

Aleksandra Sokołowska, Katarzyna Jankowska, Eliza Kulbat, Krystyna Olańczuk-Neyman

Badania stabilności biologicznej wody w wybranych systemach wodociągowych

Brak stabilności biologicznej wody zasilającej system dystrybucji uznaje się za jedną z głównych przyczyn jej wtórnego zanieczyszczenia wywołanego rozwojem mikroorganizmów. Nawet nieliczne mikroorganizmy zawieszone w wodzie zasilającej system, łącznie z występującymi w obrotach na wewnętrznych ściankach przewodów wodociągowych, mogą się rozwijać kosztem obecnych w niej organicznych i nieorganicznych substancji pokarmowych. Zjawisko może skutkować nie tylko skażeniem mikrobiologicznym, lecz także prowadzić do szkodliwych zmian cech fizyczno-chemicznych wody.

Wprawdzie przyjmuje się, że podstawowym kryterium utrzymania stabilności biologicznej wody poddawanej dezynfekcji (w przypadku ujmowania wody powierzchniowej) jest nieprzekroczenie dopuszczalnej zawartości biodegradowalnego węgla organicznego i jego frakcji przyswajalnej oraz azotu nieorganicznego i jonów fosforanowych, to jednak wobec bardzo małych wymagań pokarmowych mikroorganizmów, a także dostępności substancji pokarmowych w samej sieci wodociągowej (osady), jego spełnienie nie eliminuje ich wtórnego wzrostu [1–4]. W przypadku wody pochodzącej z ujęcia podziemnego, niepoddawanej procesowi dezynfekcji, nie ma natomiast ustalonego kryterium stabilności biologicznej. W dostępnym piśmiennictwie brakuje danych o skuteczności fizyczno-chemicznych procesów oczyszczania wód (powierzchniowych i podziemnych) w usuwaniu mikroorganizmów, w powiązaniu z cechami mikrobiologicznymi wody rozprowadzanej w systemie dystrybucji.

W pracy przedstawiono wyniki badań bakteriologicznych wody powierzchniowej i wód podziemnych (ujmowanych, oczyszczonych i rozprowadzanych siecią wodociągowa w rejonie Trójmiasta), które zasilają system dystrybucji charakteryzujący się małą wartością stosunku powierzchni kontaktu do objętości przesyłanej wody ($\approx 0,65$), a także wyniki laboratoryjnych badań ich stabilności biologicznej. Dokonano również oceny skuteczności stosowanych procesów technologicznych w zmniejszaniu ogólnej liczby bakterii, a w badaniach laboratoryjnych określono podatność wody wprowadzanej do systemu dystrybucji na ich wtórny wzrost.

Obiekty badań

Pracami badawczymi objęto trzy obiekty wodociągowe zlokalizowane w rejonie Trójmiasta: jeden zakład oczyszczania wody powierzchniowej (ZUW-1) oraz dwa zakłady oczyszczania wód podziemnych (ZUW-2 i ZUW-3). Dwa ostatnie zakłady ujmują wodę z utworów czwartorzędowych, które są podstawowym źródłem zaopatrzenia całego regionu. Cechują się one dobrą jakością, a przekroczenia dopuszczalnych wartości wskaźników dotyczą głównie związków żelaza i manganu, azotu amonowego oraz intensywności barwy [5, 6]. W przypadku zakładów ZUW-1 i ZUW-2 pobierano próbki wody z obu ujęć oraz wody oczyszczonej, a także wody z sieci wodociągowej – odpowiednio SW-1 i SW-2. W przypadku zakładu ZUW-3 pobierano próbki wody z ujęcia kredowego i czwartorzędowego, wody zmieszanej (oczyszczona woda z ujęcia czwartorzędowego z nieoczyszczoną wodą z ujęcia kredowego) oraz wody oczyszczonej (zmieszane wody kredowe i czwartorzędowe po procesach oczyszczania). Charakterystykę badanych obiektów przedstawiono w tabeli 1.

Metody badań

Podczas badań wykonanych w latach 2011–2014 analizom bakteriologicznym poddano 220 próbek wody pochodzącej z ujęcia powierzchniowego (ZUW-1) oraz 180 próbek z ujęcia wód podziemnych (ZUW-2). Badania jakości wody w drugim zakładzie ujmującym wody podziemne (ZUW-3) prowadzono w latach 2011–2012. Do badań fizyczno-chemicznych pobrano po 35 próbek z zakładów ZUW-1 i ZUW-2 oraz 24 próbki z zakładu ZUW-3. Wybrane wskaźniki fizyczne wody (temperatura, pH, przewodność elektrolityczna właściwa) oznaczono z użyciem sondy przenośnej WTW Multi 340i/SET. Zawartość pierwiastków biogenych (azot, fosfor) oznaczono z wykorzystaniem analizatora kolorymetrycznego, a związków żelaza i manganu (tylko w wodach podziemnych) z użyciem aparatu AAS Vario 6 (Analytik Jena).

