsenem, fluorem, uranem (ryc. 5). Problem zanieczyszczenia wód arsenem dotyczy nie tylko Indii, ale również krajów sąsiednich (Pakistan, Bangladesz) oraz innych krajów Azji, Ameryki a także Europy (Mukherjee i inni, 2006; WHO, 2007).



**Ryc. 5.** Studnia w Indiach – wieś Natwargadh, Gujarat. Zwierciadło wody podziemnej obniża się rocznie o 3 m i wzrasta zasolenie

*Fig. 5. Well in India - the village of Natwargadh, Gujarat. The groundwater table is lowered by 3 m per year and salinity increases*

*Źródło/Source: Elements, 2011, original photo by Amid Dave, Reuters)*

W podsumowaniu należy stwierdzić, że w celu zażegnania aktualnych i czekających nas w przyszłości kryzysów wodnych konieczna jest, przede wszystkim, odpowiednia polityka państwa i edukacja promująca oraz wspierająca takie działania, jak:

- racjonalne korzystanie z dostępnych zasobów wody powierzchniowej i podziemnej,
- odsalanie wód morskich i słonawych,
- ponowne wykorzystywanie oczyszczonych ścieków do celów rolniczych, a nawet jako wody pitne,
- właściwe zagospodarowanie wód opadowych, zapobieganie powodziom między innymi przez zwiększenie sztucznego zasilania zbiorników wód podziemnych,

- racjonalna gospodarka rolna (uprawianie roślin odpowiednich do warunków wodnych, nawadnianie upraw metodą kropelkową),
- ograniczenie marnotrawstwa żywności i preferowanie w żyzywieniu produktów o mniejszym zużyciu wody przy ich produkcji (ograniczenie spożycia mięsa, głównie wołowego),
- wczesne znajdowanie i naprawianie wycieków (minimalizacja strat),
- odpowiednia cena wody w celu zniechęcenia do marnotrawstwa (paradoks: diament – woda).

## **Literatura**

- Allan J.A., 1997. Virtual water: A Long Term Solution for Water Short Middle Eastern Economies. British Association Festival of Science. University of Leeds. 9 September 1997.
- Arad Ltd. August 16, 2017. Water Value: Changing Our Perception (<http://arad.co.il/blog/water-value-changing-perception/>).
- Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics* 70: 749-758.
- Chartles C., Sood A., 2013. The water for food paradox . *Aquatic Procedia* 1: 3-19.
- Cotula, L., Vermeulen, S., Leonard, R., & Keeley, J., 2009. Land grab or development opportunity? Agricultural investment and international land deals in Africa , Rome/London, Food and Agriculture Organization of the UN (FAO) / International Fund for Agricultural Development (IFAD) / International Institute for Environment and Development (IIED), <http://pubs.iied.org/12561IIED.html>
- Falkenmark M., Lundquist J., Widstrand C., 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum* 13, 43: 258-267.
- FAO, 2009. How to feed the world in 2050. Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO, 2012. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/218940/>
- FAO & WWC, 2015. Towards a Water and Food Secure Future: Critical Perspectives for Policy-Makers, Rome.
- Fitch A. 2013. Abu Dhabi Sheikh Has Name Erased From Private Island, *The wall Street Journal – Middle East*, April 30, 2013.
- Global Water Sustainability, 2011. *Elements*, Vol. 7, No 3, June 2011 – An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry and Petrology
- GUS, 2015. Rocznik statystyczny.
- Gutry-Korycka M., Sadurski A., Kundzewicz Z.W., Pociask-Karteczka J., Skrzypczyk L., 2014. Zasoby wodne a ich wykorzystanie, *NAUKA* 1/2014, 77-98

- Hazon D., 2015. How Israel Is Solving the Global Water Crisis. *The Tower Magazine*, Issue 31, October 2015.
- Hoekstra A.Y., Hung P.Q., 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series*.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain A. K., 2008. *Globalization of water: Sharing the planets freshwater resources*. Oxford, UK: Blackwell.
- Hrkal Z., 2017. *About People and Water*, Czech Geological Survey, Prague.
- IWMI, 2007. International Water Management Institute. *Water for Food, Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earth scan, London, U.K.
- Mukherjee A., Sengupta M. K., Hossain M.A., 2006. Arsenic contamination in groundwater: A global perspective with emphasis on the Asian scenario (PDF). *Journal of Health Population and Nutrition*. 24 (2): 142-163
- Orłowski M., 2018. Kapsztad szykuje się na Dzień Zero. Cztery miliony mieszkańców nie będzie miało wody, *New York Times*, 31 stycznia (<http://wyborcza.pl/7,75399,22964119,kapsztad-szykuje-sie-na-dzien-zero-cztery-miliony-mieszkancow.html>).
- PUB Singapore's Water National Water Agency, 2018. *Singapore Water Story*.
- Van Vuuren A.J., 2015. *Cape Town Desalination Plant to Cost \$1.3 Billion: Study*.
- Welch C., 2018. *Why Cape Town Is Running Out of Water, and Who's Next*. *National Geographic*, 5th of March.  
<https://news.nationalgeographic.com/2018/02/cape-town-running-out-of-water-drought-taps-shutoff-other-cities/>
- World Health Organization, *Arsenic in Drinking Water*, accessed 5 February 2007.
- World Water Assessment Programme. 2009. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO, and London
- Zimmer D. and Renault D., 2003. *Virtual Water in Food Production and Global Trade: Review of Methodological Issues and Preliminary Results*. *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water-Research Rapport Series*, No. 12: 93-109.
- Food or Fuel? Biofuels Inefficient, Study Suggests. *Energy Policy Information Center*, 2010.  
<http://imperialbeer.com/>
- <https://www.theatlantic.com/international/archive/2011/07/billionaire-sheikh-who-carved-his-name-island/353098/>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Paradox\\_of\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Paradox_of_value)
- [https://pl.wikipedia.org/wiki/Wielka\\_Sztuczna\\_Rzeka#/media/File:Great\\_Manmade\\_River\\_Libya.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Wielka_Sztuczna_Rzeka#/media/File:Great_Manmade_River_Libya.jpg)

## **Abstract**

The article draws attention to the problems of global water management, including local water crises. Examples of such crises, their causes and effects are presented. It also indicates how to prevent such crises. In this context, examples of paradoxes in local and regional water management are presented, paying attention to extremely important aspects regarding the relation of water resources, their availability and the degree of use. It was pointed out that on global scale the causes of water crises may be natural conditions and small water resources, climate change, bad water management as well as irrational agriculture and biofuels production. In developing countries, population growth, urbanization, political instability and poor education are among the additional and often fundamental causes. Examples of countries with high water deficits (eg. Kuwait, United Arab Emirates, Libya, Saudi Arabia, Singapore, Israel) have been presented, in which, however, water is practically available to all citizens. In this context, the water supply and water management of Israel and Singapore were considered to be an excellent. At the opposite side, paradoxically, there are a number of countries (eg. Somalia, Nigeria, Venezuela, Nepal) with much larger water resources, but characterized by limited access to good drinking water and local humanitarian crises resulting mainly from unstable political situation. Significant problems of rationalization of water consumption in agriculture being the main consumer of water on a global scale (70% of its total consumption) were also presented. Attention was paid to the problem of the so-called water footprint and virtual water.

**Key words:** water crises, reasons and effects, sustainable water management, paradoxes



## BŁĘKITNO-ZIELONA INFRASTRUKTURA (B-ZI): MAŁO ZNANY I NIEDOCENIANY KAPITAŁ NASZYCH MIAST

### *BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE (B-GI): POORLY KNOWN AND UNDERESTIMATED CAPITAL OF OUR CITIES*

LESZEK TRZĄSKI

*Śląski Ogród Botaniczny w Mikołowie*

#### Streszczenie

Zaproponowano systemowe podejście do gospodarowania błękitno-zieloną infrastrukturą oraz jej potencjalnymi zasobami na obszarze miast GZM, na przykładzie dolin potoków i niewielkich rzek. Przedstawiono uogólnioną diagnozę stanu cieków i ich dolin sformułowano i postulat przekształcenia przynajmniej niektórych z nich w błękitno-zielone, wielofunkcyjne przestrzenie publiczne. Uzasadniono potrzebę zmiany paradygmatu gospodarki wodami deszczowymi, który powinien być nakierowany na zagospodarowanie nadmiaru wód na miejscu oraz na zlewniową retencję i infiltrację wód do gruntu. Wskazano, że jest to kluczowy warunek dla kształtowania bezpiecznych i atrakcyjnych przestrzeni publicznych w dolinach. Sformułowano postulat ponadsektorowej integracji działań w zakresie gospodarki przestrzennej, kształtowania przestrzeni publicznych, gospodarki wodami deszczowymi, gospodarki ściekami komunalnymi, bezpieczeństwa od podtopień, kształtowania zieleni i adaptacji do zmiany klimatu. Sformułowano argumenty dla wpisania B-ZI w politykę przestrzenną GZM.

**Słowa kluczowe:** błękitno-zielona infrastruktura, miejska dolina rzeczna, gospodarka wodami deszczowymi, przestrzenie publiczne

#### Wprowadzenie

Idea błękitno-zielonej infrastruktury (B-ZI) miast odwołuje się do myślenia w kategoriach ładu przestrzennego i do postrzegania miasta jako swoistego ekosystemu. W takim myśleniu mieści się integracja obszarów zielonych z siecią hydrograficzną z jej kontekstami: społecznym, gospodarczym, przyrodniczym i planistycznym. W praktyce coraz liczniejszych europejskich, w tym również



niektórych polskich miast wyraża się to zwrotem ku rzekom który polega na takim gospodarowaniu dolinami rzecznyymi i nabrzeżami, by funkcjonowały one jako przyjazne mieszkańcom, możliwie wolne od zabudowy przestrzenie publiczne. W taki sposób łączy się korzyści dla rozwoju lokalnego z pozytywnym wpływem na system przyrodniczy miasta, zwłaszcza jeśli dolina rzeczna funkcjonuje w systemie miejskich przestrzeni otwartych. Takie gospodarowanie dolinami rzecznyymi służy również ograniczaniu skutków powodzi miejskich i lokalnych podtopień.

Miejska B-ZI jest bardzo silnie strukturalnie i funkcjonalnie powiązana z gospodarką wodami deszczowymi i służącą jej infrastrukturą techniczną. Im mniejszy jest ciek i im bardziej intensywna jest zabudowa, tym bardziej drastyczne było przekształcanie miejskich rzek, aby służyły one sprawnemu odprowadzaniu nadmiaru wód deszczowych. Czynnikiem, który o tym zdecydował jest przyrost uszczelnienia (zasklepienia) powierzchni terenu lokalnej zlewni. Specyfika miast obszaru Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM), wynikająca z położenia w rejonie głównego działu wodnego Polski polega między innymi na tym, że występuje tu bardzo wiele lokalnych, drobnych, bardzo silnie przekształconych cieków. Niektóre z nich, wraz z dolinami, są predestynowane do odzyskania walorów jako wielofunkcyjne przestrzenie wyznaczające system B-ZI w skali lokalnej i w skali GZM.

### **Planistyczny i inżynierski wymiar B-ZI**

B-ZI jest pojęciem bliskoznacznym z Zieloną Infrastrukturą (ZI) w rozumieniu Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) oraz innych instytucji Unii Europejskiej, odnoszona do skali miasta. W szerszym ujęciu ZI jest strategicznie zaplanowaną siecią obszarów naturalnych i półnaturalnych, obejmującą tereny zielone (lub błękitne w przypadku ekosystemów wodnych) i jest obecna zarówno na obszarach wiejskich jak i w środowisku miejskim. W skali regionu i subregionu kluczowymi obiektami ZI są obszary chronione, łączące je korytarze ekologiczne, duże założenia krajobrazowe, linie brzegowe dużych rzek i jezior, a pod pewnymi warunkami nawet duże, strategiczne szlaki transportowe (EEA 2011, COM 2013).

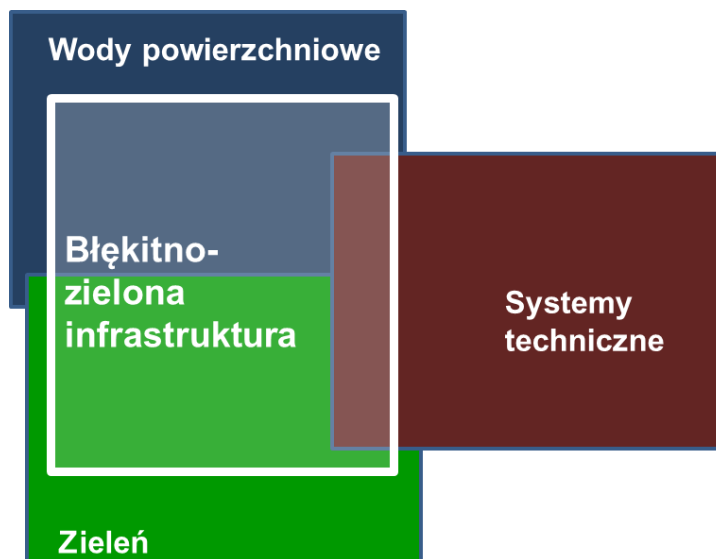
Pojęcie błękitno-zielonej infrastruktury (B-ZI), szczególnie popularne w państwach anglosaskich (Blue-Green Infrastructure) opiera się na dobrze udokumentowanym założeniu, że jednym z warunków trwałego, pomyślnego rozwoju miasta jest umiejętne powiązanie jego zielonego kapitału i gospodarki wodnej. B-ZI planuje się w skali miasta lub nawet metropolii, ale wdraża się stopniowo, w skali miejsca i dzielnicy – w miejskiej zabudowie zwykle jako część gospodarki wodami deszczowymi. Dobrze zaplanowana i urządzona B-ZI to taka, która łączy wysoką jakość i trwałość, przestrzenną i funkcjonalną ciągłość, wielofunkcyjność, publiczną dostępność oraz komfort i bezpieczeństwo użytkowania (Ghofrani, Sposito i inni, 2017).

Idea błękitno-zielonej infrastruktury miast w rozumieniu zgodnym z Krajową Polityką Miejską (KPM 2013) odwołuje się do myślenia w kategoriach ładu przestrzennego i do postrzegania miasta jako swoistego ekosystemu. Integracja obszarów

zielonych z siecią hydrograficzną ma zarówno kontekst społeczny, gospodarczy, przyrodniczy jak planistyczny. Wyraża się ona między innymi poprzez zwrot miast ku rzekom, w tym nadanie nowych funkcji nabrzeżom i stworzenie linearnego systemu parków w oparciu o układy hydrograficzne. Coraz częściej dostrzega się, że zagospodarowanie dolin rzecznych i nabrzeży daje szansę na tworzenie przyjaznych mieszkańcom przestrzeni publicznych łączących korzyści dla rozwoju lokalnego z pozytywnym wpływem na system przyrodniczy miasta, zwłaszcza w przypadku zachowania ciągłości z innymi otwartymi przestrzeniami w mieście. W KPM, a następnie w Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju (SOR 2017) stwierdzono też jednoznacznie, że dla ograniczania skutków powodzi i podtopień szczególne znaczenie ma planowanie przestrzenne i zgodne z prawem sposoby zagospodarowywania terenów zagrożonych. W tworzonych ostatnio projektach planów adaptacji dużych miast do zmiany klimatycznej (MPA 44) ochrona miejskich dolin rzecznych przed zabudową i zagospodarowanie ich jako przestrzenie publiczne odporne na skutki powodzi to oczywista, dobra opcja adaptacyjna.

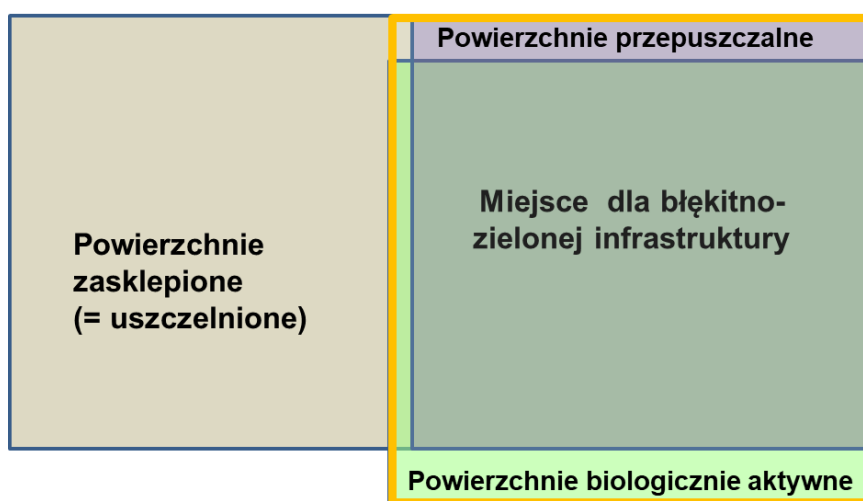
W skali miasta bardzo ważne jest rozróżnienie między błękitno-zieloną infrastrukturą i jej potencjalnymi zasobami. Nie wszystkie tereny zazielenione i wody powierzchniowe można nazwać błękitno-zieloną infrastrukturą miasta. Bardzo często są to „zaledwie” zasoby wymagające takiego przekształcenia, by stały się wysokiej jakości, wielofunkcyjnymi elementami miejskiej przestrzeni a zarazem dobrze funkcjonującymi ogniwami miejskiego obiegu wody. Najbardziej oczywistym, w potocznym rozumieniu, rodzajem zasobów B-ZI są lokalne formy ochrony przyrody oraz wszelkie skupiska zieleni. Do potencjalnych zasobów zalicza się formy użytkowania terenu zdefiniowane jako zieleń urządzona, np. skwery, zieleńce osiedlowe, ogródki działkowe, prywatne ogrody, zielone dachy i zielone ściany, a w skali miasta lub dzielnicy – także parki miejskie, zieleńce miejskie. Zgodnie z interpretacją EEA, do zasobów dla ZI należy zaliczać także formy użytkowania terenu mające inną niż zieleń główną funkcję, np. place osiedlowe, lokalne drogi dojścia do posesji, ścieżki piesze i rowerowe, place zabaw, boiska sportowe, tereny przyszkolne, cmentarze, place przykościelne, place komunalne, lokalizacje biznesowe, tereny rolnicze, składowiska odpadów, a także otwarte przestrzenie na terenach czasowo wyłączonych z użytkowania lub porzuconych, jak np. wyrobiska po surowcach mineralnych, tereny porolne, tereny poprzemysłowe. Do miejskich zasobów B-ZI w takim rozumieniu należą też zawsze przestrzenie otwarte związane z wodą: lokalne stawy, strumienie i ich doliny, rowy i inne niewielkie naturalne i antropogeniczne obniżenia terenu, natomiast w skali miasta lub dzielnicy – także otwarte kanały miejskie, jeziora, rzeki i ich doliny (Davies, MacFarlane, [www](#)).

W świetle powyższego, błędem byłoby przeciwstawianie ZI (lub B-ZI) tradycyjnie rozumianej, „szarej” infrastrukturze miasta (ryc. 1). Na przykład trasę rowerową, park miejski lub nadrzeczną promenadę można planować jako szarą infrastrukturę, albo jako (B-)ZI, albo zaliczać równocześnie do jednej i drugiej.



**Ryc. 1.** Komplementarność B-ZI i tradycyjnie rozumianej infrastruktury technicznej  
**Fig. 1.** Complementarity of B-ZI and traditionally understood technical infrastructure

Bardzo ważnym źródłem problemów środowiskowych, a zarazem źródłem wyzwań w kontekście dostosowania gospodarki wodnej i przestrzeni publicznych do zmiany klimatu jest nadmierne uszczelnienie (zasklepienie) powierzchni terenu. O B-ZI lub jej zasobach można mówić głównie w odniesieniu do terenów, na których wody opadowe mają możliwość infiltracji do gruntu (ryc. 2). Należy jednak mieć na uwadze rosnące możliwości wprowadzania elementów zieleni i obiegu wody nawet w najgęściej zabudowanych i najbardziej uszczelnionych zasklepionych częściach miasta, wynikające z postępu technologicznego (np. zielone ściany, zielone dachy, sztuczne mokradła, ogródki deszczowe i inne rozwiązania bioinżynieryjne stosowane w skali miejsca, możliwe do wprowadzenia nawet bez kontaktu z gruntem).



**Ryc. 2.** Powierzchnie zasklepione jako ograniczenie dla zasobów błękitno-zielonej infrastruktury

**Fig. 2.** Sealed surfaces as a site restriction for B-GI resources

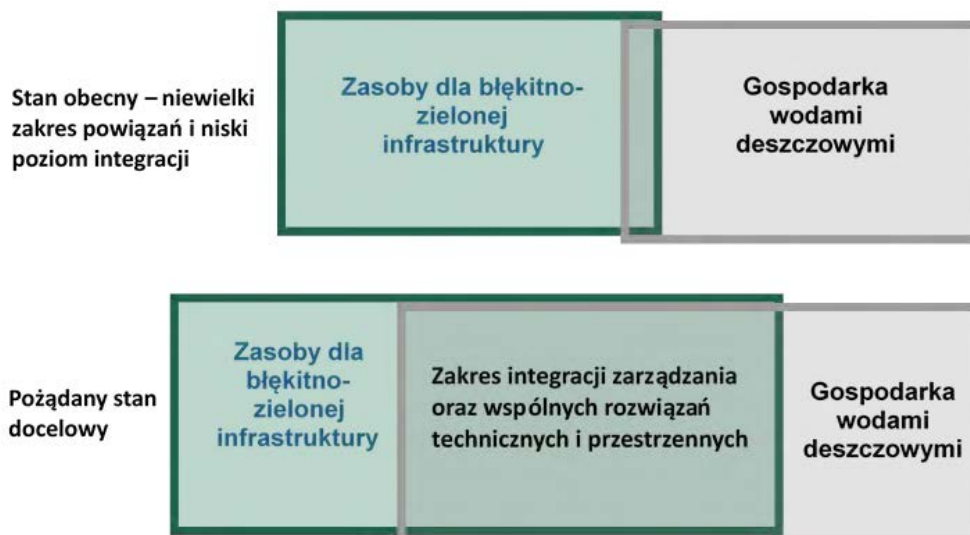
W warunkach ekosystemu miasta bardzo ważną cechą wyróżniającą B-ZI na tle jej potencjalnych zasobów jest zakres i forma udziału danego terenu/ obiektu w obiegu wody. W przestrzeni wysoce zurbanizowanej jest to jaskrawo widoczne w kontekście powiązania (lub braku powiązania) gospodarki zielenią z gospodarką wodami deszczowymi. Potrzeba i możliwość takiego powiązania była wielokrotnie formułowana w literaturze specjalistycznej i od mniej więcej dwóch dekad znajduje ona odzwierciedlenie w rozwiązaniach praktycznych (FISRWG, 1998; Schueler, 2004; Ashley, Woods i in., 2015). Szybki rozwój platform cyfrowych, postęp w zakresie jakości i dostępności danych oraz algorytmów analizy i narzędzi wsparcia decyzji powoduje, że w coraz większym zakresie do programowania i projektowania B-ZI wykorzystuje się systemy informacji przestrzennej, przy czym wiodącą rolę zyskuje, powszechnie także w Polsce, środowisko ArcGIS (O'Donnell, Thorne, 2015).

### **Propozycja integracji gospodarki wodami deszczowymi z gospodarką dolinami rzecznyymi w sposób zgodny z ideą B-ZI**

Podstawą rozważań i propozycji rozwiązań zaprezentowanych w poniższych akapitach jest 20-letni dorobek prac eksperckich autora artykułu, wykonywanych przeważnie na zlecenie samorządów lokalnych i powiązanych z nimi instytucji. Na ponad 100 zrealizowanych prac składają się m.in. programy ochrony środowiska, prace studyjne dotyczące gospodarki wodami deszczowymi, raporty o oddziaływaniu planowanych inwestycji na środowisko, waloryzacje przyrodnicze.

Historyczne uwarunkowania rozwoju naszych miast, a w wielu przypadkach ciągle jeszcze pokutujące postrzeganie wód deszczowych wyłącznie jako problem, z terenów zielonych – jako rezerwę przestrzeni pod inwestycje – spowodowały, że w praktyce planowanie i bieżące zarządzanie miastem są to w dużym stopniu rozłączne zagadnienia (ryc. 3).

Istotnym uwarunkowaniem dla gospodarki wodnej obszaru Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM), a zarazem dla kształtowania sieci B-ZI jest położenie w okolicy działu wodnego Odra-Wisła. Z tego właśnie powodu obszar GZM obfituje w doliny niewielkich rzek i lokalnych potoków. Drugi rodzaj uwarunkowań wynika z historii przemysłu, górnictwa i osadnictwa, która odcisnęła bardzo głębokie piętno na dzisiejszym obrazie dolin. Negatywne rezultaty około 200-letniej historii oddziaływań intensywnie rozwijających się miast oraz podziemnego górnictwa na sieć rzeczna są oczywiste. Z drugiej jednak strony doliny rzeczne naszych miast można – i należy – oceniać jako potencjalnie bardzo cenne zasoby dla B-ZI. Jednym z warunków racjonalnego zagospodarowania dolin rzecznych GZM jest jednak zmiana dotychczasowego podejścia do gospodarki wodami deszczowymi (tab. 1).



**Ryc. 3.** Obecny i pożądany zakres powiązania gospodarki „zielonym kapitałem” miasta z gospodarką wodami deszczowymi

**Fig. 3.** Current and desirable scope of linking the management of the “green capital” of the city with storm-water management

**Tabela 1.** Wyzwania gospodarki wodami deszczowymi i gospodarki dolinami rzecznyymi w miastach GZM

























**Table 1.** Challenges of storm-water management and of river valleys management in the cities of GZM Metropolis

Uwarunkowania systemowe	Gospodarowanie wodami deszczowymi	Gospodarowanie miejskimi dolinami rzecznyymi
DOTYCHCZASOWY SCHEMAT MYŚLENIA I DZIAŁANIA	Wody deszczowe to problem towarzyszący rozwojowi miasta; problemu należy się pozbyć	Rzeka to przedłużenie kanalizacji służące sprawnemu odprowadzenia nieczystości i deszczówki poza miasto. Dolina to „rezerwa” terenu pod zabudowę i infrastrukturę liniową.
Praktyczne konsekwencje dotychczasowego sposobu myślenia i działania: stan obecny	System zaprojektowany i skonstruowany dla szybkiego i sprawnego odprowadzania, wraz z miejskimi zanieczyszczeniami, do rzek i potoków	Koryta rzeczne monotonne, pojemne i umocnione. Doliny przekształcane (nadsypywane) dla uzdatnienia pod zabudowę lub trwale porzucane jako nieatrakcyjne. Miejskie zanieczyszczenia w wodach rzecznych i osadach dennych.

<p>POTRZEBNY SCHEMAT MYŚLENIA I DZIAŁANIA</p>	<p>Wody deszczowe to nieodłączny element ekosystemu miejskiego, a także źródło zasilania ekosystemu rzecznoego. Gospodarka wodami deszczowymi ma służyć nie tylko unikaniu/ rozwiązywaniu Problemów, ale także osiągnięciu korzyści</p>	<p>Dolina może być świetną przestrzenią publiczną oraz źródłem świadczeń ekosystemowych, w tym związanych z wodą. Dobre zagospodarowanie doliny służy bezpieczeństwu od podtopień i wzrostowi wartości pobliskich nieruchomości.</p>
<p>Stan pożądany i postulowane kierunki działań</p>	<p>Optymalne wykorzystanie w miejscu opadu i na obszarze lokalnej zlewni.                      Umożliwienie retencji w krajobrazie miasta.                      Umożliwienie przenikania do gruntu.                      Sprawne odprowadzanie nadmiaru czystych wód deszczowych do rzek i potoków.</p>	<p>Miejską rzekę trzeba uwolnić od zanieczyszczeń.                      Dolinę trzeba uchronić przed zabudową.                      Trzeba zachować ciągłość korytarza doliny.                      Należy wykorzystać możliwości częściowej renaturyzacji rzeki i poprawy dostępu do niej.</p>

























Na obecny, bardzo duży wymiar wyzwań dla gospodarki wodami deszczowymi oraz dla gospodarowania dolinami rzecznoymi składają się zarówno uwarunkowania historyczne, jak głęboko zakorzenione obyczaje w sferze gospodarowania przestrzenią, ciągle jeszcze trwająca presja urbanizacyjna oraz rosnące wymagania co do jakości przestrzeni miasta i sposobu korzystania z zasobów środowiska, w tym wody (ryc. 4, ryc. 5).

Wciąż jeszcze w środowiskach inżynierskich pokutuje myślenie w kategoriach paradygmatów „końca rury” i „drożnego kanału”, choć jest ono sprzeczne z przywołanymi wcześniej dokumentami strategicznymi takimi jak np. KPM 2023 czy SPA 2020, a także z niektórymi dokumentami szczebla lokalnego. Do zwiastunów zmiany na lepsze można zaliczyć np. zapisy uchwalonego w 2016 roku w Katowicach miejskiego programu ochrony środowiska.

Sposób zagospodarowania	Stan obecny	Obecny kierunek zmian	Pożądany kierunek zmian	Pożądany stan docelowy
Wykorzystanie nadmiaru na miejscu lub po odprowadzeniu				
Infiltracja nadmiaru do gruntu				
Retencja powierzchniowa w zlewni				
Przechwytywanie przez rośliny				
Retencja w dolinach rzecznych (w tym w stawach)				
Odprowadzanie kanalizacją do rzek lub oczyszczalni				

Ryc. 4. Porównanie obecnego i pożądanego stanu gospodarki wodami deszczowymi na obszarze GZM

Fig. 4. Comparison of the current and desired status of storm-water management practices in the area of GZM

Sposób zagospodarowania	Stan obecny	Obecny kierunek zmian	Pożądany kierunek zmian	Pożądany stan docelowy
Miejskie doliny rzeczne jako przestrzeń publiczną				
Miejskie doliny rzeczne jako szlaki rowerowe i piesze				
Koryta rzeczne jako bezpieczna przestrzeń dla rekreacji				
Miejskie doliny rzeczne jako korytarze ekologiczne				
Koryta rzeczne jako przestrzeń dla bioróżnorodności				
Rzeki jako odbiorniki miejskich zanieczyszczeń (przelewy burzowe, zrzuty z oczyszczalni, nielegalne zrzuty, zanieczyszczone wody deszczowe)				

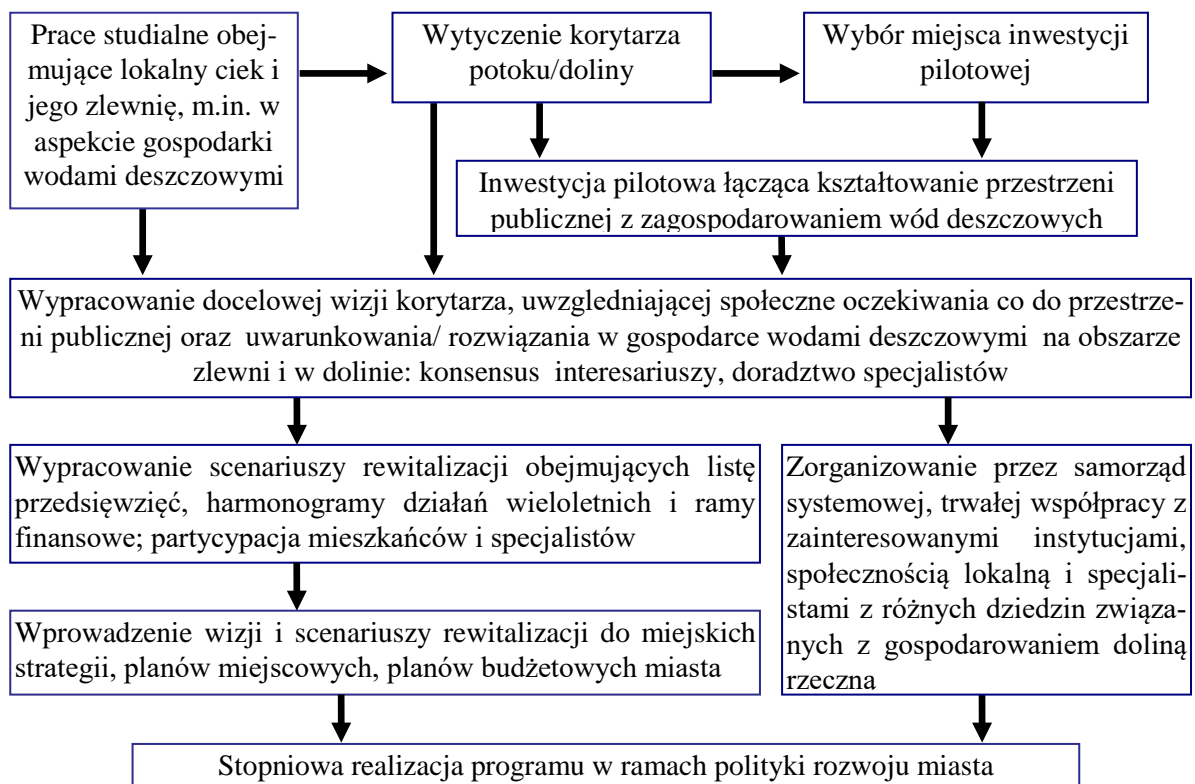
Ryc. 5. Porównanie obecnego i pożądanego stanu gospodarki dolinami rzeczными na obszarze GZM

Fig. 5. Comparison of the current and desired status of the river valleys in the area of GZM



## Systemowe podejście do kształtowania B-ZI na przykładzie miejskiej doliny rzecznej

Radykalna, pozytywna zmiana obrazu miejskiej doliny rzecznej jest możliwa pod warunkiem, że zaplanowane i zrealizowane zostaną kompleksowe działania obejmujące między innymi ulepszenie gospodarki wodami deszczowymi w skali lokalnej zlewni. Równie ważne jest opracowanie spójnej, docelowej wizji korytarza doliny, jej osadzenie w realiach planistycznych i konsekwentna wieloletnia realizacja. Optymalne byłoby podejście, w którym następuje integracja działań różnych zainteresowanych podmiotów w formule partycypacyjnej, z dużym zaangażowaniem lokalnej społeczności. Możliwość takiego podejścia do kształtowania zasobów B-ZI zademonstrowano kilka lat temu na przykładzie międzynarodowego projektu REURIS, realizowanego na obszarze GZM na przykładzie potoku Ślepiotka w Katowicach (REURIS Project Team, 2012), dostosowując do katowickich realiów zalecenia zawarte w opracowaniach FISRWG 1998 oraz Schueler, Mitchell (2005). Niestety, pomimo zachęcającego rezultatu, przedsięwzięcie to nie doczekało się jak dotąd kontynuacji. Możliwy schemat programowania i realizacji działań w dolinie rzecznej przedstawiono na ryc. 6.



**Ryc. 6.** Proponowane etapy programowania rozwoju błękitno-zielonej infrastruktury na przykładzie rewitalizacji doliny potoku/rzeki w mieście

**Źródło:** wg REURIS Project Team, 2012, zmodyfikowane

*Fig. 6. Proposed steps of programming the development of blue-green infrastructure on the example of revitalization of urban river valley*

*Source: according to REURIS Project Team, 2012, modified*

Lokalne (miejskie) przedsięwzięcia na rzecz błękitno-zielonej infrastruktury będą miały tym większy sens, im bardziej wkomponowane będą w działania nakierowane na kreowanie metropolitalnej sieci przestrzeni publicznych i współtworzącej ją błękitno-zielonej infrastruktury. W nadchodzących latach powinno to stać się jednym z fundamentów polityki przestrzennej GZM. Oczekiwane korzyści to:

- większa zdolność adaptacji miast i gmin metropolii do zmiany klimatu,
- bezpieczna przestrzeń dla spędzania czasu wolnego,
- rezerwuar usług (świadczeń) ekosystemowych,
- przestrzeń dla retencji wody (np. doliny rzeczne, kompleksy zbiorników wodnych), także w związku bezpieczeństwem od zalewania i podtopień,
- przestrzeń dla lokalnego i ponadlokalnego ruchu rowerowego,
- wysoka bioróżnorodność związana zarówno z „dziką” przyrodą (lasy, łąki, mokradła) jak z zielenią urządzoną (np. większe parki).

