

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (1), 38–54  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (1)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (1), 38–54  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (1)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.1.04

**Małgorzata MALATA, Jacek MOTYKA, Adam POSTAWA,  
Bartłomiej BYRSKI\***

Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
Department of Hydrogeology and Engineering Geology, AGH University

## **Cechy fizykochemiczne i skład jonowy wód górnej Soły\*** **Physico-chemical characteristics of water and the ionic composition of the upper Soła**

**Słowa kluczowe:** Soła, cechy fizykochemiczne wody, antropopresja

**Key words:** Soła, physicochemical properties of water, anthropopressure

### **Wprowadzenie**

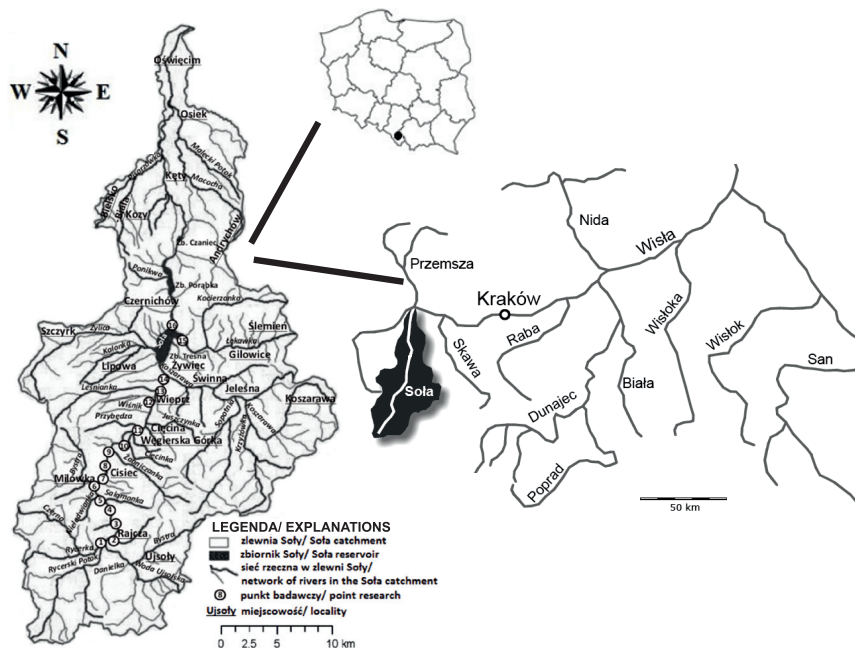
Skład fizykochemiczny wód rzecznych zależy od czynników naturalnych, tj.: litologii skał podłoża, tektoniki, rzeźby terenu, warunków klimatycznych, antropogenicznych oraz pokrycia szatą roślinną (m.in. gęstości zaludnienia), charakteru zagospodarowania zlewni rzecznej. Zlewnia Soły, mimo że objęta jest ochroną prawną (Rezerwat Biosfery UNESCO, Natura 2000), nadal podlega silnej antropopresji.

Celem pracy jest określenie składu fizykochemicznego wód w górnym od-

cinku Soły od miejscowości Rajcza do zbiornika retencyjnego na Jeziorze Żywieckim w Tresnej (rys. 1). Próbki wody pobrano z 16 przekrojów (tab. 1) na rzece w celu określenia zmian zawartości składników chemicznych i wybranych cech fizycznych wraz z biegiem rzeki.

Wyniki badań wód analizowano pod względem obowiązujących w Polsce zakresów dopuszczalnych stężeń pierwiastków i związków podanych w następujących rozporządzeniach: Ministra Zdrowia z 13 listopada 2015 roku w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2015, poz. 1989), Ministra Środowiska z 27 listopada 2002 roku w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody powierzchniowe wykorzystywane do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia (Dz.U. 2002, poz. 1728), oraz Ministra

\*Praca została zrealizowana w ramach grantu dziekańskiego – umowa: 15.11.140.633, oraz badań statutowych Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH – umowa: 11.11.140.797.



RYSUNEK 1. Sieć hydrograficzna zlewni Soły z lokalizacją przekrojów badawczych  
 FIGURE 1. Hydrographic network of the Soła river catchment basin with location sections research

TABELA 1. Lokalizacja poboru próbek wód Soły w październiku 2015 roku  
 TABLE 1. Location water sampling Soła river in October 2015

Numer próbki Number of sample	Odległość od ujścia Distance from the mouth [km]	Miejscowość Locality	Lokalizacja szczegółowa Detailed location
1	2	3	4
1	77,47	Rajcza	na wysokości parku gminnego
2	76,04	Rajcza	pod mostem na stację PKP Rajcza
3	74,04	Rajcza	na wysokości kaplicy, w Rajczy Dolnej
4	72,61	Rajcza	na granicy miejscowości Rajcza i Milówka
5	70,90	Milówka	poniżej dopływu potoku Milowskiego
6	69,47	Milówka	przy ulicy Piekarskiej
7	68,90	Cisiec	przy ulicy Cisowej
8	67,76	Cisiec	przy moście, przy ulicy Łącznej
9	66,33	Węgierska Górka	poniżej dopływu Żabniczanki
10	64,90	Węgierska Górka	pod mostem, obok Traktu Cesarskiego

TABELA 1 cd.

TABLE 1 cont.

1	2	3	4
11	62,90	Cięcina	poniżej kanału zrzutowego z oczyszczalni ścieków
12	60,04	Wieprz	pod mostem, przy ulicy Żywieckiej
13	58,61	Żywiec	poniżej dopływu Leśnianki
14	57,75	Żywiec	przy alei Jana Pawła II, powyżej dopływu Koszarawy
15	52,61	Żywiec	Jezioro Żywieckie, przy dopływie Łękawki
16	51,18	Żywiec	zapora Tresna

Środowiska z 21 lipca 2016 roku w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz.U. 2016, poz. 1187).

## Teren badań

### Położenie administracyjne

Zlewnia Soły położona jest w granicach dwóch województw: śląskiego (89%) oraz małopolskiego (11%). Swoim zasięgiem obejmuje fragmenty sześciu powiatów: oświęcimskiego, bielskiego, wadowickiego, żywieckiego, suskiego i cieszyńskiego.

### Charakterystyka warunków środowiskowych

**Geomorfologia.** Zlewnia Soły zajmuje powierzchnię 1391 km<sup>2</sup> i zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym Polski (Kondracki, 2002) rozciąga się w obrębie kilku jednostek. Są to: Makroregion Kotlina Oświęcimska, w tym Mezoregiony: Dolina Górnej Wisły i Podgórze Wilamowskie, Makroregion

Zewnętrzne Karpaty Zachodnie: Mezoregion Pogórze Śląskie; Makroregion Beskidy Zachodnie, w tym Mezoregiony: Beskid Mały, Kotlina Żywiecka, Beskid Makowski, Beskid Śląski oraz Kotlina Orawsko-Nowotarska. Geograficznie Soła położona jest w Karpatach Zewnętrznych, Beskidach Zachodnich, Beskidzie Śląskim i Żywieckim (Kondracki, 2002).