Próbki wody do badań mikrobiologicznych utrwalano roztworem formaldehydu do końcowego stężenia 2%. Liczebność i strukturę bakteriocenozy, czyli całkowitą liczbę komórek, biomasę, średnią objętość komórek oraz strukturę wielkościową i morfologiczną, analizowano z zastosowaniem mikroskopu epifluorescencyjnego. W tym celu próbki wody o objętości 6 cm³ barwiono barwnikiem

Tabela 1. Charakterystyka badanych systemów wodociągowych
Table 1. Characteristics of water treatment systems studied

Obiekt badań	Ujmowana woda	Układ oczyszczania wody	Liczba mieszkańców	Maksymalna odległość od ZUW	Liczba punktów pomiarowych	Czas badań	Liczba próbek**
ZUW-1	powierzchniowa	ozonowanie wstępne, koagulacja, filtracja pospieszna (złoża piaskowe), ozonowanie pośrednie, adsorpcja (złoża węglowe), dezynfekcja (chlor i dwutlenek chloru)	140 tys.	15,6 km	7	24 miesiące	220
ZUW-2	podziemna (czwartorzęd)	napowietrzanie, filtracja pospieszna (złoża wpracowane uaktywniane nadmanganianem potasu)	90 tys.	6,0 km	7	24 miesiące	180
ZUW-3	podziemna* (czwartorzęd + kreda)	napowietrzanie, filtracja pospieszna I ^o (złoża antracytowo-piaskowe), filtracja pospieszna II ^o (złoża piaskowo-piroluzytowe uaktywniane podchlorynem sodu)	38 tys.	–	4	24 miesiące	150

*woda z ujęcia czwartorzędowego jest mieszana z wodą z ujęcia kredowego

**do badań bakteriologicznych

fluorescencyjnym DAPI (4,6-diamidino-2-phenyl-indol) do uzyskania jego końcowej zawartości równej $2 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, a następnie sączono przez nukleoporowe, membranowe filtry poliwęglanowe o średnicy porów $0,22 \mu\text{m}$ [7]. Filtry zatapiano na szkiełkach mikroskopowych w niefluoryzującym oleju immersyjnym (Citifluor) i nakładano szkiełko nakrywkowe. W dalszych badaniach wykorzystano mikroskop epifluorescencyjny Nikon 80i o powiększeniu użytecznym $1200\times$, wyposażonym w system składający się z przystawki do mikroskopu (EpiF), kolorowej kamery z chłodzeniem o wysokiej rozdzielczości (Nikon DS-5 Mc-U2), komputera z kartą aktywizacji obrazu oraz komercyjnych programów do analizy obrazu (NIS-Elements BR 3,0 i Multiscan 14,02). Wyniki automatycznego zliczania i pomiarów komórek bakteryjnych analizowano z użyciem makrodefinicji przygotowanych w programie Excel [8]. Całkowita liczba i średnia objętość komórek została wyznaczona na podstawie wyników z 20 kolejnych pól widzenia i odpowiednich algorytmów. Biomasa bakterioplanktonu oszacowano na podstawie liczby i średniej objętości komórek z wykorzystaniem wzoru Norlanda [9]. Komórki bakteryjne zostały podzielone na trzy rodzaje morfologiczne – kuliste, cylindryczne i pozostałe (krzywe) na podstawie algorytmów geometrycznych zawartych w makrodefinicji.

Ocenę podatności wody na wtórny wzrost mikroorganizmów przeprowadzono w zestawach laboratoryjnych odpowiadających dwóm systemom – nieprzepływowym i przepływowym. Zastosowanie zestawów laboratoryjnych miało na celu uniknięcie wpływu oddziaływania materiałów i obrostów sieci wodociągowej na wynik badań. W systemie nieprzepływowym wodę gromadzono w szklanych zbiornikach o pojemności 10dm^3 i w ustalonej temperaturze prowadzono inkubację przez 3 tygodnie. W systemie przepływowym (zamkniętym) obieg wody między dwoma zbiornikami o pojemności 10dm^3 wymuszono za pomocą pomp perystaltycznych, utrzymując prędkość przepływu wody około $0,02 \text{m/s}$. Badania w tych warunkach trwały również 3 tygodnie. W obu systemach badaniom poddano 7 różnych rodzajów próbek – wodę oczyszczoną z ujęcia powierzchniowego (ZUW-1) oraz nieoczyszczoną i oczyszczoną z ujęcia ZUW-2 (czwartorzęd) i ZUW-3 (kreda, czwartorzęd i woda zmieszana). Każdy rodzaj próbki wody został poddany badaniom w 8 seriach pomiarowych, w których zastosowano trzy wartości temperatury – $5 \pm 1^\circ\text{C}$ i $10 \pm 1^\circ\text{C}$ (charakterystyczne w przypadku wód podziemnych i wody w sieci w okresie zimowym) oraz $18 \pm 1^\circ\text{C}$.

Próbki wody do badań mikrobiologicznych pobierano po upływie 1 d, 2 d, 3 d, 7 d, 14 d oraz 21 d. Analizowano ogólną liczbę bakterii z zastosowaniem mikroskopu epifluorescencyjnego. Na podstawie uzyskanych wartości ogólnej liczby bakterii wyznaczono krzywe wzrostu bakterii oraz obliczono względną szybkość wzrostu bakterii [10].

Wyniki badań poddano analizie graficznej z zastosowaniem programów Excel i Statistica [11].

Wyniki badań i dyskusja

Cechy fizyczno-chemiczne wód

Woda powierzchniowa poddawana jest w zakładzie ZUW-1 konwencjonalnym procesom technologicznym (tab. 1) w celu zmniejszenia między innymi intensywności barwy (śr. $25,5 \text{gPt}/\text{m}^3$) i mętności (śr. $3,3 \text{NTU}$) i po procesie oczyszczania spełnia wymogi stawiane wodzie do spożycia przez ludzi [12]. Stwierdzono, że w wyniku stosowanych procesów technologicznych zawartość fosforu ogólnego zmalała o 89% (śr. do $0,055 \text{gP}/\text{m}^3$), azotu amonowego do poniżej progu oznaczalności (tab. 2), natomiast ogólnego węgla organicznego o 74% (śr. do $1,5 \text{gC}/\text{m}^3$). Końcowa dezynfekcja ($\text{ClO}_2 + \text{Cl}_2$) ma na celu zabezpieczenie odpowiedniej jakości mikrobiologicznej wody w systemie dystrybucji.