### **Uwagi końcowe. B-ZI jako pożądany element metropolitalnej polityki przestrzennej**

Dla zaplanowania i wdrażania metropolitalnej sieci B-ZI konieczne jest oszacowanie zasobów – zarówno tych, które już są dobrymi przestrzeniami publicznymi, jaki i wymagających dopiero zaadaptowania. Zasobami sieci mogą być wszelkie tereny zieleni oraz wód otwartych, w tym, oprócz zieleni „urządzonej”, także np. niezabudowane doliny rzeczne, trwale zazielenione „nieużytki”, stare nasypy, hałdy, rowy, jary, tereny zawodnione/ podtopione w wyniku osiadań górniczych, itd. Konsekwencją decyzji o uwzględnieniu B-ZI w metropolitalnej polityce przestrzennej będzie:

- przyjęcie jednoznacznych kategorii zasobów i przydzielenie im warstw w metropolitalnym systemie informacji przestrzennej,
- opracowanie cyfrowej mapy zasobów B-ZI w oparciu o wszelkie dostępne dane przestrzenne, przyrodnicze, geośrodowiskowe,
- ocena zasobów z uwzględnieniem kontekstów: gospodarczego, społecznego, urbanistycznego, finansowego, prawnego,
- uwzględnienie rezultatów oceny zasobów B-ZI w zintegrowanej polityce rozwoju metropolii, najlepiej na poziomie planu zagospodarowania przestrzennego.

Znaczenie proponowanych działań może być tym większe, że łatwy dostęp do dobrze urządzonych, błękitno-zielonych przestrzeni publicznych jest coraz powszechniej postrzegany jako ważne kryterium wyboru miejsca zamieszkania. W przyszłości może to być bardzo istotnym czynnikiem warunkującym renesans miast GZM.

## Literatura

- Ashley, R., B. Woods i in., 2015. UK sustainable drainage systems: Past, present and future. *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*. 168: 1-6.
- COM, 2013. Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów. Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy. Rada Unii Europejskiej, Bruksela, 18 kwietnia 2013 r. COM(2013) 216 final.
- Davies C., R. MacFarlane, C. McGloin, M. Roe, Green Infrastructure Planning Guide; [http://www.greeninfrastructure.eu/images/GREEN\\_INFRASTRUCTURE\\_PLANNING\\_GUIDE.pdf](http://www.greeninfrastructure.eu/images/GREEN_INFRASTRUCTURE_PLANNING_GUIDE.pdf) [dostęp: 04.04.2018].
- EEA European Environmental Agency, 2011. Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. [www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion](http://www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion) [dostęp: 04.04.2018].
- FISRWG, 1998. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG)(15 Federal agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653.
- Ghofrani Z., V. Sposito, and R. Faggian, 2017. A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts. *International Journal of Environment and Sustainability [IJES] ISSN 1927-9566 Vol. 6 No. 1: 15-36*.
- KPM 2023. Krajowa Polityka Miejska do roku 2023. Uchwała Rady Ministrów w dniu 20 października 2015 r.
- MPA 44. Miejskie Plany Adaptacji. Opracowanie planów adaptacji do zmian klimatu w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców. <http://44mpa.pl/miejskie-plany-adaptacji> [dostęp: 14.04.2018].
- O'Donnell, E., C. Thorne i inni. Evaluating the multiple benefits of a Blue-Green Vision for urban surface water management (2015). Conference paper UDG Autumn Conference and Exhibition 2015, University of Leeds..
- REURIS Project Team (2012). Urban rivers – vital spaces. Manual for urban river revitalization; Implementation, participation, benefits, 1 June 2012; (eds: E. Bender, L. Bigga, W. Maier, <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0643715.pdf> [dostęp: 05.04.2018].
- Schueler T., K. Brown, 2004: An Integrated Framework to Restore Small Urban Watersheds. CWP Urban Subwatershed Restoration Manual Series. No. 1. Version 1.0. March 2004.
- Schueler T., A. Mitchell A. et al., 2005. Methods to Develop Restoration Plans for Small Urban Watersheds. Urban Subwatershed Restoration Manual No. 2. CWP-USEPA
- SOR 2017. Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.). Uchwała nr 8 Rady Ministrów z dnia 14 lutego 2017 r.

SPA 2020. Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do 2030 roku (2013). Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

### **Abstract**

A systemic approach to the management of blue-green infrastructure and its assets in the area of GZM Metropolis was proposed, in particular concerning numerous small watercourses and their valleys. A general diagnosis of the condition of watercourses and valleys was presented, and a postulate to transform at least some of them into blue-green, multi-functional public spaces was formulated. The need to change the paradigm of storm-water management was justified, which should be directed to the management of excess water on the site and for retention in the local catchment area, and infiltration of water to the ground. It was indicated that this is a key condition for shaping safe and attractive public spaces in the valleys. The postulate of cross-sectoral integration of activities in the field of spatial management, creation of public spaces, storm-water management, municipal sewage management, protection against the effects of flooding, shaping of greenery and adaptation of cities to climate change was formulated. Arguments were formulated for the inclusion of BGI, with particular emphasis on management of valleys of small watercourses, to spatial policy of GZM Metropolis.

**Key words:** blue-green infrastructure, urban river valley, storm-water management, public spaces

## ZNACZENIE WODY DLA FUNKCJONOWANIA EKOSYSTEMÓW NA TERENACH MIEJSKO-PRZEMYSŁOWYCH

### WATER IMPORTANCE TO FUNCTIONING OF ECOSYSTEMS IN URBAN-INDUSTRIAL AREAS

EDYTA SIERKA, EWELINA ROSZKOWSKA, GABRIELA WOŹNIAK

*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska*

#### Streszczenie

Funkcjonowanie ekosystemów oraz świadczone przez nie usługi dla ludzi są warunkowane głównie różnorodnością biologiczną. Natomiast woda w środowisku jest podstawnym czynnikiem kształtowania się różnorodności biologicznej na terenach naturalnych jak i miejsko-przemysłowych. Wyniki badań wykazały, że ekosystemy antropogeniczne, powstałe na terenach o znacznym zaludnieniu, prowadzą do zwiększenia różnorodności biologicznej i tym samym przyczyniają się do poprawy jakości życia ludzi. Stwierdzono, że wzrost wilgotności podłoża na zwałowiskach odpadów pogórnich istotnie zmniejsza procentowy udział gatunków dominujących na rzecz zwiększenia liczby innych. Antropogeniczny zbiornik wykazuje się niemal dwukrotnie wyższą różnorodnością biologiczną w porównaniu z ekosystemem lasu gospodarczego. Wartość świadczonych usług dla człowieka przez ekosystem zbiornika powstałego w niecce osiadania szacowana jest na 9 815\$·ha·rok<sup>-1</sup>, czyli ok. 40 000 zł·ha·rok<sup>-1</sup>.

**Słowa kluczowe:** woda w środowisku, różnorodność biologiczna, świadczenia ekosystemów, tereny miejsko-przemysłowe

#### Wprowadzenie

Pierwsze dekady XXI wieku to czas, w którym na niespotykaną dotąd skalę identyfikowane są zagrożenia elementów środowiska przyrodniczego, szczególnie pochodzenia antropogenicznego (Covich i in., 2004). Ustalono m. in., że najpoważniejsze zagrożenie dla środowiska przyrodniczego pojawia się wówczas gdy, rozchwiane zostaną mechanizmy gwarantujące właściwe funkcjonowanie poszczególnych

ekosystemów. Zmiany w funkcjonowaniu któregośkolwiek z podstawowych procesów w ekosystemie, tj. przepływie energii, cyklach mineralnych, obiegu wody czy sukcesji ekologicznej, oznacza zmianę w funkcjonowaniu pozostałych elementów, ponieważ są one wzajemnie ze sobą powiązane (Grime, 1998).

Pojęcie „ekosystem” (*ecological system*) wprowadził w 1930 roku przez Clapham (Willism, 1997), który oznaczył relacje elementów fizycznych i biologicznych w stosunku do siebie. Tansley w 1935 roku, opisał ekosystem „...jako system interakcji pomiędzy biocenozą (grupa istot żywych) i ich biotopem (środowisko, w którym żyją)”. Na wielość możliwości istniejących relacji pomiędzy organizmami a ich środowiskiem wskazał Allee z grupą współpracowników podkreślając, że ekosystem to współdziałanie systemu biotycznego i abiotycznego. Wyróżnione zostały akcje, czyli oddziaływanie siedliska fizyko-chemicznego na organizmy oraz ich reakcję a także koakcje, czyli wzajemne oddziaływanie organizmów na siebie nawzajem (Alle i in., 1958).

Niezależnie z jakiego typu ekosystemu mamy do czynienia wszystkie elementy składowe oraz ich właściwości, wzajemne relacje i zależności, funkcjonują jako całościowy system. Pojedynczy organizm, reprezentujący gatunek, nie może żyć niezależnie, bez angażowania innych organizmów w swoje funkcjonowanie. Jednak należy pamiętać, że gatunki nie odgrywają równoważnych ról w przebiegających procesach ekologicznych w ekosystemie. Natomiast stosunkowo niewielka ich liczba może być odpowiedzialna za znaczną część jego funkcji (Grime, 1998). Dlatego też, społeczności biologiczne, najczęściej obejmują ugrupowania funkcjonalne organizmów, które są swoistą „soczewką” skupiającą informacje o zestawie cech jakie muszą posiadać gatunki by móc występować w danych warunkach siedliskowych (Cox, 2004).

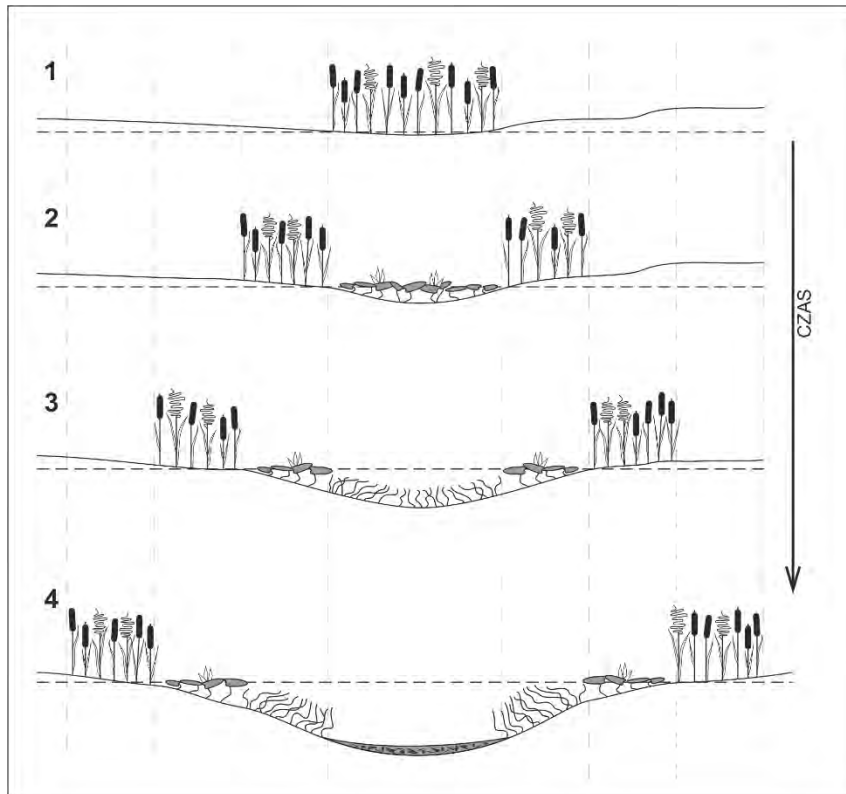
W warunkach terenów miejskich i przemysłowych, gdzie wraz z aktywnym pozyskiwaniem zasobów przyrody przez człowieka pojawiają się efekty jego działalności np. w postaci deformacji terenu na skutek podziemnej eksploatacji, powstają nowe typy siedlisk w obrębie już istniejących, prowadząc do zmiany zróżnicowania gatunkowego i generując najczęściej nowe funkcje ekosystemu (*ecosystem function*), czyli przebiegające procesy ekologiczne (Hooper i in., 2005).

Celem prezentowanej pracy jest określenie wpływu warunków wodnych na funkcjonowanie wybranych ekosystemów na terenach miejsko-przemysłowych.

## **Woda w środowisku a różnorodność biologiczna**

Różnorodność biologiczna odgrywa ważną rolę w przebiegu lokalnych i globalnych cykli wodnych (Ramsar, 1971). Z kolei zmieniające się warunki wodne mają duże znaczenie dla kształtowania się różnorodności biologicznej i w efekcie funkcjonowania ekosystemów oraz pełnionych przez nie funkcji dla człowieka (Costanza i in., 1997).

Pojawiające się na powierzchni obniżenia terenu, powstające na skutek zapadania się pustek poeksploatacyjnych, mogą prowadzić do powstania, w obrębie np. ekosystemu leśnego, na gruntach rolnych lub przemysłowych, zbiornika wody o stosunkowo niewielkiej głębokości (ryc. 1).



**Ryc. 1.** Etapy powstawania zbiornika w niecce osiadania z wizualizacją etapów rozwoju roślinności (za: Sierka i in. 2012, zmienione). Objasnienia: 1 – szuwary, 2 – rośliny z liśćmi pływającymi na powierzchni lustra wody, 3 – rośliny zanurzone, 4 – osady dennie

**Fig. 1.** Process of the mining subsidence reservoirs and the vegetation forming (after: Sierka et al. 2012, modified). Explanation: 1 – rushes, 2 – floating hydrophytes, 3 – submerged hydrophytes, 4 – bottom sediments

Najczęściej zniekształcenia podłoża, powstałe na skutek działań polegających na pozyskiwaniu kopalin, uznawane są za szkodliwe dla środowiska przyrodniczego. Jednak jak pokazują wyniki badań, siedliska powstające w wyniku działalności człowieka są niejednokrotnie unikatowymi enklawami, które inicjują rozwój nowych ekosystemów, przyczyniając się do wzrostu różnorodności biologicznej obszarów, na których powstają (Kabisch, Hemmerling, 1982; Bradshaw, 2000; Banaszak, 2002).

W lasach gospodarczych, wykazujących się zaburzonymi warunkami wilgotnościowymi, prześwietlonymi koronami i znacznym dostępem pierwiastków biogenych dla roślin, warstwa runa leśnego opanowywana jest przez gatunki ekspansywne zarówno rodzime (Sierka, 2002; Sierka i in., 2007) jak i obcego pochodzenia (Chmura, Sierka, 2006).



Ten proces prowadzi najczęściej do znacznego ograniczenia różnorodności biologicznej tych obszarów (Sierka, Orczewska, 2001) nawet poprzez ograniczanie wzrostu wprowadzanych sadzonek drzew. Kiedy w obrębie zbiorowiska leśnego, nawet zdegenerowanego, pojawi się, powstałe na skutek działalności człowieka, obniżenie terenu o charakterze zawodnionej niecki, przyczyni się to do wzrostu liczby nisz ekologicznych dla znacznie większej liczby organizmów niż zbiorowisko leśne zdominowane przez jeden gatunek.

Wyniki badań prowadzone w obrębie ekosystemu leśnego, na terenie którego nie występuje woda oraz lasu, w obrębie, którego powstał zbiornik antropogeniczny zidentyfikowano odpowiednio 52 i 91 gatunków roślin naczyniowych, przy 25 gatunkach występujących w obrębie obu fitocenoz (Sierka, Sierka, 2009). Ponadto, przedstawiciele gatunków owadów, takich jak *Chirothrips hamatus* Bagnall, *Iridothrips iridis* (Watson), związany tylko z kosaćcem żółtym, czy *Baliothrips dispar* (Haliday) i *Neoheegeria verbasci* Osborn zostały zidentyfikowane w obrębie lasu z powstałym zbiornikiem wodnym.

Kreowane przez człowieka ekosystemy tj. w sposób bezpośredni – las gospodarczy, pośredni – zbiornik powstały w niecce osiadania, generują miejsca występowania innych grup organizmów, powiązanych z występującymi roślinami np. przez zależności troficzne. Przykładem takiej grupy są wciornastki, owady fitofagiczne (żerujące na roślinach), które reprezentowane były przez 50 gatunków. Na terenie, gdzie powstał zbiornik występowały gatunki wciornastek preferujące rośliny związane z siedliskami wodnymi. Zatem zmiany w środowisku przyrodniczym, które z punktu widzenia człowieka są szkodami, dla roślin i zwierząt preferujących siedliska wodne są szansą na znalezienie nowego miejsca do życia (Stalmachová, 1997). Ostatecznie zatem antropogeniczne zbiorniki wodne przyczyniają się do zwiększenia różnorodności gatunkowej ( $\alpha$ -diversity) obszarów, gdzie powstają, co przyczynia się do zwiększenia zakresu funkcji jakie mogą pełnić i usług jakie mogą świadczyć te ekosystemy dla jakości życia człowieka np. na terenach miejskich.

### **Woda warunkująca życie na zwałowiskach skały karbońskiej**

Tereny miejsko-przemysłowe to również miejsca, gdzie składowane są odpady pogórnice czyli zwałowiska skały płonnej, nazywane potocznie hałdami. Są one antropogenicznym elementem w środowisku przyrodniczym. W ich obrębie panują zróżnicowane warunki siedliskowe (Stalmachová, 1996; Prach i in., 2011), które z kolei warunkują zróżnicowanie flory i roślinności w ich obrębie (Rostański, 2001; Rostański, Zhukov, 2006). Charakter ekosystemu zwałowiska generalnie odróżnia się zbiorowiskami roślinnymi od obszarów sąsiadujących (Stalmachová, Sierka, 2014), a miejscami nawiązuje np. pod względem przebiegu procesów ekologicznych do ekosystemów naturalnych (Woźniak i in., 2005; Lundholm, Richardson, 2010). Wyniki badań tych obiektów wskazują, że najistotniejszym czynnikiem warunkującym zasiedlanie zwałowisk przez organizmy żywe jest dostępność wody (Prach i in., 2007).

Udowodniono również, że spontaniczna lub zamierzona zmiana pokrycia terenu, np. rekultywacja przez określony typ roślinności, najczęściej prowadzi do modyfikacji całościowego bilansu wody w podłożu na zwałowisku i w jego sąsiedztwie, a to w konsekwencji wpływa na funkcjonowanie ekosystemów oraz warunkuje przebieg i skuteczność regeneracji tego obszaru (Tokumoto i in., 2014).

Można przyjąć, że obiekty jakimi są zwałowiska skały płonnej, mają podobną genezę i charakteryzują się niewielką zawartością materii organicznej, co może prowadzić do ujednoczenia warunków wilgotnościowych zwałowisk (Ukalska-Jaruga i in., 2015) i powodować brak zróżnicowania roślinności. Jednak uwzględnić należy również to, że zwałowiska charakteryzują się podatnością na erozję oraz występującymi wahaniami wilgotności co powoduje, iż zmagazynowana woda opadowa, z której korzystają rośliny, szybko przesiąka w dół i tym samym powoduje wysychanie górnych części zwałów (Stalmachová, 2006). Zwałowiska różnią się między sobą pod względem panujących warunków wilgotności z powodu typu składowanego materiału, sposobu jego składowania itd.

Badania prowadzone w ramach projektu InfoRevita „System wspomaganie rewitalizacji zwałowisk odpadów pogórnich przy użyciu narzędzi geoinformacyjnych” wykazały, że istnieje zależność pomiędzy zawartością wody w podłożu, a pokryciem dominujących gatunków roślin (\*gatunek dominujący, przewyższa pokryciem powierzchni pozostałe gatunki). Przy czym wzrost wilgotności podłoża powoduje, istotnie statystycznie, zmniejszenie procentowego udziału gatunków roślin dominujących (współczynnik korelacji rang Spearmana  $R=-0,12$ ;  $N= 297$ ;  $p\leq 0,03$ ) na rzecz gatunków współwystępujących.

Z ilością wody w podłożu powiązana jest również ilość wytwarzanej biomasy przez poszczególne gatunki. Stwierdzono, np. że nawłóć późna *Solidago gigantea*, trzcina pospolita *Phragmites australis* oraz trzcinnik piaskowy *Calamagrostis epigejos* wytwarzały najwięcej biomasy spośród analizowanych gatunków dominujących. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem procentowego pokrycia wzrasta ilość wytwarzanej biomasy, ale ilość wytwarzanej biomasy nie zależy od ilości wody w podłożu (Krawczyk i in., 2017; Pietrzyba i in., 2017).

Trawy, jak wykazały badania, pełnią ważną funkcję siedliskotwórczą w obrębie zwałowiska skały płonnej, również w zakresie utrzymania wilgotności podłoża, co wskazuje na ich lepsze przystosowanie do wykorzystania w rekultywacji w porównaniu z innymi gatunkami pojawiającymi się spontanicznie na zwałowiskach (Krawczyk i in., 2017). Mają one mniejsze wymagania względem wilgotności podłoża, co wynika z faktu, że posiadają zdolność do wieloletniego odrastania w okresie wegetacyjnym oraz wykształcają silne systemy korzeniowe (Stalmachová, Sierka, 2014).

## Woda w środowisku warunkująca usługi ekosystemów

Za funkcję ekosystemu można uznać „zdolności naturalnych procesów i składników do dostarczania towarów i usług, które bezpośrednio lub pośrednio zaspokajają potrzeby ludzkie” (De Groot i in., 2002). Są to również interakcje pomiędzy abiotycznymi i biotycznymi składnikami (roślinnością, wodą, glebą, atmosferą i fauną), które przenoszą energię i materię w obrębie ekosystemów i między nimi. Niektóre z funkcji jakie pełnią ekosystemy mogą bezpośrednio lub pośrednio dostarczać towary (np. żywność) i usługi (np. sekwestracja dwutlenku węgla), z których korzystają ludzie świadcząc usługi na ich rzecz (Costanza i in., 1997).

Usługi ekosystemów (*ecosystem services*) zapewniają wsparcie funkcjonowania człowieka w zakresie niezbędnym do jego przetrwania, również przez zapewnienie warunków życia innym organizmom. Stanowią one tzw. kapitał przyrodniczy, z którego ludzie czerpią szeroką gamę usług, umożliwiających życie i jego jakość.

Usługi ekosystemowe obejmują cztery główne grupy, ujęte w trzy sekcje (CICES, 2013), czyli: usługi zaopatrzeniowe (*provisioning services*); regulacyjne (*regulating services*) i wspomagające (*supporting services*) oraz kulturowe (*cultural services*), zapewniające człowiekowi potrzeby bezpośrednio niezbędne do życia, jak i te potrzebne do prawidłowego funkcjonowania. Ekosystemy wodne, zarówno naturalne jak i antropogeniczne wspierają dostarczanie kluczowych usług ekosystemowych, takich jak produkcja ryb, zaopatrzenie w wodę i rekreacja.

Kluczowe usługi ekosystemów są związane z cyklem hydrologicznym, retencją wody, regulacją klimatu (Grizzetti i in., 2016). Większość tych usług świadczonych przez ekosystemy związanych z wodą w środowisku jest bezpośrednio wykorzystana przez ludzi i są to usługi, które można wyrazić w jednostkach monetarnych, mogą być określone ilościowo np. produkcja ryb (Polasky i in., 2015). Są również usługi świadczone przez ekosystemy wodne, które nie są wyliczalne. Szczególnie usługi regulacyjne i kulturowe, które są mniej widoczne, niejednokrotnie niezauważalne, a mogące przyczynić się do zmniejszenia np. skutków powodzi (ryc. 2).



**Ryc. 2.** Schemat relacji między człowiekiem a wodą w środowisku

**Źródło:** za: Grizzetti 2016

**Fig. 2.** Diagram of relationships between humans and aquatic ecosystems

**Source:** after: Grizzetti 2016

Usługi wspomagające ekosystemów obejmują tworzenie gleby, fotosyntezę i obieg składników pokarmowych. Procesy te stanowią podstawę dla np. rozwoju upraw. Usługi kulturowe natomiast obejmują piękno, są inspiracją np. dla artystów oraz zapewniają możliwość rekreacji np. spływy kajakowe. Odrębną grupą usług świadczonych przez ekosystemy, zaliczanych do grupy kulturowych są te, które zwiększają dobrobyt duchowy człowieka.

Usługi ekosystemów dla człowieka są niezbędne i nie mogą być, jak na razie, zastąpione żadnym z ludzkich osiągnięć technologicznych. Część populacji ludzkiej zdaje sobie sprawę, że usługi świadczone przez ekosystemy mogą mieć wartość kulturową, na przykład chronić ważne miejsca dla ludności autochtonicznej lub tereny zagrożonej przyrody, a także dostarczać wartości estetycznych i duchowych poprzez poprawę samopoczucia człowieka (Roberts i in., 2015).

Jednak ze względu na fakt, że wiele funkcji i usług ekosystemów, w tym szczególnie wodnych zawsze było dostępnych bez ograniczeń, bez wnoszenia opłat za korzystanie z nich, ludzie nie uświadamiają sobie ich rzeczywistego, długofalowego znaczenia dla ich życia (Boydb, Spencer, 2007). Działania prowadzące do całkowitego zniszczenia ekosystemu i jego usług wpływa negatywnie na wzrost gospodarczy i zwiększanie dobrobytu. Jednak mimo rosnącej świadomości w tym zakresie, nadmiernie korzystamy, jako ludzie, z oferowanych przez ekosystemy usług. Utrata różnorodności biologicznej, w aspekcie produkcji pierwotnej ekosystemów, może doprowadzić do znacznie istotniejszych zmian w funkcjonowaniu człowieka niż tzw. globalne zmiany, za które uważa się m.in. ocieplenie klimatu czy zakwaszenie oceanów.

Zaburzenia a na dalszym etapie zanik usług ekosystemowych, wiążą się zarówno z działalnością człowieka (np. pogarszająca się jakość wód powierzchniowych) jaki i pojawiającymi się czynnikami naturalnymi (np. trzęsienia ziemi) (Wang i in., 2012).

Podjęcie przyrodnicze do funkcji i świadczonych przez ekosystemy usług różni się znacząco od podejścia ekonomicznego, ponieważ dla ekonomisty, jeżeli coś jest „bezcenne“ to nie ma wartości (Żylicz, 2010). Czy zatem usługi świadczone przez ekosystemy wodne lub inne, dla ludzi mogą być wycenione ekonomicznie? Costanza i in. (1997) proponując 17 typów usług ekosystemowych, wycenił wartość ekonomiczną usług jakie świadczą ekosystemy w skali całego globu.

W roku 2014 została oszacowana wartość świadczeń dostarczanych przez ekosystemy jezior, rzek – 8 498 \$·ha·rok<sup>-1</sup>, ekosystemy terenów podmokłych – średnio 14 785 \$·ha·rok<sup>-1</sup>, bagien i terenów zalewowych – 19 580 \$·ha·rok<sup>-1</sup>, ekosystemy łąk i pastwisk – 232 \$·ha·rok<sup>-1</sup>, a dla porównia użytków rolnych – 92·\$·ha·rok<sup>-1</sup>.

Antropogeniczne ekosystemy wodne, takie jak już wspomniane zbiorniki powstające w nieckach osiadania, funkcjonują na zbliżonych zasadach do ekosystemów płytkich jezior. Czy ten typ ekosystemów, powstających na terenach miast i terenów przekształconych działalnością przemysłową, świadczy usługi dla człowieka?

Wykorzystując metodę wskaźnikową, zaproponowaną przez Costanza i in. (1997), wartości poszczególnych usług (uwzględniając zmienność ekosystemu podczas pór roku), oszacowano wartość usług ekosystemów zbiornika powstałego w obniżeniu terenu nad podziemnym polem eksploatacyjnym.

Roślinność, występującą na terenie zbiornika i jego najbliższego otoczenia reprezentowała zbiorowiska związane z reżimem wodnym. W oparciu o występowanie dominujących gatunków roślin, określono ich przynależność do grupy preferującej określone warunki siedliskowe (Matuszkiewicz, 2001) – biomu i obliczono wartość świadczonych usług dla każdego z nich. Następnie wyliczono wartość dla jednego zbiornika o powierzchni 10,7 ha, którego jeden z brzegów jest umocniony skałą płoną i zalesiony, a pozostałe brzegi są w bezpośrednim sąsiedztwie ze zróżnicowanymi typami roślinności tj. las łąkowy, łąki i pastwiska, tereny podmokłe, pola uprawne. Uwzględniając powierzchnie poszczególnych biomów oszacowano, że wartość usług ekosystemowych, świadczonych przez teren samego zbiornika oraz terenów podmokłych bezpośrednio sąsiadujących ze zbiornikiem, w ciągu roku świadczą usługi różnego typu, które można wycenić na  $9\,815 \text{ \$} \cdot \text{ha} \cdot \text{rok}^{-1}$ , czyli ok.  $40\,000 \text{ zł} \cdot \text{ha} \cdot \text{rok}^{-1}$  (uwzględniając siłę nabywczą dolara) i pory roku, w aspekcie aktywności fotosyntetycznej roślin.

Usługi jakie pełnią biomy w obrębie zbiornika wodnego wraz z bezpośrednio przyległymi terenami podmokłymi to: 1) zapewnienie zasobów wody, 2) regulacja stosunków wodnych, 3) unieszkodliwianie martwej materii, 4) poprawa jakości powietrza oraz 5) funkcja kulturowa – rekreacja, głównie wędkarstwo.

Walory krajobrazowe oraz np. obecność ptaków, pozwala również wskazać rolę zbiornika, który oddziałuje na sferę estetyczną (duchową) ludzi.

Generalnie wody słodkie, stanowiące zaledwie 0,01% wody na świecie zajmują około 0,8% powierzchni Ziemi. Ich znaczenie jest duże ze względu na fakt, że ten niewielki ułamek globalnych zasobów wody stwarza warunki dla występowania niemal 6% wszystkich opisanych gatunków świata (Dudgeon i in., 2006), czyli około 100 000 z około 1,8 mln. Dlatego też pojawiające się ekosystemy wodne na terenach o przekształconych, działalnością przemysłu, stosunkach wodnych mogą być formą rekompensaty zaistniałych strat (Pełka-Gościnnik, 2006; Stalmachová, 2004). Ponadto istotnie wzbogacają potencjał tych terenów o zróżnicowanym poziomie degradacji, dając nowe możliwości (Ratyńska, 2002) ich wykorzystania przez organizmy żywe i człowieka.

Badania Jeppesen i in. (1997) wykazały, że małe, płytkie zbiorniki wykazują się większą różnorodnością gatunków roślin i zwierząt w porównaniu do stawów, jezior, strumieni i rzek. Dlatego też zbiorniki w nieckach osiadania, mimo antropogenicznej genezy są godnymi uwagi obiektami mogącymi w istotny sposób przyczynić się do rozwoju terenów poprzemysłowych, przez nadanie im wartości w postaci świadczonych przez ekosystemy usług. Ich właściwe zagospodarowanie w obszarach takich jak Górny Śląsk, regionu o małych zasobach wód powierzchniowych jest, jak się wydaje, szansą na lepszą jakość życia ludzi (Pełka-Gościnnik, Waga, 2003; Sierka i in., 2012).

Różnorodność biologiczna ekosystemów, szczególnie wodnych, jest istotnym elementem ich właściwego funkcjonowania i stanowi gwarancję utrzymania usług pełnionych przez ekosystemy niezbędnych do życia ludzi (de Bello i in., 2010).

## **Literatura**

- Allee, W.C., Emerson A.E., Park O., Park T., Schmidt K.P. 1958. *Zasady ekologii zwierząt*. Warszawa: PWN.
- Banaszak, J. 2002. Wyspy środowiskowe. Bioróżnorodność i próby typologii. Wyd. Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz, pp. 302.
- Boydb, J., Spencer, B. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63:616-626.
- Bradshaw, A. D. 2000. The use of natural processes in reclamation. Advantages and difficulties. *Landscape and urban planning* 51: 89-100.
- Chmura, D., Sierka E. 2006. Relation between invasive plant and species richness of forest floor vegetation: a study of *Impatiens parviflora* D. C. *Polish Journal of Ecology*: 54 (3): 417-428.
- CICES, 2013. <http://cices.eu/the-equivalences-between-cices-and-the-classifications-used-by-thema-and-teeb> [dostęp 20.03.2018].
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R., Sutton P., van den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Covi, A.P., Austen M.C., Bärlocher F. Chauvet E., Cardinale B.J., Biles C.L., Inchausti P., Dangles O., Solan M., Gessner M.O., Stutzner B., Moss B. 2004. The role of biodiversity in the functioning of freshwater and marine benthic ecosystems. *BioScience*, 54: 767-775.
- Cox, G.W. 2004. *Alien Species and Evolution*. Island Press, Washington, 377 pp.
- De Bello, F., Lavorel, S., Díaz, S., Harrington, R., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., Berg, M.P., Cipriotti, P., Feld, C.K., Hering, D., Marins, da Silva P., Potts, S.G., Sandin, L., Sousa J.P., Storkey, J., Wardle, D.A., Harrison, P.A., 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodivers Conserv* 19: 2873-2893.
- De Groot, R., Wilson M., Boumans R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.
- Dudgeon D., Arthington A.H., Gessner M.O., Kawabata Z.I., Knowler D.J., Lévêque C., Naimam R.J., Prieur-Richard A.H., Soto, D., Stiassny, M.L.J., Sullivan C.A., 2006. Freshwater biodiversity: impotence, threats, status and conservation challenges. *Biol. Rev.* 81(2): 163-182.
- Grime J.P., 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology* 86: 902-910.

- Grizzetti B., Lanza D., Liqueste C., Reynaud, Cardoso A.C., 2016. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy* 61: 194-203.
- Hooper D., Chapin III, S., Ewel, J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J., Lodge, D., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A., Vandermeer, J., Wardle, D., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75: 3-35.
- Jeppesen E., Jensen J.P., Sondergaard M., Lauridsen T., Pedersen L.J., Jensen L., 1997. Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia* 342/343 (Dev. Hydrobiol. 119): 151-164.
- Kabisch K., Hemmerling J., 1982. Ponds and pools – oases in the landscape. Edition, Leipzig, ss. 261. Kattner E., Schwartz.
- Krawczyk A., Sierka E., Woźniak G., Kompała-Bąba A., Błońska A., Pasierbiński A., Reimann M., Płonka D., 2017. Soil moisture as a factor that differentiates vegetation in post-mining waste heaps in terms of their development. In: Sierka E., Nadgórska-Socha A. (eds.). *Current problems of environmental protection, Assessment of the state of environment, Threats of the environment, Applied technologies in environmental protection*. University of Silesia, Katowice, Poland, p. 99 (<http://www.apos.us.edu.pl/Pub/monography.pdf>)
- Lundholm J.T., Richardson P.J., 2010. Habitat analogues for reconciliation ecology in urban and industrial environments. *Journal of Applied Ecology* 47: 966-975.
- Matuszkiewicz W., 2001. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. nauk. PWN. Warszawa, s. 536.
- Pełka-Gościniak J., 2006. Restoring nature in mining areas of the Silesian Upland (Poland). *Earth Surface Processes and Landforms* 31:1685-1691.
- Pełka-Gościniak J., Waga J.M., 2003. Wpływ eksploatacji węgla kamiennego na przyrodę w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym – analiza skutków ubytku masy z górotworu [w:] A.T. Jankowski, M. Rzętała (red.) *Problemy Geoekologiczne Górnośląsko-Ostrawskiego Regionu Przemysłowego*. WNoZ, UŚ, Sosnowiec: 117-124.
- Pietrzyba D., Chmura D., Pasierbiński A., Błońska A., Sierka E., Nowak T., Reimann M., Płonka D., Woźniak G., 2017. Biomass of selected vascular plant species occurring on post-mining waste heaps depending on habitat conditions. [in:] Sierka E., Nadgórska-Socha A. (eds.). *Current problems of environmental protection, Assessment of the state of environment, Threats of the environment, Applied technologies in environmental protection*. University of Silesia, Katowice, Poland, p. 29 (<http://www.apos.us.edu.pl/Pub/monography.pdf>).
- Polasky S., Tallis H., Reyers B., 2015. Setting the bar: standards for ecosystem services. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112: 7356-7361.