Zlewnia górnej Soły zlokalizowana jest w obrębie Makroregionu Beskidy Zachodnie (Kondracki, 2002). Położony na południowym wschodzie Beskid Śląski tworzy południkowe pasma górskie porozidzielane dolinami. Stoki wzniesień charakteryzują się dużymi spadkami mogącymi osiągać 25–40°. Wierzchowiny są płaskie, ze słabo zaznaczonymi kamiennymi partiami szczytowymi. Wzniesienia mogą osiągać 1000 m n.p.m., a lokalnie do ponad 1200 m n.p.m. (Skrzyczne 1257 m n.p.m.). Mniej zróżnicowaną rzeźbę terenu ma położony bardziej na północ Beskid Mały. Charakteryzuje go zwarte przestrzennie pasmo o przebiegu równoleżnikowym, rozcięte w środkowej części przełomem Soły. Zbocza są pokryte licznymi osuwiskami o cechach erozyjno-denudacyjnych. Południowo-

-wschodnia części zlewni Soły leży w Beskidzie Makowskim, który tworzy wzniesienia ograniczone licznymi dolinami. Dalej na południe znajduje się Kotlina Żywiecka, położona pomiędzy Beskidem Śląskim, Beskidem Makowskim i Beskidem Małym. Jest to kotlina, którą cechuje obniżenie o długości około 20 km, z koncentrycznym układem sieci rzecznej Soły i jej dopływów: Koszarawy, Żylicy, Łękawicy. Jest ona obszarem często nawiedzanym przez gwałtowne powodzie (Golonka, 1981).

Szczytowe partie wzniesień Beskidów pokrywają charakterystyczne dla terenów górskich gleby szkieletowe. W stokowych i przystokowych partiach terenu przeważają gleby brunatne wylugowane i kwaśne. Gleby te są ubogie w składniki mineralne i odwapnione. Na obszarach niżej położonych napotkać można powszechnie gleby bielcowe i lessowe. Kotlinę Żywiecką pokrywają głównie gleby lessowe, pyłowe. Rzadziej występują gleby torfowe, mułowo-torfowe i mursze. W dnach dolin wykształciły się płyty mad. Lokalnie napotkać można rędziny (Bula i in., 2014).

**Hydrografia.** Zlewnia Soły należy do prawobrzeżnego dorzecza górnej Wisły. Rzeka uchodzi do Wisły w rejonie miejscowości Dwory koło Oświęcimia, na wysokości 227 m n.p.m. (geoportal.gov.pl). Długość Soły wynosi 88,9 km, średni spadek koryta to 12,4‰, a powierzchnia zlewni osiąga 1391 km<sup>2</sup> (Bula i in., 2014). Źródła tej rzeki znajdują się w Beskidzie Żywieckim na wysokości około 720 m n.p.m. Przyjmuje się, że potokami źródłowymi są Słanica i Czarna (Ślusarczyk, 2016). Największym dopływem Soły jest Koszarawa, łącząca się z Sołą powyżej zbiornika wodnego

w Tresnej, na wysokości Żywca. Pod względem powierzchni zlewni dopływy prawobrzeżne są ponaddwukrotnie większe niż lewobrzeżne. Dominującym typem abiotycznym cieków występujących w zlewni Soły jest potok fliszowy. Obok niego wyróżnić należy również wyżynny węglanowy z substratem drobnoziarnistym na lessach oraz małą rzekę fliszową (Bula i in., 2014).

Przeptyw Soły jest zmienny czasowo oraz przestrzennie. Głównie uzależniony jest on od sytuacji pogodowej oraz warunków środowiska przyrodniczego modyfikowanego przez działalność człowieka. Warunki środowiska przyrodniczego to przede wszystkim opady atmosferyczne, właściwości fizjograficzne zlewni (budowa geologiczna, gleby, rzeźba terenu). Wpływ antropopresji to głównie zabudowa hydrotechniczna, tj. zbiorniki retencyjne. Wszystkie te czynniki wpływają na proces transformacji opadu w odpływ. Odpływ rzeczny Soły wykazuje bardzo dużą zmienność (Ślusarczyk, 2016), co obrazują średnie roczne i średnie niskie przepływy oraz odpływy jednostkowe dla wybranych posterunków wodowskazowych (tab. 2).

Obszar zasilania Soły jest położony na styku trzech klimatów (Romer, 1949). W jej części źródłowej występuje region klimatu górskiego, w części środkowej pogórza karpackiego, a obszar ujściowy to klimat kotlin podgórszych. Średni opad roczny wynosi od blisko 800 mm przy ujściu Soły do Wisły do około 1200 mm w odcinku źródłowym. Średnia roczna temperatura powietrza waha się od około 8°C w pobliżu ujścia do około 4°C w obszarze źródłowym (Niedzwiedz i Obrębska-Starkłowa, 1991). Klimat górnej części zlewni Soły jest zaliczany

TABELA 2. Przepływy średnie i niskie oraz odpływy jednostkowe w przekrojach dla stacji wodowskazowych zlewni Soły z wielolecia (Ślusarczyk, 2016)

TABLE 2. Average and low flows and unit runoff in individual sections for gauging station catchment Soła river of multi-year (Ślusarczyk, 2016)

Wodowskaz Water gauge	Rzeka River	Powierzchnia zlewni Cachment basin [km <sup>2</sup> ]	$SSQ$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$SSq$ [l·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> ]	$SNQ$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$SNq$ [l·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> ]	$Z = SSQ - SNQ$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$V_{roczne} - V_{annual}$ [mln m <sup>3</sup> ]
Rajcza	Soła	253,81	5,11	20,13	0,62	2,44	4,49	141,60
Żywiec	Soła	753	15,3	20,32	1,74	2,31	13,56	427,63
Ujsoły	Woda Ujsolska	102,86	2,29	22,26	0,31	3,01	1,98	62,44
Kamesznica	Bystra	48,18	1,06	22	0,1	2,08	0,96	30,27
Żabnica	Żabniczanka	37,03	0,67	18,09	0,09	2,43	0,58	18,29
Pewel Mała	Koszara	205,5	4,3	20,92	0,57	2,77	3,73	117,63
Łodygowice	Żylica	55,21	1,3	23,55	0,16	2,9	1,14	35,95