Woda z ujęć podziemnych kierowana do zakładów ZUW-2 i ZUW-3 pochodzi z piętra czwartorzędowego i jest klasyfikowana jako dobrej jakości, a usunięcia wymagają zwiększone ilości związków żelaza i manganu oraz dodatkowo – w przypadku zakładu ZUW-3 – azotu amonowego (tab. 1) i twardości węglanowej.

W zakładzie ZUW-2 ujmowana woda jest filtrowana przez złoża ciśnieniowych filtrów pospiesznych typu Culligan okresowo uaktywnianych nadmanganianem potasu, a w zakładzie ZUW-3 (tab. 1) przez złoża antracytowo-kwarcowe filtrów I stopnia, a następnie przez uaktywniane podchlorynem sodu złoża kwarcowo-piroluzytowe filtrów II stopnia. W celu ograniczenia twardości węglanowej (wynoszącej ponad $360 \text{gCaCO}_3/\text{m}^3$) wodę po procesach oczyszczania w zakładzie ZUW-3 początkowo rozcieńczano w stosunku 2:1 wodą ujmowaną z piętra kredowego o niewielkiej twardości ogólnej ($48 \div 68 \text{gCaCO}_3/\text{m}^3$), co skutkowało wytrącaniem znacznych ilości osadu w zbiorniku wody czystej. Po modernizacji stacji (od 2011 r.) wody te są mieszane przed procesami oczyszczania [13].



Tabela 2. Wartości wybranych wskaźników fizyczno-chemicznych wody
Table 2. Values of the selected physico-chemical parameters of water

Objekt badań	Woda	Wartość	Wskaźnik, jednostka									
			pH	barwa, gPt/m ³	azot amonowy, gN/m ³	azotyny, gN/m ³	azotany, gN/m ³	azot ogólny, gN/m ³	fosforany, gP/m ³	fosfor ogólny, gP/m ³	ChZT, gO ₂ /m ³	
ZUW-1	ujęcie (powierzchniowa)	minimum + maksimum	7,3÷8,2	3÷32	0,080÷0,089	0,028÷0,036	0,399÷0,580	0,837÷0,948	0,228÷0,346	0,431÷0,456	10,1÷11,9	
		średnia	7,8	26	0,0845	0,032	0,5445	0,825	0,298	0,4435	11,0	
	oczyszczona	minimum + maksimum	7,2÷8,2	2÷4	*	0,002÷0,005	0,399÷0,443	0,687÷0,741	0,054÷0,208	0,054÷0,257	1,01÷4,35	
ZUW-2	sieć wodociągowa	minimum + maksimum	7,2÷8,2	2÷9	0,000÷0,034	0,007÷0,011	0,091÷0,829	0,73÷1,34	0,036÷0,715	0,033÷0,72	4,1÷5,7	
		średnia	7,7	7	0,015	0,009	0,365	0,935	0,254	0,258	4,9	
	ujęcie (czwartorzęd)	minimum + maksimum	7,3÷7,9	5÷15	0,003÷0,017	0,006÷0,008	0,048÷0,084	0,136÷0,255	0,061÷0,099	0,07÷0,093	1,15÷2,78	
ZUW-3	ujęcie (kreda)	minimum + maksimum	7,6	9	0,014	0,0075	0,0785	0,275	0,0635	0,077	0,57	
		średnia	7,7	5	0,028	<0,005	0,139	0,293	0,031	0,031	3,17	
	oczyszczona	minimum + maksimum	7,3÷7,9	1÷7	0,001÷0,082	<0,005	0,107÷0,169	0,212÷0,4	0,025÷0,035	0,026÷0,032	2,61÷3,48	
ZUW-3	sieć wodociągowa	minimum + maksimum	7,7	6	0,0002	<0,015	0,1046	0,3156	0,065	0,066	5,15	
		średnia	7,7	6	0,0002	<0,015	0,1046	0,3156	0,065	0,066	5,15	
	ujęcie (kreda)	minimum + maksimum	7,2÷7,9	10÷12	0,795÷0,831	<0,015	<0,23	0,12÷0,98	0,05÷0,07	0,05÷0,067	9,4÷24	
ZUW-3	ujęcie (czwartorzęd)	minimum + maksimum	7,6	11	0,800	<0,015	<0,23	0,85	0,064	0,065	17,3	
		średnia	7,6	11	0,800	<0,015	<0,23	0,85	0,064	0,065	17,3	
	oczyszczona	minimum + maksimum	6,9÷7,1	20÷35	1,176÷1,518	0,015÷0,024	<0,23	1,32÷1,70	0,09÷0,27	0,28÷0,38	8,6÷12,2	
ZUW-3	ujęcie (czwartorzęd)	minimum + maksimum	7,0	25	1,350	0,020	<0,23	1,60	0,15	0,33	10,75	
		średnia	7,0	25	1,350	0,020	<0,23	1,60	0,15	0,33	10,75	
	oczyszczona	minimum + maksimum	7,0÷7,1	5÷9	0,050÷0,100	<0,015	0,61÷0,68	0,40÷0,79	<0,05	0,05÷0,08	11,7÷18,5	
ZUW-3	oczyszczona	minimum + maksimum	7,1	6	0,070	<0,015	0,64	0,65	<0,05	0,06	14,03	
		średnia	7,1	6	0,070	<0,015	0,64	0,65	<0,05	0,06	14,03	