- Prach K., Řehounková K., Řehounek J., 2011. Restoration of postmining sites – overall comparison [in:] Řehounková K., Řehounek J., Prach K. (eds.) 2011. Near-natural restoration vs. technical reclamation of mining sites in the Czech Republic University of South Bohemia in České Budějovice: 85-88. <http://restoration-ecology.eu/CZ/data/uploads/Nearnatural-restoration.pdf> [dostęp: 10.06.2016].
- Prach K.; Pyšek P., Jarošík V., 2007. Climate and pH as determinants of vegetation succession in Central European man-made habitats. *Journal of Vegetation Science* 18: 701-710.
- Ramsar, 2010. Information Pack on Ecosystem Services. Ramsar, Gland.
- Ratyńska H., 2002. Wyspy środowiskowe jako element krajobrazu, próba typologii i zróżnicowanie szaty roślinnej [w:] J. Banaszak (red.) *Wyspy środowiskowe. Bioróżnorodność i próby typologii*. Wyd. Akademii Bydgoskiej im. K. Wielkiego, Bydgoszcz: 239-260
- Roberts L., Brower A., Kerr G., Lambert S., McWilliam W., Moore K., Quinn J., Simmons D., Thrush S., Townsend M., Blaschke P., Costanza R., Cullen R., Hughey K., Wratten S., 2015. The nature of wellbeing: How nature's ecosystem services contribute to the wellbeing of New Zealanders. Department of Conservation, New Zealand Government, Wellington, NZ. 145p.
- Rostański A., 2006. Spontaniczne kształtowanie się pokrywy roślinnej na zwałowiskach po górnictwie węgla kamiennego na Górnym Śląsku. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2006.
- Rostański A., Zhukov S., 2001. Comparison of the flora of mining spoil heaps of Upper Silesia (Poland) and Donetsk coal district (Ukraine). *Natura Silesiae Superioris, Supplement*: 67-77.
- Sierka E., 2002. Ekspansja *Carex brizoides* L. jako efekt antropogenicznych przemian lasów Wyżyny Śląskiej. *Człowiek i Środowisko* 7: 159-167.
- Sierka E., Orczewska A., 2001. Zdegenerowane grądy z *Carex brizoides* L. wybranych obszarów Wyżyny Śląskiej i Płaskowyżu Głubczyckiego. *Przemiany środowiska przyrodniczego Polski a jego funkcjonowanie*. Pod redakcją Krystyny German i Jarosława Balona. *Problemy Ekologii Krajobrazu* 10: 474-480.
- Sierka E., Stalmachová B., Molenda T., Chmura D., Pierzchała Ł., 2012. Environmental and socio-economic importance of mining subsidence reservoirs. *BEN-Technická Literatura, Praha*, 112 p.
- Sierka E., Wika S., Czerwińska A., 2007. Rola *Carex brizoides* L. w strukturze runa różnowiekowych lasów grądowych [w:] *Zagrożenia ekosystemów leśnych przez człowieka. Rozpoznanie-Monitoring-Przeciwdziałanie*. Mazur S., Tracz H. (red.) *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*. Rogów: 174-183.
- Sierka W., Sierka E., 2008. The Effect of Flooded Mine Subsidence on Thrips and Forest Biodiversity in the Silesian Upland of Southern Poland – A Case Study. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica* 43(1): 345-353.

- Stalmachová B., 1996. Fundamentals of the ecological regeneration of the industrial landscape. (In Czech). Phare, Vol. 38. VŠB – TU Ostrava.
- Stalmachová B., 2004. The importance of vegetation to the planning of mining landscape regeneration. In: Hardygora, Paszkowska, Sikora (eds.): Mine Planning and Equipment Selection. Taylor & Francis Group, London, 6: 863-870
- Stalmachová B., Sierka E. 2014. Managed succession in reclamation of postmining landscape, Technická univerzita v Košiciach, Slovakia.
- Stalmachová B., 1997. Watered depressions as ecological phenomena in regions affected by mining activities. In: B. Stalmachová (ed.): Proc. Mine Planning and Equipment Selection 1997. Balkema, Rotterdam: 979-984.
- Tokumoto I., Heilman J.L., Schwinning S., McInnes K.J., Litvak M.E., Morgan C.L.S., Kamps R.H., 2014. Small-scale variability in water storage and plant available water in shallow, rocky soils. *Plant and Soil*, 385, 1-2: 193-204.
- Ukalska-Jaruga A., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., 2015. Rola materii organicznej w procesach akumulacji trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO) w glebach. *Polish Journal of Agronomy* 20: 15-23.
- Wang Y.K., Fu B., Xu P., 2012. Evaluation the impact of earthquake on ecosystem services. *Procedia Environmental Sciences* 13: 954-966.
- Willis A.J., 1997. The ecosystem: an evolving concept viewed historically, *Functional Ecology* 11(2): 268-271.
- Woźniak G., Rostański A., Sierka E., Aschan G., Pfanz H., 2005. Diversity of spontaneous vegetation on post-industrial sites – importance in reclamation process [in:] Martens P.N. (ed.). *Sustainable Development Indicators in the Mineral Industry*. A.I.M.S., Verlag Gluckauf, Essen.
- Żylicz T., 2010. Wycena usług ekosystemów. *Przegląd wyników badań światowych*. *Ekonomia i Środowisko* 1(37): 31-45.

## Abstract

Biodiversity, mainly determines ecosystems functioning and services provided to the human. Water in the environment is a fundamental factor in the shaping of biodiversity in natural and urban-industrial areas. Water ecosystems of anthropogenic origin in places where large population of people lives, lead to increased biodiversity and thus contribute to the improvement of human well-being. It was found that, the increase of soil moisture on post-mining waste dumps, significantly reduces the percentage share of dominant plant species and increase the number of accompanying species. Biological diversity of anthropogenic reservoir are almost twice as high as compared to the bred commercial forest ecosystem. The value of ecosystem services, provided by the mining subsidence reservoirs for the human, is estimated at level of approximately  $9,815 \cdot \$ \cdot \text{ha} \cdot \text{year}^{-1}$ , ( $40,000 \text{ PLN} \cdot \text{ha} \cdot \text{year}^{-1}$ ).

**Key words:** water in the environment, biodiversity, ecosystem services, urban industrial areas

## NOWOCZESNE METODY MONITORINGU WÓD POWIERZCHNIOWYCH

### *NOVEL METHODS OF SURFACE WATER MONITORING*

*DAMIAN ABSALON*

*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Nauk o Ziemi*

#### **Streszczenie**

W rozdziale przedstawiono założenia i rodzaje monitoringu wód powierzchniowych. Oprócz klasycznych metod monitoringu zaprezentowano coraz częściej wykorzystywane metody oparte na nowoczesnych technologiach. Stwierdzono, że nowoczesne metody monitoringu mogą być remedium na niedoskonałości systemów „tradycyjnych” w przypadku wystąpienia hydrologicznych zjawisk ekstremalnych. Ich szersze wykorzystanie pozwoliłoby także na znacznie lepszy wybór punktów kontrolno-pomiarowych (monitoring patrolowy) oraz bardziej miarodajną ocenę stanu jednolitych części wód (monitoring ciągły). Okresowe wykonywanie monitoringu patrolowego byłoby także pomocne przy wykrywaniu najbardziej zagrożonych miejsc na terenie jednolitych części wód.

**Słowa kluczowe:** monitoring, wody powierzchniowe, rzeka, jezioro, jakość wody, pomiar

#### **Wprowadzenie**

Monitoring wg definicji Słownika języka polskiego PWN, to stała obserwacja i kontrola jakichś procesów lub zjawisk lub stały nadzór nad jakimś obiektem chronionym. Kluczowym słowem tej definicji jest „stały” – jak rozumieć stałą obserwację czy kontrolę wód oraz w jaki sposób wykorzystać współczesne możliwości techniczne i technologiczne do monitoringu wód powierzchniowych? W rozdziale oprócz założeń i rodzajów monitoringu zaprezentowano klasyczne oraz coraz częściej wchodzące do praktyki nowoczesne rozwiązania w zakresie monitoringu wód powierzchniowych.

## Monitoring wód powierzchniowych – założenia i rodzaje

Państwowy Monitoring Środowiska (PMS) w świetle ustawy Prawo ochrony środowiska jest systemem pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska oraz gromadzenia, przetwarzania i rozpowszechniania informacji o środowisku. Celem PMS jest wspomaganie działań na rzecz ochrony środowiska poprzez systematyczne informowanie organów administracji i społeczeństwa o jakości elementów przyrodniczych, dotrzymanie standardów jakości środowiska określonych przepisami oraz obszarach występowania przekroczeń tych standardów, a także o występujących zmianach jakości elementów przyrodniczych i przyczynach tych zmian, w tym powiązaniach przyczynowo skutkowych występujących po między emisjami i stanem elementów przyrodniczych.



**Ryc. 1.** Cele Państwowego Monitoringu Środowiska (PMS)

**Fig. 1.** The aims of the National Environmental Monitoring (NEM)

**Źródło/Source:** [www.gios.gov.pl](http://www.gios.gov.pl)

Monitoring jakości wód obejmuje:

- monitoring środowiska wodnego Morza Bałtyckiego,
- monitoring wód przejściowych i przybrzeżnych,
- monitoring osadów dennych w rzekach i jeziorach,
- monitoring jezior,
- monitoring rzek i zbiorników zaporowych,
- monitoring jakości wód podziemnych.

Przy ocenie stanu wód śródlądowych oceniamy następujące wskaźniki:

- elementy hydromorfologiczne – reżim hydrologiczny, ciągłość sieci hydrograficznej,
- elementy fizykochemiczne – warunki termiczne, natlenienie, zasolenie, zakwaszenie, substancje biogenne i specyficzne zanieczyszczenia syntetyczne i niesyntetyczne,
- elementy chemiczne – substancje priorytetowe: metale ciężkie, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne WWA, pestycydy chloroorganiczne,
- elementy biologiczne – obfitość, liczebność i skład gatunkowy.

Definicja poszczególnych rodzajów monitoringu, zakres badanych wskaźników, a także częstotliwość badań, regulowana jest przez rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 listopada 2013 roku (Dz. U. z 2013 r. poz. 1558). W świetle tego Rozporządzenia program monitoringu jest realizowany w czterech jego rodzajach:

- monitoring diagnostyczny,
- monitoring operacyjny,
- monitoring badawczy,
- monitoring obszarów chronionych.

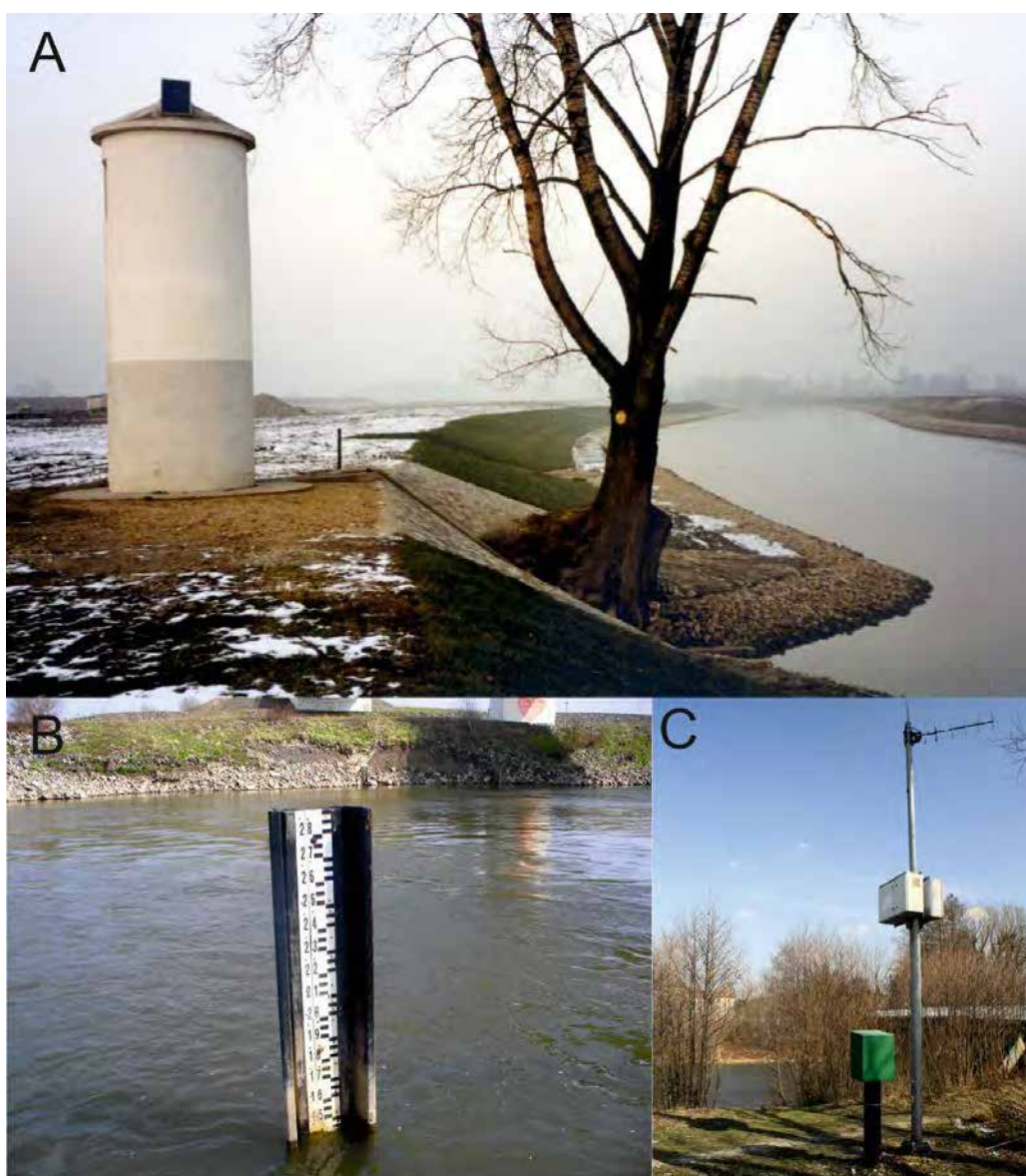
Monitoring diagnostyczny i operacyjny ma na celu dostarczenie informacji o stopniu spełnienia podstawowego celu środowiskowego Ramowej Dyrektywy Wodnej, czyli osiągnięcie przez wody co najmniej dobrego stanu czy też potencjału. Monitoring obszarów chronionych ma na celu określenie spełnienia przez jednolite części wód dodatkowych celów środowiskowych wynikających z charakteru obszaru chronionego. Monitoring obszarów chronionych obejmuje następujące rodzaje wody znajdujące się na następujących rodzajach obszarów (<http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod/>):

- zagrożonych eutrofizacją ze źródeł komunalnych,
- przeznaczonych do wykorzystania rekreacyjnego, w tym kąpieliskowego,
- wykorzystywanych do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia,
- położonych na obszarach sieci Natura 2000 i innych obszarach chronionych, których stan jest zależny od jakości wód powierzchniowych.



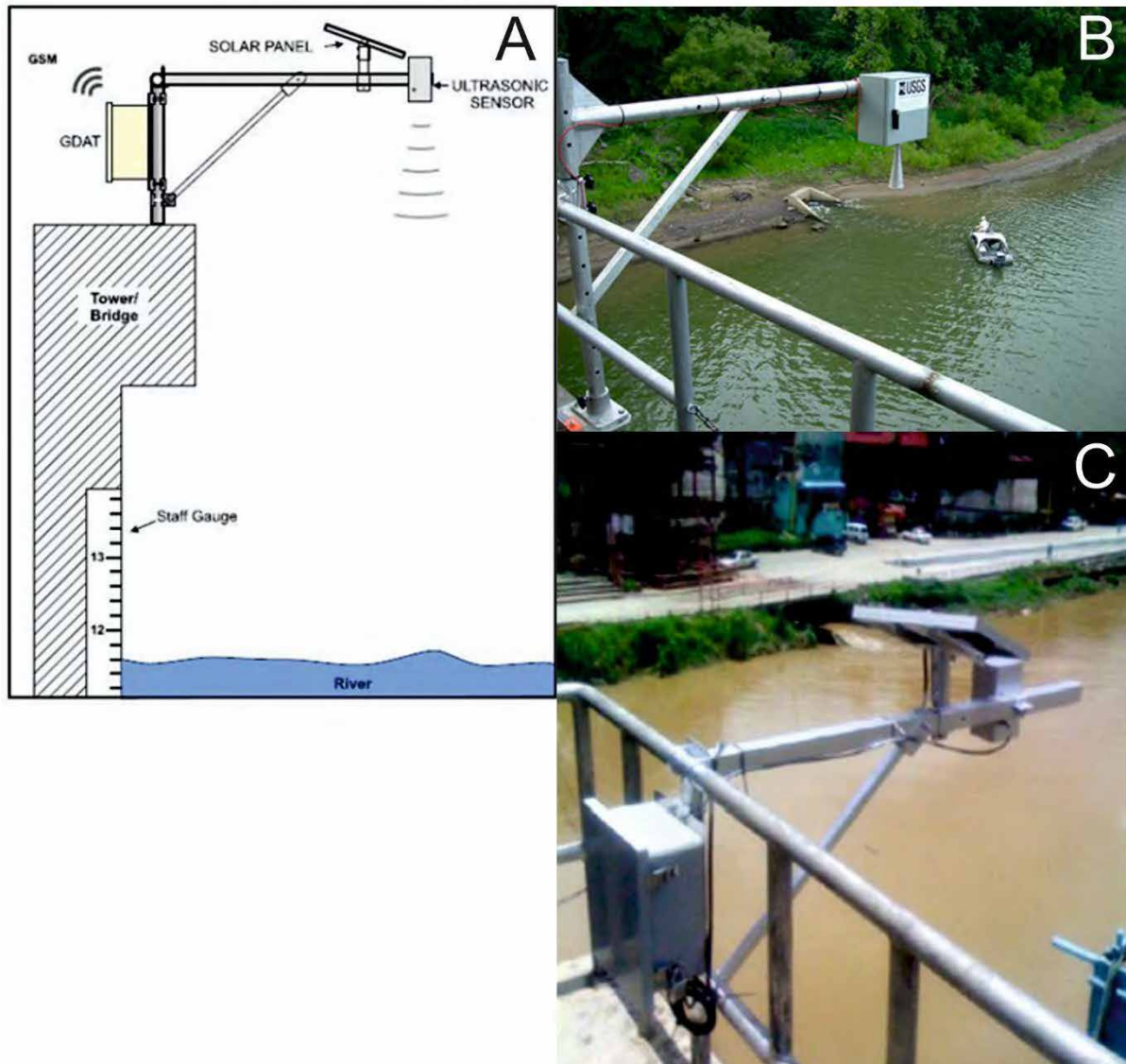
## Monitoring hydrologiczny – stany wody i przepływy

Niezbędnym elementem do oceny reżimu hydrologicznego wód płynących są pomiary hydrometryczne: stanów wody i przepływów. Systematyczne obserwacje stanów wody prowadzi w Polsce Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB) w wyznaczonych przekrojach cieków (Bajkiewicz-Grabowska i in., 1993). Stan wody, określany jako wzniesienie zwierciadła wody ponad umownie przyjęty poziom zwany zerem wodowskazu, możemy mierzyć za pomocą łaty wodowskazowej lub rejestrować za pomocą różnego rodzaju urządzeń elektronicznych (ryc. 2, ryc. 3).



**Ryc. 2.** Pomiary stanów wody w sieci obserwacyjnej IMGW-PIB: A – posterunek wodowskazowy Miedonia na rzece Odrze, B – łata wodowskazowa na posterunku Krzyżanowice na rzece Odrze, C – posterunek wodowskazowy Górki Wielkie na rzece Brennicy

**Fig. 2.** Measurements of water stage in the IMGW-PIB monitoring network: A – water gauging-site Miedonia on the Oder river, B – water level gauge on the Krzyżanowice site on the Oder river, C – water gauging-site Górki Wielkie on the Brennica river



**Ryc. 3.** Pomiary stanów wody z wykorzystaniem metod hydroakustycznych: A – schemat pomiaru, B, C – przykłady rozmieszczenia stacji pomiarowych

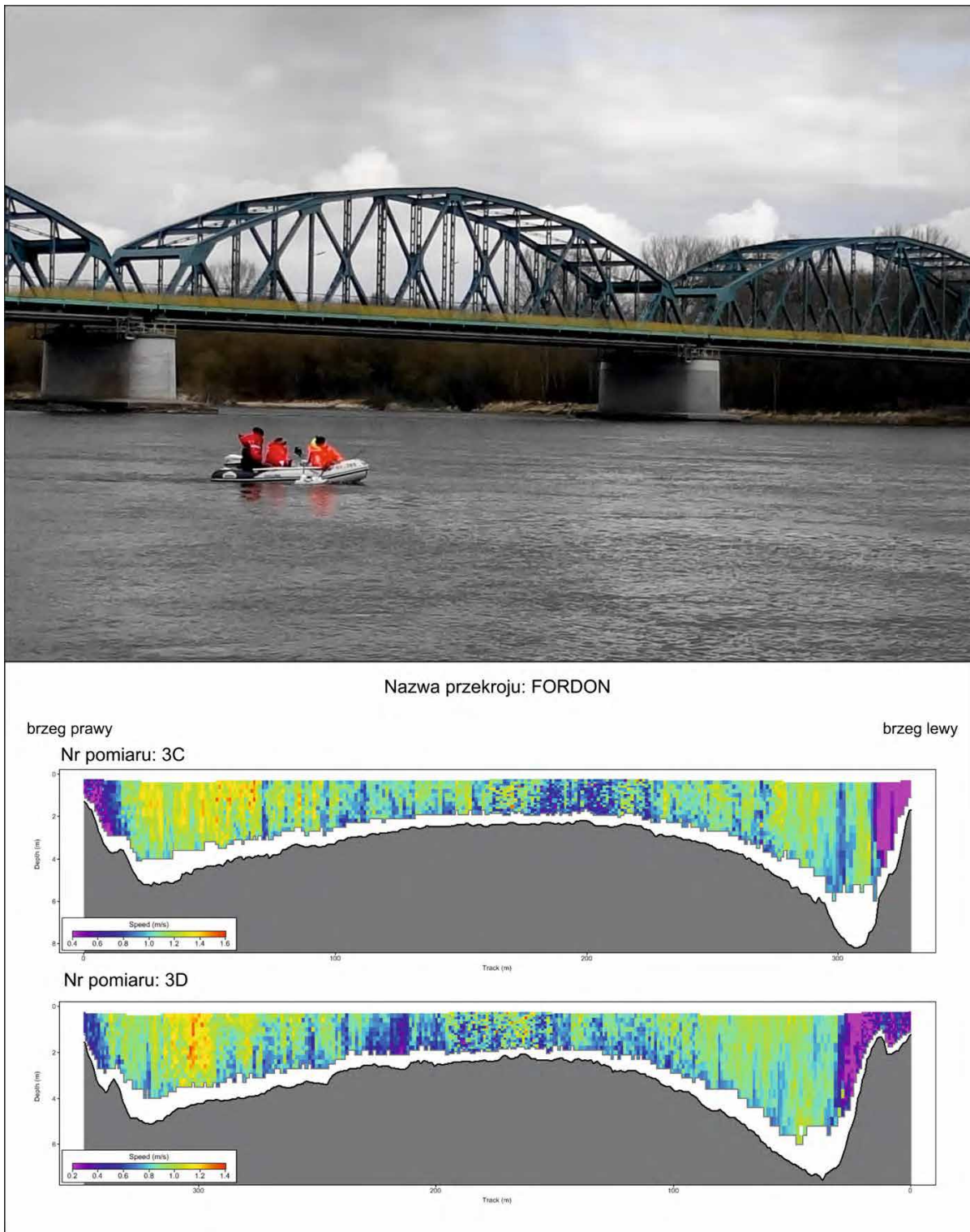
**Źródło:** opracowano na podstawie: [www.marikinacity.wordpress.com](http://www.marikinacity.wordpress.com) i [www.hkywater.org/river-and-creek-levels](http://www.hkywater.org/river-and-creek-levels)

**Fig. 3.** Measurements of water stage with hydroacoustic methods: A – measurement scheme, B, C – examples of gauging station distribution

**Source:** elaborated on the basis of: [www.marikinacity.wordpress.com](http://www.marikinacity.wordpress.com) and [www.hkywater.org/river-and-creek-levels](http://www.hkywater.org/river-and-creek-levels)

Chwilowe natężenia przepływu w rzekach są również systematycznie mierzone przez służby pomiarowe IMGW-PIB. W pomiarach wykorzystuje się najczęściej klasyczną metodę punktową (za pomocą młynka hydrometrycznego) oraz metody hydroakustyczne ADCP (Absalon i in., 2015) (ryc. 4).

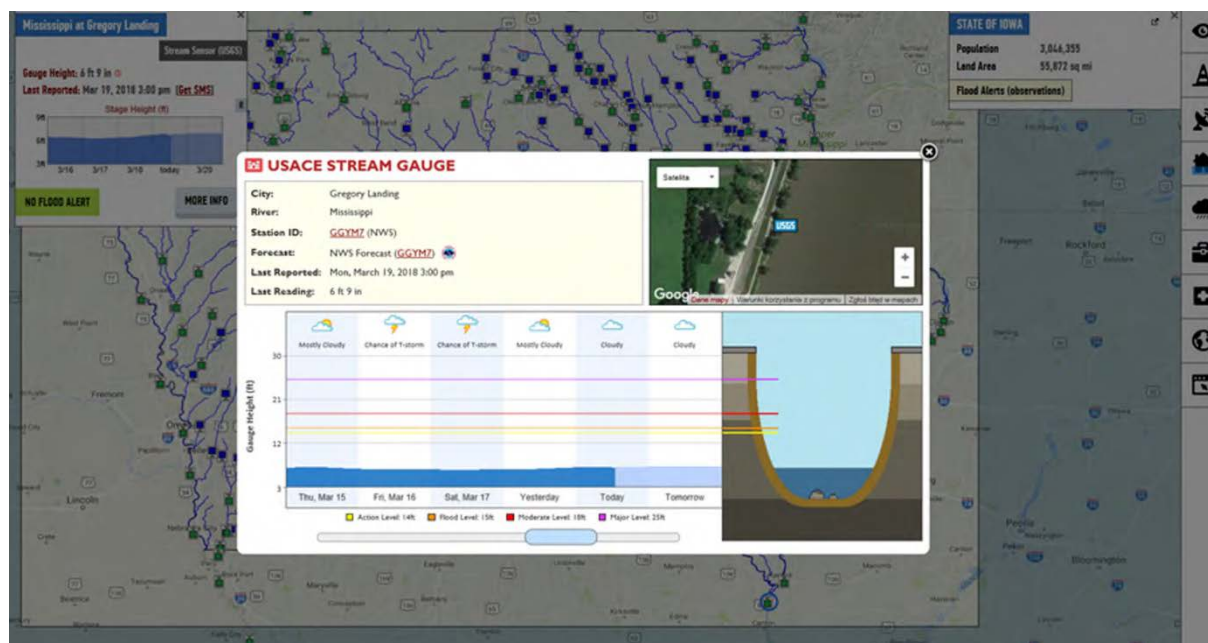




**Ryc. 4.** Pomiary przepływu w przekroju Fordon na rzece Wiśle metodą hydroakustyczną: na fotografii przebieg pomiaru, poniżej fotografii wykres rozkładu prędkości wody w przekroju

**Fig. 4.** Measurements of discharge in the Fordon gauging station on the Vistula with the hydroacoustic method: the photograph presents the course of measurements, below the photograph there is the chart of the distribution of water velocity in the station

Dostęp społeczeństwa do bieżących danych hydrologicznych realizowany jest najczęściej poprzez serwisy internetowe. W Polsce informacje te znajdziemy na portalu IMGW-PIB – [www.pogodynka.pl](http://www.pogodynka.pl). W różnych krajach funkcjonują mniej lub bardziej rozbudowane systemy informowania społeczeństwa o bieżącej sytuacji hydrologicznej i potencjalnych zagrożeniach wynikających z prognozowanych zjawisk ekstremalnych, np. powodzi, suszy (ryc. 5).



Ryc. 5. Przykład informacji podawanych w systemie ochrony przeciwpowodziowej stanu Iowa (USA)

Źródło: zrzuty ekranów ze strony internetowej [www.ifis.iowafloodcenter.org](http://www.ifis.iowafloodcenter.org)

Fig. 5. Example of information provided in the system of the Iowa Flood Center (USA)

Source: screenshots from the website [www.ifis.iowafloodcenter.org](http://www.ifis.iowafloodcenter.org)

## Monitoring jakości wody – klasyka a nowoczesność

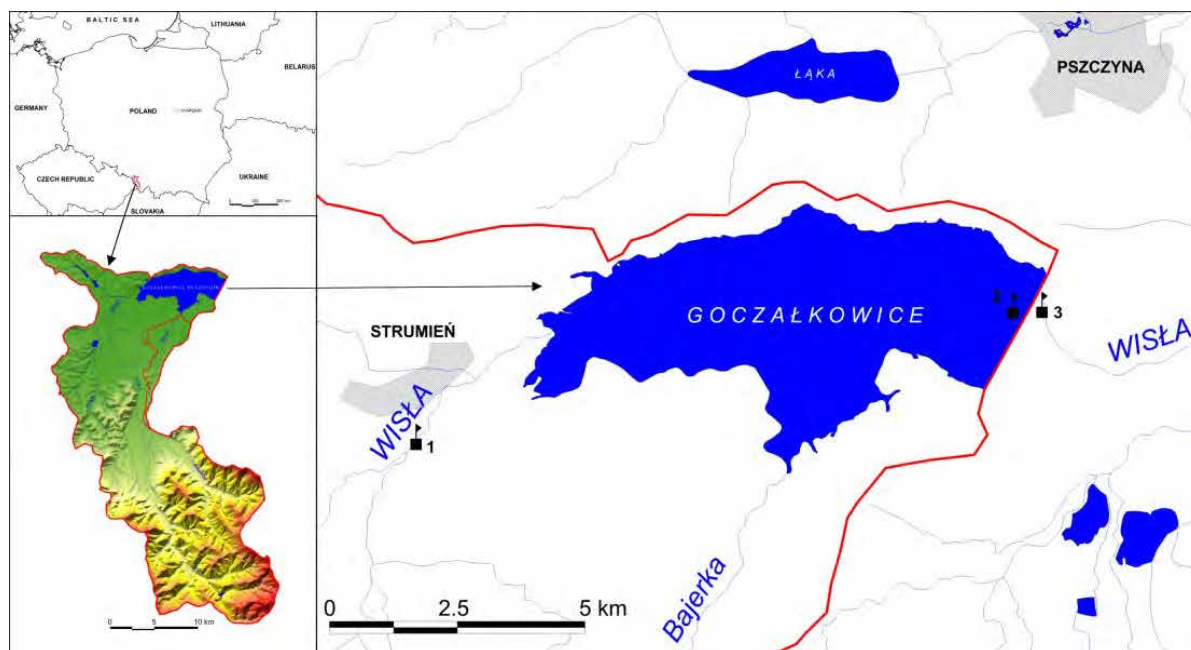
Tradycyjny monitoring jakości wody opiera się na poborze próbek wody z częstotliwością wynikającą z rodzaju prowadzonego monitoringu w punktach wyznaczonych w taki sposób, aby były reprezentatywne dla analizowanej jednolitej części wód. Skutkuje to najczęściej bardzo niesystematycznym opróbowaniem jednego tylko punktu, który ma odzwierciedlać stan całej jednolitej części wód. W świetle przeprowadzonych badań wydaje się, że jest to niewystarczające, a uzyskane wyniki są nie zawsze reprezentatywne. Tradycyjny monitoring, oparty na okresowych pomiarach, w specyficznych warunkach może prowadzić do błędnych wniosków na temat stanu fizycznego, chemicznego i ekologicznego wód (Absalon i in., 2014a i b). Ważne jest także dążenie do optymalizacji lokalizacji punktów monitoringowych (Ouyang, 2005).

Od 2010 roku prowadzony jest tzw. monitoring ciągły zbiornika goczałkowickiego, który odbywał się w ramach projektu ZiZoZap, a teraz wykonywany jest

w okresie jego trwałości. Monitoring ten polega na ciągłym pomiarze wybranych parametrów Wisły i zbiornika goczalkowickiego prowadzonym w 3 punktach (ryc. 6):

1. Wisła – jaz w Strumieniu – dopływ do zbiornika;
2. Pelagial zbiornika w najgłębszym punkcie, w dawnym korycie Wisły – ok. 400 m na południowy zachód od spustu dennego zapory;
3. Wisła – wypływ ze zbiornika.

Ciągły monitoring własności fizycznych i chemicznych wody wykonywany jest przy użyciu automatycznych sond wieloparametrowych DS5X firmy OTT Messtechnik GmbH umożliwiających pomiar: temperatury wody, tlenu rozpuszczonego, odczynu pH, potencjału redox, przewodnictwa elektrolitycznego właściwego, chlorofilu, mętności, azotanów, chlorków i siarczanów. Sondy posiadają system samoczyszczący, który zmywa zanieczyszczenia przylegające do elektrod przed każdym pomiarem, zapewniając maksymalną wiarygodność prowadzonych badań. Sonda na zbiorniku została zamocowana na pławie (boi), która dodatkowo realizuje pomiar podstawowych parametrów meteorologicznych. Posiada ona również autonomiczny system zasilania oparty o panele słoneczne. Transmisja danych z całego systemu prowadzona jest zdalnie dzięki modemom GSM-GPRS. Umożliwia to nie tylko natychmiastowy dostęp do gromadzonych pomiarów, ale także zdalną konfigurację wybranych parametrów.



**Ryc. 6.** Lokalizacja punktów pomiarowych monitoringu ciągłego parametrów fizycznych i chemicznych wód Wisły i zbiornika goczalkowickiego: 1 – rzeka Wisła, jaz w Strumieniu, 2 – zbiornik goczalkowicki – najgłębszy punkt, 3 – rzeka Wisła – wypływ ze zbiornika

**Fig. 6.** Location of measurement points of constant monitoring of physical and chemical parameters of water in the Vistula and the goczalkowicki reservoir : 1 – the Vistula river, weir in Strumień, 2 – the goczalkowicki reservoir – the deepest point, 3 – the Vistula river outflow from the reservoir

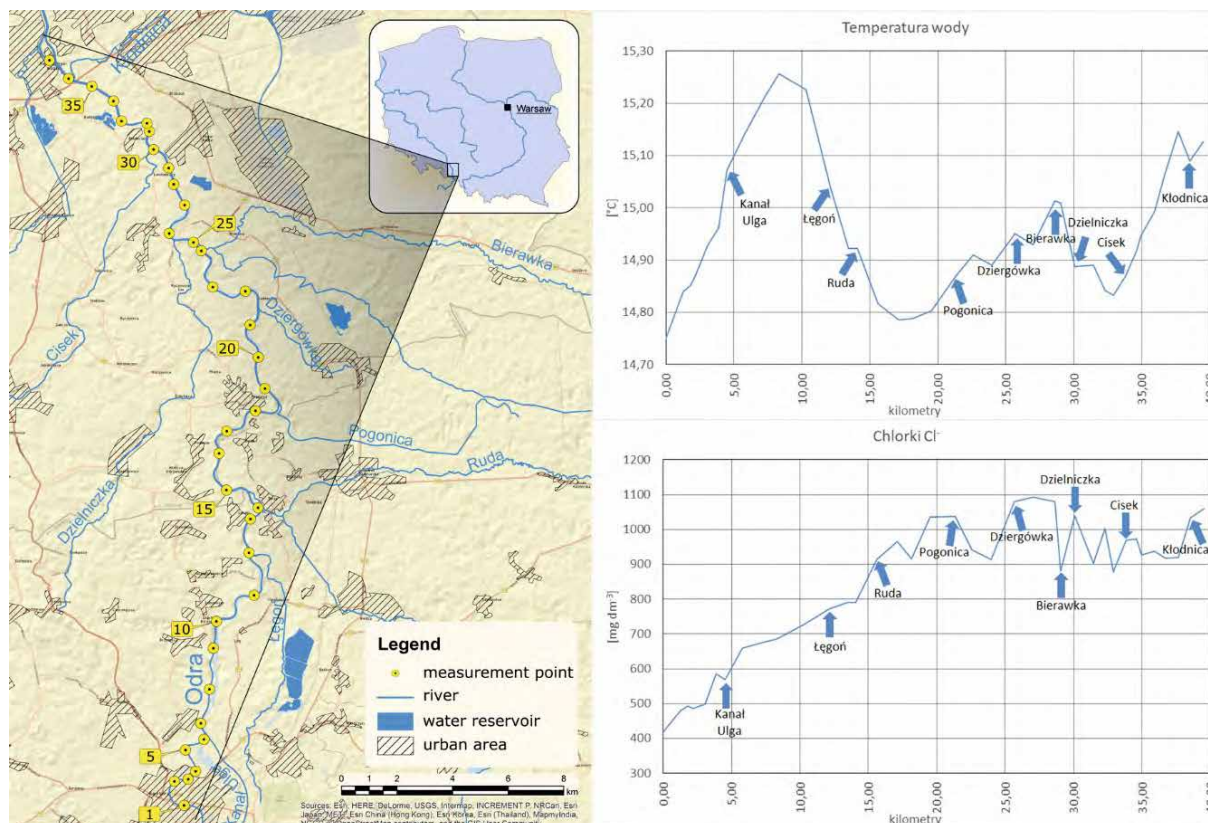
Monitoring zbiornika „Goczałkowice” jest jednym z niewielu tego typu projektów w Europie. Zakres mierzonych parametrów pozwala na monitoring badawczy (potamiczny i limniczny), ale dostarcza także szeregu informacji o jakości wód dopływających i wypływających ze zbiornika. Pozwala to na ocenę wpływu akwenu na jakość wód oraz dostarcza informacji meteorologicznych. Wszystkie badane parametry zasilają model funkcjonowania zbiornika.