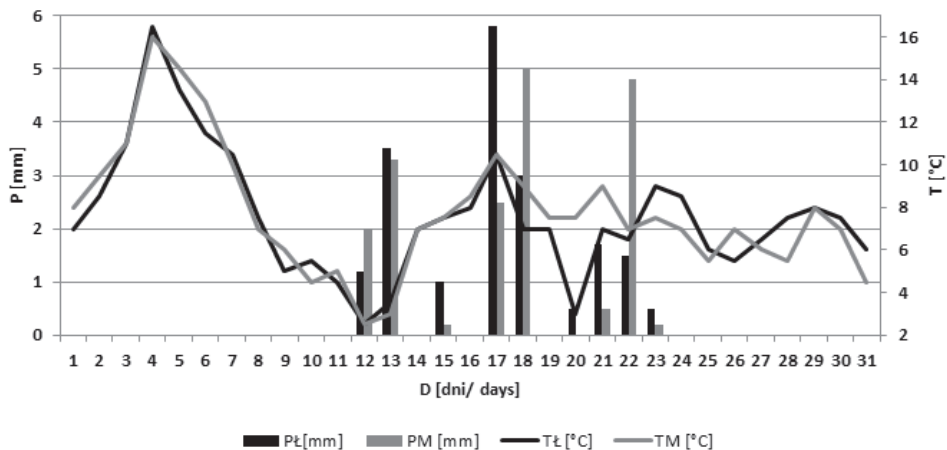
MPHP – Mapa podziału hydrograficznego Polski,  $SSQ$  – przepływ średni na podstawie wieloletnich obserwacji IMGW,  $SSq$  – średnie roczne odpływy jednostkowe,  $SNQ$  – przepływ średni niski na podstawie wieloletnich obserwacji IMGW,  $SNq$  – średnie niskie roczne odpływy jednostkowe,  $V_{roczne}$  – roczny odpływ,  $Z$  – zasoby.

do klimatu górskiego. Charakteryzuje się on średnim opadem rocznym wynoszącym 1031,3 mm. Maksymalny opad notowany jest w miesiącach letnich, minima przypadają na jesień. Pokrywa śnieżna zalega od grudnia przez około 120–150 dni (Szczepanek, 2003). Analizy temperatur powietrza oraz opadów atmosferycznych (pogodynka.pl) w okresie obserwacji (październik 2015 r.) wykazały wartości typowe dla obszaru zlewni górnej Soły (rys. 2).

W środkowym biegu Soły znajduje się zespół trzech zbiorników retencyjnych: Tresna, Porąbka oraz Czaniec. Zbiorniki te za podstawowe zadanie mają zabezpieczenie przed skutkami wezbrań powodziowych. Pełnią one także funkcje komunalną, energetyczną oraz rekreacyjną.

Soła powyżej kaskady zbiorników ma charakter rzeki górskiej. Poniżej zespołu zbiorników retencyjnych reżim rzeki jest kontrolowany przez gospodarkę wodną prowadzoną za pomocą zbiorników. Dane z wodowskazów z posterunków w Żywcu i Porąbce na Sole wskazują, że na wysokości Żywca maksymalne odpływy miesięczne występują w marcu. Poniżej kaskady Soły wskutek oddziaływania zbiorników maksymalne odpływy miesięczne występują z kilkudziesięciodniowym opóźnieniem. W przekroju Porąbka mają one miejsce w kwietniu. Minimalne odpływy miesięczne na posterunkach wodowskazowych notowano w październiku i listopadzie (Ślusarczyk, 2016).

Zlewnia Soły należy do obszarów o najwyższych wskaźnikach zagrożenia



RYSUNEK 2. Średnie dobowe temperatury ( $T$ ) powietrza i sumy opadów atmosferycznych ( $P$ ) na posterunkach meteorologicznych Łodygowice (Ł) – 370 m n.p.m., i Milówka (M) – 430 m n.p.m. w październiku 2015 roku (pogodynka.pl)

FIGURE 2. Average daily air temperature ( $T$ ) and precipitation ( $P$ ) at the meteorological stations Łodygowice (Ł) – 370 m a.s.l., and Milówka (M) – 430 m a.s.l. in October 2015 (pogodynka.pl)

powodziowego w Polsce. Na jej terenie występują wszystkie rodzaje zagrożeń typowych dla rzek górskich (Nachlik, 2001). Przyczyną wezbrań na Sole są trwające zwykle kilka dni deszcze rozlewne, występujące najczęściej w miesiącach letnich. Na terasach zalewowych przeważają użytki zielone, a w ich otoczeniu znajdują się zabudowania gospodarcze. Na obszarze całej zlewni notowany jest wysoki wskaźnik zalesienia z przewagą świerka oraz lasu mieszanego bukowo-świerkowego stanowiący 46,5% (Lipski i in., 2005). Z biegiem rzeki zauważa się wpływ działalności antropogenicznej przejawiający się zurbanizowaniem terenu i rozwojem ośrodków przemysłowych (m.in. przemysłu maszynowego, samochodowego, włókienniczego oraz metalurgicznego).

Na obszarze zlewni Soły występują dwa piętra wodonośne: czwartorzędowe i trzeciorzędowe. Utworami wodonośnymi wieku czwartorzędowego są aluwial-

ne żwiry i piaski występujące w dolinach rzecznych, tworzące holoceni i plejstoceni zbiorniki porowe. Głównymi trzeciorzędowymi utworami są osady paleogeńskie budujące fliszowe zbiorniki szczelinowo-porowe (Chowaniec, 1984).

Według regionalizacji hydrogeologicznej Polski (Paczyński, 1995; Paczyński i Sadurski, 2007) zlewnia Soły znajduje się w Makroregionie Południowym, Subregionie Karpackim XV. Należy ona do górskiej prowincji Wisły na terenie zewnętrznej części masywu Karpat. Cały analizowany obszar leży w granicach jednolitej części wód podziemnych JCWPd 158 obejmującej hydrogeologiczny region Górnej Wisły w pasie Zewnętrznych Karpat Zachodnich. W granicach analizowanego obszaru znajduje się kilka GZWP (Kleczkowski, 1990): GZWP 445 „Magura” (Babia Góra), GZWP 446 „Dolina rzeki Soły”, GZWP 447 „Beskid Mały”, GZWP 348 „Godula” (Beskid Śląski).

Czwartorzędowe piętro wodonośne związane jest z utworami akumulacji rzecznej. Zwierciadło wód podziemnych w utworach czwartorzędowych ma charakter swobodny (Chowaniec, 1984). Ze względu na przepuszczalny charakter skał przypowierzchniowych poziomy wodonośne nie są izolowane ich nadkładem.

Fliszowe piętro wodonośne wykształciło się w utworach piaskowcowo-łupkowych paleogenu. Wydajność poszczególnych poziomów jest różna i może wahać się od 2 do 5 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> (Chowaniec, 1984). Soła jest zbiornikiem odkrytym, czyli pozbawionym lub lokalnie pokrytym cienką pokrywą izolującą utworów czwartorzędowych. Sprzyja to zasilaniu zbiornika, lecz powoduje zwiększoną podatność na zanieczyszczenia.

**Zarys budowy geologicznej.** Pod względem geologicznym obszar zlewni Soły znajduje się w obrębie zewnętrznych Karpat fliszowych. Budowę geologiczną zlewni Soły reprezentują utwory paleogeńskie oraz czwartorzędowe (Golonka, 1981). Formacja paleogeńska charakteryzuje się występowaniem fliszu karpackiego. Czwartorzędową budują m.in. piaski i żwiry.