* poniżej granicy wykrywalności

Cechy bakteriologiczne wód

W ujmowanej wodzie powierzchniowej średnia ogólna liczba bakterii, wynosząca $3,7 \cdot 10^5$ kom./cm³, po procesach oczyszczania zmniejszyła się do $1,8 \cdot 10^4$ kom./cm³, tj. o 95% (rys. 1). W wodzie rozprowadzanej w systemie dystrybucji, w miarę oddalania się od stacji oczyszczania, ogólna liczba bakterii stopniowo ulegała zwiększeniu – w punkcie nr 1, oddalonym od zakładu o około 6 km, nastąpił ponad 3-krotny wzrost, a na całym 14-kilometrowym odcinku sieci wzrost ten był ponad 4-krotny. Obserwowany wzrost ogólnej liczby bakterii można tłumaczyć zarówno stopniowym zmniejszaniem się ilości środka dezynfekcyjnego (mieszanina Cl₂ i ClO₂) w wodzie rozprowadzanej w sieci wodociągowej i w konsekwencji rozwojem bakterii pozostałych po dezynfekcji wody, jak również ich wypłukiwaniem z obrotów sieci wodociągowej.

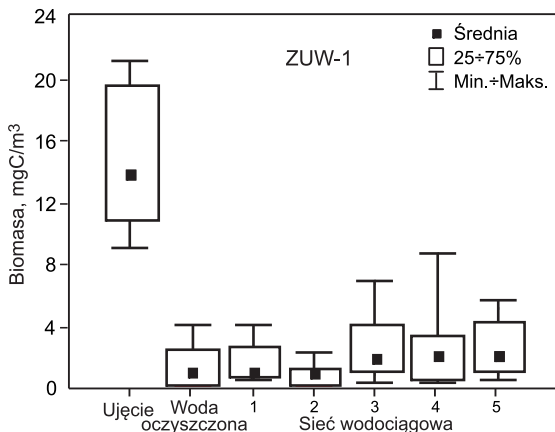
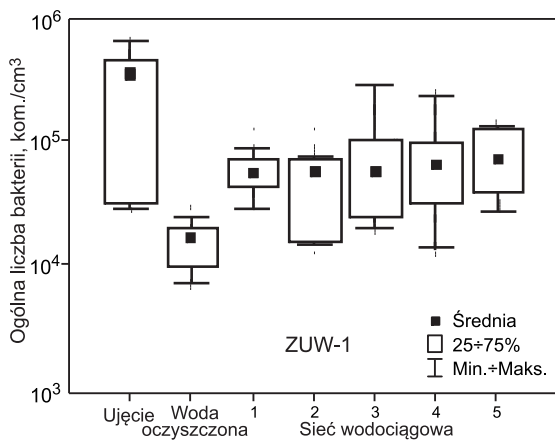
Po procesach oczyszczania średnia zawartość całkowitej biomasy bakterii wyizolowanych z ujmowanej wody powierzchniowej, wynosząca 13,8 mgC/m³, zmalała w wodzie oczyszczonej do wartości 1 mgC/m³ (o 93%) i nie zmieniała się w wodzie rozprowadzanej w sieci wodociągowej do punktu nr 1 odległego o 6 km, po czym w odległości 14 km wzrosła do 2,1 mgC/m³ (rys. 1). Trzykrotnemu wzrostowi ogólnej liczby bakterii na początkowym odcinku sieci (6 km) towarzyszył spadek biomasy pojedynczych komórek z wartości 55,4 fgC/kom. do 16,3 fgC/kom., tzn. ich biomasa zmalała trzykrotnie. Zjawisko to należy tłumaczyć między innymi silnym stresem, jakiemu zostały poddane mikroorganizmy w kolejnych procesach oczyszczania oraz dezynfekcji wody. W kolejnych punktach systemu dystrybucji wody, wskutek stopniowego zaniku środków

dezynfekcyjnych, biomasa pojedynczych komórek bakterii wzrosła do wartości 27,7 fgC/kom., czyli 1,7-krotnie.

Dominującą grupę bakterii zarówno w ujmowanej wodzie powierzchniowej, jak i po procesach jej oczyszczania (ZUW-1) stanowiły pałeczki – odpowiednio (średnio) 71% i 64%. Formy kuliste i krzywe stanowiły odpowiednio 24% i 5% komórek w ujmowanej wodzie oraz 30% i 6% w wodzie wprowadzanej do sieci. Zatem po procesach oczyszczania zwiększył się udział procentowy komórek kulistych kosztem komórek cylindrycznych.