Pomiary z wykorzystaniem sond automatycznych umożliwiają ciągły dostęp do wyników, niezależny od pogody, pory roku, dnia czy warunków meteorologicznych. Monitoring ciągły wyznacza trend, w jakim zmierza nowoczesna metodyka pomiarowa jakości wody (Muste et al., 2010). Wyniki uzyskane takimi metodami są zdecydowanie bardziej reprezentatywne w stosunku do pozyskiwanych w tradycyjny sposób. Klasyczny monitoring oparty na rzadkich pomiarach w cyklu rocznym w specyficznych warunkach może prowadzić do błędnych wniosków na temat stanu obiektu badań. Dotyczy to szczególnie wskaźników o dużej zmienności dobowej, takich jak: mętność, stężenie chlorofilu oraz tlenu rozpuszczonego.

Monitoring ciągły parametrów fizycznych i chemicznych wody pokazuje dynamikę obserwowanych wskaźników, nie tylko sezonową, lecz dobową. Poprawia to możliwości właściwej interpretacji otrzymywanych wartości i szybkość reakcji na zagrożenia, np. dostarczanie danych umożliwiających optymalizację pracy ujęć wody. Wyniki uzyskane z wyprzedzeniem z sond automatycznych dają stacji uzdatniania czas na reakcję, stosownie do sygnalizowanych zmian jakości wody.

W 2016 roku przeprowadzono eksperyment na rzece Odrze, na odcinku pomiędzy Raciborzem a Koźlem. Patrolowy monitoring własności fizycznych i chemicznych wody wykonywany był przy użyciu automatycznej sondy wieloparametrowej DS5X (HYDROLAB) firmy OTT Messtechnik GmbH umożliwiającej pomiar parametrów takich, jak: temperatura wody, tlen rozpuszczony, głębokość, odczyn pH, potencjał REDOX, przewodnictwo elektrolityczne właściwe, azotany i chlorki. Pomiary patrolowe wykonano z łodzi wyposażonej w precyzyjny odbiornik GPS we wrześniu 2016. Ogółem zmierzono po 10 parametrów w każdym z 37 punktów (ryc. 7). Stwierdzono, że monitoring patrolowy jest dobrym narzędziem do oceny rozmieszczenia punktów prowadzenia klasycznego monitoringu stacjonarnego. Szczególnie na obszarach o zróżnicowanej antropopresji, gdzie dopływy rzeki głównej są bardzo zróżnicowane pod względem hydrochemicznym. Z powodu tego zróżnicowania wyniki monitoringu operacyjnego, prowadzonego raz na kilka lat mogą być niemiarodajne, a prezentowany stan monitorowanych jednolitych części wód odbiegać od rzeczywistego. W dobie szybkiego rozwoju nowoczesnych technologii, a jednocześnie konieczności racjonalnego korzystania z zasobów wodnych lepszym rozwiązaniem byłby monitoring diagnostyczny prowadzony za pomocą pomiarów patrolowych, a następnie propozycja lokalizacji punktów monitoringu operacyjnego (Absalon et al., 2017).





**Ryc. 7.** Monitoring patrolowy przeprowadzony na rzece Odrze między Raciborzem a Koźlem w 2016 roku: na mapie pokazano rozmieszczenie punktów pomiarowych, a na wykresach przebieg przykładowych parametrów jakości wody

**Fig. 7.** Patrol monitoring on the Odra between Racibórz and Koźle in 2016: the map contains the distribution of measurement points and the charts present sample parameters of water quality

## Wnioski

Nowoczesne metody monitoringu mogą być remedium na niedoskonałości systemów „tradycyjnych”. W przypadku wystąpienia hydrologicznych zjawisk ekstremalnych funkcjonująca państwowa sieć monitoringu jest najczęściej niewystarczająca, a zbyt mała ilość posterunków kontroli parametrów ilościowych (stanu wody i przepływu) powoduje niedostatek informacji niepozwalający na właściwe zarządzanie sytuacją kryzysową. Wykorzystanie nowoczesnych metod pomiarowych umożliwia obecnie rozbudowę sieci pomiarowych, szczególnie na terenach, gdzie zjawiska ekstremalne rozwijają się szybko i częstokroć nieprzewidywalnie. Efektem takich działań będzie wzrost możliwości oceny skali i tempa rozwoju zjawiska, co z pewnością przełoży się na zmniejszenie negatywnych skutków (kosztów materialnych, społecznych i środowiskowych).

Obecny system monitoringu parametrów jakościowych jest niedoskonały zarówno ze względu na sposób zbierania danych, wybór miejsc kontroli oraz ich częstotliwość. Szersze wykorzystanie nowoczesnych metod monitoringu ciągłego pozwoliłoby na znacznie lepszą ocenę stanu jednolitych części wód, szczególnie tam, gdzie chodzi o bezpieczeństwo ludzi i koszty, np. w przypadku zbiorników wody

pitnej. Z kolei wykorzystanie metody monitoringu patrolowego pozwoliłoby na znacznie lepszy wybór punktów kontrolno-pomiarowych charakteryzujących stan jednolitych części wód, które następnie mogłyby być obserwowane w sposób „tradycyjny” lub „ciągły”. Okresowe wykonywanie monitoringu patrolowego byłoby także pomocne przy wykrywaniu najbardziej zagrożonych miejsc na terenie jednolitych części wód, tzw. „hot spots”.

## **Literatura**

- Absalon D., KostECKI M., Łaszczyca P., Matysik M., Ruman M., 2014a. Ciągły monitoring automatyczny a monitoring klasyczny – alternatywa czy dopełnienie metod oceny jakości wody, *Gospodarka Wodna*, 8: 296-299.
- Absalon D., Kryszczuk P., Rutkiewicz P., 2017. Changes in water quality along the course of a river – Classic monitoring versus patrol monitoring, *AIP Conference Proceedings* 1906, 170011.
- Absalon D., Kubiciel P., Matysik M., Ruman M., 2015. Nowoczesne metody pomiaru przepływu w rzekach [w:] D. Absalon, M. Matysik, M. Ruman (red.), *Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce wodnej*, Monografie Komisji Hydrologicznej PTG, t. 3, Komisja Hydrologiczna Polskiego Towarzystwa Geograficznego Polskie Towarzystwo Geograficzne, Oddział Katowicki, Sosnowiec.
- Absalon D., Ruman M., Matysik M., Koziół K., Polkowska Ż., 2014b. Innovative Solutions in Surface Water Quality Monitoring, *APCBEE Procedia* 10: 26-30.
- Bajkiewicz-Grabowska E., Magnuszewski A., Mikulski Z., 1993. *Hydrometria*, PWN, Warszawa: 313 s.
- Muste M., Kim D., Merwade V., 2010. Modern Digital Instruments and Techniques for Hydrodynamic and Morphologic Characterization of River Channels [w:] Church M., Biron P., Roy A.G. (red.) *Gravel bed rivers*, John Wiley & Sons Ltd.: 315-342.
- Ouyang Y., 2005. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis, *Water Research*, 39, 12: 2621-2635.
- [www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod](http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod)

## **Abstract**

The chapter presents the principles and types of surface water monitoring. Besides the classic monitoring methods it also discusses methods based on modern technologies, which are used more and more often. It has been established that novel monitoring methods may be the remedy for the imperfections of "traditional" systems in the case of occurrence of extreme hydrological phenomena. Their wider use would also enable a much better choice of control and measurement points (patrol monitoring) and a more reliable assessment of the condition of waterbodies (continuous monitoring). Periodic patrol monitoring would also be helpful in detecting the most endangered places in the area of waterbodies.

**Key words:** monitoring, surface water, river, lake, water quality, measurement



# CYFROWE MODELE ZBIORNIKÓW WODNYCH – NARZĘDZIE DO ZARZĄDZANIA WODAMI I EKOSYSTEMEM

## DIGITAL MODELS OF RESERVOIRS – A TOOL TO MANAGE WATERS AND ECOSYSTEM

BARTOSZ ŁOZOWSKI<sup>1</sup>, RAFAŁ ULAŃCZYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

<sup>2</sup>Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy

### Streszczenie

Analiza stanu wód oraz ekosystemów w jeziorach i w sztucznych zbiornikach wodnych, a także analiza potencjalnego wpływu różnych czynników na wody tych akwenów i ich ekosystemy, wymaga uwzględnienia szeregu procesów i relacji zachodzących w analizowanym środowisku. Procesy te wpływają na przepływ wody, jej skład chemiczny, właściwości fizyczne i w efekcie na ekosystemy wodne oraz od wody zależne. Analizy tych zjawisk muszą opierać się na uproszczonej reprezentacji lub abstrakcji rzeczywistości – czyli na modelu. Modele mogą mieć różną postać, od reprezentacji obiektu w umyśle osoby analizującej problem, poprzez modele fizyczne po modele matematyczne, rozwijane od lat 60. XX wieku. Modele zalecane są przez wiele organizacji międzynarodowych (np. ONZ) do stosowania w celu wspierania zarządzania zasobami wodnymi. W rozdziale wskazano przyczyny, które powodują, że modelowanie na potrzeby zarządzania wodami i ekosystemami wodnymi może stanowić kluczowe wsparcie dla ekspertów; opisano również różnorodność dostępnych narzędzi do modelowania. W rozdziale przedstawiono ponadto przykłady użycia trójwymiarowych modeli matematycznych w Polsce.

**Słowa kluczowe:** AEM3D, model matematyczny, Jezioro Paprocańskie, Łękuć Wielki, zbiornik Goczałkowice, zarządzanie zbiornikami

## Wprowadzenie

Obieg wody w przyrodzie jest jednym z najistotniejszych czynników kształtujących ekosystemy oraz warunki życia człowieka. Dostępność wody o odpowiedniej jakości jest z kolei kluczowym czynnikiem determinującym różnorodne aspekty rozwoju gospodarczego. Dlatego też liczne organizacje, mające wpływ na politykę międzynarodową, np. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO), Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Oświaty, Nauki i Kultury (UNESCO), Europejska Komisja Gospodarcza (UNECE), Program Narodów Zjednoczonych ds. Środowiska (UNEP), Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) i Globalne Partnerstwo dla Wody (GWP) podkreślają znaczenie działań na rzecz rozpoznania wpływu czynników naturalnych i działalności człowieka na zasoby wodne oraz działań na rzecz ochrony tych zasobów. Większość tych organizacji zwraca uwagę na potrzebę wsparcia, jakie może dać zastosowanie modelowania matematycznego dla oceny i prognozy jakości wód oraz do rozpoznania czynników kształtujących zasoby wodne, co w konsekwencji ma umożliwić odpowiednie gospodarowanie i ochronę zasobów wodnych (GWP, INBO, 2009; WWAP, 2009; UNEP, IWMI, 2011). Co więcej, wskazuje się, że pomimo długiej historii rozwijania narzędzi do modelowania matematycznego w dziedzinie hydrologii i ekologii wód, narzędzia te nie są rutynowo stosowane do zarządzania i planowania dotyczącego zasobów wodnych (GWP, 2013). W niniejszym artykule przybliżono pojęcie modelu, modelu matematycznego (ze szczególnym uwzględnieniem modeli stosowanych w hydrologii i ekologii wód), a także przedstawiono przykłady praktycznego wykorzystania w Polsce trójwymiarowych modeli hydrodynamiki i ekosystemów jezior i zbiorników wodnych.

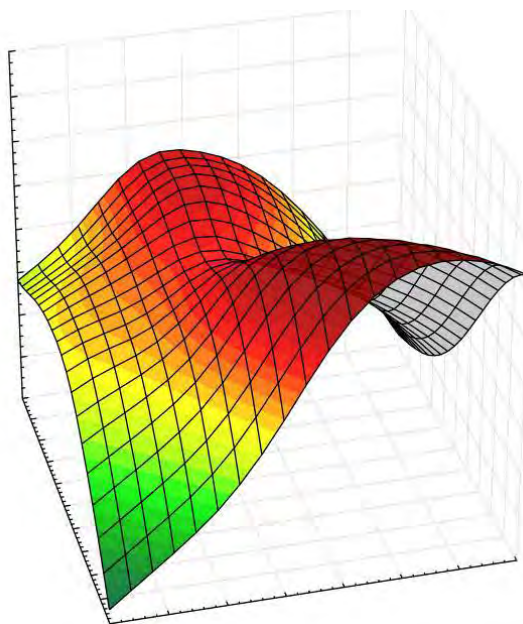
Od kiedy człowiek uzyskał możliwość użycia mowy i tworzenia obrazów graficznych, musiał nauczyć się kreować wyobrażenie o tej rzeczywistości, by móc ją opisać. Przywołać tu można, datowane na ok. 17 tys. lat, słynne rysunki z jaskiń w Lascaux przedstawiające m.in. sceny polowania, czy mniej znane, datowane na 40 tys. lat rysunki o podobnej tematyce, z indonezyjskich jaskiń. W obu przypadkach możemy mówić o kreowaniu wyobrażenia nt. procesu jakim jest polowanie.

Obecnie zdanie „uproszczona reprezentacja lub abstrakcja rzeczywistości” stanowi jedną z najprostszych i najbardziej treściwych definicji terminu model (Demeritt, Wainwright, 2005). Jeszcze inaczej model można określić jako system założeń, pojęć i zależności między nimi, pozwalający opisać (modelować) w przybliżony sposób jakiś aspekt rzeczywistości (Wikipedia.org). Można więc powiedzieć, sięgając do definicji terminu „model”, że każde wyobrażenie opisujące pewne aspekty obiektu czy zjawiska (niezależnie od formy prezentacji tego wyobrażenia) jest rodzajem modelu, a proces powstawania tego wyobrażenia – modelowaniem.

Powyższe rozumienie definicji terminu „model” dotyczy również różnych form opisu zbiorników wodnych, ich funkcjonowania w zakresie hydrologicznym, jak i ekosystemowym. Praktyka pokazuje, że najczęstszym modelem zbiorników

wodnych z jakim możemy się spotkać, jest model powstający w świadomości eksperta, który opisuje określony aspekt budowy lub funkcjonowania zbiornika wodnego. Model ten budowany jest w oparciu o pozyskane dane i relacje między nimi, wiedzę na temat innych zbiorników, zdobyte doświadczenie i (czego nie da się uniknąć) własne przypuszczenia i przeczucia, które mają różny poziom uzasadnienia i wiarygodności (w dużym stopniu poziom ten nie poddaje się łatwemu skwantyfikowaniu, a najczęściej jest to w ogóle niemożliwe).

Ekspert tworząc we własnej świadomości model przedmiotowego akwenu zaprzęga do pracy potężne narzędzie analityczne, jakim jest jego mózg. W uproszczeniu jest to sieć neuronowa składająca się z 16 miliardów komórek nerwowych znajdujących się w korze mózgowej, każda z tych komórek może łączyć się z kolejnymi tysiącami neuronów. Niestety narzędzie to nie jest zoptymalizowane do analizowania zależności między wieloma zmiennymi. A właśnie z takim typem analiz mamy do czynienia, podczas modelowania funkcjonowania zbiornika wodnego, szczególnie, gdy uwzględnimy jego ekosystem. Trudności związane z percepcją relacji zaledwie między trzema zmiennymi, ilustruje przykładowa, rzeczywista zależność między parametrami wody (fizycznym, chemicznym i biologicznym), w jednym ze zbiorników zaporowych (ryc. 1). Zależności między tymi parametrami wymyka się językowi opisowemu i wymagają użycia aparatu matematycznego. Należy podkreślić, że w analizach ekosystemowych występują zależności między wieloma parametrami (nierzadko kilkudziesięcioma). W wyniku badania relacji między nimi generowane są n-wymiarowe macierze. Próba uchwycenia tych zależności wyłącznie przy użyciu modelu stworzonego w świadomości eksperta skazana jest na porażkę.



**Ryc. 1.** Zależność między trzema zmiennymi stanowiącymi parametry wody (fizycznym, chemicznym i biologicznym) w jednym ze zbiorników zaporowych

*Fig. 1.* The relation between three variables constituting parameters of water (physical, chemical, biological) in one of the dam reservoirs

## **W jaki sposób wspomagać eksperta w badaniu zależności zachodzących w zbiorniku wodnym?**

Odpowiedzią na powyższe pytanie powinna być ponownie treść ukryta w terminie „model”. Tym razem nie chodzi jednak o model tworzony wyłącznie w świadomości eksperta, ale o jeden z dwóch typów modeli działających poza świadomością eksperta; modeli utworzonych w oparciu o zdefiniowane przez eksperta cele i zasilonych przez jego wiedzę oraz wiedzę twórców samego modelu. Mowa tu o modelu będącym fizycznym odwzorowaniem obiektu w określonej skali oraz o modelu tworzonym *in silico*, działającym jako program komputerowy. W każdym z tych przypadków dobrze działający model hydrodynamiczny i ekosystemowy zbiornika wodnego lub innego akwenu powinien odślaniać rzeczywiste relacje między poszczególnymi jego elementami. Dzięki takiemu modelowaniu można oczekiwać m.in. rozpoznania przyczyn zaobserwowanych niekorzystnych zjawisk, prześledzić związki poszczególnych jego części, ustalić źródła oddziaływań zewnętrznych, określić relacje między interesującymi parametrami, bądź analizować scenariusze potencjalnych zmian.

### **Model jako kopia obiektu wykonana w skali**

Wykonywanie modeli tworzonych jako kopia badanego akwenu lub budowli hydrotechnicznej w odpowiedniej skali jest dziś stosunkowo rzadkie. Wynika to z kosztowności i ilości czasu niezbędnego do wykonania takiego modelu, ograniczonej możliwości prowadzenia symulacji i wprowadzania zmian. Bardzo istotną wadą takiego modelu jest problem skalowalności. Wymiary liniowe obiektu, powierzchnia i objętość skalują się w różny sposób (odpowiednio do potęgi pierwszej, do kwadratu i do sześciastu). Modele takie stosowane były głównie przed skonstruowaniem wydajnych komputerów. Przykładem może być model warszawskiego koryta rzeki Wisły utworzony na potrzeby analizowania zrzutów podgrzanej wody z elektrowni w Kozienicach. Rozchodzenie się prądów podgrzanej wody było badane przy pomocy kamery termowizyjnej. O wykorzystaniu tego modelu wzmiankowano w Polskiej Kronice Filmowej nr 36/1978 (ryc. 2).

Współcześnie również tworzone są fizyczne modele akwenów jednak ich wykorzystanie jest marginalne i związane ze specyficznymi zastosowaniami. Przykładem może tu być model uszkodzonej zapory w Oroville (Kalifornia, USA). Zapora ta uległa poważnemu uszkodzeniu w lutym 2017 roku. Na Uniwersytecie Stanowym w Utah utworzono fizyczny model uszkodzonej zapory w celu zbadania jak efektywnie zablokować wypływ wody (ryc. 3).



**Ryc. 2.** Model warszawskiego koryta rzeki Wisły – zdjęcie z Polskiej Kroniki Filmowej nr 36/1978

*Fig. 2. The model of the Vistula River channel in Warsaw – a photo from a Polish Film Chronicle collection no 36/1978*

*Źródło/Source: [www.repozytorium.fn.org.pl](http://www.repozytorium.fn.org.pl)*



**Ryc. 3.** Zapora w Oroville (Kalifornia, USA); A – zdjęcie uszkodzonej zapory (Josh Edelson, [afp.com](http://afp.com)), B – zdjęcie modelu skonstruowanego na Uniwersytecie Stanowym w Utah

*Fig. 3. Oroville Dam (California, the USA); A – Oroville dam damage (Josh Edelson, [afp.com](http://afp.com)), B – a model constructed in the Utah State University*

*Źródło/Source: [www.uwrl.usu.edu](http://www.uwrl.usu.edu)*



## Model numeryczny

Drugi typ modeli – obecnie najczęściej stosowany, to model numeryczny. Współcześnie modele numeryczne są realizowane jako programy komputerowe, które można uruchamiać nawet na „domowych” komputerach, choć ze względu na liczbę koniecznych operacji zazwyczaj stosuje się w tym celu wydajne serwery i stacje robocze. Należy tu wskazać dwa podtypy modeli:

- modele hydrodynamiczne – modele rozwiązujące równania hydrodynamiczne określające ruchy wód, transport i mieszanie wszystkich symulowanych substancji uwzględniając istotne czynniki wpływające na ten ruch (np. wiatr, promieniowanie słoneczne, kształt dna, ruchy pionowe, termodynamikę, poziom piętrzenia);

- modele ekosystemowe – modele rozwiązujące skomplikowane równania reprezentujące procesy biogeochemiczne umożliwiając symulację jakości wody, m.in. obiegu tlenu, fosforu, azotu, krzemu i węgla (uwzględniając np. rozpuszczanie, wytrącanie, sedymentację, unoszenie z dna, utlenianie i mineralizację) oraz symulację biomasy organizmów wodnych (fitoplanktonu, zooplanktonu, ryb, bentosu, mięczaków, makrofitów i bakterii).

Początków modeli numerycznych należy upatrywać w 1925 roku gdy Streeter i Phelps w USA zaproponowali model zmienności stężenia tlenu w związku z biochemicznym zapotrzebowaniem na tlen (BOD) dla rzeki Ohio. Model ten został rozwinięty w latach 60. XX wieku, co możliwe było dzięki zastosowaniu ówczesnych komputerów. Model wykorzystywał liniowe równanie różniczkowe pierwszego rzędu, zaś do określenia przepływów wody relatywnie proste równania uwzględniające poziom wody, natężenie jej przepływu – tzw. model 1D przepływu.

Obecnie modele matematyczne wspierają bardziej złożone analizy hydrodynamiki, termodynamiki i ich wpływu na jakość wody oraz ekosystemy. Istnieją różnorodne modele, które opisują procesy fizyczne, wpływające na proces mieszania wody i transport ciepła, a także modele symulujące jednocześnie procesy fizyczne i (bio-)chemiczne. Jansen i in. (2015) raportuje na podstawie przeglądu literatury ponad 1500 tego typu narzędzi. Istnieje wiele modeli jednowymiarowych (np. CE-QUAL-R1, DYRESM, DUFLOW, GLM, GOTM, LIMNMOD, MINLAKE, Mylake, PROTECH, SIMSTRAT) stosowanych powszechnie, głównie do analizy procesu mieszania oraz jakości wody w pionowej kolumnie (Jansen i in., 2015). Modele te często są podstawą dla modeli dwuwymiarowych, takich jak CE-QUAL-W2, które mogą być używane do symulacji procesów zachodzących wzdłuż cieków lub wąskich zbiorników wodnych. Modele 2D wykorzystywać mogą informacje o batymetrii (dane określające ukształtowanie dna i głębokość), umożliwiając modelowanie takich zjawisk jak np. powódź, symulując wartości parametrów dotyczą m.in. dynamiki i kierunku przepływu mas wody. W modelach dwuwymiarowych zakłada się jednak, że zmienność analizowanych zmiennych, np. temperatury i jakości wody w przekrojach poziomych nie jest istotna, co jest znacznym

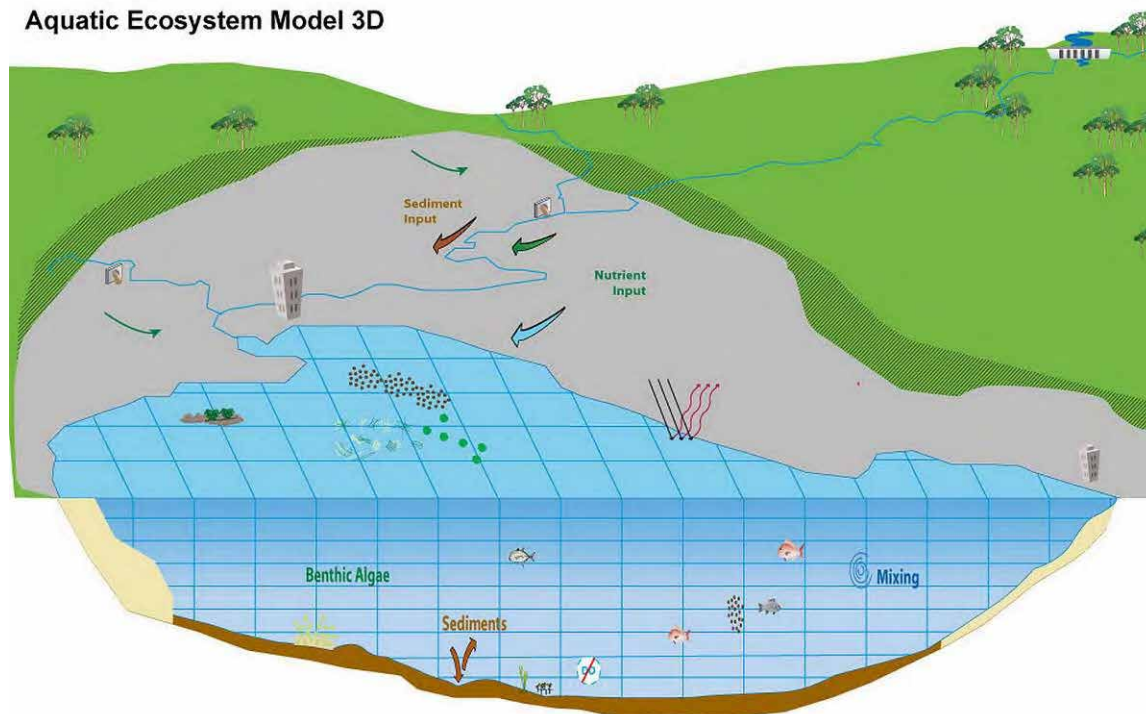
ograniczeniem podczas analizy lokalnych zjawisk biochemicznych i biologicznych, np. zakwitów glonów (Romero et al., 2004; Lee et al., 2013). Najbardziej zaawansowane narzędzia stanowią modele trójwymiarowe – 3D (np. AEM3D, ELCOM-CAEDYM, GEMSS, GETM) lub systemy, w których możliwy jest wybór ilości analizowanych wymiarów odpowiednio do celu aplikacji modelu (np. Delft3D, EFDC, WASP) (Jansen i in., 2015). Modele 3D obrazują zmiany wielu parametrów (nawet kilkudziesięciu) w całej objętości wody, a większość równań ma charakter logistyczny lub wykładniczy i powiązana jest dużą ilością współzależności. Sam zbiornik podzielony jest na sześciiany (bądź wieloboki) o określonej objętości, w których wyliczane są parametry hydrodynamiczne i jeśli model na to pozwala ekosystemowe. Ocena zalet i wad poszczególnych modeli i ich typów była przedmiotem wielu prac naukowych, np. Saloranta i in. (2004), Gao i Li (2014), Jansen i in. (2015).

Przykładem modelu 3D jest program AEM3D (Aquatic Ecosystem Model), będący modelem ekosystemów wodnych zintegrowanym z modelem hydrodynamicznym. AEM3D stanowi rozwinięcie dwóch modeli: ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) i CAEDYM (Computation Aquatic Ecosystem Dynamics Model) opracowanych przez Centre for Water Research (CWR) – jednostki podległej Uniwersytetowi Zachodniej Australii (University of Western Australia). Aktualnie prace nad rozwijaniem modelu kontynuowane są przez firmę HydroNumerics (<http://www.hydronumerics.com.au>). Model AEM3D pozwala na symulację przepływu wody; temperatury i gęstości (z uwzględnieniem stratyfikacji); cyklu obiegu węgla, azotu, fosforu, krzemionki, tlenu rozpuszczonego; kilku klas wielkości zawiesin nieorganicznych; dynamiki bakterii, fitoplanktonu, zooplanktonu, ryb, makroalg; dodatkowych parametrów fizykochemicznych, jak pH, materia organiczna, stężenie wybranych jonów i metali (m.in. Fe, Mn, S, Al, Zn, Cd) (Hipsey i in., 2012; Hodges, Dallimore, 2013; Hodges, Dallimore, 2016). Konceptualny schemat tego modelu został przedstawiony na ryc. 4. Model działa z krokiem czasowym, krótszym od jednej doby. Krok ten jest uzależniony od rozdzielczości przestrzennej modelu, a zależność ta wynika z warunku CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), będącego matematycznym warunkiem zbieżności numerycznych metod rozwiązywania równań różniczkowych opisujących propagację fal i stanowiącego kryterium stabilności modelu (Hodges, Dallimore, 2013).



## AEM3D

### Aquatic Ecosystem Model 3D



Symbols courtesy of the Integration and Application Network, University of Maryland Center for Environmental Science ([ian.umces.edu/symbols/](http://ian.umces.edu/symbols/)).

Ryc. 4. Konceptualny schemat modelu AEM3D

Fig. 4. A conceptual scheme of AEM3D model

Źródło/Source: [www.hydronumerics.com.au/software/aquatic-ecosystem-model-3d](http://www.hydronumerics.com.au/software/aquatic-ecosystem-model-3d)

### Przykłady zastosowania modeli 3D

Poniżej przedstawione zostaną trzy przykłady użycia modelu AEM3D oraz jego wcześniejszej wersji w postaci powiązanych modeli ELCOM i CAEDYM. Przykłady wybrane zostały w taki sposób aby ukazać różnorodność aplikacji i obejmują one:

- model zbiornika Goczałkowice opracowany w ramach pracy badawczej (projekt ZiZOZap „Zintegrowany system wspomagający zarządzaniem i ochroną zbiornika zaporowego” finansowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka);
- model Jeziora Paprocańskiego, opracowany w ramach prac na rzecz Miasta Tychy, będącej częścią programu rekultywacji zbiornika,
- model jeziora Łękuk Wielki, które jest częścią jednej z jedenastu zlewni badawczych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Polsce.

Ogólna charakterystyka przykładowych akwenów i modeli przedstawiona została w tabeli poniżej (tab. 1).

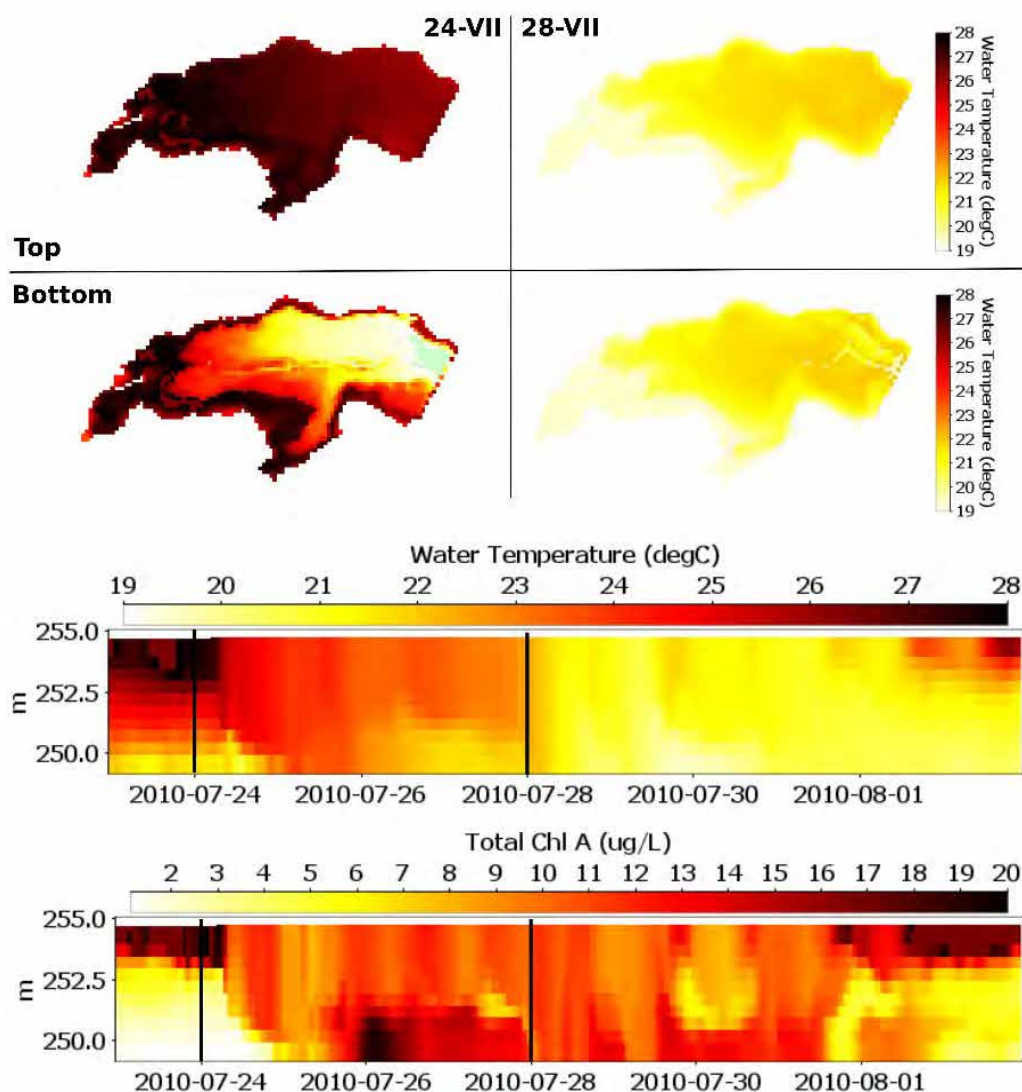
**Tabela 1.** Podstawowa charakterystyka przykładowych akwenów i zastosowanych modeli  
**Table 1.** The basic characteristic of reservoirs and applied models

	<b>Zbiornik Goczałkowice</b>	<b>Jezioro Paprocańskie</b>	<b>Jezioro Łękek Wielki</b>
Powierzchnia akwenu (km <sup>2</sup> )	32	1,051	0,213
Głębokość maksymalna (m)	13	2,51	12,5
Głębokość średnia (m)	5,5	1,34	5,2
Powierzchnia zlewni (km <sup>2</sup> )	530	130,6 (rzeczywista 17,94)	13,2
Cel użycia modelu	1) prezentacja stanu zbiornika w czasie rzeczywistym; 2) analiza scenariuszy gospodarowania zbiornikiem i wpływu innych czynników	1) rozpoznanie zmienności przepływu i jakości wody w czasie; 2) ocena skutków zwiększenia dopływu wody do zbiornika; 3) ocena skutków utworzenia bariery ograniczającej dopływ wody do kąpieliska	1) identyfikacja przyczyn oraz prognozowanie zmian zachodzących w środowisku jako wsparcie dla Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Polsce
Rozdzielczość pozioma modelu	100 (20*)	10	10
Liczba warstw i ich miąższość w modelu	20 (od 0,5 do 1,25 m)	12 (od 0,1 do 1,3 m)	21 (od 0,25 do 1 m)
Liczba komórek obliczeniowych	41 683 (844 966*)	14 422	33 622

\* dla analiz nieuwzględniających przemian biochemicznych

Pierwszym z przykładów jest model opracowany dla zbiornika Goczałkowice, będącego największym zbiornikiem zaporowym w południowej Polsce i wchodzącego w skład systemu, który zaopatruje w wodę do spożycia około 3,4 miliona ludzi. Model zbiornika uwzględnia hydrodynamikę i termodynamikę zbiornika liczone w oparciu o dane dotyczące m.in.: natężenia i temperatury dopływu dwóch rzek (Wisła i Bajerka), dopływu wody z pięciu przepompowni wód z obszarów depresyjnych w bezpośredniej zlewni zbiornika, a także warunków meteorologicznych, obejmujących temperaturę, prędkości i kierunek wiatru, ciśnienie atmosferyczne, natężenie promieniowania słonecznego oraz zachmurzenie. Ponadto model uwzględnia przemiany biochemiczne obejmujące obieg biogenów, tlenu, krzemionki, dwóch frakcji osadów, czterech grup fitoplanktonu, trzech grup zooplanktonu i trzech grup ryb.