Na obszarze badań występują dwie jednostki tektoniczno-strukturalne: śląska i podśląska (Chowaniec i in., 2009). Jednostkę śląską budują warstwy godulskie (Golonka, 1981). Są to piaskowce grubo- i średnioławicowe przekładane łupkami ilasto-marglistymi. Obszar zbudowany z piaskowców gruboławicowych warstw godulskich został wydzielony jako rejon występowania głównego użyt-

kowego poziomego wodonośnego (Chowaniec i in., 2009). Jednostkę podśląską budują piaskowce cienkoławicowe przeławiczone pakietami łupków (Golonka, 1981). Skały są spękane, zuskokowane i często sfałdowane, co w dużej mierze komplikuje krążenie i gromadzenie się wód podziemnych (Chowaniec i in., 2009). Utwory fliszowe pokryte są utworami czwartorzędowymi, tj. gliny, zwietrzliny, piaski. Doliny rzek i potoków wypełnione są czwartorzędowymi utworami aluwialnymi. Są to otoczaki i żwiry z domieszką częściowo zaglinionych piasków.

Litologia górnej części zlewni Soły (Golonka, 1981) różnicuje obszar badań na:

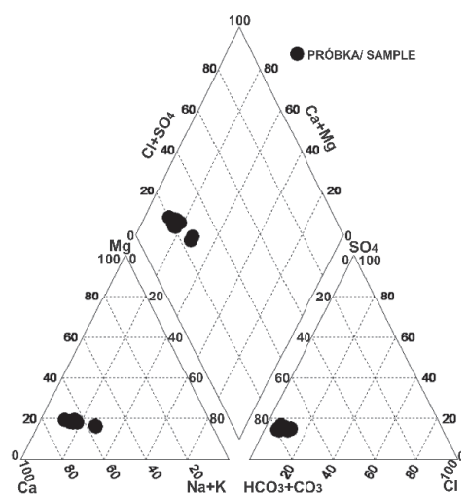
- Beskid Mały pod względem geologicznym stanowiący przedłużenie Beskidu Śląskiego, od którego oddzielony jest uskokiem. Zbudowany jest głównie z piaskowców, a jego partie grzbietowe z bardziej odpornych utworów.
- Kotlinę Żywiecką znajdującą się na granicy jednostki śląskiej i magurskiej, wypełnioną skałami (kotliną ma charakter aluwialny) o słabej wytrzymałości na wietrzenie. Osady te zostały zmodyfikowane przez wody płynące (Sołę, Koszarawę, Żylicę i Łękawicę). Efektem tego procesu jest powstanie rozległej kotliny.
- Beskid Makowski zbudowany głównie z piaskowców magurskich z przewarstwieniami mniej odpornych łupków.
- Beskid Śląski będący pasmem zbudowanym głównie z utworów fliszowych.

## Metodyka badań

Badaniami fizykochemicznymi objęto południowy odcinek biegu Soły. Próbkę wody pobrano w październiku 2015 roku na odcinku od miejscowości Rajcza do Jeziora Żywieckiego, poniżej zapory w Tresnej. W terenie wykonano pomiary odczynu, przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) przy użyciu terenowego miernika wielofunkcyjnego CPC-105 firmy Elmetron. Do butelek polietylenowych pobrano próbki wody do analiz chemicznych, po przefiltrowaniu filtrem strzykawkowym próbki przechowywano w lodówce (w temperaturze około 4°C) do czasu analizy laboratoryjnej (48 h od pobrania). W laboratorium wykonano oznaczenia kationów ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), anionów ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) oraz pierwiastków śladowych (Ag, Al, As, Be, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Hg, I, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Te, Ti, Tl, U, V, W, Y, Sr, Zn, Zr). Badania laboratoryjne wykonano w akredytowanym laboratorium (certyfikat akredytacji PCA AB 1050) Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie. Stężenia  $\text{HCO}_3^-$  oraz  $\text{Cl}^-$  oznaczono wolumetrycznie (miareczkowanie kwasem solnym w obecności wskaźnika mieszanego) oraz argentometrycznie (metodą Mohra). Do oznaczenia stężenia  $\text{NO}_3^{2-}$  wykorzystano spektrofotometr DR 2800 firmy HACH Lange. Metodą ICP OES – spektrofotometr emisyjny z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (Optima 7300 DV firmy Perkin Elmer) – oznaczono jony główne i niektóre mikroelementy. Metodą ICP MS – spektrometr masowy z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (Elan 6100 firmy Perkin Elmer) – oznaczono pierwiastki śladowe.

## Wyniki badań

Ocenę jakości składu fizykochemicznego wód Soły wykonano na podstawie wyników pomiarów pH i PEW oraz analiz składu chemicznego pobranych próbek wody. Zgodnie z klasyfikacją Szczukariewa-Prikłońskiego (Macioszczyk, 1987) wody te zalicza się do typu hydrogeochemicznego  $\text{HCO}_3^-$ – $\text{Ca}^{2+}$  (rys. 3).



RYSUNEK 3. Diagram Pintera [%mval] badanych próbek wody Soły w październiku 2015 roku  
FIGURE 3. Piper diagram [mval%] samples tested water Soła river in October 2015

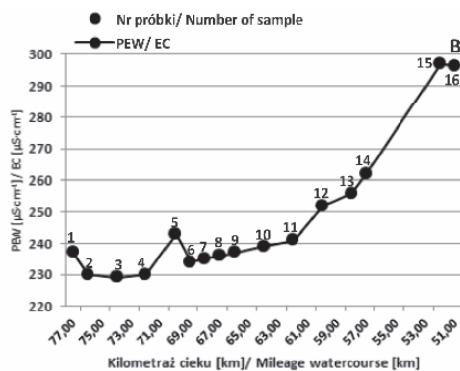
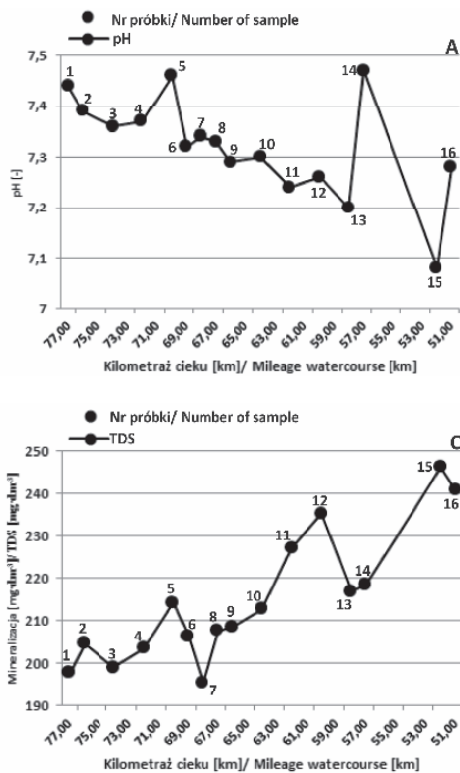
Odczyn wody mieści się w zakresie od 7,1 do 7,5. Zatem badane próbki wody można zaliczyć do lekko zasadowych, a w przypadku próbki 13 do niemal odczynu obojętnego. Zaobserwowano tendencję do malejącej zasadowości wraz z biegiem rzeki, a w próbce 14 wystąpiła wyraźna anomalia. Podwyższona wartość pH mogła być spowodowana dopływem Koszarawy, która ma zwartą zabudowę dna doliny (tab. 3, rys. 4A). Analizując wykres z wynikami pomiaru PEW, można zauważyć trend rosnący wraz z biegiem rzeki. Wartości PEW