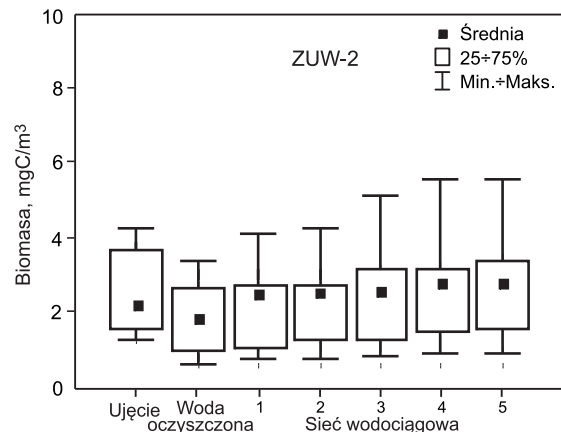
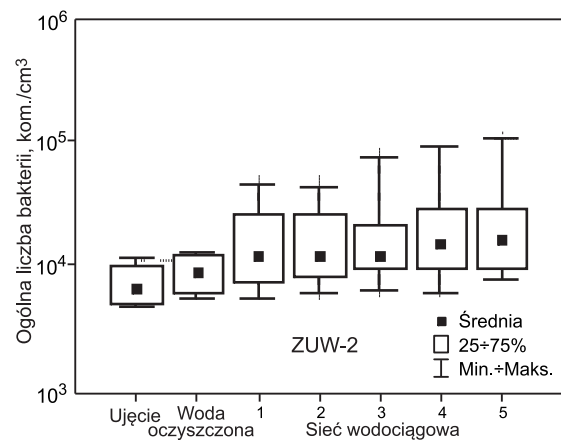
W czwartorzędowej wodzie podziemnej (ZUW-2) średnia ogólna liczba bakterii wynosiła $6,8 \cdot 10^3$ kom./cm³, a po procesach oczyszczania – $9,2 \cdot 10^3$ kom./cm³, tzn. była większa o 26% (rys. 2). Zwiększenie ogólnej liczby bakterii w wodzie po procesach oczyszczania, w stosunku do wody z ujęcia, było najprawdopodobniej skutkiem wypłukiwania komórek bakteryjnych zasiedlających złoża filtrów wpracowanych (uaktywnionych nadmanganianem potasu). W systemie dystrybucji wody ogólna liczba bakterii zmieniała się od $5,6 \cdot 10^3$ kom./cm³ do $1,1 \cdot 10^5$ kom./cm³, a wartość średnia w najdalszym punkcie sieci (nr 5) wyniosła $1,6 \cdot 10^4$ kom./cm³. Na 8-kilometrowym odcinku sieci zaobserwowano średnio 1,7-krotny wzrost ogólnej liczby bakterii.

Całkowita biomasa bakterii w ujmowanej wodzie wynosiła średnio 2,10 mgC/m³, po procesach oczyszczania (złoża filtrów typu Culligan okresowo uaktywniane nadmanganianem potasu) – 1,7 mgC/m³, a w sieci wodociągowej 2,4÷2,7 mgC/m³ (w najdalszych punktach sieci nr 4 i nr 5) (rys. 2). Na 8-kilometrowym odcinku sieci wodociągowej średnia zawartość biomasy bakterii wzrosła 1,5-krotnie.



Rys. 1. Ogólna liczba bakterii i całkowita biomasa bakterii w wodzie powierzchniowej (ZUW-1)

Fig. 1. Total number of bacteria and total biomass of bacteria in surface water (WTP-1)



Rys. 2. Ogólna liczba bakterii i całkowita biomasa bakterii w wodzie podziemnej (ZUW-2)

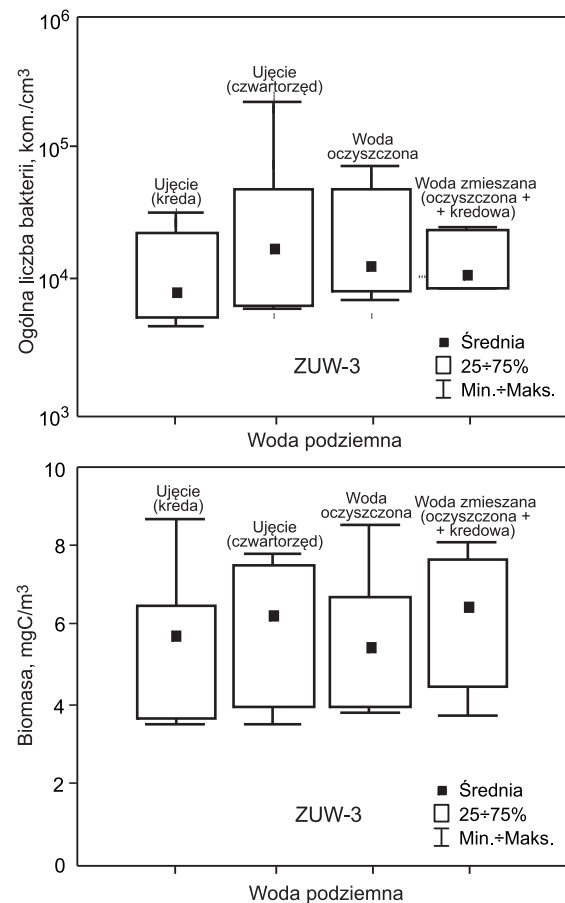
Fig. 2. Total number of bacteria and total biomass of bacteria in groundwater (WTP-2)

Pomimo wzrostu ogólnej liczby bakterii w wodzie po filtracji, średnia zawartość całkowitej biomasy bakterii zmalała o 19% (w stosunku do wody z ujęcia), a pojedynczych komórek o 42%. Zmniejszenie biomasy komórek w wodzie po filtracji było najprawdopodobniej związane z dezynfekującym działaniem nadmanganianu potasu, który był stosowany do uaktywniania złoza filtracyjnego. W odróżnieniu od wyników dotyczących dezynfekowanej wody powierzchniowej (ZUW-1) rozprowadzanej w systemie dystrybucji na długości 6 km, na której zanotowano 3-krotny spadek biomasy pojedynczych komórek bakterii (z 55,4 fgC/kom. do 16,3 fgC/kom.), w przypadku niedezynfekowanej wody podziemnej (ZUW-2), na analogicznej długości sieci spadek ich biomasy wynosił zaledwie 10% (z 18,1 fgC/kom. do 16,4 fgC/kom.). Niewielkie zmiany zarówno ogólnej liczby bakterii, jak i biomasy pojedynczych komórek świadczyły o warunkach niepowodujących namnażania się bakterii w sieci wodociągowej. Najliczniejszą grupę morfologiczną bakterii w ujmowanej wodzie stanowiły pałeczki – 66%, natomiast (średni) udział ziarniaków i form krzywych wyniósł odpowiednio 32% i 2%, przy czym w wodzie oczyszczonej rozprowadzanej w sieci wodociągowej procentowy udział pałeczek zmalał do 62%, natomiast udział ziarniaków zwiększył się do 36%.