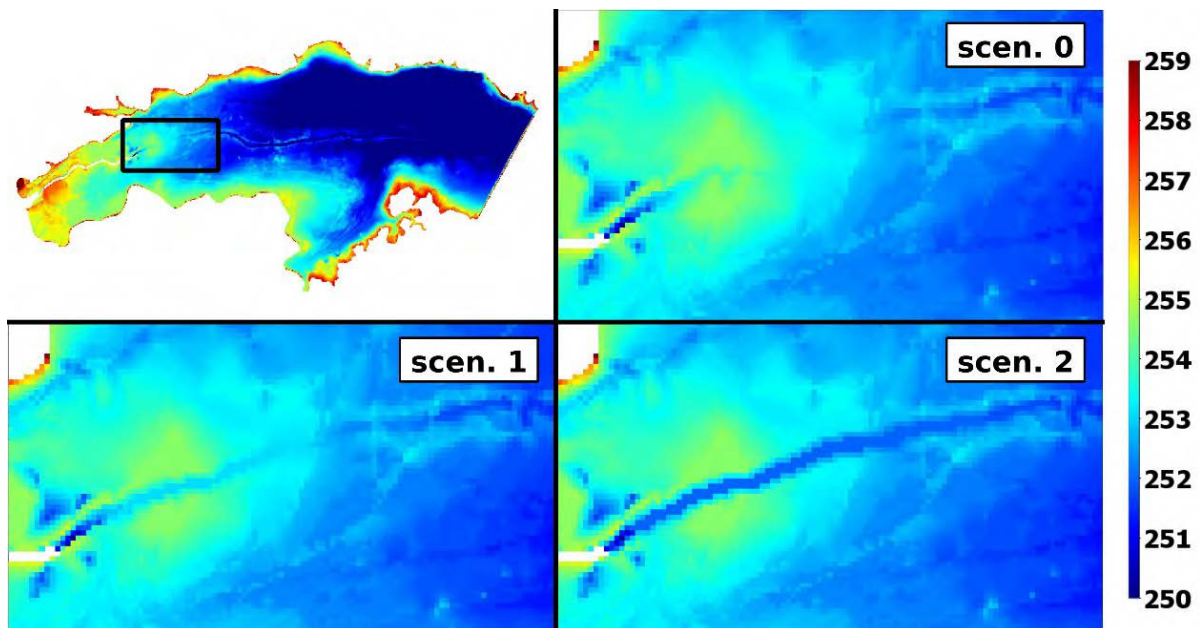
Model weryfikowano na podstawie danych dotyczących temperatury wody w profilu pionowym oraz stężenia chlorofilu. Kalibracja modelu pozwoliła uzyskać wartości 0,96 i 0,95 odpowiednio dla współczynnika determinacji ( $R^2$ ) i współczynnika Nasha-Sutcliffe'a (NS) w oparciu o godzinowe pomiary temperatury na 9 głębokościach z okresu pięciu miesięcy. Weryfikacja stężenia chlorofilu  $a$  w oparciu o godzinowe dane z tego samego okresu, ale z jednej głębokości, dały rezultaty na poziomie  $R^2=0,52$  i  $NS=0,51$ . Przykład wizualizacji wyników, które model generował w sposób automatyczny z dobową częstotliwością przedstawiono na rysunku (ryc. 5).



**Ryc. 5.** Przykład wizualizacji obliczeń modelu ELCOM i CAEDYM dla zbiornika Goczałkowice: mapy rozkładu temperatury wody przy powierzchni i przy dnie dla 24 i 28 lipca 2010 roku oraz profile temperatury i stężenia chlorofilu  $a$  dla punktu zlokalizowanego przy upuszcie dennym zbiornika

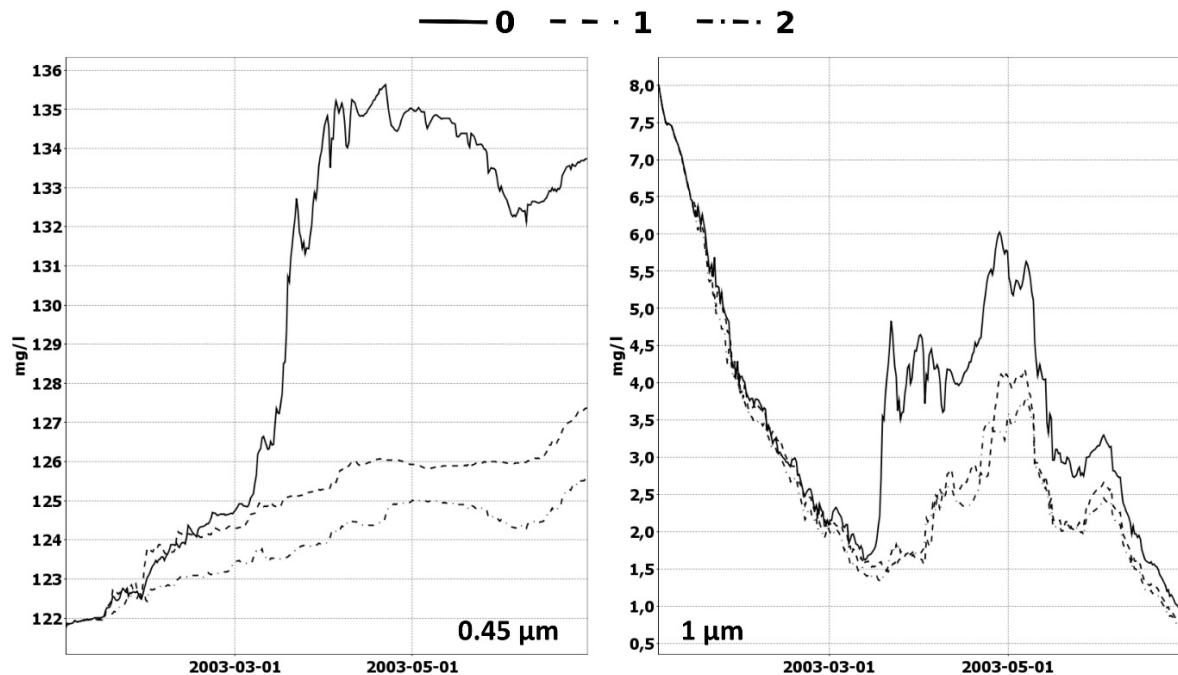
**Fig. 5.** A sample visualisation of calculation of ELCOM and CAEDYM models for the Goczałkowice reservoir: maps of the temperature distribution in the top and bottom water layer on the 24th and 28th July 2010, and the temperature and chlorophyll in a water profile located near the reservoir outlet

Powyższy model z rozdzielczością przestrzenną zwiększoną do 20 metrów został użyty do szczegółowych analiz przepływu wody oraz transportu osadów i substancji rozpuszczonych. Jedną z analiz była ocena wpływu pogłębienia dna zbiornika poniżej ujścia Wisły. Analiza uwzględniała 3 scenariusze: 0) stan aktualny; 1) pogłębienie dna do rzędnej 253,10 m n.p.m. (długość wykopu 700 m, głębokość maksymalna 1,50 m, głębokość średnia 0,46 m); 2) pogłębienie dna do rzędnej 252,00 m n.p.m. (długość wykopu 1470 m, głębokość maksymalna 3,40 m, głębokość średnia 0,87 m). W obu przypadkach szerokość głównego wykopu wynosiła 40 m, a dodatkowo wykop obejmował dwudziestometrowe pasy obniżenia dna w celu utrzymania stateczności skarp (ryc. 6). Celem analiz scenariuszy była odpowiedź na pytanie, czy pogłębienie dna i tym samym ułatwienie przepływu wody w kierunku wschodnim spowodować może ryzyko szybszego dotarcia cząstek o różnej średnicy oraz zanieczyszczeń do strefy ujęcia wód, zlokalizowanego w północno-wschodniej części zbiornika. Analizowano osady o średnicy ziaren 0,45 i 1  $\mu\text{m}$  oraz wirtualny znacznik mający cechy niereaktywnej substancji rozpuszczonej. Dla wszystkich trzech typów markerów, analizy wykazały, że wykonanie pogłębienia dna nie tylko nie spowoduje szybszego dotarcia zanieczyszczeń do strefy, z której ujmowana jest woda, ale nawet w przypadku osadów obniży stężenie w obszarze ujęcia w wyniku zintensyfikowania procesu mieszania wody w zbiorniku (ryc. 7).



Ryc. 6. Scenariusze pogłębienia dna zbiornika Goczałkowice, analizowane przy użyciu modelu

Fig. 6. Scenarios of dredging of bottom sediments in the Goczałkowice reservoir, analysed using the model



**Ryc. 7.** Symulowane stężenia osadów o średnicy 0,45 i 1 µm w dopływie do ujęcia na terenie zbiornika Goczałkowice: wyniki dla stanu aktualnego (scenariusz 0) oraz dla dwóch scenariuszy pogłębienia dna zbiornika (scenariusz 1 i 2)

**Fig. 7.** A simulation of the 0,45 and 1µm-diameter sediments concentration in the inflow to the water intake of Goczałkowice reservoir. The results apply to the actual condition (scenario 0) and to two scenarios of the dredging of sediments

Drugi z omawianych przykładów dotyczy Jeziora Paprocańskiego, które było przedmiotem programu rekultywacji wykonanego na zlecenie Urzędu Miasta Tychy. Celem programu było przygotowanie propozycji niezbędnych prac rekultywacyjnych i takich działań ochronnych, które doprowadzą do uzyskania i utrzymania dobrego stanu wód. Obecnie jakość wód, pomimo stale podejmowanych przez władze miasta prób jej poprawy, stanowi ograniczenie rozwoju rekreacji, sportów wodnych i zorganizowanej turystyki. W ramach wspomnianej pracy, modele ELCOM i CAEDYM użyte zostały w celu: 1) rozpoznania zmienności przepływu i jakości wody w czasie; 2) oceny skutków zwiększenia dopływu wody do zbiornika poprzez transfer wody ze zlewni nie należących do aktualnego obszaru zasilania zbiornika oraz 3) oceny skutków utworzenia bariery ograniczającej dopływ wody do kąpieliska we wschodniej części basenu. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że aktualna zlewnia Jeziora Paprocańskiego stanowi jedynie niespełna 18% zlewni zasilającej zbiornik do lat 20. XIX wieku, co może tłumaczyć okresowe deficyty wody w akwenu. Za pomocą modelu analizowano 2 scenariusze częściowego odtworzenia zlewni zbiornika: 1) scenariusz, w którym poza aktualnym dopływem do zbiornika zakłada się transfer wody ze zlewni rzeki Gostyni zamkniętej przekrojem powyżej ujścia Rowu S1 (potoku Kanar), bez uwzględnienia

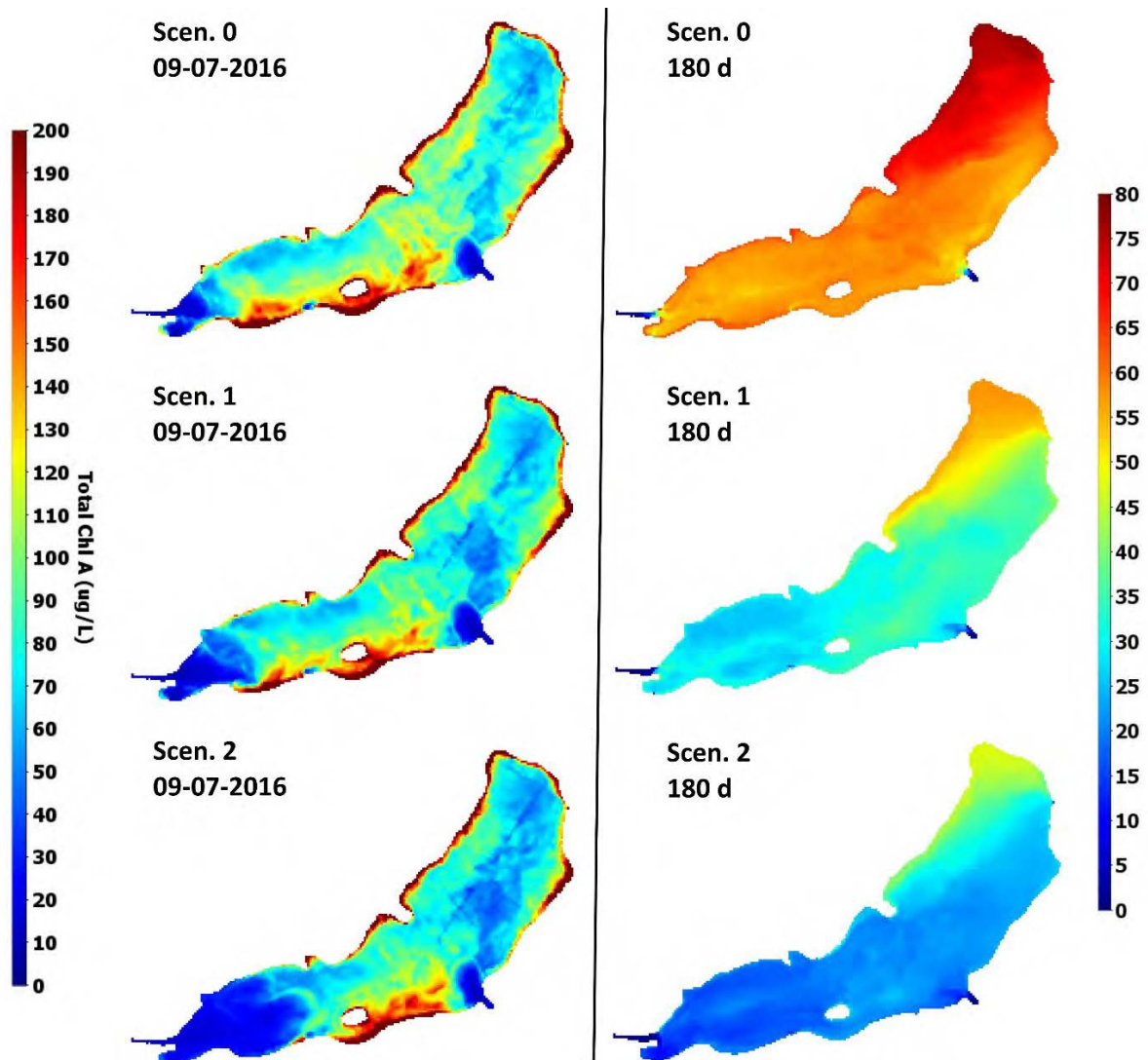


przepływu charakterystycznego dla okresów bezdeszczowych oraz 2) scenariusz, w którym dodatkowo zakłada się transfer do zbiornika całości wody płynącej Potokiem Żwakowskim do Gostyni.

Obliczenia stężenia chlorofilu *a* pozwoliły na identyfikację miejsc, w których stężenie to przekracza wartość 200 µg/l wskazując na zakwity fitoplanktonu. Jak wskazują wyniki symulacji zwiększenie dopływu wody do zbiornika powodować powinno zwiększenie intensywności mieszania się wód oraz szybszy przepływ wody przez zbiornik, czego konsekwencją jest spadek stężenia chlorofilu oraz zmniejszenie liczby miejsc, w których stężenie chlorofilu jest wyraźnie wyższe od wartości średniej dla zbiornika (ryc. 8). Należy jednak zwrócić uwagę, na fakt, że doprowadzenie większej ilości wód do zbiornika niesie też ryzyko dopływu większego ładunku biogenów w sytuacji obfitych opadów i nieodpowiedniego gospodarowania zlewnią.

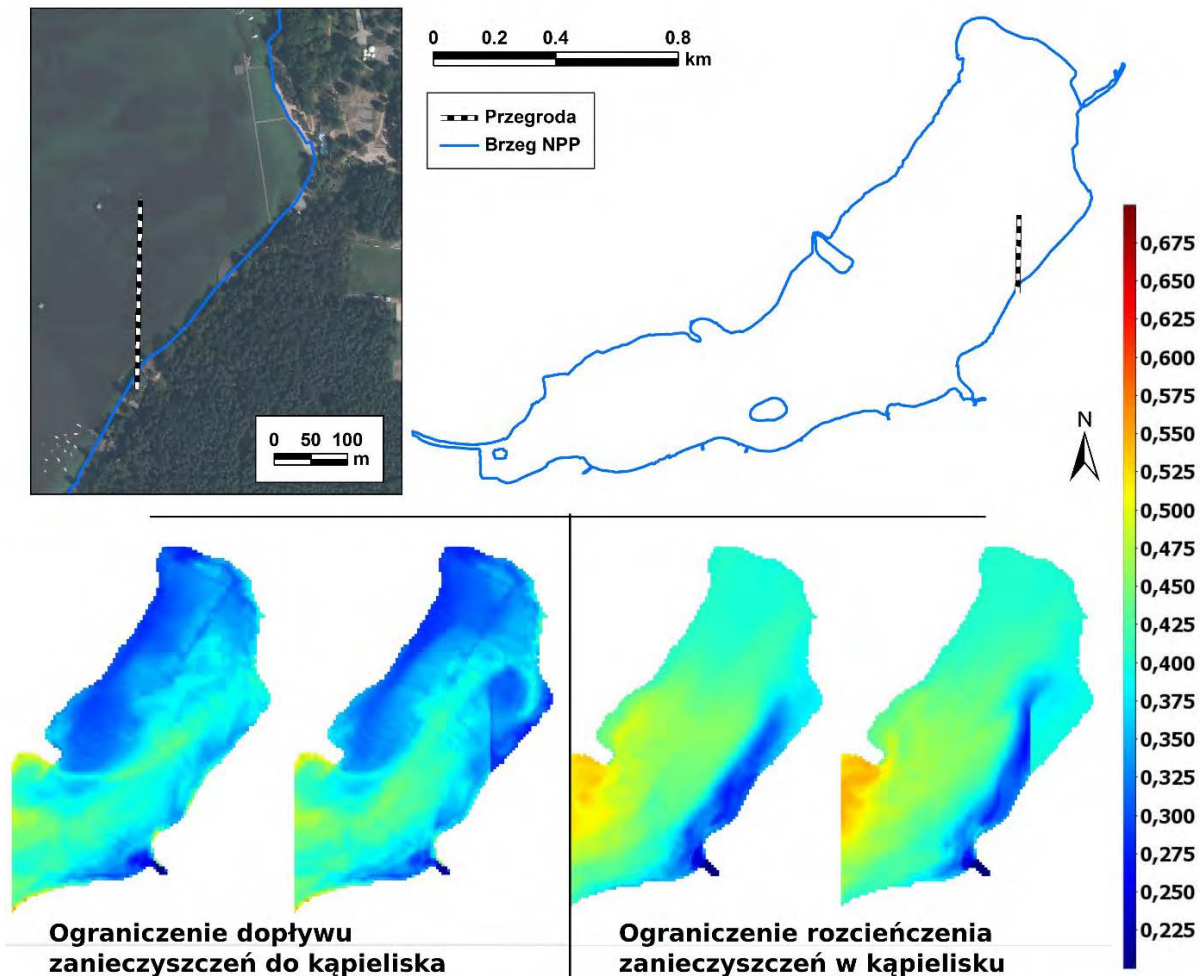
Na podstawie wyników uzyskanych z modelu określono również wpływ częściowego odtworzenia zlewni zbiornika na czas retencji wody, definiowany tu jako okres, w którym woda po dotarciu do zbiornika przemieszcza się w nim zanim dotrze do miejsca wypływu. Szacowany czas zatrzymania wody w zbiorniku dla stanu aktualnego wynosi około 60 dni w części wschodniej łącznie z obszarem kąpieliska oraz 77 dni w części północnej, gdzie wartość jest najwyższa dla całego zbiornika. Zwiększenie dopływu do zbiornika zmniejsza czas retencji do 40 i 25 dni w rejonie kąpieliska oraz do 58 i 47 dni w północnej części odpowiednio dla scenariusza 1 i 2 (ryc. 8).

Analiza zastosowania przegrody częściowo ograniczającej dopływ wody do kąpieliska (przegroda stanowi barierę wodną o długości 250 m i wysokości od dna do powierzchni lustra wody) wykazała, że w dłuższej perspektywie nie wpływa ona na rozkład przestrzenny stężeń substancji dopływających do kąpieliska i jazu zbiornika. Przegroda ta ma jednak duże znaczenie w przypadku zjawisk krótkotrwałych, gdy do zbiornika dopływa woda o jakości znacznie odbiegającej od jakości wody w zbiorniku. W przypadku dopływu znacznej ilości zanieczyszczeń w krótkim czasie przegroda może zmniejszyć stężenie zanieczyszczeń w obszarze kąpieliska (ryc. 9), ale tylko do czasu, w którym na skutek oddziaływania wiatru woda ulegnie wymieszaniu. Jednak w przypadku dopływu do zbiornika wody o lepszej jakości niż woda znajdująca się w zbiorniku, a zwłaszcza w przypadku dopływu południowymi potokami, przegroda ograniczyć może rozcieńczenie zanieczyszczeń znajdujących się w obszarze kąpieliska (ryc. 9).



**Ryc. 8.** Symulowane stężenie chlorofilu a oraz czas retencji wody dla trzech scenariuszy dopływu wody do Jeziora Paprocańskiego  
*Fig. 8. A Simulated of chlorophyll a concentration and the time of water retention for three inflow scenarios to Paprocany Lake*





**Ryc. 9.** Symulowany wpływ przegrody na rozkład stężeń w okolicy kąpieliska i jazu Jeziora Paprocańskiego

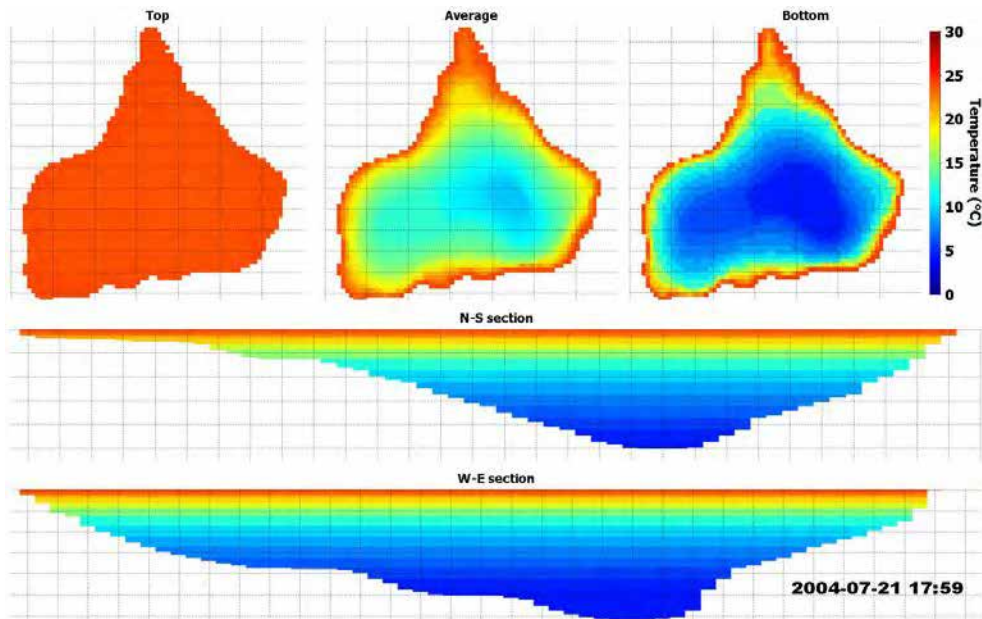
*Fig. 9. Simulated impact of a barrier on concentrations of pollutants near the bathing area and near the Paprocański Reservoir weir*

Dodatkowo, przegroda ograniczając dopływ zanieczyszczeń do kąpieliska powoduje wzrost ich stężenia w odpływie ze zbiornika. W dłuższej perspektywie (około półrocznej) zauważalnym efektem stosowania przegrody jest wzrost czasu retencji wody w obszarze kąpieliska i spadek czasu retencji w północnym fragmencie zbiornika, gdzie czas zatrzymania wody jest najdłuższy. Biorąc po uwagę wyniki symulacji, budowa przegrody powinna uwzględniać możliwość jej składania lub przestawiania w oparciu o jakość wody w dopływach do zbiornika oraz kierunek i prędkość wiatru.

Ostatnim z przykładów jest model jeziora Łękek Wielki. W odróżnieniu od poprzednich przykładów jest to naturalne jezioro i jest ono częścią zlewni badawczej Stacji Bazowej „Puszcza Boreska”, monitorowanej od ponad 20 lat w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP), który funkcjonuje jako podsystem Państwowego Monitoringu Środowiska. Monitoring zintegrowany wspierany jest przez modele matematyczne, które umożliwiają wykorzystanie

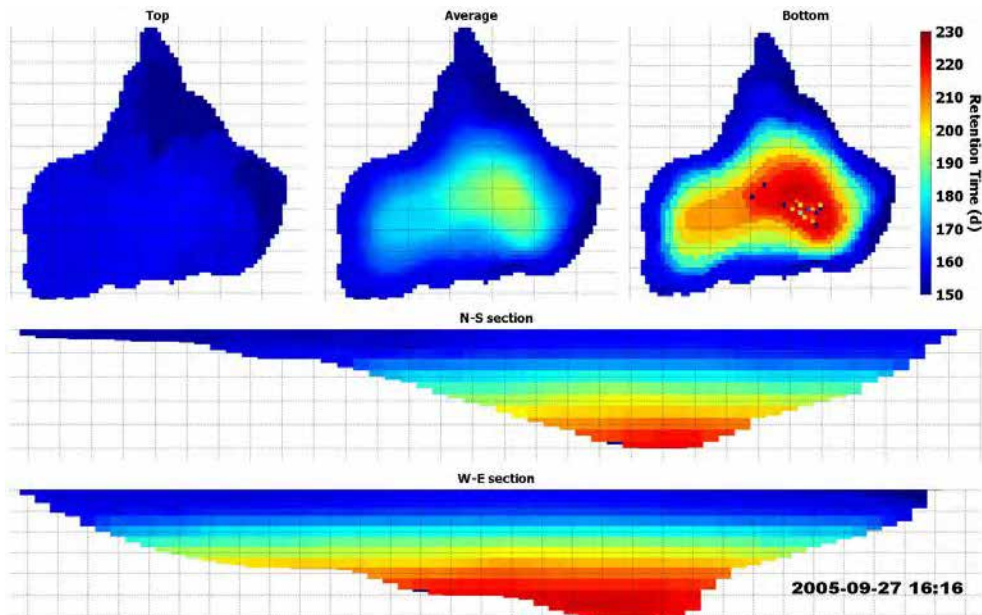
i interpretację szerokiego zakresu monitoringu prowadzonego w ramach ZMŚP. W roku 2017 rozpoczęta została praca nad systemem zintegrowanej oceny procesów przyrodniczych w zlewni jeziora Łękuk Wielki. System ten składać będzie się z pięciu podstawowych komponentów: 1) baza danych, 2) model bilansu wodnego i bilansu biogenów w zlewni, 3) model hydrodynamiki i ekosystemów jeziora, 4) model hydrogeologiczny i 5) model transportu i depozycji zanieczyszczeń z atmosfery. W pierwszym etapie pracy wdrożone zostały dwa moduły: 1) moduł hydrologiczny i moduł transportu zanieczyszczeń w zlewni oparty o model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) oraz 2) moduł hydrodynamiki i ekosystemów jeziora oparty o model AEM3D, korzystający z wyników modelu SWAT jako danych wejściowych. Model jeziora wykorzystany został do symulacji przepływu i temperatury wody, jako czynników kształtujących jakość wody i stan ekosystemu w jeziorze. Jezioro to charakteryzuje się niewielkim dopływem wód powierzchniowych (część dopływów występuje tylko okresowo). Okresowo również jezioro jest bezdopływowe. Z tego powodu kluczowe było wykonanie kalibracji modelu w taki sposób, aby odpowiednio uwzględnić wpływ warunków meteorologicznych, głównie opadów i parowania na bilans wodny oraz wpływ opadu, wiatru i promieniowania słonecznego na temperaturę wody. Weryfikacja modelu wykazała bardzo dobre dopasowanie wyników symulacji do miesięcznych wartości obserwowanych (współczynnik determinacji  $R^2$  równy 0,72 dla temperatury wody mierzonej na 8 głębokościach i 0,83 dla miesięcznych sum parowania, współczynnik NS równy 0,28 i 0,88 dla wspomnianych parametrów). Okres miesięczny wynika z dostępności danych i charakteru zlewni, w której bilans wodny zaburzany jest czynnikami naturalnymi (aktywność bobrów).

Wyniki obliczeń modelu wskazują, że średnia miesięczna różnica temperatury pomiędzy powierzchnią jeziora i jego najgłębszym miejscem wynosi od 11,8 do 18,2°C dla okresu od maja do listopada. W miesiącach tych średnia temperatura wody to 19,5°C. Miesiącami o przejściowym charakterze są kwiecień i listopad. Temperatura wody przy powierzchni wynosi wtedy około 10°C, a różnica w profilu pionowym spada do 7°C. W pozostałych miesiącach, tj. grudzień-marzec temperatura średnia przy powierzchni spada do 2,2°C i przewyższa ona o 0,8 stopnia temperaturę w najgłębszym punkcie jeziora (ryc. 10). Czas przebywania wody w jeziorze szacowany jest na około 280 dni w całym jeziorze poza strefami ujść cieków, gdzie okresowo wartość ta spada. W sezonie ciepłym, różnica pomiędzy czasem zatrzymania wody przy powierzchni i w głębszej części jeziora może się znacznie różnić, a różnica ta osiąga wartość 70 dni (ryc. 11).



**Ryc. 10.** Rozkład przestrzenny temperatury wody w jeziorze Łękek Wielki w dniu 17 sierpnia 2004 roku na podstawie obliczeń modelu AEM3D (powierzchnia jeziora, średnia wartość z warstw wody, dno jeziora, przekrój N-S i przekrój W-E)

*Fig. 10.* The spatial distribution of the temperature in the Łękek Wielki Lake on 17th August 2004 on the basis of the AEM3D model (the surface of the lake, average value of the water layers, lake bottom, N-S section W-E section)



**Ryc. 11.** Rozkład czasu zatrzymania wody w jeziorze Łękek Wielki dla sezonu ciepłego ze stosunkowo dużym zasilaniem wodami powierzchniowymi. na podstawie obliczeń modelu AEM3D (powierzchnia jeziora, średnia wartość z warstw wody, dno jeziora, przekrój N-S i przekrój W-E)

*Fig. 11.* The time of the water retention in the Łękek Wielki Lake in the warm season with a considerably high precipitation, on the basis of the AEM3D model (the surface of the lake, average value of the water layers, lake bottom, N-S section W-E section)

## Podsumowanie

Modelowanie matematyczne wspierające zarządzanie wodami i ekosystemami wodnymi jest powszechnie stosowane na świecie, coraz częściej praktykowane jest również w Polsce. Modele matematyczne opracowywane są dla jezior i zbiorników o różnej wielkości, a także dla ich zlewni w celu m.in. rozpoznania procesów zachodzących w środowisku wodnym i czynników kształtujących te procesy oraz oceny oddziaływania różnych praktyk zarządzania zlewnią i zbiornikami (a także oddziaływania zmian klimatu) na bilans i jakość wód. Modele znajdują zastosowanie, nie tylko w pracach naukowych, ale także w pracach realizowanych we współpracy i na potrzeby jednostek administracyjnych i jednostek odpowiedzialnych za zarządzanie i monitoring zasobów wodnych, przy czym prace te dotyczą m.in. koncepcji gospodarowania zbiornikami lub ich zlewnią, ocen oddziaływania na środowisko oraz konsumpcji i interpretacji wyników Państwowego Monitoringu Środowiska. Takie podejście jest promowane i zalecane przez liczne organizacje międzynarodowe, które kreują politykę ochrony środowiska i przepisy w tym zakresie.

Modele matematyczne mogą być opracowane dla każdego jeziora, czy zbiornika wodnego pod warunkiem przygotowania odpowiedniej koncepcji takiego modelu, dobrania narzędzia odpowiedniego do celu zastosowania, a także zebrania odpowiedniej ilości danych (cechujących się odpowiednią jakością) do parametryzacji, kalibracji i weryfikacji modelu. Proces przygotowania modelu, w zależności od jego złożoności, może być bardzo czasochłonny. Dlatego bardzo istotne jest jasne określenie celu zastosowania modelu i oczekiwań co do zakresu jego danych wyjściowych.

## Literatura

- Demeritt D., Wainwright J., 2015. Models, modeling and geography [w] N Castree, A Rogers and D Sherman (ed.) *Questioning Geography: 206-225*, Blackwell, Oxford.
- Gao L., Li D., 2014. A review of hydrological/water-quality models. *Front. Agr. Sci. Eng.* 2014, 1(4): 267-276.
- GWP, 2013. The role of decision support systems and models in integrated river basin management. Global Water Partnership, Technical Focus Paper.
- GWP, INBO, 2009. A Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins. Global Water Partnership, International Network of Basin Organizations.
- Hipsey M.R., Antenucci J.P., Hamilton D., 2012. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3 v3.2 Science Manual (DRAFT). Centre for Water Research, University of Western Australia. July 17, 2012.
- Hodges B., Dallimore C., 2013. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v3.0 User Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia. May 23, 2013.

- Hodges B., Dallimore C., 2016. Aquatic Ecosystem Model: AEM3D v1.0 User Manual. HydroNumerics, October 7, 2016.
- Janssen A.B.G., Arhonditsis G.B, Beusen A., Bolding K., Bruce L., Bruggeman J., Couture R-M., Downing A.S., Elliott J.A., Frassl M.A., Gal G., Gerla D.J., Hipsey M.R., Hu F., Ives S.C., Janse J.H., Jeppesen E., Johnk K.D., Kneis D., Kong X., Kuiper J.J., Lehmann M.K., Lemmen C., Ozkundakci D., Petzoldt T., Rinke K., Robson B.J., Sachse R., Schep S.A., Schmid M., Scholten H., Teurlincx S., Trolle D., Troost T.A., Van Dam A.A., Van Gerven L.P.A., Weijerman M., Wells S.A., Mooij W.M., 2015. Exploring, exploiting and evolving diversity of aquatic ecosystem models: a community perspective. *Aquat Ecol* (2015) 49:513-548.
- Lee H.S., Chung S.W., Ryu I., Choi J., 2013. Three-dimensional modeling of thermal stratification of a deep and dendritic reservoir using ELCOM model, *Journal of Hydro-environment Research*. 7(2): 124-133.
- Romero J.R., Antenucci J.P., Imberger J. 2004. One- and three-dimensional biogeochemical simulations of two differing reservoirs. *Ecological Modelling* 174 (2004): 14-160.
- Saloranta T.M., Malve O., T. Bakken T.H., Ibrekk A.S., Moe J., 2004. Lake Water Quality Models and Benchmark Criteria. NIVA, SYKE. Delivery Report from the Lake Model Work Package (WP6) of the BMW-project.
- UNEP, IWMI, 2011. *Ecosystems for water and food security* (ed.): E. Boelee, Nairobi: United Nations Environment Programme; Colombo: International Water Management Institute.
- WWAP, 2009. *World Water Assessment Programme. 2009. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO, and London: Earthscan.

## **Abstract**

Processes and relations occurring in a given environment need to be taken into account while analysing the quality of water, lake and reservoir ecosystems as well as the potential influence of various factors (such as climate, management of basin and reservoirs) on the waters of these bodies and their ecosystems. Those processes impact the water flow, its chemical composition, physical properties, and as a result water - and water-related ecosystems. The analysis of those phenomena are based on a simplified representation or an abstract model. The models have different forms ranging from an object in the mind of person conducting the analysis, physical models in a given scale and mathematical models describing the analysed object by means of equations. The latter have been developed since 1960s due to rapid expansion of IT industry and the computer processing power. Such models are also recommended by international institutions (e.g the UN) as a means to manage water resources. The article indicates why the modelling of the water supplies and ecosystems is crucial for their management. Diverse modelling tools and 3D

mathematical models used in Poland have also been described. Various applications are mentioned: the analysis of the dam reservoir management, the analysis of the influence of the changes in the basin management on the quality of water in the reservoirs, and the analysis of the processes occurring in the lakes as a means to support monitoring of the water.