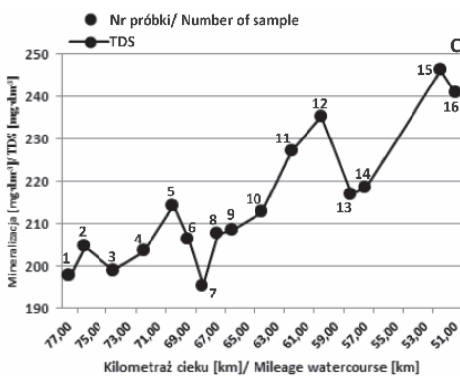
TABELA 3. Cechy fizykochemiczne i stężenie wybranych jonów w wodach Soły w październiku 2015 roku  
 TABLE 3. Physico-chemical characteristics and concentration of selected ions in the waters of the Sola in October 2015

Numer próbki Number of sample	Odległość od ujścia Distance from the mouth [km]	pH	PEW – EC $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TDS
1	77,47	7,4	237	31,3	5,24	5,17	1,7	122,7	17,5	5,54	10,4	0,147	197,9
2	76,04	7,4	230	28,8	4,81	6,19	1,85	127,9	18,6	7,49	14,3	0,091	204,6
3	74,04	7,4	229	28,58	4,81	6,3	1,88	122,8	18,4	7,16	15,7	0,181	199,1
4	72,61	7,4	230	28,38	4,8	6,32	1,97	127,6	18,6	6,03	14,3	0,176	203,6
5	70,90	7,5	243	30,73	5,44	7,47	1,9	133,2	20,3	6,52	12,9	0,198	214,2
6	69,47	7,3	234	29,33	4,91	6,54	2,07	127,7	18,8	6,07	16,1	0,069	206,4
7	68,90	7,3	235	29,14	5,11	7,02	2,27	114,9	19,8	6,05	12,6	0,064	195,6
8	67,76	7,3	236	29,04	5,04	6,90	2,28	127,4	19,6	6,19	15,2	0,094	207,6
9	66,33	7,3	237	29,3	5,14	6,89	2,32	127,8	19,97	6,21	13,9	0,18	208,6
10	64,90	7,3	239	29,63	5,31	7,56	2,59	125,4	20,2	7,01	16	0,154	212,7
11	62,90	7,2	241	29,56	5,31	7,2	2,57	141,1	20,3	6,57	12,3	0,201	227,2
12	60,04	7,3	252	30,95	5,45	8,13	2,72	146,3	20,8	7,66	13,6	0,304	235,3
13	58,61	7,2	256	31,27	5,37	8,79	2,83	128,1	21,5	8,24	15,4	0,135	216,9
14	57,75	7,5	262	33,05	5,49	8,09	2,37	135,8	20,5	6,85	12,3	0,101	218,5
15	52,61	7,1	297	31,68	5,66	16,19	3,54	148,9	22,1	12,88	13,5	0,215	246,3
16	51,18	7,3	296	31,82	5,62	16,48	3,5	141,2	22,9	13,86	11,4	0,081	240,9

Objasnienia w tekście – Explanation of acronims in the text.



pH – Odczyn wody – Water reaction  
 PEW – EC – Przewodność elektrolityczna właściwa wody – Electrical conductivity of water  
 TDS – Mineralizacja wody – Mineralization of water



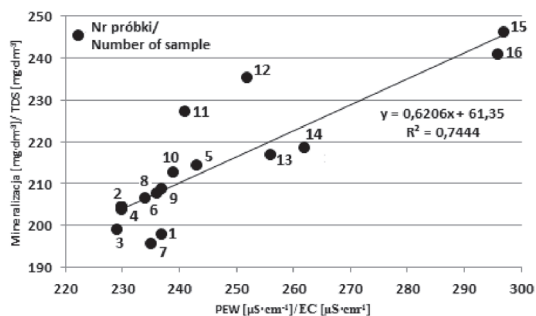
RYСУNEK 4. Zmienność parametrów fizykochemicznych w wodach Soły w październiku 2015 roku  
 FIGURE 4. Variability of physical and chemical parameters in the waters of the Soła river in October 2015

mieszczą się w przedziale od 229 do 297  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (tab. 3, rys. 4B).

Mineralizacja próbek wód mieści się w przedziale od 195,6 do 246,3  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , wartość średnia wynosi 214,7  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . Oznacza to, że jest to woda niskozmineralizowana (tab. 3, rys. 4C). Istnieje wyraźna zależność mineralizacji ogólnej od PEW (rys. 5). Współczynnik determinacji dla tej zależności wynosi  $R^2 = 0,74$  (zakres dopasowania zadawalającego: 60–80%).

Analizując wyniki badań składników głównych próbek wody, można zauważyć pewne prawidłowości. W przypadku chlorków, których stężenie mieści się w przedziale od 5,54 do 13,86  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , dochodzi do niemal równomiernego