W zakładzie ZUW-3 średnia ogólna liczba bakterii w wodzie z piętra czwartorzędowego była ponad 2-krotnie większa ($1,8 \cdot 10^4$ kom./cm³) niż z piętra kredowego ($8,4 \cdot 10^3$ kom./cm³) (rys. 3). W wodzie zmieszanej (czwartorzędowa oczyszczona + kredowa bez oczyszczania) i oczyszczonej średnia ogólna liczba bakterii wynosiła odpowiednio $1,2 \cdot 10^4$ kom./cm³ i $1,3 \cdot 10^4$ kom./cm³. Względnie duża ogólna liczba bakterii w wodzie ujmowanej z piętra kredowego (kierowanej do ZUW-3) wynikała z rozwoju bakterii (auto- i allochtonicznych) w otwartym zbiorniku gromadzącym wodę z tego ujęcia. Pomimo zbliżonej ogólnej liczby bakterii w wodzie zmieszanej oraz oczyszczonej, średnia zawartość całkowitej biomasy bakterii w wodzie zmieszanej (zawierającej wodę kredową) była większa o 18%. We wszystkich rodzajach próbek wody pobieranych z zakładu ZUW-3, podobnie, jak w przypadku zakładów ZUW-1 i ZUW-2, dominującą morfologicznie grupę stanowiły pałeczki średnio od 60% (woda zmieszana) do 66% (woda kredowa). Największy średni udział form kulistych bakterii miał miejsce w wodzie oczyszczonej (38%), a najmniejszy (33%) w wodzie z piętra kredowego.

Podatność wody na wtórny rozwój bakterii

Podatność na wtórny rozwój bakterii oceniano w próbkach wody ujmowanej z ujęć podziemnych (ZUW-2 i ZUW-3) oraz w próbkach wody oczyszczonej ze wszystkich badanych ujęć. W tym celu określono średnią szybkość wzrostu bakterii w badanych próbkach w różnych temperaturach w pierwszym i drugim tygodniu inkubacji (tab. 3). Stwierdzono, że w obu badanych systemach (przepływowym i nieprzepływowym) szybkość wzrostu ogólnej liczby bakterii była zbliżona, przy czym w obrazie mikroskopowym bakterii wyizolowanych z wody z systemu przepływowego obserwowano głównie pojedyncze komórki bakterii, a w systemie nieprzepływowym komórki bakterii występowały w niewielkich skupiskach. W pierwszym tygodniu badań najszybszy wzrost średniej ogólnej liczby bakterii zaobserwowano w najwyższej temperaturze (18°C), przy czym wyjątek stanowiły dwie próbki wody mieszanej z ZUW-3, w których najszybszy wzrost bakterii miał miejsce w temperaturze 10°C (tab. 3). Wprowadzenie



Rys. 3. Ogólna liczba bakterii i całkowita biomasa bakterii w wodzie podziemnej (ZUW-3)

Fig. 3. Total number of bacteria and total biomass of bacteria in groundwater (WTP-3)

wody z piętra kredowego, której temperatura w warstwie wodonośnej wynosiła 9÷11°C do wody czwartorzędowej spowodowało zmianę preferencji temperaturowej bakterii. We wszystkich badanych temperaturach (5°C, 10°C i 18°C) zanotowano mniejszą średnią szybkość wzrostu bakterii w dezynfekowanej (oczyszczonej) wodzie powierzchniowej (ZUW-1) o stosunkowo małej zawartości związków organicznych (śr. 1,5 gC/m³) niż w niedezynfekowanej wodzie podziemnej z zakładów ZUW-2 i ZUW-3. W drugim tygodniu badań wody powierzchniowej, po zaniku środków dezynfekcyjnych, średnia szybkość wzrostu bakterii była większa w temperaturach 10°C i 18°C.

W wodzie podziemnej ujmowanej przez zakład ZUW-2 w pierwszym tygodniu trwania eksperymentu odnotowano wzrost ogólnej liczby bakterii, przy czym średnia szybkość ich wzrostu malała wraz ze spadkiem temperatury i wynosiła odpowiednio 0,31 kom./h w temperaturze 18°C, 0,29 kom./h w temperaturze 10°C i 0,1 kom./h w temperaturze 5°C (tab. 3). W wodzie oczyszczonej w tym zakładzie, w której zawartość związków organicznych (OWO) była o 14,5% mniejsza niż w wodzie ujmowanej (zmniejszenie z 2,8 gC/m³ do 2,4 gC/m³), w pierwszym tygodniu eksperymentu średnia szybkość wzrostu ogólnej liczby bakterii była znacząco mniejsza niż w ujmowanej wodzie (0,19 kom./h w temp. 18°C, 0,05 kom./h w temp. 10°C i 0,02 kom./h w temp. 5°C). W drugim tygodniu badań nastąpiło zahamowanie wzrostu ogólnej liczby bakterii w temperaturze 10°C i 18°C zarówno w wodzie przed, jak i po oczyszczeniu. Dodatkowo, zarówno w przypadku zakładu ZUW-2, jak i ZUW-3 zaobserwowano znacznie



Tabela 3. Szybkość wzrostu bakterii w wodzie w pierwszym i drugim tygodniu badań laboratoryjnych
Table 3. The growth rate of bacteria in water during the first and the second week of laboratory testing