**Key words:** AEM3D, mathematical model, Paprocańskie Lake, Łękuk Wielki Lake, Goczałkowice Reservoir, reservoir management

## AUTOMATYCZNA BIODETEKCJA ZAGROŻEŃ CHEMICZNYCH WODY

### *AUTOMATIC BIODETECTION OF CHEMICAL THREATS IN WATER*

AGNIESZKA NOWAK, ANDRZEJ WOŹNICA

*Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska*

#### Streszczenie

Każdego dnia w bazie Chemical Abstract Service (CAS) rejestrowanych jest około 4 000 nowych produktów chemicznych, a obecnie ich łączna liczba bliska jest 140 milionom. Potencjalnie substancje te mogą dostać się do środowiska, część z nich w stężeniach powodujących ich toksyczność, i zaburzać prawidłowe funkcjonowanie ekosystemów. Mogą również być groźne dla zdrowia ludzi. Do badania tego typu zagrożeń chemicznych, szczególnie w środowisku wodnym, bardzo dobrym rozwiązaniem wydają się być niespecyficzne biosensory pozwalające monitorować toksyczność ogólną substancji. Biosensory, to urządzenia rejestrujące zmiany zachodzące w środowisku poprzez śledzenie zmian fizjologicznych i biochemicznych układu biologicznego – biodetektora. W automatycznych urządzeniach tego typu, jako element biologiczny najczęściej stosuje się ryby, małże, ślimaki lub mikroorganizmy. Przykładem biosensora, którego bioelement stanowią konsorcja bakterii nitryfikacyjnych jest Automatyczny Biodetektor Toksyczności Ogólnej Wody (ABTOW). Urządzenie to działa na zasadzie śledzenia aktywności metabolicznej bakterii, poprzez monitorowanie zawartości tlenu w wodzie przepływającej przez bioreaktory z unieruchomioną biomasą. Wykazano wysoką czułość ABTOW między innymi na obecność fenolu, cyjanku potasu, azydru sodu, dichlorofenoli oraz soli metali ciężkich. Montaż tego typu biosensorów wykonujących pomiary w czasie rzeczywistym może w przyszłości stanowić system wczesnego ostrzegania przed skażeniem wody.

**Słowa kluczowe:** substancje priorytetowe, biosensor, biodetekcja, ABTOW, SYMBIO, Bio-Sensor® Monitoring



## **Wprowadzenie**

Rozwój wielu gałęzi przemysłu oraz rolnictwa nie byłby możliwy bez stosowania na szeroką skalę związków chemicznych, jak na przykład pestycydy, farmaceutyki, barwniki czy związki ropopochodne. Znaczne ilości tych substancji dostają się do wód. Część z nich jest odprowadzana jako ścieki i oczyszczana, część stanowi tak zwane zrzuty, czyli zanieczyszczenia odprowadzane do wody w sposób niekontrolowany. Dodatkowo tworzenie nowych substancji chemicznych powoduje szereg zagrożeń związanych z pojawianiem się w środowisku związków, które nie są degradowane, a tym samym mogą być akumulowane w łańcuchach troficznych. Znaczna liczba stosowanych związków jest niebezpieczna dla środowiska i dla człowieka, ich obecność już w niewielkich stężeniach może zaburzać prawidłowe funkcjonowanie ekosystemów, bądź je niszczyć.

## **Regulacje prawne dotyczące ochrony jakości wód przed zanieczyszczeniami chemicznymi**

W marcu 2018 roku w bazie Chemical Abstract Service (CAS), należącej do Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego, było zarejestrowanych blisko 140 milionów substancji chemicznych organicznych i nieorganicznych (<http://support.cas.org>). Są to związki, które mogą potencjalnie zostać wprowadzone do obrotu handlowego, co stwarza zagrożenie ich przedostania się do środowiska. O szybkim tempie w jakim powstają nowe substancje chemiczne może świadczyć fakt, że obecnie w bazie rejestrowanych jest około 4000 nowych związków dziennie. Istotnym jest również, że w 2014 roku zarejestrowano więcej substancji chemicznych niż w latach 1965-1990 łącznie. Tak ogromna różnorodność substancji mogących potencjalnie stanowić zagrożenie dla funkcjonowania ekosystemów wymagała wprowadzenia regulacji prawnych wymuszających kontrolę stężeń związków, które zostały uznane za toksyczne, niebezpieczne, czy potencjalnie szkodliwe. W Ustawie z dnia 20 lipca 2017 roku Prawo wodne (Dz. U. z 2017 r. poz. 1566, 2180) zanieczyszczenia stanowiące zagrożenie dla jakości wody zostały podzielone na 12 grup, wśród których obok związków o udowodnionych właściwościach rakotwórczych, mutagennych wyróżniono również związki mogące zakłócać funkcje reprodukcyjne, steroidogenowe, i endokrynologiczne, substancje, które przyczyniają się do eutrofizacji wody oraz wywierające niekorzystny wpływ na bilans tlenu, jak również produkty biobójcze i środki ochrony roślin. Wcześniej, bo już w 2001 roku zgodnie z Decyzją nr 2455/2001/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 listopada 2001 roku ustanowiono listę 33 substancji priorytetowych i 8 innych zanieczyszczeń (Dz.U. L 331 z 15.12.2001). Wprowadzanie tych związków do środowiska powinno być, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, stopniowo redukowane, a w przypadku priorytetowych substancji niebezpiecznych, całkowicie zakazane. Na pierwszej liście substancji priorytetowych

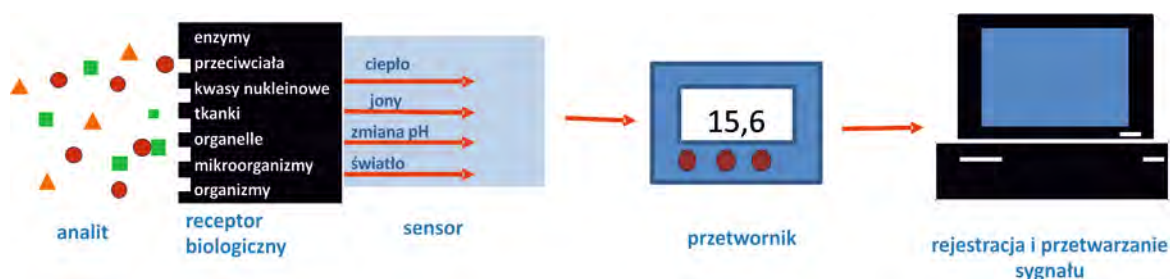
znalazły się węglowodory wchodzące w skład insektycydów (chlorpyrifos, endosulfan, chlorfenwinfos) i herbicydów (symazyna, alachlor, diuron, atrazyna, izoproturon, trifluralin), inne węglowodory zarówno alifatyczne (np. dichloroetan, dichloro-metan), jak i aromatyczne (np. benzen, antracen), metale ciężkie i ich związki (głównie kadmu, niklu, ołowiu i rtęci) oraz związki metaloorganiczne. Dodatkowo w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/39/UE z dnia 12 sierpnia 2013 roku założono utworzenie i stałe uzupełnianie tak zwanej listy obserwacyjnej (Dz.U. L 226/1 z 24.08.2013). Na liście tej po raz pierwszy znalazły się substancje farmaceutyczne jak 17  $\alpha$ -etynyloestradiol (EE2), 17  $\beta$ -estradiol (E2) oraz diklofenak. Istotnym jest fakt, że nie zakwestionowano wartości medycznej tych substancji; ale wykazano, że obecność tych związków w środowisku wodnym może działać szkodliwie na zdrowie ryb, ograniczać ich reprodukcję oraz działać szkodliwie na inne organizmy wodne. Obecnie do dnia 22 grudnia 2018 roku ma zostać opracowany dodatkowy program monitoringu wód powierzchniowych, wykonywany w ramach państwowego monitoringu środowiska dla kolejnych 12 substancji priorytetowych. Zostały one wybrane na podstawie danych naukowych wskazujących na ich potencjalne poważne zagrożenie dla zdrowia. Dotychczasowa lista zostanie rozszerzona o substancje zawarte w środkach ochrony roślin (aklonifen, bifenoks, cypermetrynę, dikofol, heptachlor, chinoksyfen), substancje zawarte w produktach biobójczych (cybutrynę, dichlorfos, terbutrynę), chemikalia przemysłowe (kwas perfluorooktanosulfonowy – PFOS, heksabromocyklododekan – HBCDD) oraz uboczne produkty spalania (dioksyny i dioksynopodobne polichlorowane bifenyle – PCB).

### **Biosensory – zasada działania**

Jak pokazują powyższe przykłady, lista substancji, których obecność musi być monitorowana w środowisku stale się wydłuża. Zgodnie z obowiązującym prawem metody referencyjne do określania stężeń tych substancji w wodzie obejmują analizy fizykochemiczne. Analizy tego typu mimo wielu zalet, takich jak czułość i dokładność są czasochłonne – oprócz czasu potrzebnego na pobranie próby, należy uwzględnić czas potrzebny na transport próbki do laboratorium oraz czas niezbędny do wykonania procedury oznaczenia. Jednak największą ich wadą jest to, że nie dają bezpośrednio informacji o tym jaka część danego związku jest biodostępna oraz jak mieszanina różnych związków wpływa na organizmy żywe. Aby to określić na podstawie wyników badań potrzeba dużej wiedzy z dziedziny toksykologii i ekotoksykologii.

Alternatywę analiz fizykochemicznych stanowią pomiary z użyciem biosensorów. Urządzenia tego typu wykorzystują żywe organizmy jako receptory biologiczne do detekcji zmian parametrów i składu chemicznego badanej wody. Zastosowanie żywych organizmów lub ich fragmentów pozwala uzyskać informację o szkodliwości zanieczyszczeń w odniesieniu do układów żywych, czyli o frakcji biodostępnej substancji toksycznej. Pomiary nie wymagają pracochłonnego

przygotowania próby, często prowadzone są w czasie rzeczywistym. Mimo obiecujących wyników badań nad możliwością zastosowania biosensorów, skuteczności ich działania są one rzadko wykorzystywane w kontroli jakości wody. Biosensory, to urządzenia rejestrujące zmiany zachodzące w środowisku poprzez rejestrację zmian fizjologicznych i biochemicznych układu biologicznego. Śledzenie procesów biochemicznych pozwala na wykrycie reakcji układu na czynnik fizykochemiczny (analit) w środowisku. Biosensor składa się z receptora – części biologicznej reagującej na zmiany środowiska przetwornika, który pozwala zamienić ten sygnał biologiczny na mierzalny aparaturowo (na przykład sygnał analogowy) i analizatora, który przetwarza uzyskany w ten sposób sygnał na informacje o stanie wód. Biologiczna warstwa może być selektywna, to znaczy zdolna do reagowania na pojawienie się ściśle określonego bodźca. Receptorem w takich układach mogą być enzymy, DNA, przeciwciała, komórki, tkanki (Bobade i in., 2016). Reakcja analitu z częścią biologiczną generuje odpowiedź, która może być obserwowana jako pojawienie się lub brak określonych jonów (np.  $H^+$ , pH), zmiana temperatury, emisja lub zanik emisji światła luminescencji. Tego typu zmiany są wykrywane przez detektor (sensor) i generują w nim sygnał, który dzięki przetwornikowi może zostać zmierzony, wzmocniony i zarejestrowany. Schemat ideowy biosensora przedstawia rycina 1.



**Ryc. 1.** Ogólny schemat budowy i działania biosensora

*Fig. 1. The general scheme of the construction and operating principle of the biosensor*

W badaniach wody z użyciem biosensorów kluczowy jest dobór odpowiedniego biodetektora, który powinien być szybki i niezawodny w detekcji substancji niebezpiecznych, wrażliwy na niskie stężenia substancji toksycznych, a jego reakcja powinna być jednoznaczna i łatwa do interpretacji. Dodatkowo powinien umożliwiać oszacowanie biodostępnej frakcji związków, być stabilny przez długi okres czasu, w pełni automatyczny, z możliwością zdalnego sterowania, kontroli i weryfikacji odczytów, jak również przyjazny dla środowiska i prosty w obsłudze.

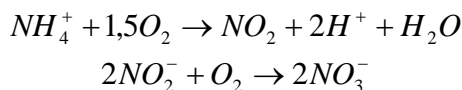
## Automatyczne biodetektory do ciągłego biomonitoringu jakości wody

Do badania zagrożeń chemicznych pojawiających się w wodzie szersze zastosowanie znalazły niespecyficzne biosensory pozwalające monitorować toksyczność ogólną tych związków. W automatycznych urządzeniach tego typu, jako element biologiczny stosuje się ryby, małże, ślimaki, rośliny lub mikroorganizmy. Biosensorem często wykorzystywanym do monitoringu jakości wody w Polsce jest SYMBIO – system biomonitoringu z użyciem małży (skójkę zaostrzonej – *Unio tumidus*) opracowany przez firmę Prote Technologie dla Środowiska Sp. z o.o. (<https://www.prote.pl/PL-H16>). Jak podaje producent, system ten obecnie monitoruje wodę dla 8 mln mieszkańców. W zbiorniku SYMBIO, umieszczonych jest osiem osobników małży przytwierdzonych do podłoża na okres trzech miesięcy, z których każda na klapach muszli ma dodatkowo zamontowany czujnik hallotronowy i magnez. Naturalną reakcją tych mięczaków na pojawienie się substancji toksycznych w filtrowanej przez nie wodzie jest zamknięcie muszli. Reakcja ta jest szybka i jednoznaczna u całej grupy osobników. Sondy pomiarowe urządzenia rejestrują stopień rozwarcia muszli małża.

Innym przykładem urządzenia do ciągłego monitorowania jakości wody jest Bio-Sensor® Monitoring – system opracowany przez amerykańską firmę Biological Monitoring, Incorporated, oparty na pomiarze aktywności oddechowej i ruchowej ryb (<http://www.biomon.com/biosenso.html>). Układ biodetektora stanowi osiem osobników ryb umieszczonych w osobnych kanałach pomiarowych. Jeżeli zachowanie istotnej liczby tych zwierząt odbiega od normy wówczas włączany jest alarm. Stosowanie tego urządzenia może jednak wywoływać pewne wątpliwości natury etycznej ze względu na to, że biodetektor stanowią kręgowce.

Wątpliwości takich nie wzbudza stosowanie mikroorganizmów jako elementu służącego do monitorowania jakości wody. Dodatkowo można wymienić szereg zalet związanych z wykorzystywaniem bakterii, jak ich wszechobecność, małe wymagania środowiskowe, wrażliwość na substancje toksyczne, zdolność metabolizowania szerokiej gamy związków chemicznych, możliwość funkcjonowania w niekorzystnych warunkach środowiska, zdolność funkcjonowania w mętnym roztworze, możliwość pomiaru ich aktywności w czasie rzeczywistym oraz łatwość detekcji sygnału. Dodatkowo, duża liczebność bakterii umożliwia weryfikację uzyskanych sygnałów. Mikroorganizmy jako element służący do biodetekcji zastosowano w Automatycznym Biodetektorze Toksyczności Ogólnej Wody (ABTOW) (ryc. 2A) – urządzeniu skonstruowanym i zoptymalizowanym przez naukowców z Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. ABTOW działa na zasadzie śledzenia aktywności metabolicznej bakterii nitryfikacyjnych, poprzez monitorowanie zawartości tlenu w wodzie przepływającej przez trzy bioreaktory (Woznica i in., 2010A). Każdy bioreaktor składa się z biozłóża – gąbki poliuretanowej z zaimmobilizowaną biomasą bakterii. Na końcach każdego z bioreaktorów zamontowane są czujniki tlenowe. Badana woda, zasilana medium odżywczym, jest doprowadzana za pomocą pompy perystaltycznej i tłoczona przez

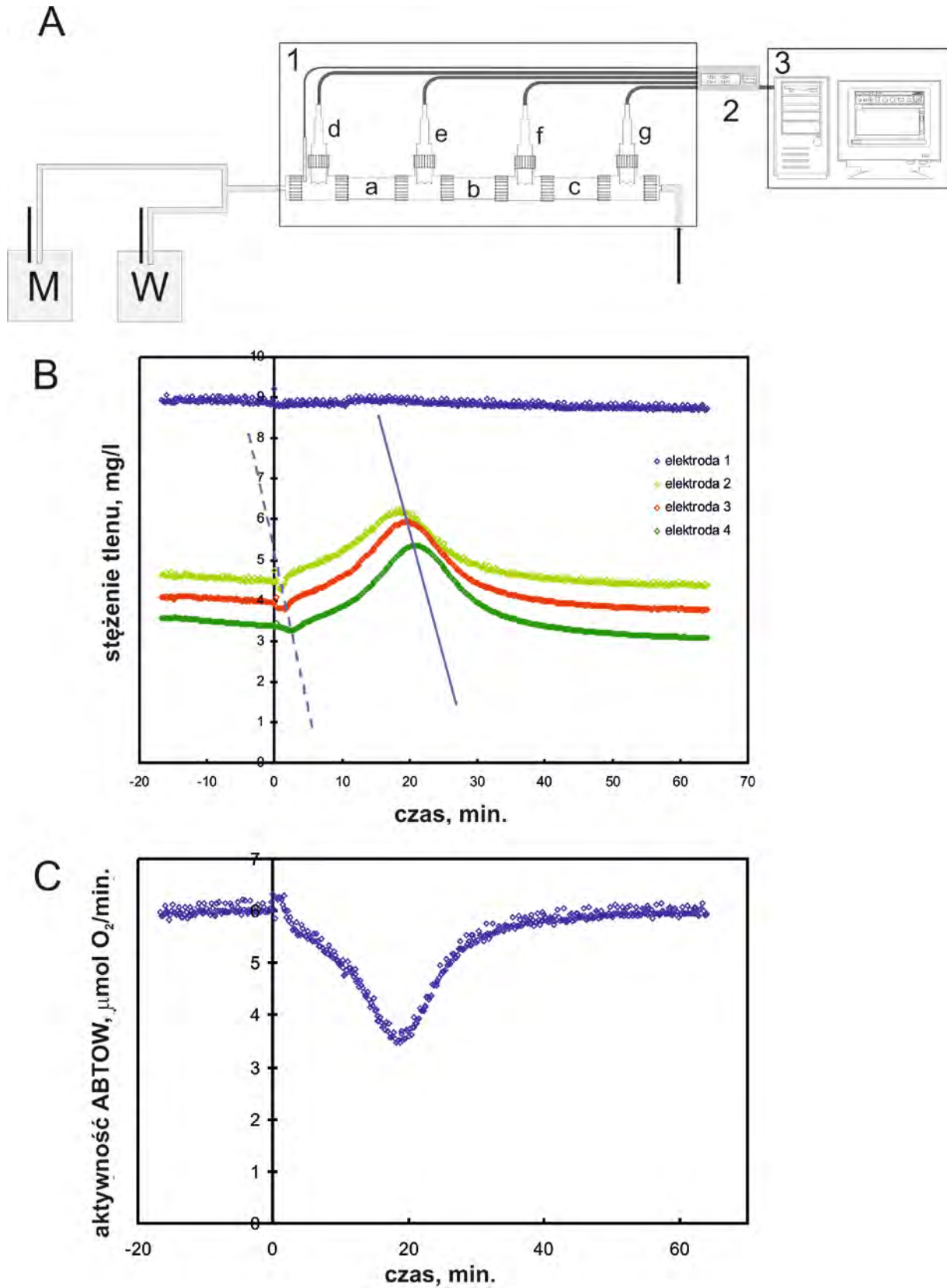
szeregowo ustawione biozłoża z nityfikantami. Sygnały z poszczególnych elektrod są rejestrowane i przetwarzane przez komputer. Używane w ABTOW bakterie nityfikacyjne, to chemolitoautotrofy utleniające jony amonowe do azotanów (V) w dwóch etapach, zgodnie z reakcjami:



Pierwszy etap nityfikacji przeprowadzają głównie bakterie z rodzajów *Nitrosomonas* i *Nitrosospira*, a drugi – *Nitrobacter* i *Nitrospira*. W obu reakcjach wymagana jest obecność tlenu, który w warunkach kontrolnych mikroorganizmy zużywają na stałym, określonym poziomie. W momencie pojawienia się w badanej wodzie substancji toksycznej metabolizm nityfikantów zostaje zahamowany, a tym samym wzrasta stężenie tlenu w wodzie co jest rejestrowane przez elektrody tlenowe ( ryc. 2B). Czas reakcji urządzenia na pojawienie się substancji szkodliwych wynosi 1,5 minuty. Obraz reakcji urządzenia na pojawienie się fenolu przedstawia rysunek 2C. Istotną cechą bakterii nityfikacyjnych jest ich powolny wzrost, który powoduje, że stosowane w ABTOW biozłoża charakteryzują się dużą stabilnością przez długi okres czasu (przez kilka miesięcy). Ponadto mikroorganizmy te cechuje duża wrażliwość na substancje toksyczne, a obserwowana zależność ich reakcji od wprowadzonej dawki w badanych zakresach ma charakter liniowy.

**Objaśnienia do ryc. 2.** A – budowa biosensora: 1 – moduł biodetekcji, 2 – transducer, 3 – moduł rejestracji i analizy danych, a,b,c – bioreaktory z zaimobilizowanymi bakteriami nityfikacyjnymi, d,e,f,g – elektrody tlenowe, W – badana woda, M – medium odżywcze. B – zmiany stężenia tlenu rejestrowane przez elektrody tlenowe po podaniu fenolu. Linia przerywana obrazuje moment początku reakcji, a linia ciągła jej maksimum na poszczególnych elektrodach. Oba przesunięcia związane są z przepływem wody przez układ. C – obraz zmian aktywności ABTOW w czasie po podaniu fenolu, wyznaczony w oparciu o zużycie tlenu przez bioreaktory

*Explanations to fig. 2.* A – the construction of the biosensor: 1 – a module of biodetection, 2 – a transducer, 3 – a module of data registration and analysis, a,b,c – bioreactors with immobilized nitrifying bacteria, d,e,f,g – oxygen electrodes, W – analyzed water, M – nutrient medium. B – changes of oxygen concentration registered by electrodes after phenol addition. Dotted line shows the start of the reaction, continuous line – the maximum of the reaction on the particular electrodes. Shifts are connected with the flow of water through the system. C – changes of ABTOW's activity in time after phenol addition, calculated on the basis of the oxygen consumption by the biomass



Ryc. 2. Schemat budowy i zasada działania ABTOW

Fig. 2. The scheme of the construction and operating principle of ABTOW

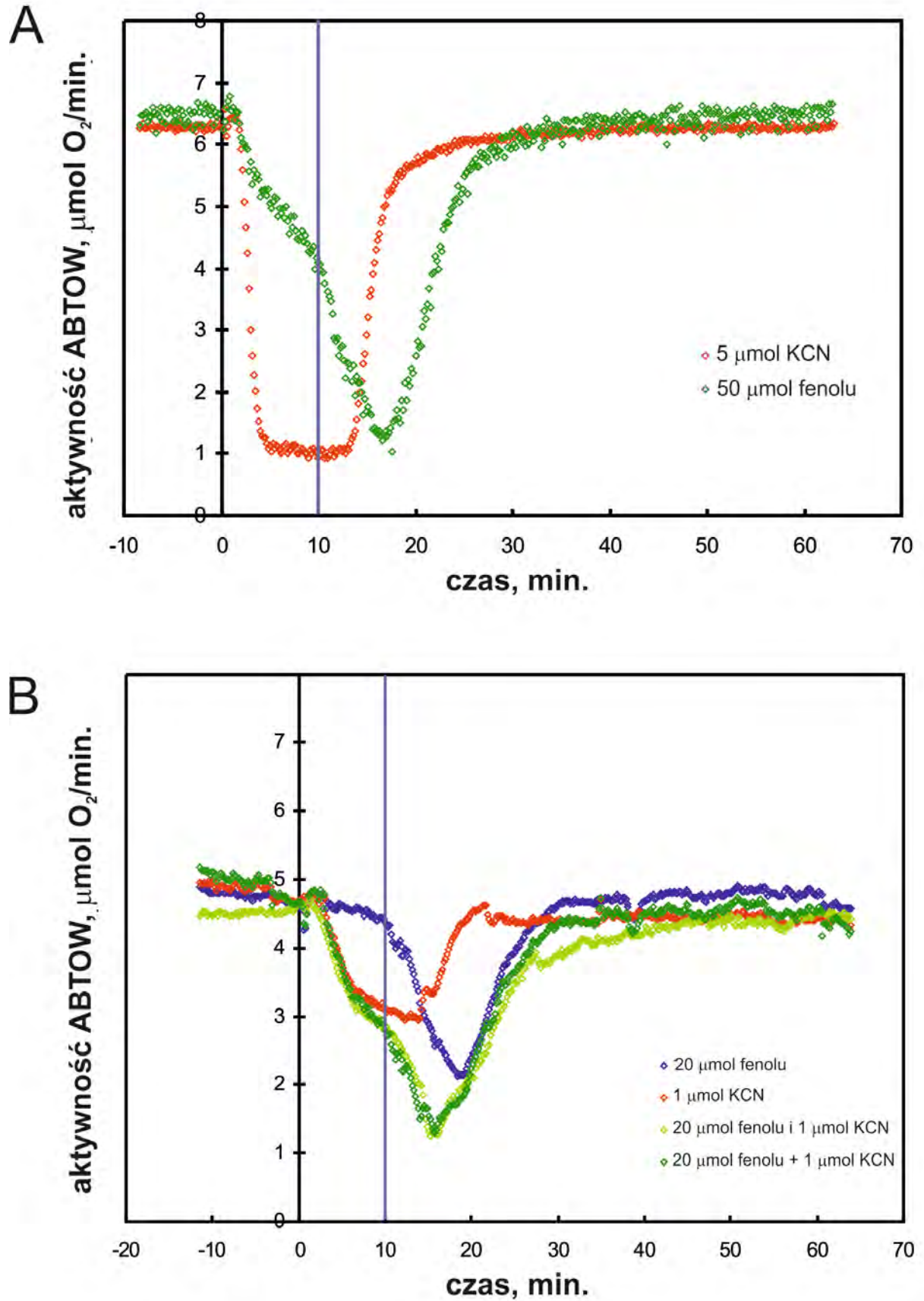
W trakcie badań, w których testowano szereg toksyn, w tym substancji priorytetowych, stwierdzono zróżnicowany charakter odpowiedzi mikroorganizmów na obecność substancji toksycznych co pozwala na tworzenie bibliotek tych reakcji. Dodatkowo wykazano możliwość tworzenia modeli numerycznych określających charakter działania toksyny w określonym stężeniu. Testowanymi substancjami były między innymi fenol, cyjanek potasu, azydek sodu, dichlorofenole oraz sole metali ciężkich (cynku, ołowiu, kadmu, chromu). Bardziej szczegółowe badania nad reakcją ABTOW na obecność fenolu i cyjanku potasu wykazały, że cyjanek jest związkami dziesięciokrotnie bardziej toksycznym dla nityfikantów niż fenol. Obserwowano zbliżoną reakcję urządzenia na obecność 5  $\mu\text{moli}$  cyjanku i 50  $\mu\text{moli}$  fenolu (Woźnica i in., 2010B). Kształty pików ilustrujących zmiany aktywności biodetektora były jednak różne ( ryc. 3A), co może dawać wstępne informacje na temat charakteru pojawiających się w wodzie toksyn. Fenol jest związkiem oddziałującym bezpośrednio na błony biologiczne, natomiast cyjanek jest inhibitorem fosforylacji oksydacyjnej. Dodatkowo stwierdzono addytywny charakter działania tych związków na bakterie. Łączny efekt toksyczności fenolu i KCN był bardzo zbliżony do sumarycznego efektu toksycznego tych ksenobiotyków podanych oddzielnie o czym świadczył podobny kształt pików dla spadku aktywności ABTOW (ryc. 3B).

Obok badań nad funkcjonowaniem modułu biodetekcji istotne są również testy mające na celu optymalizację obsługi urządzenia przez użytkowników. Cechami istotnymi pod względem użytkownika ABTOW jest jego łatwe zarządzanie i sterowanie dzięki pełnej automatyzacji analiz, możliwości autokalibracji i autokontroli układu, cyklicznej oceny aktywności biozłóży oraz możliwości sterowania na odległość. Pod względem przyjazności dla środowiska ważne jest z kolei, że bioelementem urządzenia są mikroorganizmy wyizolowane ze środowiska (z osadu czynnego oczyszczalni ścieków) i są one nieszkodliwe dla organizmu ludzkiego.

**Objaśnienia do ryc. 3.** Reakcja ABTOW na obecność fenolu i cyjanku potasu. A – porównanie zmian aktywności ABTOW po podaniu do układu po 1 litrze 5  $\mu\text{M}$  KCN oraz 50  $\mu\text{M}$  fenolu. Niebieską linią zaznaczono moment zakończenia podawania toksyn. B – Zmiany aktywności ABTOW po podaniu po 1 litrze: 20  $\mu\text{mole}$  fenolu, 1  $\mu\text{mole}$  KCN, mieszaniny tych toksyn o analogicznych stężeniach oraz sumarycznej reakcji po podaniu fenolu i KCN osobno. Niebieską linią zaznaczono koniec podawania związków. Stężenie jonu amonowego 3,4 mM, szybkość przepływu 100 ml/min., temp 21°C, pH 7,5

*Explanations to fig. 3. The reaction of ABTOW in the presence of phenol and potassium cyanide. A – the comparison of ABTOW's activity changes after addition of 1 l of KCN at concentration 5  $\mu\text{M}$  and 1 l of phenol at concentration 50  $\mu\text{M}$ . Blue line shows the finish of the compounds' addition. B – changes of the ABTOW's activity after addition of phenol (1 l) at concentration of 20  $\mu\text{mol}$ , KCN (1 l) at concentration of 1  $\mu\text{mol}$  and the mixture of these compounds at the relative concentrations. Blue line shows the finish of the compounds' addition. The concentration of ammonium was 3,4 mM, the velocity of the water flow was 100 ml/min., temp 21°C, pH 7,5*





Ryc. 3. Reakcja ABTOW na obecność fenolu i cyjanku potasu

Fig. 3. The reaction of ABTOW in the presence of phenol and potassium cyanide

## Podsumowanie

Stale wzrastająca liczba rejestrowanych substancji chemicznych, które potencjalnie mogą zostać wprowadzone do środowiska powoduje, że konwencjonalny, periodyczny sposób kontroli jakości wód metodami fizykochemicznymi jest niewystarczający. Dla zwiększenia bezpieczeństwa zarówno ludzi, jak i całych ekosystemów bardzo dobrym rozwiązaniem wydaje się być wprowadzenie automatycznych biodetektorów stanowiących układy przepływowe, wykonujące pomiary w czasie rzeczywistym. Montaż tego typu urządzeń może stanowić system wczesnego ostrzegania przed skażeniem wody. Pomimo wielu zalet urządzenia tego typu mają szansę być stosowane na szeroką skalę dopiero po wprowadzeniu odpowiednich regulacji prawnych wymuszających ciągły monitoring wody celem zwiększenia bezpieczeństwa zarówno ludzi, jak i innych organizmów.

## Literatura

- Bobade S., Kalorey D.R., Warke S., 2016. Biosensor Devices: A review on their biological applications. *Biosci. Biotech. Res. Comm.* 9: 132-137.
- Dz. U. z 2017 r. poz. 1566, 2180. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne.
- Dz.U. L 226/1 z 24.08.2013. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/39/UE z dnia 12 sierpnia 2013 r. zmieniająca dyrektywy 2000/60/WE i 2008/105/WE w zakresie substancji priorytetowych w dziedzinie polityki wodnej Tekst mający znaczenie dla EOG.
- Dz.U. L 331 z 15.12.2001. Decyzja NR 2455/2001/WE Parlamentu Europejskiego i rady z dnia 20 listopada 2001 r. ustanawiająca wykaz priorytetowych substancji w dziedzinie polityki wodnej oraz zmieniająca dyrektywę 2000/60/WE Tekst mający znaczenie dla EOG.
- <http://support.cas.org/>
- <http://www.biomon.com/biosenso.html>
- <https://www.prote.pl/PL-H16>
- Woźnica A., Nowak A., Beimfohr C., Karczewski J., Bernas T., 2010A. Monitoring structure and activity of nitrifying bacterial biofilm in an automatic biodetector of water toxicity. *Chemosphere* 78: 1121-1128.
- Woźnica A., Nowak A., Karczewski J., Klis C., Bernas T., 2010B. Automatic biodetector of water toxicity (ABTOW) as a tool for examination of phenol and cyanide contaminated water. *Chemosphere* 81: 767-772.

## **Abstract**

Every day, about 4,000 new chemical compounds are registered in the Chemical Abstract Service (CAS) database, and currently their total number is now close to 140 million. Potentially large amounts of these substances can be introduced to the environment, and some of them in small concentrations may be toxic and disturb the proper functioning of ecosystems, as well as may be dangerous to human health. For the monitoring of this type of chemical threats, especially in the aquatic environment, non-specific biosensors seem to be a very good solution. Biosensors record changes occurring in the environment by following physiological and biochemical changes in the biological system – the bio-detector. In the automatic biosensors, fish, mussels, snails or microorganisms are the most often used as the biological element. An example of a biosensor whose bioelement is a consortium of nitrifying bacteria is the Automatic Biodetector of Water Toxicity (ABTOW). This system monitors the metabolic activity of bacteria by measuring the oxygen content in water flowing through bioreactors with immobilized biomass. High sensitivity of ABTOW has been proofed, inter alia, in the presence of phenol, potassium cyanide, sodium azide, dichlorophenols and heavy metals. Installation of this type of biosensors performing real-time measurements may, in the future, constitute an early warning system against water contamination.

**Key words:** priority substances, biosensor, biodetection, ABTOW, SYMBIO, Bio-Sensor® Monitoring



**ROLA ZBIORNIKÓW ZAPOROWYCH GOCZAŁKOWICE I KOZŁOWA  
GÓRA PODCZAS POWODZI W MAJU I CZERWCU 2010 ROKU  
W ŚWIETLE OBOWIĄZUJĄCYCH INSTRUKCJI EKSPLOATACJI  
I UTRZYMANIA ZBIORNIKA**

*THE ROLE OF THE GOCZAŁKOWICE AND KOZŁOWA GÓRA DAM RESERVOIRS  
DURING THE FLOODS IN MAY AND JUNE 2010 IN THE LIGHT OF THE OPERATING  
AND MAINTENANCE INSTRUCTIONS*

*ANDRZEJ SIUDY*

*Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. W Katowicach  
Rada Gospodarki Wodnej Regionu Wodnego Małej Wisły*

**Streszczenie**

W artykule zaprezentowano sposób prowadzenia gospodarki wodnej w trakcie wezbrań w oparciu o „sztywne” instrukcje gospodarowania wodą, na przykładzie zbiornika Goczałkowice i Kozłowa Góra. Zbiornik goczałkowicki położony jest w km 43+092 Małej Wisły i z uwagi na krótki czas koncentracji fal wezbraniowych nie są opracowywane dla niego prognozy hydrologiczne krótko i średnioterminowe. Sytuacja ta zmusiła administratora zbiornika, którym jest Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. do opracowania „sztywnej” instrukcji postępowania na wypadek powodzi, w oparciu o prowadzone przez siebie analizy historycznych powodzi z okresu 50-cioletniej eksploatacji zbiornika. Podobna sytuacja występuje na zbiorniku wodnym Kozłowa Góra, gdzie również wprowadzono identyczne zasady gospodarowania wodą. Skuteczność opracowanych procedur wykazana została na przykładzie ostatniej dużej powodzi w dorzeczu Małej Wisły w maju 2010 roku.

**Słowa kluczowe:** powódź, zbiornik wodny, ochrona przeciwpowodziowa, gospodarka wodna

## Wprowadzenie

Zbiornik goczałkowicki położony jest w południowej Polsce, u podnóża Beskidu Śląskiego i stanowi podstawowy rezerwuuar wody pitnej dla aglomeracji śląskiej. Powstał w 1955 roku w wyniku wybudowania zapory w km 43+092 Małej Wisły (Mała Wisła to odcinek Wisły od jej źródeł do ujścia Przemszy, posiadający odrębny kilometr w kierunku przeciwnym do ruchu wody).

Zbiornik goczałkowicki tworzy zaporę wykonaną z materiałów miejscowych o długości 2980 m i wysokości 16 m ponad dnem rzeki. Zapora jest zaliczona do I klasy budowli hydrotechnicznych. Całkowita pojemność zbiornika wynosi 161,25 hm<sup>3</sup>, z czego na stałą rezerwę powodziową przypada 43,18 hm<sup>3</sup>. Zbiornik goczałkowicki posiada cechy płytkiego zbiornika nizinnego, jednak cała zlewnia do przekroju piętrzenia to zlewnia górską z gwałtownym przyborem wód podczas dużych opadów. Średni czas osiągnięcia kulminacji wynosi 23 godziny. Dlatego niezwykle istotną sprawą jest dokonywanie zrzutów już na początku wezbrania oraz utrzymywanie dużej rezerwy powodziowej w zbiorniku w ciągu całego roku.

Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że w niewielkiej odległości poniżej zbiornika do Małej Wisły dopływają dwie stosunkowo duże rzeki: Iłownica i Biała, podwajając wielkość zlewni. W warunkach powodziowych dopływ z tych rzek wyprzedza o kilka godzin dopływ do zbiornika Goczałkowice. Sprzyja temu brak jakichkolwiek zbiorników retencyjnych posiadających znaczenie przeciwpowodziowe w ich zlewniach, oraz wysoki stopień uregulowania ich koryt. Obszar usytuowany wzdłuż Małej Wisły od zapory goczałkowickiej do Oświęcimia to teren intensywnej eksploatacji górniczej i związanych z tym znacznych osiadań terenu, przekraczających wielkość kilku metrów. Osiedlenia dotyczą zarówno korony wałów przeciwpowodziowych Małej Wisły, dna rzeki oraz terenów na zawału. Stwarza to problemy hydrauliczne w korycie rzeki, które nie występują w innych regionach Polski. Anomalie przepływu widoczne są szczególnie podczas przechodzenia wezbrań.

Zlewnia zbiornika o powierzchni 523,1 km<sup>2</sup> obejmuje obszary górskie i podgórskie charakteryzujące się powstawaniem nagłych, intensywnych wezbrań na skutek nawałnych opadów na stokach Beskidu Śląskiego. Z uwagi na stosunkowo krótki czas koncentracji fali wezbraniowej do przekroju zbiornika Goczałkowickiego nie są wykonywane dla niego prognozy hydrologiczne krótko i średnioterminowe. Fakt ten został opisany w „*Ocenie stanu zabezpieczenia przeciwpowodziowego województwa śląskiego w 2009 roku*” opracowanej przez Śląski Urząd Wojewódzki, Wydział Bezpieczeństwa i Zarządzania Kryzysowego. W związku z tym, jedyną formą prowadzenia racjonalnej gospodarki wodnej na zbiorniku Goczałkowickim w okresie wezbraniowym, jest praca według tzw. „sztywnej” instrukcji gospodarowania wodą.

## Charakterystyczne parametry i funkcje zbiornika Goczałkowice

Zapora Zbiornika Goczałkowickiego została usypana z materiałów miejscowych – piasków fluwiogłacjalnych. Uszczelnienie korpusu zapory od strony wody górnej stanowi ekran ilowy o grubości od 1,00 m u góry, do 2,50 m u podstawy, który od przemarzania i wypłukiwania chroniony jest dwuwarstwowym filtrem odwrotnym (każda warstwa o grubości 0,25 m). Filtr pokryty jest metrową warstwą żwiru grubego i tłucznia, który chroni okładzina z płyt betonowych o grubości od 0,25 m do 0,35 m. Podstawowe parametry zapory i zbiornika zostały zestawione w tabeli 1.

**Tabela 1.** Charakterystyczne parametry zapory i zbiornika „Goczałkowice”

*Table 1. Characteristic parameters of the dam and “Goczałkowice” reservoir*

Parametry	Jednostka	Wielkość
Wydatek spustu dennego	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	216
Wydatek przelewu burzowego	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	694
Minimalny poziom piętrzenia (Min PP)	m n.p.m.	250,50
Minimalny poziom piętrzenia dla Zakładu Uzdania Wody Goczałkowice	m n.p.m.	251,50
Normalny poziom piętrzenia (NPP)	m n.p.m.	255,50
Roboczy poziom piętrzenia (RPP)	m n.p.m.	254,50
Maksymalny poziom piętrzenia (Max PP)	m n.p.m.	257,00
Pojemność martwa zbiornika	hm <sup>3</sup>	17,378
Pojemność minimalna dla Zakładu Uzdania Wody Goczałkowice	hm <sup>3</sup>	29,659
Pojemność przy normalnym poziomie piętrzenia	hm <sup>3</sup>	120,216
Pojemność przy roboczym poziomie piętrzenia	hm <sup>3</sup>	93,184
Pojemność przy maksymalnym poziomie piętrzenia	hm <sup>3</sup>	165,60
Pojemność wyrównawcza pomiędzy rzędnymi 250,50-255,50 m	hm <sup>3</sup>	102,84
Pojemność powodziowa pomiędzy rzędnymi 255,50-257,00 m	hm <sup>3</sup>	45,386
Pojemność powodziowa pomiędzy rzędnymi 254,50-257,00 m	hm <sup>3</sup>	72,418
Powierzchnia zalewu przy minimalnym poziomie piętrzenia	km <sup>2</sup>	10,3
Powierzchnia zalewu przy roboczym poziomie piętrzenia	km <sup>2</sup>	25,70
Powierzchnia zalewu przy normalnym poziomie piętrzenia	km <sup>2</sup>	29,9
Powierzchnia zalewu przy maksymalnym poziomie piętrzenia	km <sup>2</sup>	32,0

Z uwagi na wielkość zbiornika goczałkowickiego, już na etapie jego projektowania przewidziano, że będzie to zbiornik wielozadaniowy. Obecnie podstawowymi funkcjami zbiornika są: zaopatrzenie w wodę konurbacji górnośląskiej, ochrona przeciwpowodziowa doliny rzeki Wisły, alimentacja przepływów niżówkowych w okresie suszy, gospodarka rybacka i ochrona przyrody.





**Fot. 1.** Zbiornik Goczałkowice. Zapora czołowa

*Photo 1.* Goczałkowice reservoir. Front dam

*Źródło/Source:* Siudy, 2010

### **Charakterystyczne parametry i funkcje zbiornika Kozłowa Góra**

Zbiornik Kozłowa Góra powstał poprzez spiętrzenie wód rzeki Brynicy w km 28+000 zaporą ziemną wzniesioną w ramach robót publicznych w latach 1935-1938 z przeznaczeniem magazynowania wody dla celów obronnych kraju. Wzdłuż doliny rzeki Brynicy przebiegała linia fortyfikacji, których zbiornik był integralną częścią. Zgromadzona w zbiorniku woda, w przypadku zagrożenia wojennego, mogła po otwarciu spustu dennego spowodować zatopienie doliny rzeki poniżej zbiornika. Po drugiej wojnie światowej zbiornik całkowicie stracił swoje znaczenie wojskowe i został przeznaczony na cele zaopatrzenia w wodę oraz ochrony terenów poniżej zapory przed powodzią.



**Fot. 2.** Zbiornik Kozłowa Góra. Zapora czołowa

*Photo 2.* Kozłowa Góra reservoir. Front dam

*Źródło/Source:* Siudy, 2008

Powierzchnia zlewni do przekroju zaporowego wynosi 184,1 km<sup>2</sup>. Zbiornik ma długość 3,6 km a szerokość średnio 1,5 km. Powierzchnia zalewu zbiornika przy maksymalnym piętrzeniu wynosi 6,32 km<sup>2</sup>. Brzegi zbiornika graniczą z lasami sosnowym, natomiast od zachodniej strony w rejonie Świerklańca, zbiornik ogranicza zapora boczna o dł. 2,74 km. Od północnej strony w miejscowości Niezdara zbiornik ogranicza wał ochronny o dł. 500 m. Zbiornik wykorzystywany jest dla retencjonowania wody dla stacji uzdatniania wody w Kozłowej Górze oraz pełni ważną funkcję przeciwpowodziową w zlewni Brynicy.

Maksymalny wydatek spustu dennego przy nadpiętrzeniu, tj. przy rzędnej zwierciadła wody górnej 278,99 m n.p.m. wynosi :

- jedna nitka:  $Q = 24,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- dwie nitki:  $Q = 49,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , może być przepuszczona woda miarodajna  $Q_{m(p=0,3 \%)} = 42,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- trzy nitki:  $Q = 74,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , może być przepuszczona woda kontrolna  $Q_{k(p=0,1 \%)} = 59,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- cztery nitki:  $Q = 98,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Średnie głębokości zalewu w zależności od przyjętej rzędnej piętrzenia wynoszą:

- 278,99 m n.p.m – 2,44 m,
- 278,28 m n.p.m – 2,11 m,
- 277,20 m n.p.m – 1,44 m.

Podstawowe parametry zbiornika Kozłowa Góra przedstawiono w tab. 2.

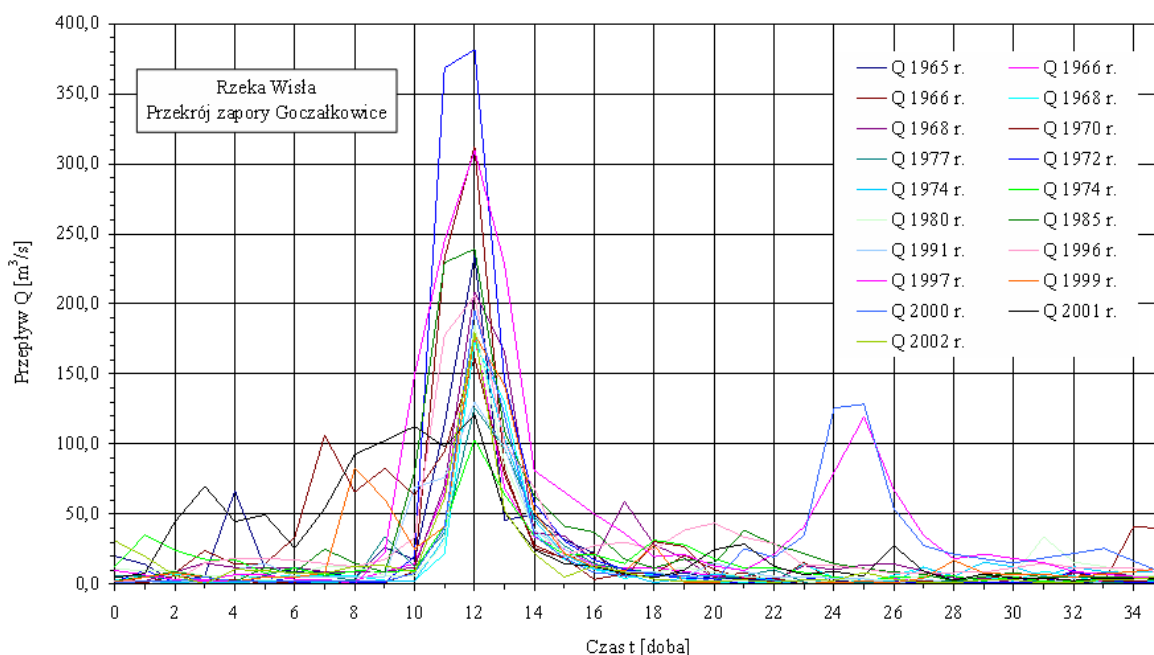
**Tabela. 2.** Podstawowe parametry zbiornika Kozłowa Góra

*Table 2. Characteristic parameters of the "Kozłowa Góra" reservoir*

L.p.	Wyszczególnienie	Jednostka	Wielkość
1.	Kilometr rzeki Brynicy w przekroju zapory	km	28+000
2.	Powierzchnia zlewni do przekroju zaporowego	km <sup>2</sup>	184,1
3.	<b>Charakterystyczne poziomy piętrzenia</b>		
3.1.	Minimalny poziom piętrzenia (Min PP )	m n.p.m.	275,03
3.2.	Minimalny poziom dla pracy ZPW Kozłowa Góra	m n.p.m.	275,29
3.3.	Normalny poziom piętrzenia (NPP)	m n.p.m.	278,08
3.4.	Maksymalny poziom piętrzenia (Max PP)	m n.p.m.	278,58
3.5.	Nadzwyczajny poziom piętrzenia (Nad PP) (przy wypełnieniu rezerwy forsowanej)	m n.p.m.	278,99
4.	<b>Pojemność zbiornika</b>		
4.1.	Całkowita przy piętrzeniu do rzędnej Nad PP 278,99 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	17,582
4.2.	Martwa przy minimalnym poziomie piętrzenia 275,03 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	1,263
4.3.	Przy normalnym poziomie piętrzenia 278,08 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	12,389
4.4.	Przy maksymalnym poziomie piętrzenia 278,58 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	15,175
4.5.	Wyrównawcza pomiędzy rzędnym 278,08-275,03 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	11,126
4.5.	Powodziowa pomiędzy rzędnymi 278,08-278,58 m n.p.m.	hm <sup>3</sup>	2,786
4.6.	Powodziowa pomiędzy rzędnymi 278,08-278,99 m n.p.m. (razem z rezerwą forsowaną powyżej MPP)	hm <sup>3</sup>	5,193
5.	<b>Powierzchnia zalewu</b>		
5.1.	Przy piętrzeniu do rzędnej 275,03 m n.p.m.	km <sup>2</sup>	1,765
5.2.	Przy piętrzeniu do rzędnej 278,08 m n.p.m.	km <sup>2</sup>	5,268
5.3.	Przy piętrzeniu do rzędnej 278,58 m n.p.m.	km <sup>2</sup>	5,746
5.4.	Przy piętrzeniu do rzędnej 278,99 m n.p.m.	km <sup>2</sup>	6,039

### Metodyka opracowania „sztywnej” instrukcji gospodarowania wodą na zbiornikach zaporowych Goczałkowice, Kozłowa Góra

Prace nad opracowaniem „sztywnej” instrukcji gospodarowania wodą w okresie powodzi rozpoczęto od analizy przebiegu historycznych wezbrań w dolinie Małej Wisły i Brynicy. W tym celu zestawiono hydrogramy wszystkich odnotowanych przez obsługę zbiornika wezbrań z okresu 50 lat istnienia zbiorników. Hydrogramy złożono w ten sposób, aby ich kulminacje pokrywały się ze sobą (ryc. 1).

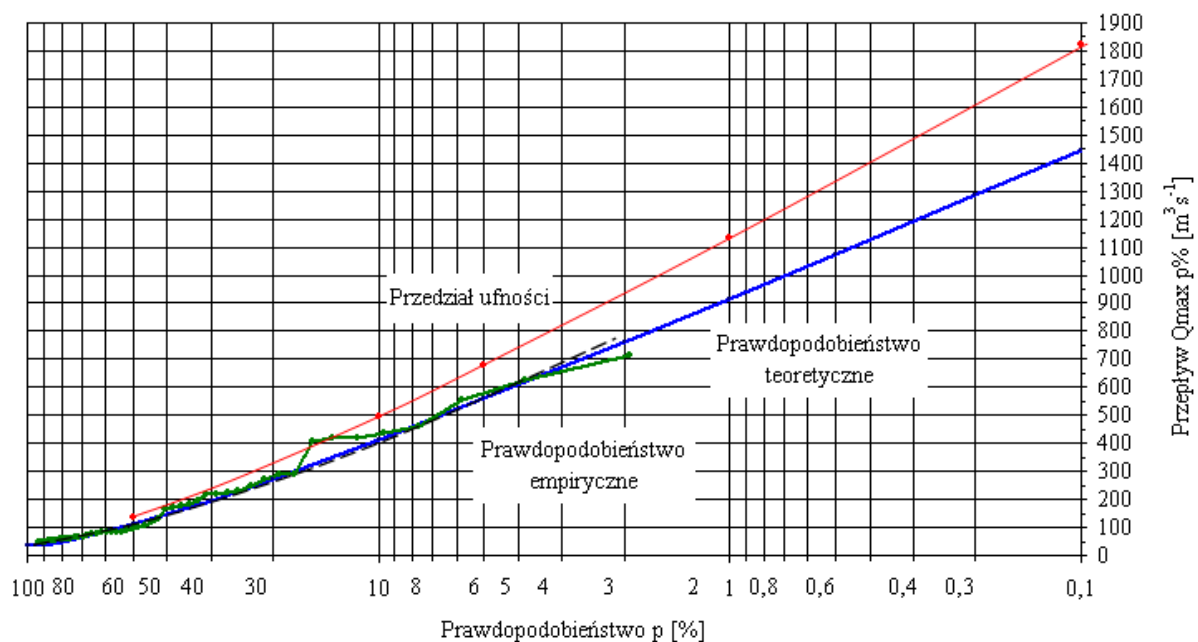


**Ryc. 1.** Hydrogramy historycznych wezbrań w dolinie Małej Wisły w przekroju zapory zbiornika goczałkowickiego

**Fig. 1.** Hydrographs of historical floods in the Mała Wisła valley in the cross section of the Goczałkowice reservoir dam

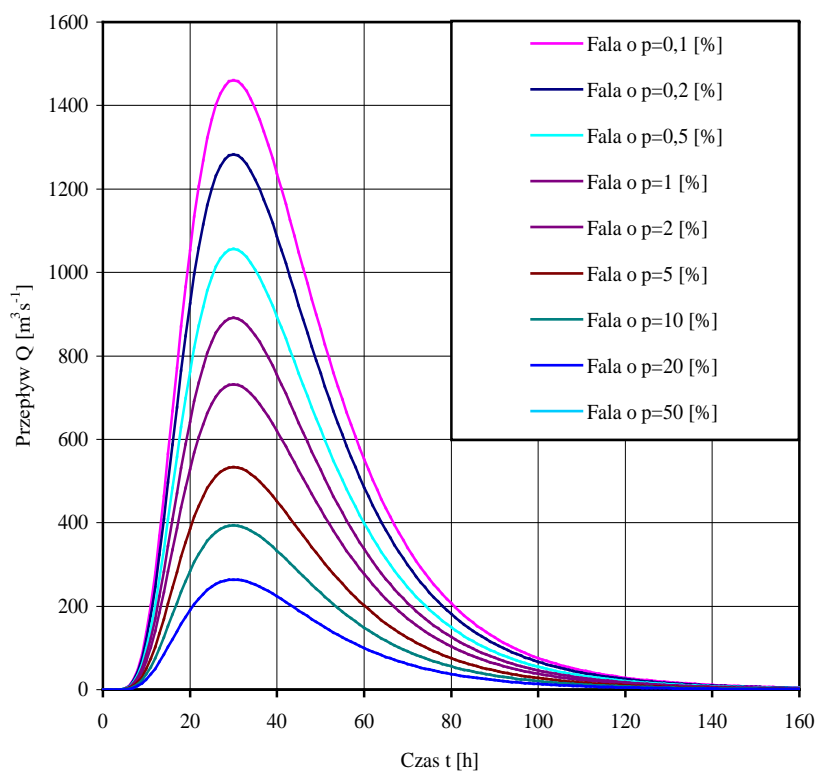
Następnie, w oparciu o współczesne metody hydrologii inżynierskiej wyznaczono kształt hydrogramu typowego opisujący z dostatecznym przybliżeniem kształt obserwowanych hydrogramów. Spośród opisanych w literaturze analitycznych metod określenia hydrogramów hipotetycznych, najlepszym przybliżeniem cechowała się zmodyfikowana przez Ciepielowskiego metodą Strupczewskiego (Byczkowski, 1999).

Dysponując równaniem opisującym kształt typowego hydrogramu hipotetycznego wezbrania dla doliny Małej Wisły oraz opracowanym rozkładem przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w przekroju zapory zbiornika goczałkowickiego (ryc. 2), wyznaczono hydrogramy teoretyczne fal wezbraniowych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia (ryc. 3).



**Ryc. 2.** Wykres prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych rocznych w przekroju zapory zbiornika goczalkowickiego

**Fig. 2.** Probability diagram of the maximum annual discharge in the cross section of the Goczalkowice reservoir dam



**Ryc. 3.** Wykres hydrogramów teoretycznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w przekroju zapory zbiornika goczalkowickiego

**Fig. 3.** Theoretical hydrographs with specified exceedance probability across the Goczalkowice reservoir dam

Następnie dla przygotowanych fal teoretycznych zostały przeprowadzone symulacje pracy zbiornika, których efektem była opracowana instrukcja pracy zbiornika w okresie wezbrań. Należy tu zauważyć, że z uwagi na położenie zbiornika goczałkowickiego do momentu zakończenia wezbrania, nie można jednoznacznie określić z jak wielkim wezbraniem ma się do czynienia. W związku z tym algorytm sposobu gospodarowania wodą na zbiorniku jest identyczny przy każdym wezbraniu, stąd nazwa „sztywna instrukcja gospodarowania wodą w czasie powodzi”.

Postępowanie przeciwpowodziowe na zbiorniku obejmuje gospodarkę wodną w obrębie stałej rezerwy powodziowej, zawartej między rzędnymi piętrzenia NPP = 255,50 m n.p.m. i MaxPP = 257,00 m n.p.m. Okres postępowania przeciwpowodziowego rozpoczyna się w momencie, kiedy wypełniona jest pojemność użytkowa zbiornika (rzędna 255,50 m n.p.m.) lub gdy dopływ do zbiornika przekracza  $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  i trwa do całkowitego odtworzenia rezerwy powodziowej. Schemat gospodarki wodnej w warunkach powodziowych uzależnia dyspozycję odpływu ze zbiornika od dopływu i wypełnienia rezerwy powodziowej. W toku postępowania przeciwpowodziowego obowiązują następujące reguły:

- Po przekroczeniu stanu alarmowego na wodowskazie Skoczów należy zadysponować zrzut o wielkości  $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Jeżeli dopływ do zbiornika osiąga wartość  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  należy zrzut powiększyć do  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Kolejne dyspozycje odpływu wydawane są co 3 godziny.
- Jeżeli dopływ do zbiornika osiąga wartość  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  należy zrzut powiększyć do  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Jeżeli dopływ do zbiornika osiąga wartość  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  należy zrzut powiększyć do  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Jeżeli dopływ do zbiornika osiąga wartość  $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  należy zrzut powiększyć do  $350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Jeżeli dopływ do zbiornika przekracza  $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , a prognozy świadczą o tendencji wzrostowej dyspozycję zrzutów ustalać na poziomie 50 % dopływu.
- Po osiągnięciu piętrzenia do rzędnej 256,70 m n.p.m. należy tak regulować odpływ przez spust denny i przelew, aby nie przekroczyć rzędnej maksymalnego piętrzenia 257,00 m n.p.m.
- Napelnianie rezerwy powodziowej trwa do momentu, gdy dopływ będzie mniejszy od dysponowanego poprzednio odpływu lub do osiągnięcia Max PP w zbiorniku.
- Po przejściu fali powodziowej należy niezwłocznie odtworzyć rezerwę powodziową odpływem nie przekraczającym odpływu dopuszczalnego ( $Q_d = 350,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Odpływ należy tak regulować, aby poziom wody w zbiorniku obniżać nie więcej niż 30 cm na dobę.



Dopływ do zbiornika obliczany jest metodą objętościową według wzoru :

$$Q_{dopl.} = \frac{\Delta V}{10800} + Q_{odpl.}$$

gdzie :

$Q_{dopl.}$  – średni dopływ do zbiornika w czasie 3 godzin [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],

$\Delta V$  – różnica pojemności zbiornika dla 3 godzinnego przedziału czasu [ $m^3$ ],

$Q_{odpl.}$  – średni odpływ ze zbiornika w czasie 3 godzin [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ].

### Skuteczność „sztywnej” instrukcji gospodarowania wodą w trakcie powodzi w maju 2010 roku

Powódź z maja 2010 roku miała kulminację na poziomie wody o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p=5\%$  i była czwartą co do wielkości kulminacji falą powodziową jaka dopłynęła do zbiornika. Jednak majowe wezbranie trwało o dwie doby dłużej niż zaobserwowane dotychczas wezbrania, co w konsekwencji spowodowało, że objętość fali powodziowej z maja i czerwca 2010 roku była największym obserwowanym wezbraniem w 54-letnim okresie istnienia zbiornika.

14 maja po południu (piątek i początek weekendu) do powiatowych Centrów Zarządzania Kryzysowego oraz administratorów zbiorników retencyjnych dostarczono ostrzeżenie meteorologiczne, że 16 maja wystąpi opad 30-50 mm (w rejonach górskich i podgórskich 100 mm) oraz 17 maja 15-30 mm (w rejonach górskich i podgórskich 50 mm).

Natomiast opad faktyczny na posterunkach opadowym kształtował się następująco:

**Tabela 3.** Opady atmosferyczne w maju 2010 r.

*Table 3. Precipitation in May 2010*

Posterunek	14 maja	15 maja	16 maja	17 maja	18 maja	19 maja	suma
Stecówka	14,0	2,8	14,4	73,7	54,2	33,1	192,2
Brenna	8,6	6,3	27,1	162,7	148,8	50,1	403,6
Wisła	13,4	4,7	19,9	81,5	97,6	51,4	268,5
Skoczów	8,5	4,7	20,3	128,4	97,9	51,9	311,7

*Źródło/Source: IMGW, Kraków.*

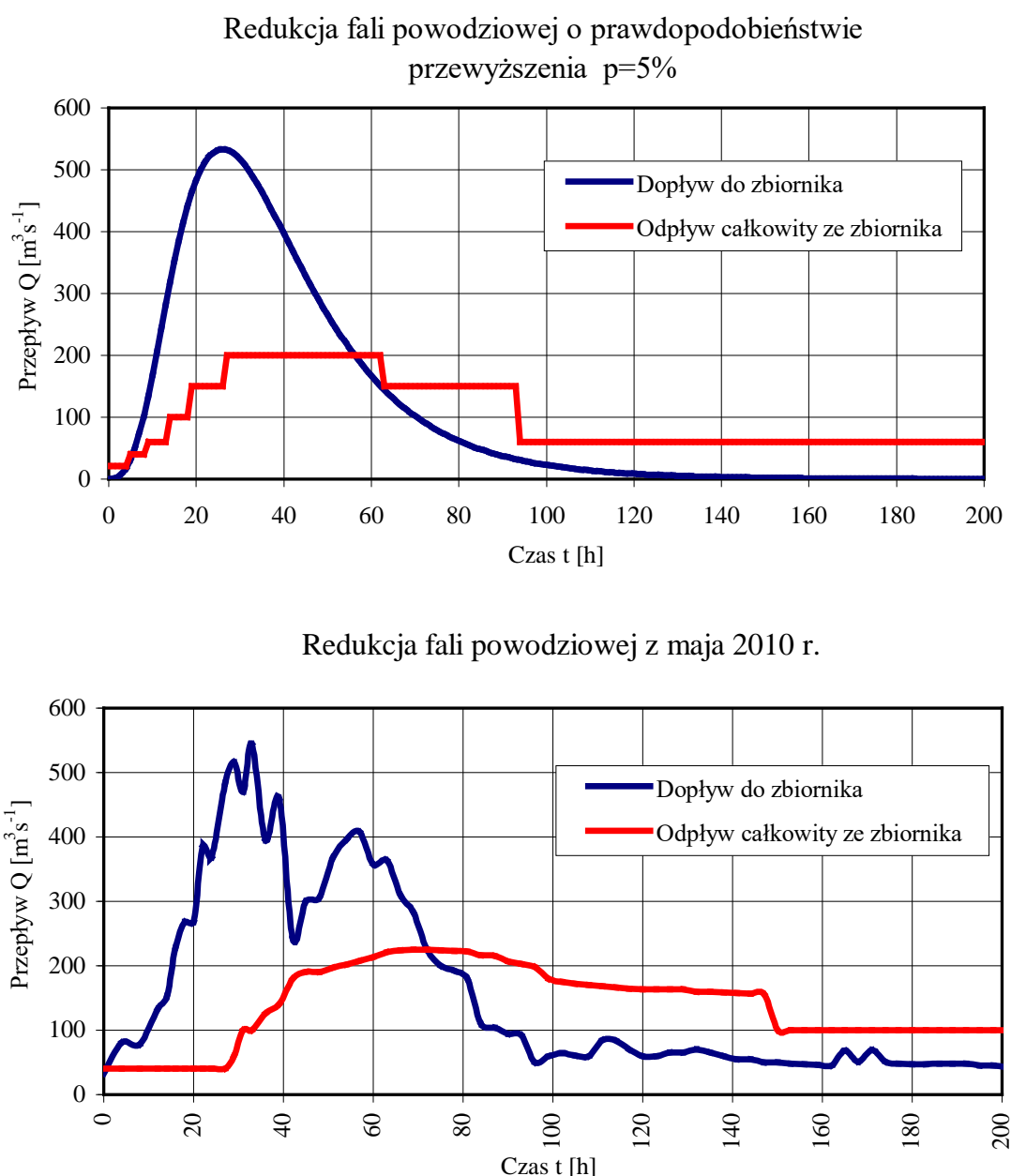
Taki opad wygenerował falę powodziową na Wiśle w Strumieniu w wysokości 122 milionów  $m^3$  (w 1997 wynosiła 57 mln  $m^3$ ). Wielkości te stanowią średni opad z półrocza letniego dla tej części Polski.

Istotnym problemem podczas powodzi w maju 2010 r. były nieprawdziwie informacje podawane przez IMGW Kraków o wpływie zrzutów ze zbiornika goczałkowickiego na zwiększenie zagrożenia powodziowego w Krakowie. Obsługa zbiornika podczas powodzi wiele czasu i determinacji poświęciła na dementowanie



tych informacji zamiast zajmować się tylko i wyłącznie wykonywaniem swoich obowiązków służbowych związanych z gospodarowaniem wodą podczas powodzi.

W celu udowodnienia skuteczności sztywnej instrukcji gospodarowania wodą w trakcie wezbrania, zestawiono obok siebie wykres symulowanej pracy zbiornika w trakcie wezbrania o prawdopodobieństwie przewyższenia 5% z instrukcji opracowanej w 2004 roku (Bojarski i in., 2004) oraz wykres rzeczywistej pracy zbiornika w trakcie powodzi w maju 2010 (ryc. 4).



**Ryc. 4.** Porównanie przebiegu fali hipotecznej o  $p=5\%$  i rzeczywistej z maja 2010 na zbiorniku Goczałkowice

**Fig. 4.** Comparison of discharge hydrograph estimated as  $p=5\%$  and real hydrograph from May 2010 at Goczałkowice reservoir.

W przypadku zbiornika wodnego Kozłowa Góra, zgodnie z procedurami zawartymi w pozwoleniu wodno-prawnym oraz w instrukcji gospodarowania wodą zwykle (około 280 dni w roku) zrzut ze zbiornika nie przekracza  $0,15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Według instrukcji zrzut bezpieczny ze zbiornika ustalono na poziomie  $8,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , natomiast zrzut dopuszczalny ze zbiornika ustalono na poziomie  $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Zrzuty większe mogą być zadysponowane tylko w przypadku wyczerpania się rezerwy powodziowej w zbiorniku podczas wielkich wezbrań powodziowych.

Zbiornik posiada stosunkowo dużą rezerwę powodziową, która pozwala na znaczącą redukcję kulminacji fali powodziowej jak np. podczas majowej powodzi w 2010 r. Prowadzenie gospodarki wodnej w okresie powodzi bardzo utrudniał fakt, że na początku wezbrania otrzymywano sprzeczne komunikaty IMGW odnośnie opadów faktycznych w zlewni. W dniu 15 maja najpierw otrzymano informację o opadzie 78,9 mm by następnie na prośbę obsługi zbiornika o zweryfikowanie tych danych uzyskano korektę na 7,8 mm, po czym dnia 16 maja o godzinie 10<sup>00</sup> dopływ zaczął szybko wzrastać, osiągając w dniu 18 maja niespotykaną dotąd wartość  $48,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Było to natężenie dopływu przekraczające obliczeniowy przepływ miarodajny  $Q_{0.3\%} = 12,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  dla przekroju rzeki w Kozłowej Górze. Tak więc był to przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p=0,22\%$ , który może się pojawić raz na 450 lat. Fala powodziowa z maja 2010 r. została w całości zredukowana przez zbiornik do wielkości zrzutu dopuszczalnego tzn.  $12,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Można na podstawie zestawienia dopływ-odpływ wysunąć wniosek, że podczas wielkich wezbrań powodziowych zbiornik wodny Kozłowa Góra pięciokrotnie zmniejsza przepływy w rzece Brynica poniżej zbiornika. Histogram powodzi przedstawiono na wykresie nr 5.



**Ryc. 5.** Przebieg fali powodziowej z maja 2010 na zbiorniku Kozłowa Góra

*Fig. 5.* Flood hydrograph from May 2010 at Kozłowa Góra reservoir

## Podsumowanie

Instrukcja gospodarowania wodą w okresie powodzi dla zbiornika wodnego Goczałkowice ma charakter „sztywny”, tj. dyspozycje odpływu głównie zależą od aktualnego dopływu do zbiornika i wielkości rezerwy powodziowej, którą zbiornik w tym momencie dysponuje. Procedury postępowania w czasie powodzi są stosunkowo proste. Powstały one na podstawie analiz wszystkich historycznych powodzi, które wystąpiły od początku istnienia zbiornika. Ciąg statystyczny obserwacji (szereg rozdzielczy maksymalnych dopływów rocznych) określono na podstawie ksiąg gospodarowania wodą prowadzonych przez obsługę zbiornika systematycznie od początku istnienia obiektu.

Dla oceny skuteczności gospodarki wodnej zbiorników Goczałkowice na podstawie sztywnej instrukcji wykonano symulacje wykorzystując hydrogram Strupczewskiego dla hipotetycznych fal o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia. Jako dane wejściowe wykorzystano wygenerowane hipotetyczne fale powodziowe o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p=10\%$ ;  $5\%$ ;  $2\%$ ,  $1\%$ ,  $0.5\%$ ,  $0.1\%$  i  $0.05\%$ . Na podstawie tych symulacji opracowano procedury gospodarowania wodą na zbiorniku W każdym przypadku redukcja kulminacji wezbrania wynosiła minimum  $45\%$ . Identyczne zasady sporządzania symulacji pracy zbiornika podczas powodzi obowiązywały w przypadku zbiornika Kozłowa Góra z tą różnicą, że wykorzystano do tego celu hydrogram Krebsa.

Powódź na zbiorniku goczałkowickim w maju i czerwcu 2010 r. miała kulminację na poziomie wody o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p=5\%$  i była czwartą co do wielkości kulminacji falą powodziową jaka nawiedziła zbiornik. Natomiast objętość fali wynosiła  $122 \text{ hm}^3$  i stanowiła wielkość dwukrotnie większą niż hipotetyczna fala o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p=5\%$ . Dla porównania objętość fali wezbraniowej z lipca 1997 r. wynosiła  $57 \text{ hm}^3$ . Kształt fali wezbraniowej z maja 2010 różnił się znacznie od wezbrań poprzednich, ponieważ podstawa fali była o 2 dni dłuższa niż zwykle.

Obliczona (wg aktualnie obowiązującej praktyki) wielkość wody miarodajnej  $Q_{m(p=0,1\%)} = 1\,448,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  przekracza znacząco wydatek urządzeń upustowych, liczony bez przekroczenia Max PP. W przypadku jej wystąpienia poważnie zagrożone jest bezpieczeństwo budowli, gdy nie jest utrzymywana zwiększona stała rezerwa powodziowa.

Zlewnia Małej Wisły powyżej zbiornika goczałkowickiego graniczy ze zlewnią Odry i Dunaju, a granice przebiegają w odległości zaledwie kilkudziesięciu kilometrów od przekroju piętrzenia. Sumaryczna wielkość prognoz opadów na tym obszarze dzieli się zatem na wyżej wymienione zlewnie i trudno określić w praktyce jakie będą faktyczne spływy do zlewni Małej Wisły do czasu, aż opad będzie zarejestrowany przez urządzenia telemetryczne IMGW i GPW SA usytuowane w zlewni zbiornika Goczałkowice.

Podczas wezbrania powodziowego 12-godzinną prognozę dopływu do zbiornika sporządza obsługa zbiornika na podstawie nomogramów empirycznych opracowanych na potrzeby instrukcji eksploatacji zbiornika, a sporządzonych na podstawie wieloletnich doświadczeń i obserwacji zachowania zlewni podczas wezbrań powodziowych. Prognoza ta jest niezbędna do szacowania czasu jakim dysponuje kierownictwo zbiornika do momentu wyczerpania rezerwy powodziowej.

W przypadku dużego dopływu do zbiornika i 8-godzinnej prognozy utraty rezerwy powodziowej sztaba kryzysowe: wojewody śląskiego i powiatowe oraz samorządy miejscowości położonych poniżej zbiornika są informowane o takim zagrożeniu, aby zawczasu przeprowadzić ewakuację ludności. Taka sytuacja miała miejsce 18 maja 2010 r. dla terenów poniżej zbiorników wodnych Goczałkowice i Kozłowa Góra.

Po analizie powodzi 2010 r na zbiorniku Kozłowa można stwierdzić, że sztywne zasady gospodarowania wodą na zbiorniku sprawdziły się nawet przy dopływie do zbiornika większym niż obliczeniowy przepływ miarodajny. Wezbranie z maja 2010 roku było największym wezbraniem jakie nawiedziło zbiornik od początku jego istnienia tj. 1938 roku.