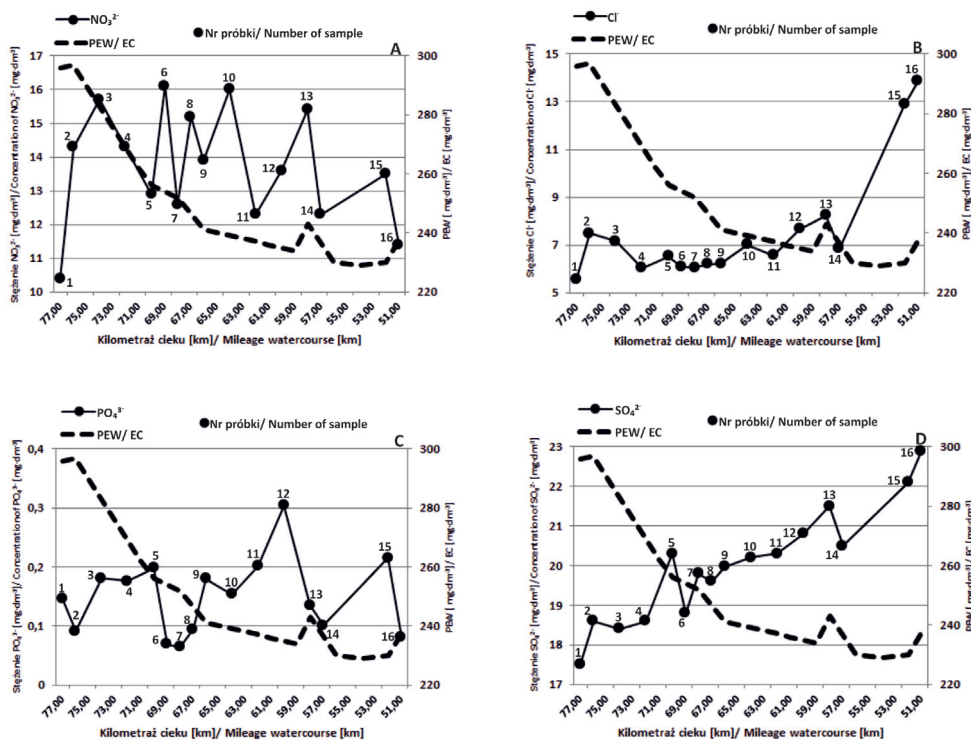
wzrostu wraz z biegiem rzeki. W ostatnich dwóch próbkach wzrost zawartości  $\text{Cl}^-$  jest znaczący. Głównym powodem tendencji wzrostowej jest dopływ ścieków bytowych oraz stagnacja wody w zbiornikach retencyjnych (tab. 3, rys. 6B). Kolejnymi składnikami, które wykazują wzrost stężenia z biegiem rzeki, są siarczany często występujące w wodach naturalnych. Jony  $\text{SO}_4^{2-}$  dostają się do wody na skutek wymywania ze skał osadowych lub wylugowania gleby, a ich zawartość mieści się w przedziale od 17,5 do 22,9  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  (tab. 3, rys. 6D). Jony  $\text{NO}_3^{2-}$  mieszczące się w przedziale od 10,4 do 16,1  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  (tab. 3, rys. 6A) oraz  $\text{PO}_4^{3-}$  (tab. 3, rys. 6C)



RYSunEK 5. Związek mineralizacji ogólnej i *PEW* w wodach Soły w październiku 2015 roku  
 FIGURE 5. Correlation between *TDS* and *EC* water in the waters of the Soła river in October 2015

występujące w zakresie od 17,5 do 22,9 mg·dm<sup>-3</sup> są związane z dopływem ścieków bytowych oraz nawozów rolniczych. Na rysunku 6 przedstawiono

dla porównania zależność między stężeniem wybranych związków chemicznych w tym biogennych a *PEW* badanych próbek wody. Zaobserwowano wyraźne po-

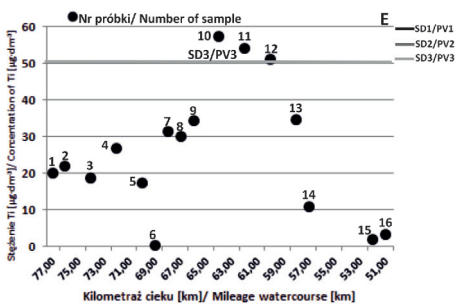
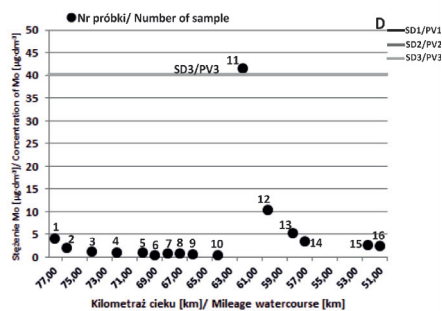
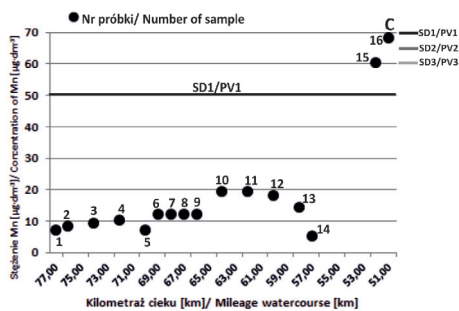
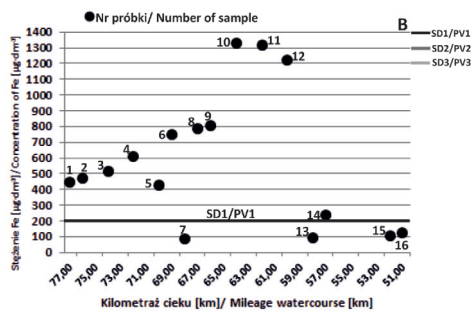
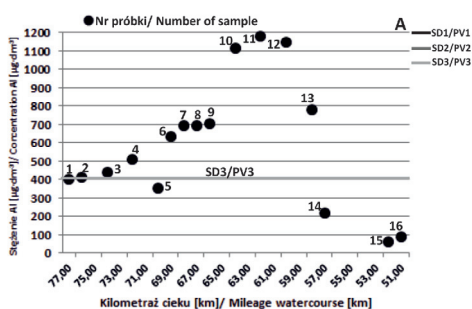


RYSunEK 6. Wykresy zmienności stężeń NO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (A), Cl<sup>-</sup> (B), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (C), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (D) na tle zmian *PEW* w wodach Soły w październiku 2015 roku  
 FIGURE 6. Charts volatility levels NO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (A), Cl<sup>-</sup> (B), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (C), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (D) against the changes of *EC* in the waters of the Soła river in October 2015

wiązanie stężeń chlorków i siarczanów z PEW.

Według zakresów dopuszczalnych stężeń pierwiastków i związków podanych w rozporządzeniach: Ministra Zdrowia z 2015 roku (Dz.U. 2015, poz. 1989), Ministra Środowiska z 2002 roku (Dz.U. 2002, poz. 1728) oraz z 2016 roku (Dz.U. 2016, poz. 1187) dokonano analizy stężenia mikrośladników. Na podstawie zakresów stężeń podanych w rozporządzeniu Ministra Zdrowia

z 2015 roku w próbkach wody wartości dopuszczalne zostały przekroczone dla: Fe ( $>200 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) oraz Mn ( $>10 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ). Według zakresów rozporządzenia Ministra Środowiska z 2016 roku wartości dopuszczalne zostały przekroczone dla: Al ( $>400 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ), Mo ( $>40 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) oraz Ti ( $>50 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ). Na podstawie wartości dopuszczalnych stężeń z rozporządzenia Ministra Środowiska z 2002 roku nie doszło do przekroczeń (tab. 4, rys. 7).