Obiekt badań	Punkt pomiarowy	Względna szybkość wzrostu bakterii w danej temperaturze, kom./h					
		5±1°C		10±1°C		18±1°C	
		pierwszy tydzień	drugi tydzień	pierwszy tydzień	drugi tydzień	pierwszy tydzień	drugi tydzień
ZUW-1	oczyszczona woda powierzchniowa	0,01	0,00	0,02	0,03	0,07	0,12
ZUW-2	ujęcie wody podziemnej (czwartorzęd)	0,10	0,10	0,29	0,00	0,31	0,00
	oczyszczona woda podziemna (czwartorzęd)	0,02	0,02	0,05		0,19	
ZUW-3	ujęcie wody podziemnej (kreda)	0,14	0,09	0,19	0,05	0,22	0,01
	ujęcie wody podziemnej (czwartorzęd)		0,10	0,20	0,08	0,28	0,00
	oczyszczona woda podziemna (czwartorzęd + kreda)	0,11	0,05	0,19	0,00	0,14	0,04
	zmieszana woda podziemna*	0,04	0,10		0,07	0,17	0,10

*oczyszczona woda z ujęcia czwartorzędowego + woda z ujęcia kredowego bez oczyszczania

mniejsze zawartości fosforanów i fosforu ogólnego w wodzie oczyszczonej, które były niższe odpowiednio o 58% i 50% (ZUW-2) oraz o 76% i 67% (ZUW-3) w stosunku do wody ujmowanej z utworów czwartorzędowych (tab. 2). Dane literaturowe [14–17] potwierdzają istotny wpływ zawartości związków fosforu w wodach podziemnych, a szczególnie frakcji dostępnej mikrobiologicznie (microbially available phosphorus – MAP) na wtórny rozwój mikroorganizmów. W trzecim tygodniu badań odnotowano zahamowanie wzrostu ogólnej liczby bakterii prawie we wszystkich badanych typach wód, wyjątek stanowiła woda zmieszana, w której stwierdzono nieznacznie szybką wzrostu bakterii w temperaturze 5°C (0,01 kom./h).

Otrzymane wyniki wskazały na istotnie korzystny wpływ procesów oczyszczania badanych wód na ich stabilność biologiczną, co było szczególnie widoczne na przykładzie wody podziemnej z zakładu ZUW-2. Szybkość wzrostu ogólnej liczby bakterii w wodzie oczyszczonej inkubowanej przez 1 tydzień w temperaturze 5°C i 10°C była o około 80% mniejsza niż w wodzie niepoddanej oczyszczaniu (odpowiednio 0,02 kom./h i 0,1 kom./h oraz 0,05 kom./h i 0,29 kom./h). Ponadto uzyskane rezultaty potwierdziły ogólnie znany znaczący korzystny wpływ procesu dezynfekcji wody powierzchniowej na jej stabilność [18]. Zaobserwowano także zróżnicowane wymagania temperatury bakterii w wodzie z piętra czwartorzędowego i kredowego, przy czym bakterie występujące w wodach kredowych, w odróżnieniu od pochodzących z wód czwartorzędowych, rozwijały się szybciej w temperaturze 10°C.

Podsumowanie

Badania wykazały, że w konwencjonalnym systemie oczyszczania wody powierzchniowej zachodziła wysoka (95%) eliminacja ogólnej liczby bakterii, natomiast proste systemy oczyszczania były mało skuteczne w usuwaniu bakterii, a nawet wskutek wypłukiwania komórek bakterii z filtrów obserwowano wzrost ich liczebności nawet o ponad 20%. W ujmowanych wodach (powierzchniowej i podziemnych) dominującą grupę morfologiczną bakterii stanowiły pałeczki (ponad 60%), przy czym w wodzie oczyszczonej nieznacznie zwiększył się udział form kulistych (śr. o ok. 5%), a w przypadku wód powierzchniowych również form krzywych (o ok. 2%). Mieszanie wód podziemnych pochodzących z ujęcia czwartorzędowego z wodami kredowymi wpłynęło na zmianę morfologii

(większy udział form cylindrycznych) i na wymagania temperatury bakteriocenozy (szybszy rozwój bakterii w temperaturze 10°C niż w 18°C).

W obu badanych systemach wodociągowych (SW-1 – zasilany oczyszczoną wodą powierzchniową po dezynfekcji; SW-2 – zasilany wodą podziemną bez dezynfekcji) obserwowano wzrost wartości ogólnej liczby bakterii, przy czym był on większy (na początkowym (6 km) odcinku – ponad 330%) w sieci zasilanej wodą powierzchniową niż w niedezynfekowanej wodzie podziemnej (na początkowym (8 km) odcinku – 170%). W początkowym (6 km) odcinku sieci rozprowadzającym dezynfekowaną wodę powierzchniową obserwowano 3-krotne zmniejszenie biomasy pojedynczych komórek, a w przypadku niedezynfekowanej wody podziemnej zmniejszenie ich biomasy w sieci (na odcinku 8 km) było stosunkowo niewielkie (ok. 10%).

W badaniach stabilności mikrobiologicznej wody przeznaczonej do spożycia, prowadzonych w warunkach laboratoryjnych, stwierdzono korzystny wpływ procesów oczyszczania na ograniczenie podatności wody na wtórny wzrost bakterii. W oczyszczonej wodzie podziemnej (ZUW-2) inkubowanej przez 7 d w temperaturze w zakresie 5÷10°C szybkość wzrostu bakterii była o około 80% mniejsza niż w wodzie ujmowanej. Potwierdzono również znaczący wpływ procesu dezynfekcji wody powierzchniowej na ograniczenie wtórnego wzrostu bakterii.