W przypadku obu zbiorników, po ustaniu wezbrań powodziowych zbiorniki w dalszym ciągu dysponowały znaczną rezerwą powodziową.

## Literatura

- Bojarski A., Szczęsny J., Wojtas S., 2004. Instrukcja utrzymania i eksploatacji. Zbiornik wodny Kozłowa Góra w Wymysłowie. Część I – Ogólna. Cermet-Bud Sp. z o.o., Kraków.
- Bojarski A., Wojtas S., 2005. Instrukcja utrzymania i eksploatacji. Zbiornika wodnego Goczałkowice. Część I – Ogólna. Cermet-Bud Sp. z o.o., Kraków.
- Byczkowski A., 1999. Hydrologia tom II. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Ciepielewski A. Dąbkowski S., 2006. Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych. Bydgoszcz
- Ciepielowski A, 1999. Podstawy gospodarowania wodą. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- IMGW Warszawa Ośrodek technicznej Kontroli Zapór – Ocena Stanu Technicznego i Bezpieczeństwa Zapory Kozłowa Góra za okres 5 letni 2005-2010 r.
- Szczęsny J., Więzik B., Bojarski A., Wojtas S. Olbrych M., 2005. Instrukcja utrzymania i eksploatacji zbiornika Goczałkowice. Kraków.
- Śląski Urząd Wojewódzki Wydział Bezpieczeństwa i Zarządzania Kryzysowego, 2009. Ocena stanu zabezpieczenia przeciwpowodziowego województwa śląskiego w 2009 roku. Katowice.

## **Abstract**

The article presents the method of conducting water economy during high-water stages based on “unyielding” water economy instructions, on the example of the Goczałkowice and Kozłowa Góra reservoirs. The Goczałkowice reservoir is located in 43 + 092 km of Mała Wisła and due to the short time of concentration of flood waves, hydrological forecasts for short and medium-term are not prepared for it. This situation forced the administrator of the reservoir, which is the Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. to develop an “unyielding” instruction in the event of a flood, based on the analysis of historical floods from the period of 50-year operation of the reservoir. A similar situation occurs on the Kozłowa Góra water reservoir, where identical water economy principles were also introduced. The effectiveness of the developed procedures was demonstrated on the example of the last large flood in the Little Vistula basin in May 2010.

**Key words:** flood, water reservoir, flood protection, water management



## **TEKSTYLIA WODOODPORNE**

### **WATERPROOF TEXTILES**

**KATARZYNA BEDNARCZYK<sup>1</sup>, MARCIN LIBERA<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Instytut Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*

<sup>2</sup>*Śląskie Centrum Wody Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*

<sup>3</sup>*Wirtualne Centrum Nano- i Mikroskopii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*

#### **Streszczenie**

Tekstylnia wodoodporne stanowią jedne z ważniejszych innowacyjnych materiałów funkcjonalnych wykorzystywanych między innymi do konstruowania tzw. inteligentnej odzieży. Intensywny rozwój materiałów charakteryzujących się różnym poziomem wodoodporności od lat 40 ubiegłego wieku doprowadził do powstania wielu impregnatów i membran polimerowych zapewniających optymalne właściwości w zależności od zapotrzebowania. Celowe i świadome tworzenie tekstyliów wodoodpornych i jednocześnie zapewniających komfortowe użytkowanie wymaga między innymi uwzględnienia zachowania wody wynikającego z jej budowy molekularnej. Badania prowadzone w obszarze tekstyliów wodoodpornych umożliwiły opracowanie nowych metod wytwarzania membran i warstw polimerowych oraz postęp w dziedzinie syntezy polimerów.

**Słowa kluczowe:** wodoodporność, membrany polimerowe, parametry fizykochemiczne wody

#### **Typy i charakterystyka odzieży odpornej na wodę**

Odzież jest używana przez człowieka od tysięcy lat między innymi do ochrony przed niekorzystnym wpływem czynników środowiska. Szczególnie wymagająca jest ochrona przed wodą i wilgocią. Przez wiele stuleci używano różnych skór zwierzęcych lub innych materiałów pochodzenia zwierzęcego oraz klejów roślinnych do konstruowania odzieży odpornej na wodę. Pierwsze informacje o celowej modyfikacji tekstyliów za pomocą impregnacji olejem lnianym, tłuszczem zwierzęcym lub woskiem dotyczą parasoli wytwarzanych w Chinach już 1000 lat temu oraz



odzieży marynarzy z XV wieku. Pierwsze wodoodporne tekstylia wytwarzano w Wielkiej Brytanii w XIX wieku wykorzystując mleczko lateksowe jak warstwę pomiędzy dwoma warstwami tkaniny. Odzież wytwarzana z tych materiałów nie zyskała jednak uznania ze względu na niestabilność naturalnego kauczuku. Dopiero opatentowanie procesu wulkanizacji, przez Thomasa Hancocka w Europie i Charlesa Goodyeara w USA w 1845 roku, umożliwiło tworzenie stabilnych warstw gumy na tkaninach. Dalszy postęp w tworzeniu odzieży wodoodpornej nastąpił w czasie II wojny światowej, podczas której zastosowano gęsto tkane materiały do konstruowania odzieży wojskowej dla Brytyjskiej armii. Kolejnym dużym osiągnięciem było zastosowanie membrany mikroporowatej wykonanej z politetrafluoroetyleny (teflon) o nazwie GORE-TEX, która pojawiła się na rynku w 1976 roku. Od tego czasu następuje ciągły postęp w dziedzinie materiałów wodoodpornych i oddychających (<https://www.gore-tex.com/experience/our-history>, dostęp 8.05.2018).

Tekstylia zapewniające ochronę przed wodą dzielą się na wodoodporne i wodoszczelne. Materiały wodoszczelne nie przepuszczają wody (np. guma, folia poliolefinowa) natomiast wodoodporne wykazują zwiększoną odporność na działanie wody w normalnych warunkach, jednak w długotrwałym kontakcie z wodą lub pod zwiększonym ciśnieniem następuje wnikanie wody w strukturę materiału. Tkaniny wodoszczelne nie przepuszczają pary wodnej (nie oddychają) natomiast wodoodporne przepuszczają parę wodną (oddychają).

Wodoodporność tekstyliów można zmierzyć poprzez symulację deszczu lub częściej stosowaną metodę poddawania tkaniny działaniu ciśnienia hydrostatycznego. Klasy wodoodporności tkanin rosną wraz ze wzrostem odporności na prześiąkanie przy zwiększonym ciśnieniu hydrostatycznym (tabela 1) (Loghin, 2003).

**Tabela 1.** Klasy wodoodporności tkanin w zależności od odporności na ciśnienie hydrostatyczne słupa wody

*Table 1. Classes of waterproof textiles depending on water hydrostatic pressure*

<b>Ciśnienie hydrostatyczne na tkaninie [mm H<sub>2</sub>O]</b>	<b>Klasa wodoodporności tkaniny</b>
0 – 5000	Tkanina nie odporna na deszcz
5000 – 10000	Tkanina słabo i średnio odporna na deszcz
10000 – 15000	Tkanina odporna na deszcz
15000 – 20000	Tkanina wodoodporna w warunkach agresywnych
>20000	Tkanina całkowicie wodoodporna

Tekstylia wodoodporne muszą charakteryzować się podstawowymi parametrami fizykochemicznymi:

- paroprzepuszczalność,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- wytrzymałość na ścieranie,
- wytrzymałość na zginanie,
- odporność na niskie i wysokie temperatury,
- odporność na światło,
- odporność na pospolite czynniki chemiczne i zanieczyszczenia środowiska.

Z punktu widzenia parametrów użytkowych istotne są właściwości wpływające na komfort użytkowania:

- poziom wodoodporności,
- ciężar,
- poziom fizjologicznego komfortu termicznego,
- działanie nieuczulające i niedrażniące,
- zdolność do przenoszenia pary wodnej,
- estetyka,
- trwałość (wytrzymałość na powtarzające się cykle zginania, rozdarcie, rozciąganie, wytrzymałość na tarcie),
- łatwość prania (mycie / czyszczenie na sucho / suszenie w suszarce bębnowej),
- odporność powłoki hydrofobowej na powtarzające się pranie i czyszczenie,
- szybkość schnięcia po zamoczeniu,
- stabilność rozmiarów w stanie suchym i mokrym.

Dodatkowo w przypadku tak zwanej odzieży BHP wymagane są:

- widoczność,
- identyfikacja,
- odporność na palenie.

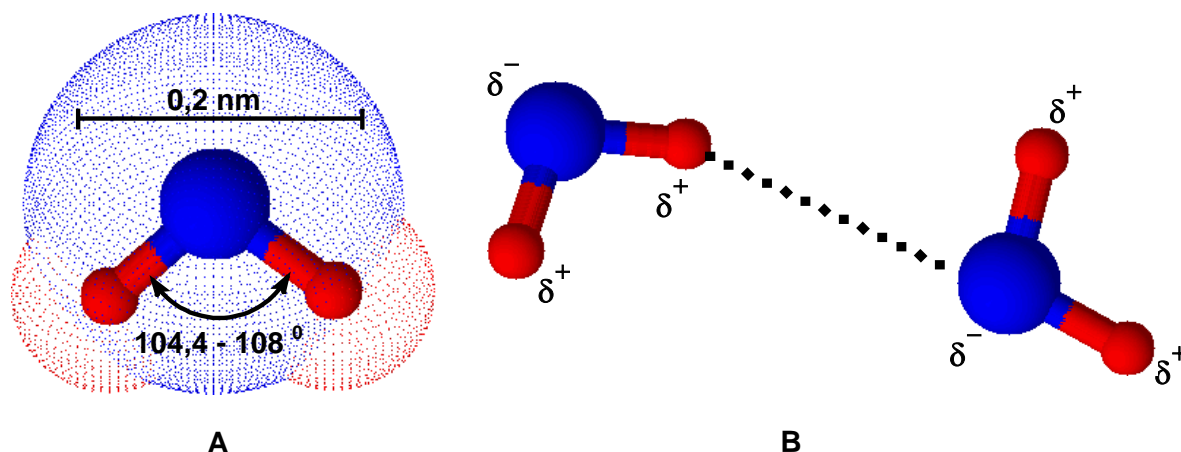
Komfort użytkownika odzieży wodoodpornej stanowi wyzwanie dla twórców materiałów, które z jednej strony muszą być odporne na wodę, a z drugiej strony przepuszczać parę wodną wytwarzaną przez użytkownika. Ludzka skóra wydziela pot w sposób ciągły z różną intensywnością w zależności od aktywności człowieka (od 60 do 840 mL/godz.). Zatkanie wszystkich porów podłoża tekstylnego przez warstwę hydrofobową spowoduje uformowanie szczelnej bariery dla wody w obu kierunkach i wykraplanie się pary wodnej pochodzącej z potu na tkaninie od strony ciała. Zastosowanie warstwy posiadającej pory umożliwiające odprowadzanie pary wodnej może jednak nie w pełni izolować od wody. Do stworzenia komfortowej odzieży uwzględniającej wymagania użytkowe niezbędny jest kompromis pomiędzy przepuszczalnością powietrza i pary wodnej a ochroną przed wnikaniem wody.

## Fizykochemiczny kontekst tekstyliów odpornych na wodę

Zachowanie wody na powierzchni materiału wynika z parametrów fizykochemicznych jej cząstek w tym:

- silnej polarności molekuł  $H_2O$ ,
- zdolności do tworzenia wiązań wodorowych.

Wymienione dwie podstawowe cechy spowodowane są nieliniową budową cząsteczki oraz dużą polaryzacją wiązań tlen-wodór z czego wynika stały moment dipolowy cząsteczki wody (ryc. 1). Rozmiar pojedynczej cząsteczki wody to około 0,2 nm, kąt między tlenem i wodorami wynosi  $104,4^\circ$  w fazie gazowej,  $105,5^\circ$  w fazie ciekłej i  $108^\circ$  w fazie stałej. Pomiedzy cząsteczkami wody w fazie ciekłej nieustannie powstają i pękają wiązania wodorowe co powoduje, że mamy do czynienia z dynamicznymi klasterami. W wiązaniach wodorowych biorą również udział kationy Zundela  $H_5O_2^+$  i kationy Eigena  $H_3O_4^+$  powstające z jonów hydroksylowych  $H_3O^+$ . Według różnych źródeł średnia liczba wiązań wodorowych przypadająca na jedną cząsteczkę wody w temperaturze  $25^\circ C$  wynosi od 3,8 do 2,8 (Xenides, 2006, Bukowski, 2007). W fazie gazowej natomiast cząsteczki wody nie tworzą większych skupisk tylko występują jako pojedyncze molekuły.



**Ryc. 1.** Podstawowe parametry cząsteczki wody, wielkość i zakres kątów pomiędzy atomami (A), wiązanie wodorowe powstające pomiędzy cząsteczkami wody (B). Kolorem niebieskim oznaczono tlen, a czerwonym wodór

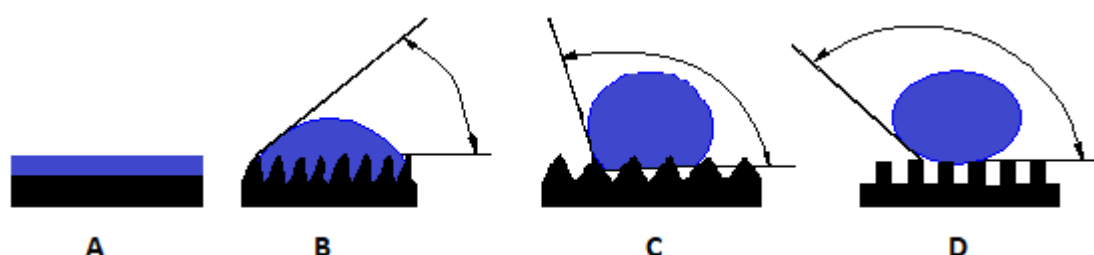
*Fig. 1. Basics parameters of water molecule, size and range of angles between atoms (A), hydrogen bonding arising between two water molecules (B). Blue color is marked oxygen, red hydrogen*

W fazie ciekłej molekuły wody występujące na granicy faz woda-powietrze są silnie wciągane do wnętrza cieczy na skutek występowania dużej liczby wiązań wodorowych i działania kohezji. Zjawisko to generuje między innymi duże zapotrzebowanie na energię niezbędną do wytworzenia powierzchni swobodnej oraz duże napięcie powierzchniowe ( $72,75 \text{ mJ/m}^2$ ) ciekłej wody. Ponadto wiązania wodorowe generują dużą gęstość ( $997,07 \text{ kg/m}^3$ ), lepkość ( $8,91 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) i wysokie ciepło parowania ( $2441,70 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) wody w temperaturze  $25^\circ C$  (Williams, 2013).

Wodoodporność tekstyliów w znacznym stopniu zależy od napięcia powierzchniowego powstającego na granicy faz woda-materiał. Na napięcie pomiędzy powierzchnią materiału a wodą największy wpływ ma morfologia i struktura powierzchni, tj.:

- kompozycja przędzy i włókien,
- mikrostruktura powierzchni (porowatość, ciągłość) (Park, 2017),
- struktura porów na powierzchni (rozmiar, kształt, rodzaj).

Optymalną strukturę materiału wodoodpornego charakteryzuje nie tylko odporność na wnikanie ciekłej wody, ale również jej odpychanie, tak by krople samoczynnie z niej spadały. Fizycznym parametrem charakteryzującym właściwości powierzchni w aspekcie oddziaływania z wodą (hydrofobowość lub hydrofilowość) jest kąt zwilżania powierzchni (ryc. 2).



Ryc. 2. Kąt zwilżania powierzchni wodą: A – całkowicie zwilżalna (hydrofilowa), B – zwilżalna (hydrofobowa), C – niezwilżalna (hydrofobowa), D – całkowicie niezwilżalna (superhydrofobowa)

Fig. 2. Contact angle of water, level of wetting: A – complete wetting (hydrophilic), B – high wettability (hydrophobic), C – low wettability (hydrophobic), D – non wettability (superhydrophobic)

Tekstylia klasyfikowane są w grupach odporności na wodę w zależności od statycznego kąta zwilżania jak przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podział tekstyliów w zależności od statycznego kąta zwilżania wody

Table 2. Classification of textiles depending on static contact angle

Statyczny kąt zwilżania [°]	Właściwości powierzchni
0	Powierzchnia hydrofilowa, całkowicie zwilżalna
0 – 90	Powierzchnia hydrofilowa dobrze i umiarkowanie zwilżalna
90 – 120	Powierzchnia hydrofobowa umiarkowanie i wysoce niezwilżalna
120 – 150	Powierzchnia hydrofobowa, nie zwilżalna
150 – 180	Powierzchnia superhydrofobowa, nie zwilżalna

Paroprzepuszczalność („oddychalność”) w przypadku tekstyliów odpornych na działanie wody dotyczy zdolności materiału do odprowadzania wilgoci pochodzącej z ciała człowieka do środowiska. Szybkość przenikania pary wodnej przez materiał jest uzależniona od oporności pary wodnej danego materiału w danej temperaturze i jest wyrażana w g/m<sup>2</sup>·Pa. Innym ważnym parametrem charakteryzującym materiał paroprzepuszczalny jest przepuszczalność powietrza. Szczególne

znaczenie w tekstyliach mają membrany paroprzepuszczalne jednak nieprzepuszczalne dla powietrza (Gunesoglu, 2017).

Najważniejszymi procesami odpowiedzialnymi za odprowadzanie pary wodnej przez tekstylia, w kierunku od ciała człowieka do środowiska, są dyfuzja, osmoza i mechanizm kapilarny oraz mechanizm absorpcyjno-desorpcyjny. Dyfuzja w ujęciu konwencjonalnym jest procesem przemieszczania się cząsteczek pary wodnej ze środowiska o większym stężeniu do środowiska o mniejszym stężeniu w celu osiągnięcia równowagi termodynamicznej (maksimum entropii i minimum entalpii swobodnej). Osmoza zachodzi według podobnego mechanizmu do dyfuzji jednak uwzględniania jest w tym przypadku membrana przepuszczająca tylko wybrane cząstki. W przypadku mechanizmu kapilarnego istotne jest uzyskanie tzw. histerezy kapilarnej odparowywania wody z powierzchni poprzez odpowiednie parametry kapilar. Mechanizm absorpcyjno-desorpcyjny wymaga zastosowania odpowiednich włókien, które z jednej strony promują absorpcję pary wodnej oraz jej przenoszenie wzdłuż włókna, a z drugiej desorpcję cząsteczek wody z powierzchni. Najprostszym sposobem dyfuzji w aspekcie odzieży jest przenoszenie pary wodnej przez warstwę powietrza znajdującego się pomiędzy włóknami tkaniny. Szybkość tego rodzaju dyfuzji zależy głównie od gradientu ciśnień, ale również od gęstości upakowania tkaniny i wielkości posiadanych porów. W zaawansowanych membranach paroprzepuszczalnych mamy do czynienia z mechanizmem osmotycznym lub kapilarnym, który zależy od rozmiaru, kształtu i rodzaju porów lub kapilar (Haghi, 2011).

### **Konstrukcje tekstyliów wodoodpornych**

Tekstylia wodoodporne i oddychające wytwarza się używając gęstych materiałów konstruowanych z cienkich przędz, które muszą być przepuszczalne dla powietrza i pary wodnej. Materiały takie poddawane są modyfikacji powierzchniowej poprzez impregnację lub laminację w celu nadania im wodoodporności oraz zwiększenia tzw. oddychalności.

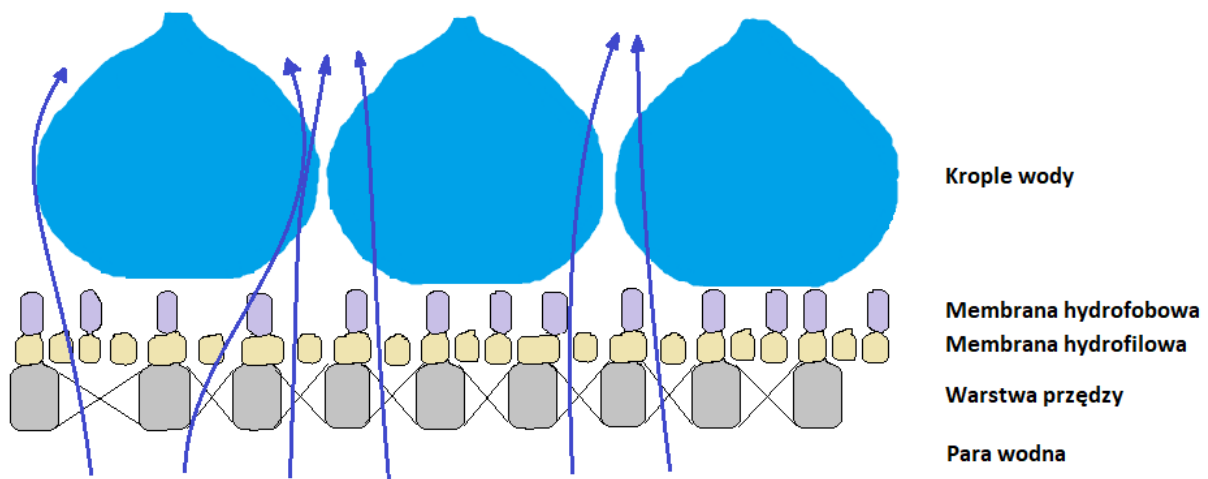
Zwiększenie potencjału do przepuszczania pary wodnej uzyskuje się poprzez zastosowanie materiałów posiadających dużą liczbę grup hydrofilowych, jak np.:  $-OH$ ,  $-COOH$ ,  $-NH_2$ ,  $-CONH$  lub hydrofilowych membran porowatych. W materiałach zawierających grupy funkcyjne następuje absorpcja i desorpcja cząsteczek wody, a szybkość procesu jest uzależniona między innymi od powierzchni właściwej materiału. W przypadku porowatych membran hydrofilowych występują procesy osmozy, adsorpcji i desorpcji oraz kondensacji i ewaporacji kapilarnej. Szybkość procesu jest uzależniona od wielkości, kształtu (rodzaju) i rozmieszczenia porów w membranie. Ze względu na średnicę wyróżniamy następujące pory:

1. Makropory  $>50$  nm,
2. Mezopory 50-2 nm,
3. Mikropory  $<2$ nm.

Ze względu na kształt wyróżnia się następujące pory:

- cylindryczne – jednostronnie lub obustronnie otwarte,
- koniczne (stożkowe),
- sferyczne,
- beczkowe,
- butelkowe,
- szczelinowe.

Wodoodporność tekstyliów oddychających uzyskuje się poprzez impregnację lub laminację substancjami hydrofobowymi, które również posiadają pory, jednak znacznie większe niż w przypadku „oddychających” membran hydrofilowych. Pory membrany hydrofobowej muszą być mniejsze niż krople wody, aby zatrzymać je na powierzchni, jednak znaczenie większe niż pojedyncze cząsteczki wody i małe klastry, aby nie blokować dyfuzji, osmozy i mechanizmu absorpcyjno-desorpcyjnego (ryc. 3) (Jeon, 2016).



**Ryc. 3.** Konstrukcja materiału tekstylnego wodoodpornego i paroprzepuszczalnego zbudowanego z przędzy oraz porowatych membran: hydrofilowej i hydrofobowej

*Fig. 3. Construction of waterproof and breathable material made of yarns and porous membranes: hydrophilic and hydrophobic*

Powłoki porowate na tekstyliach wodoodpornych i oddychających uzyskiwane są następującymi metodami poprzez (Kramar, 1998; Mukhopadhyay, 2008; Shekar, 2003):

- nanoszenie polimerów w procesie koagulacji z roztworu, wywołane wprowadzeniem lub odparowaniem selektywnego rozpuszczalnika,
- nanoszenie piany lub emulsji polimerowej,
- ekstrakcję rozpuszczalnikową z wykorzystaniem soli,
- selektywne wypłukiwanie fragmentów warstwy polimerowej na materiale,
- rozpylanie radiacyjne,
- chemiczne osadzanie z fazy gazowej,
- osadzanie elektrochemiczne,

- elektroprzewodzenie,
- termiczne nanoszenie materiałów wytwarzanych przez ekstruzję z przedmuchem,
- mechanicznie rozrywanie ciągłych membran prowadzące do fibrylacji, jak również poprzez nanoszenie gotowych membran w procesie laminacji.

Wśród materiałów polimerowych wykorzystywanych do wytwarzania membran porowatych można wyróżnić:

- kauczuki syntetyczne w różnych kombinacjach,
- poliolefiny, w tym poli(tetrafluoroetylen), polietylen i poli(chlorek winylu),
- poliakrylany w tym polimetakrylany,
- poliestry,
- poliuretany,
- poliamidy,
- silikon.

Wśród wymienionych materiałów najczęściej wykorzystywanymi są poliuretany. Należy również uwzględnić możliwość liniowej i rozgałęzionej budowy makrocząsteczek jak również tworzenia materiałów usieciowanych i sieci polimerowych z wykorzystaniem wymienionych grup polimerów (Wu, 2012).

## **Metody badania tekstyliów wodoodpornych**

Wyznaczenie najważniejszych parametrów tekstyliów wodoodpornych i oddychających wymaga stosowania powtarzalnych i sprawdzonych metod analitycznych. Odporność tkaniny na adsorpcję wody można wyznaczyć między innymi metodą wagową. Po 20 minutach zanurzania tkaniny w wodzie przeprowadza się piętnastosekundowe odwirowanie i ponownie waży tkaninę. Metoda jest przydatna w szczególności dla tkanin przeznaczonych do długotrwałego kontaktu z wodą (BS/EN 3449:1990 Method for resistance of fabrics to water absorption (static immersion test) (BSI, 1990).

Wskazany wcześniej kąt zwilżania, jako miara hydrofobowości powierzchni, można wyznaczać w warunkach statycznych i dynamicznych. W obu przypadkach po naniesieniu kropli wody na powierzchnię rejestrowany jest obraz kropli. Badana powierzchnia w metodzie statycznej znajduje się pod kątem neutralnym, natomiast w dynamicznej powierzchnia jest pochylona generując dodatkowo ruch kropli po powierzchni. Metoda pomiaru kąta zwilżania w warunkach dynamicznych jest szczególnie przydatna do powierzchni niejednorodnych oraz charakteryzujących się dużą chropowatością (Sacevičienė, 2016).

Do określania hydrofobowości tekstyliów testuje się również ich odporność na działanie roztworów alkohol/woda o różnym stężeniu. Na powierzchnię materiału nanosi się krople roztworów alkohol izopropylowy/woda o różnym stężeniu i mierzy czas utrzymywania kropli na powierzchni (BS/EN/ISO 23232:2009 Aqueous liquid repellency. Water/alcohol solution resistance test (BSI, 2009). Podobnie mierzona jest odporność tkanin na oleje (BS/EN/ISO 14419:2010 Textiles. Oil repellency. Hydrocarbon resistance test (BSI, 2010).



Badanie wodoodporności tkanin można przeprowadzić jedną z metod dynamicznych:

- test natryskowy – rozpylanie z dyszy wody na próbkę znajdującą się pod kątem 45° względem dyszy i następnie ocena kropeł wody powstających po uderzeniu materiałem o twardą powierzchnię (BS/EN/ISO 4920:2012 Textile fabrics. Determination of resistance to surface wetting (spray test) (BSI, 2012a)),
- test penetracji – rozpylanie z dyszy wody na próbkę znajdującą się pod kątem 45° względem dyszy i wagowa ocena przyrostu masy bibuły przylegającej do materiału od strony nie natryskiwanej (BS/EN/ISO 18695:2007 Textiles. Determination of resistance to water penetration. Impact penetration test (BSI, 2007)),
- test prysznicowy Bundesmann'a – tkanina jest zraszana w sposób symulujący deszcz i po 10 minutach poruszana w celu symulacji ruchu człowieka. Analizowana jest ilość wody, która przedostała się przez tkaninę (BS/EN/ISO 29865:1993 Determination of water repellency of fabrics by the Bundesmann rain-shower test (BSI, 1993)),
- test hydrostatyczny – tkanina poddawana jest naporowi hydrostatycznego słupa wody o zwiększającej się wartości do momentu przeniknięcia przez tkaninę w trzech różnych miejscach (BS/EN 20811:1992 ISO 811:1981 Textiles. Determination of resistance to water penetration—Hydrostatic pressure test (BSI, 1992).

Oprócz testów na wodoodporność tkaniny poddawane są ocenie trwałości wykonania, wśród których najważniejsze to wielokrotne pranie i suszenie oraz ścieranie (Ozen, 2012).

## **Literatura**

- BS/EN 20811:1992 ISO 811:1981 Textiles. Determination of resistance to water penetration—Hydrostatic pressure test (BSI, 1992).
- BS/EN 3449:1990 Method for resistance of fabrics to water absorption (static immersion test) (BSI, 1990).
- BS/EN/ISO 14419:2010 Textiles. Oil repellency. Hydrocarbon resistance test (BSI, 2010).
- BS/EN/ISO 18695:2007 Textiles. Determination of resistance to water penetration. Impact penetration test (BSI, 2007).
- BS/EN/ISO 23232:2009 Aqueous liquid repellency. Water/alcohol solution resistance test (BSI, 2009).
- BS/EN/ISO 29865:1993 Determination of water repellency of fabrics by the Bundesmann rain-shower test (BSI, 1993).
- BS/EN/ISO 4920:2012 Textile fabrics. Determination of resistance to surface wetting (spray test) (BSI, 2012a).
- Bukowski R., Szalewicz K., Groenenboom G. C., van der Avoird A., 2007. Predictions of the properties of water from first principles. *Science* 315: 1249-1252.

- Gunesoglu S., Cerci E., Topalbekiroglu M., 2017. The improved breathability of polyurethane coated cotton fabric via micro-cracking. *The Journal of the Textile Institute* 108: 1815-1821.
- Heat & Mass Transfer in Textiles, 2<sup>nd</sup> Edition. Haghi, A.K. (eds.) 2011. Basic Concepts of Heat Transfer through Fabrics. WSEAS Press: 21-31.  
<https://www.gore-tex.com/experience/our-history>, dostęp 8.05.2018.
- Jeon S., Rajabzadeh S., Okamura R., Ishigami T., Hasegawa S., Kato N., Matsuyama H., 2016. The Effect of Membrane Material and Surface Pore Size on the Fouling Properties of Submerged Membranes. *Water* 8: 602-613.
- Kramar L., 1998. Recent and future trends for high performance fabrics providing breathability and waterproofness. *Journal of Industrial Textiles* 28: 106-115.
- Loghin C., 2003. *Welding of Textile Materials*. Performantica Publishing House.
- Mukhopadhyay A., Midha V. K., 2008. A review on designing the waterproof breathable fabrics part I: fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 37: 225-262.
- Ozen I., 2012. Multi-layered Breathable Fabric Structures with Enhanced Water Resistance. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 7: 63-69.
- Park S., Kim J., Park Ch. H., 2017. Influence of micro and nano-scale roughness on hydrophobicity of a plasma-treated woven fabric. *Textile Research Journal* 87: 193-207.
- Sacevičienė V., Jucienė M., Bieliūnienė V., Čepauskienė V., Urbelis V., 2016. Investigation of the wettability of the hydrophobic textile after mechanical treatments. *Polymer Science* 64: 118-123.
- Shekar R. I., Yadav A. K., Kumar K., Tripathi V. S., 2003. Breathable apparel fabrics for defence applications. *Man-Made Text.* 46: 9-16.
- Williams M., 2013. *The Merck Index – An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*, 15th Edition [in:] M.J. O'Neil (eds.). Royal Society of Chemistry 74.
- Wu D., Xu F., Sun B., Fu R., He H., Matyjaszewski K., 2012. Design and Preparation of Porous Polymers. *Chemical Reviews* 112: 3959-4015.
- Xenides D., Randolph B. R., Rode B. M., 2006. Hydrogen bonding in liquid water: An ab initio QM/MM MD simulation study. *Journal of Molecular Liquids* 123: 61-67.

## **Abstract**

One of most important functional materials used in constructing "intelligent" fabrics are waterproof textiles. The expansion which occurs in the field of waterproof materials since 80 years, results in develop impregnates and polymer membranes having optimal properties. Goal-oriented creating of waterproof materials and ensuring their comfortable usage requires to provide of consideration of molecular structure of water molecules. Research in waterproof materials area supported the development of new methods of membranes manufacturing, polymer coatings as well as the progress in polymer synthesis.

**Key words:** waterproofness, polymer membranes, physicochemical parameters of water

# Śląskie Centrum Wody

Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach

Powstanie Centrum to efekt realizacji i komercjalizacji projektu ZIZOZap. Tematyka badawczo-dydaktyczna Centrum obejmuje dziedzinę nauki związanych z fizycznymi, chemicznymi, biologicznymi i ekologicznymi aspektami gospodarowania wodami. Jednym z najważniejszych zadań Centrum jest koordynacja interdyscyplinarnych badań w dziedzinach nauki związanych z wodą, prowadzonych na Uniwersytecie i w innych współpracujących z nim jednostkach badawczych.

Centrum jest ważnym ogniwem łączącym naukę z gospodarką, poprzez komercjalizację wyników badań, a także prowadzenie działalności

## Propozycje Śląskiego Centrum Wody Edukacja

**Podstawowa** - wykłady, zajęcia laboratoryjne i terenowe we współpracy ze szkołami średnimi  
**Spółeczna** - wykłady popularnonaukowe i warsztaty z zakresu dobrych praktyk gospodarowania ekosystemami wodnymi  
**Zaawansowana** – pozyskiwanie finansowania i realizacja wspólnych projektów naukowo-badawczo-edukacyjnych w kooperacji ze szkołami średnimi  
**Akademicka** – prace licencjackie i magisterskie oraz realizacja prac naukowo-badawczych i projektów badawczo-rozwojowych przez studentów, praktykantów i wolontariuszy  
**Eksperska** - studia doktoranckie obejmujące warsztaty, analizy, praktyki i wiedzę specjalistyczną z zakresu specjalizacji ŚCW  
**Szkolenia i warsztaty** dla pracowników administracji publicznej z zakresu gospodarowania wodami i środowiskiem wodnym.

## Dla administracji państwowej samorządowej i przedsiębiorstw

- Wsparcie eksperckie dotyczące między innymi ekologii wód, gospodarowania wodami, hydrobiologii i biologii wód, ichtiologii, hydrologii, hydroakustyki, hydrogeologii, analiz środowiskowych, GIS.
- Kreatywne podejście do niestandardowych zagadnień związanych z gospodarowaniem wodami.
- Ekspertyzy środowiskowe.
- Analizy batymetryczne akwenów, nawigacyjne mapy batymetryczne, mapy miąższości osadów.
- Analizy rozkładu przestrzennego właściwości chemicznych wód.
- Analizy i mapowanie przestrzennego rozkładu roślinności przybrzeżnej i zanurzonej
- Analizy ichtiologiczne.
- Analizy jakości wód uwzględniające obszar zlewni w oparciu o przyczyny i skutki zdiagnozowanych presji oraz model DPSIR
- Monitoring interwencyjny w zakresie przyczyn złego stanu wód oraz lokalizacja nielegalnych zrzutów ścieków.
- Modelowanie matematyczne hydrauliki, fizykochemii wód i dynamiki zmian ekosystemów wodnych
- analizę przyczynowo skutkową stanu wód.
- Analizy predyktoryjne stanu ekosystemów wodnych wywołane działaniami człowieka i zmianami klimatu.
- Analizy usług ekosystemowych obszarów wodnych.



50  
lat



WYDZIAŁ BIOLOGII  
I OCHRONY ŚRODOWISKA



WYDZIAŁ  
NAUK O ZIEMI  
UNIWERSYTET ŚLĄSKI



INSTYTUT CHEMII  
UNIWERSYTET ŚLĄSKI



# śląskie centrum wody



modelowanie  
hydrologia  
edukacja

ekosystemy  
chemia wody  
hydrobiologia

śląskie Centrum Wody Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach  
ul. Bankowa 5 pok. 203, 40-007 Katowice,  
tel. 32 359 22 29  
email: [scw@us.edu.pl](mailto:scw@us.edu.pl),  
strona internetowa: <http://www.scw.us.edu.pl/>



Innowator Śląska



50  
lat



WYDZIAŁ BIOLOGII  
I OCHRONY ŚRODOWISKA



WYDZIAŁ  
NAUK O ZIEMI  
UNIWERSYTET ŚLĄSKI



INSTYTUT CHEMII  
UNIWERSYTET ŚLĄSKI