RYSUNEK 7. Stężenia wybranych mikrośladników w wodach Soły w październiku 2015 roku  
FIGURE 7. Concentrations of micronutrients in the waters of the Soła river in October 2015

TABELA 4. Stężenia wybranych mikrośladków w wodach Soły w październiku 2015 roku  
 TABLE 4. Concentrations of micronutrients in the waters of the Soła in October 2015

Numer próbki Number of sample	Odległość od ujścia Distance from the mouth [km]	$\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$														
		Al	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Sr	Ti	Zn
1	77,47	398	<0,05	8,53	<0,01	1,19	437	3	7	3,86	<0,1	<0,1	<0,1	179	19,7	7
2	76,04	408	<0,05	9,17	<0,01	1,44	466	3	8	1,84	<0,1	<0,1	<0,1	164	21,7	<1
3	74,04	432	<0,05	9,15	<0,01	1,08	508	3	9	0,98	<0,1	<0,1	<0,1	164	18,4	1
4	72,61	507	<0,05	9,58	<0,01	1,25	606	3	10	0,79	<0,1	<0,1	<0,1	163	26,5	<1
5	70,90	347	<0,05	9,41	<0,01	0,99	422	3	7	0,73	<0,1	<0,1	<0,1	173	17,1	6
6	69,47	631	<0,05	10,9	<0,01	1,42	744	3	12	0,26	<0,1	<0,1	<0,1	167	40,1	<1
7	68,90	689	<0,05	11,2	<0,01	1,45	79	3	12	0,57	<0,1	<0,1	<0,1	164	31,2	10
8	67,76	686	<0,05	11,3	<0,01	1,53	782	3	12	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	163	29,8	6
9	66,33	701	<0,05	10,3	<0,01	1,29	799	3	12	0,32	<0,1	<0,1	<0,1	160	34	1
10	64,90	1112	<0,05	13,7	<0,01	1,95	1319	4	19	0,28	<0,1	<0,1	<0,1	166	57	16
11	62,90	1175	<0,05	14,5	<0,01	2,36	1307	4	19	41,3	<0,1	<0,1	<0,1	165	53,7	9
12	60,04	1142	<0,05	14,6	<0,01	1,86	1214	4	18	10,2	<0,1	<0,1	<0,1	171	50,8	1
13	58,61	777	<0,05	13,2	<0,01	1,78	84	3	14	5,15	<0,1	<0,1	<0,1	171	34,4	<1
14	57,75	211	<0,05	10,1	<0,01	0,59	231	3	5	3,33	<0,1	<0,1	<0,1	173	10,5	4
15	52,61	54,8	<0,05	12	<0,01	0,68	98	2	60	2,52	<0,1	<0,1	<0,1	150	1,65	<1
16	51,18	83,2	<0,05	12,2	<0,01	0,41	116	2	68	2,3	<0,1	<0,1	<0,1	152	3,12	7
wartość dopuszczalna (1) admissible concentration (1)		10			5	2000	200		50		20	10	10			
wartość dopuszczalna (2) admissible concentration (2)		50			5	50	2000		100		50	50	10			5000
wartość dopuszczalna (3) admissible concentration (3)		400	50	500	0,45	50			40				20		50	1000

(1) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia, 2015 / according to Rozporządzenie Ministra Zdrowia, 2015.

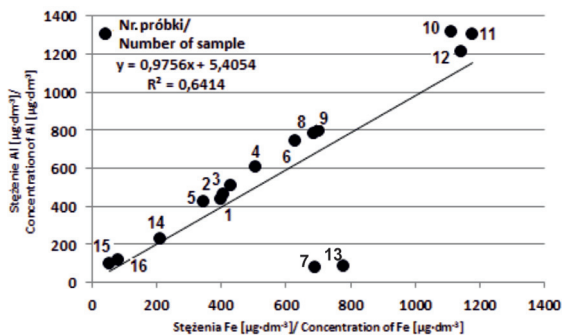
(2) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska, 2002 / according to Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2002.

(3) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska, 2016 / according to Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2016.

W przypadku stężenia Al w początkowych próbkach obserwowano wzrost stężeń z biegiem rzeki. W próbkach 15, 16 mniejsze wartości Al są spowodowane prawdopodobnie dopływem Koszarawy. Stężenie Al mieści się w przedziale od 211 do 1175  $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ . Podobne tendencje cechuje zawartość Fe w próbkach. Jego stężenie również rośnie z biegiem rzeki od 98 do 1319  $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ , a na wysokości Żywca jego zawartość w próbkach gwałtownie maleje (tab. 4, rys. 7A, B). Występuje wyraźna korelacja stężeń Al z wartościami dla Fe (rys. 8). Współczynnik determinacji dla tej zależności wynosi  $R^2 = 0,64$  (zakres dopasowania zadawalającego: 60–80%). Na rysunku 9 przedstawiono zależność między Al i Fe a odczynem. Wraz z tendencją do alkalizacji pH obserwuje się wzrost stężeń Al i Fe.

wany jest zasilaniem rzeki głównie przez opady atmosferyczne. Zlewnię Soły budują skały złożone głównie z trudno rozpuszczalnych i odpornych na wietrzenie piaskowców. Dodatkowo szybki nurt rzeki górskiej powoduje krótki kontakt podłoża skalnego z wodą, co nie ułatwia wzbogacania w składniki mineralne.

Niekorzystne zmiany jakości wody z biegiem rzeki są wynikiem wpływu antropopresji. Przykładem może być wysokie stężenie jonu  $\text{Cl}^-$ . Wskazuje ono na wpływ dopływu ścieków bytowych oraz stagnacji wód zbiorników retencyjnych na skład fizykochemiczny wody (rys. 6B). Podobna tendencja charakteryzuje jony  $\text{SO}_4^{2-}$ , których pochodzenie przypuszczalnie jest związane z procesami rozpuszczania i wietrzenia skał podłoża (rys. 6D).

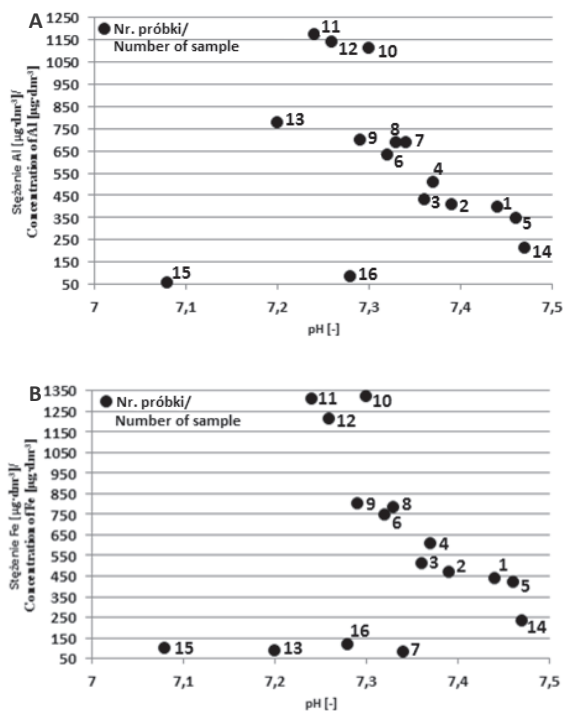


RYSUNEK 8. Zależność stężeń Al oraz Fe w próbkach wód Soły w październiku 2015 roku  
 FIGURE 8. Correlation Al concentrations and Fe in water samples of Soła river in October 2015