Prace badawcze zostały zrealizowane w ramach projektu nr NN523 559638 sfinansowanego przez MNiSW.

LITERATURA

1. M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ, M. WOLSKA: Ocena zmian stabilności biologicznej w układzie technologicznym oczyszczania wody infiltracyjnej (Variations in the biostability of infiltration water in the treatment train). *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 4, ss. 63–68.
2. D. van der KOOIJ: Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *Journal American Water Works Association* 1982, Vol. 84, pp. 57–65.
3. M. W. LeCHEVALLIER, N. J. WELCH, D. B. SMITH: Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology* 1996, Vol. 62, No. 7, pp. 2201–2211.
4. O. M. ZACHEUS, M. J. LEHTOLA, L. K. KORHONEN, P. J. MARTIKAINEN: Soft deposits, the key site for microbial growth in drinking water distribution networks. *Water Research*. 2001, Vol. 35, No. 7, pp. 1757–1765.



5. R. BRAY, K. OLAŃCZUK-NEYMAN: The influence of changes in groundwater composition on the efficiency of manganese and ammonia nitrogen removal on mature quartz sand filtering beds. *Water Science and Technology Water Supply* 2001, Vol. 1, No. 2, pp. 91–98.
6. M. PRUSZKOWSKA, G. MALINA: Hydrogeochemistry and vulnerability of groundwater in the moraine upland aquifers of the Gdańsk region (Northern Poland). *Geological Quarterly* 2008, Vol. 52, No. 3, pp. 291–300.
7. K. G. PORTER, Y. S. FEIG: The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography* 1980, Vol. 25, No. 5, pp. 943–948.
8. A. ŚWIĄTECKI: Zastosowanie wskaźników bakteriologicznych w ocenie jakości wód powierzchniowych. *Studia i Materiały WSP w Olsztynie* 1997, t. 118.
9. S. NORLAND: The relationship between biomass and volume of bacteria. In: P. F. KEMP, B. F. SHERR, E. B. SHERR, J. J. COLE [Eds.]: *Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology*. Lewis Publishers, New York 1993, pp. 303–308.
10. H. EINARSSON: Evaluation of a predictive model for the shelf life of cod (*Gadus morhua*) fillets in two different atmospheres at varying temperatures. *International Journal of Food Microbiology* 1994, Vol. 24, No. 1/2, pp. 93–102.
11. A. STANISZ: Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STATISTICA PL na przykładach z medycyny. StatSoft, Kraków 1998.
12. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 61, poz. 417 oraz Dz. U. z 2010 r., nr 72, poz. 466.
13. R. BRAY, A. SOKOŁOWSKA, K. JANKOWSKA, K. OLAŃCZUK-NEYMAN: Wpływ mieszania wody podziemnej z różnych pięt wodonośnych na jej stabilność chemiczną i biologiczną w sieci wodociągowej (Impact of mixing groundwaters from different formations on their chemical and biological stability in the water-pipe network). *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 3, ss. 19–23.
14. D. JIANG, Y. CHEN, G. NI: Effects of total phosphorus (TP) and microbially available phosphorus (MAP) on bacterial regrowth in drinking water distribution system. *Systems Engineering Procedia* 2011, Vol. 1, pp. 124–129.
15. M. J. LEHTOLA, I. T. MIETTINEN, T. VARTIAINEN, P. J. MARTIKAINEN: Changes in content of microbially available phosphorus, assimilable organic carbon and microbial growth potential during drinking water treatment processes. *Water Research* 2002, Vol. 36, No. 15, pp. 3681–3690.
16. A. SATHASIVAN, S. OHGAKI: Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system – a clear evidence of phosphorus limitation. *Water Research* 1999, Vol. 33, No. 1, pp. 137–144.
17. T. JUHNA, D. BIRZNIECE, J. RUBULIS: Effect of phosphorus on survival of *Escherichia coli* in drinking water biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* 2007, Vol. 73, No. 11, pp. 3755–3758.
18. B. WRICKE, A. KORTH, H. PETZOLDT, M. KRÜGER: Change of bacterial water quality in a drinking water distribution system working with or without low chlorine residual. *Water Science and Technology: Water Supply* 2002, Vol. 2, No. 3, pp. 275–281.

Sokolowska, A., Jankowska, K., Kulbat, E., Olanczuk-Neyman, K. **Biological Stability of Drinking Water in Selected Water Distribution Systems.** *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 4, pp. 31–37.

Abstract: Results of microbiological analysis and biological stability of surface and groundwater (taken, treated and distributed in the Tri-city region) which supply a distribution system with low contact surface to transferred water volume ratio (≈ 0.65) were presented. Additionally, the effectiveness of technological processes in reduction of the total number of bacteria (TNB) was evaluated and laboratory tests determined the susceptibility of water introduced into the system to the bacterial regrowth. It was established that high elimination (95%) of TNB occurred in the conventional surface water treatment system, while simple

groundwater treatment systems were not effective in eliminating these bacteria. TNB was demonstrated to increase (even up to 20%) as a result of periodic leaching of bacteria from filters. In both surface and groundwater supply systems an increase in the TNB was observed. It was higher along the surface water network (330% for a 6-km section) than the non-disinfected groundwater network (170% for a 8-km section). The laboratory studies confirmed the beneficial effect of treatment processes on reduction of water susceptibility to bacterial regrowth. Increase in the total number of bacteria in the treated groundwater after 7-day incubation at temperatures ranging from 5 to 10°C was approximately 80% lower than in the raw water.

Keywords: Surface water, groundwater, tap water, total bacteria number, bacterial regrowth.