## Dyskusja

Soła ma typowy charakter rzeki górskiej – ma duże spadki koryta, wartki nurt oraz wysoki współczynnik odpływu. Ma to duży wpływ na formowanie się składu fizykochemicznego wody. Niski poziom mineralizacji wody spowodo-

Wysokie stężenia Al i Fe są wynikiem naturalnych procesów neutralizacji kwaśnych opadów na glinokrzemianach, wpływu ścieków bytowych oraz wpływu słabo zasadowego odczynu wody (Malata i Motyka, 2015). Wysokie stężenia Al i Fe notuje się z reguły przy odczynie obojętnym (tab. 4, rys. 9A, B). Zakres pH



RYSUNEK 9. Zależność stężenia Al i Fe od odczynu wód Soły w październiku 2015  
 FIGURE 9. Concentration of Al and Fe versus pH of Soła river waters in October 2015

w analizowanych próbkach notowano w granicach wód słabo zasadowych i na granicy odczynu obojętnego (7,1–7,5). Przekroczenia wartości granicznych dla wód dobrej jakości w stosunku do Fe mogły być spowodowane również reakcją wód opadowych z pyłami ze spalania węgla (Kabata-Pendias i Pendias, 1999; Witczak i in., 2013). Przekroczenia dopuszczalnego stężenia molibdenu w wodzie mogą być spowodowane wpływem antropopresji oraz odczynem wody. Przy kwaśnym lub słabo kwaśnym odczynie wody jon molibdenu jest sorbowany. Dostaje się on do wody poprzez pyły ze spalania węgla opałowego, spaliny samochodowe oraz ścieki i odpady komunalne (Kabata-Pendias i Pendias, 1999). Wysokie stężenia manganu

w wodzie mogą być wynikiem naturalnych procesów geochemicznych oraz przedostaniem się do wody pyłów ze spalania węgla opałowego, spalin samochodowych (Kabata-Pendias i Pendias, 1999). Przekroczenia dopuszczalnego stężenia tytanu w wodzie mogą być spowodowane wpływem wysokich stężeń żelaza i manganu. Duża zawartość tytanu może być również związana ze słabo zasadowym odczynem wody (Kabata-Pendias i Pendias, 1999).

## Podsumowanie

Wpływ na skład fizykochemiczny Soły mają: własności fizjograficzne zlewni, opady atmosferyczne oraz an-

tropopresja (w tym zabudowa hydro-techniczna). Soła jest rzeką naturalną, zasilaną głównie opadami atmosferycznymi, przy trudno rozpuszczalnym podłożu skalnym. Wody Soły klasyfikuje się jako niskozmineralizowane (wody słodkie). Widoczny jest wpływ zanieczyszczeń antropogenicznych. Podwyższone stężenia związków biogennych oraz pierwiastków śladowych świadczą o dopływie m.in. ścieków bytowych. Na obszarze zlewni Soły w ostatnich latach wykonano budowę sieci kanalizacyjnej i finalizowany jest etap podłączania do niej gospodarstw domowych. W związku z tym w nadchodzących latach przewidywana jest poprawa stanu czystości wody w rzece.

## Literatura

- Chowaniec, J. (1984). *Objaśnienia do mapy hydrogeologicznej Polski 1:200 000*. Arkusz Bielsko Biała, Tatry Zachodnie. Instytut Geologiczny. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Chowaniec, J., Freiwald, P. i Witek, K. (2009). Bielsko-Biała. W: K. Witek (red.) *Wody podziemne miast Polski powyżej 50 000 mieszkańców* (s. 21-38). Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Bula, R., Romańczyk, M., Sokół, K., Wieland, Z. i Wrońska A. (2014). *Strategia rozwoju obszarów wiejskich województwa śląskiego do roku 2030 Diagnoza uwarunkowań środowiskowych*. Centrum dziedzictwa przyrody Górnego Śląska.
- Golonka, J. (1981). *Objaśnienia do mapy geologicznej Polski 1:200 000*. Arkusz Bielsko-Biała. Instytut Geologiczny. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Kabata-Pendias, A. i Pendias, H. (1999). *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kleczkowski, A.S. (1990). *Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, skala 1:500 000*. Kraków: Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH.
- Kondracki, J. (2002). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Lipski, C., Kostuch, R. i Ryczek, M. (2005). Charakterystyka hydrologiczna górnej części zlewni Soły na tle warunków fizjograficznych, klimatu i użytkowania. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2, 75-82.
- Macioszczyk, A. (1987). *Hydrogeochemia*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Malata, M. i Motyka, J. (2015). Chemizm wód źródeł w zlewni Markowego Potoku. Babogórski Park Narodowy. *Przegląd Geologiczny*, 63, 247-255.
- Nachlik, E. (2001). *Lokalny plan ograniczenia skutków powodzi i profilaktyki przeciwpowodziowej Powiatu Żywieckiego*. Kraków.
- Niedźwiedź, T. i Obrebska-Starkłowa, B. (1991). *Klimat*. W: I. Dynowska i M. Maciejewski (red.), *Dorzecze górnej Wisły* (s. 68-82). Warszawa-Kraków: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Paczyński, B. (1995). *Atlas hydrogeologiczny Polski w skali 1: 500 000. Systemy zwykłych wód podziemnych. Zasoby, jakość i ochrona zwykłych wód podziemnych*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Paczyński, B. i Sadurski, A. (2007). *Hydrogeologia regionalna Polski. Wody słodkie*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Romer, E. (1949). Regiony klimatyczne Polski, *Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego* (B), 16.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 listopada 2002 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody powierzchniowe wykorzystywane do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia* (Dz.U. 2002, poz. 1728).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 lipca 2016 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych* (Dz.U. 2016, poz. 1187).
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 listopada 2015 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi* (Dz.U. 2015, poz. 1989).



- Ślusarczyk, J. (2016). *Program małej retencji dla Województwa Śląskiego – aktualizacja 2016r.* Katowice: Śląski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych.
- Szczepanek, R. (2003). *Czasoprzestrzenna struktura opadu atmosferycznego w zlewni górskiej.* (rozprawa doktorska). Kraków: Politechnika Krakowska.
- Witczak, S., Kania, J. i Kmiciek, E. (2013). *Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania.* Warszawa: Instytut Ochrony Środowiska.

## Streszczenie

**Cechy fizykochemiczne i skład jonowy wód górnej Soły.** W artykule zaprezentowano wyniki badań jakości wód w górnym odcinku Soły (od Rajczy do zapory Tresna). W składzie chemicznym wody dominowały jony  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{HCO}_3^-$ , a ze związków biogenych  $\text{NO}_3^{2-}$ . Wody charakteryzowały się niskim poziomem mineralizacji w zakresie od 195,6 do 246,3  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . W terenie zmierzono wartość pH oraz *PEW* wody. W laboratorium HGI AGH oznaczono metodami ICP-OES:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , oraz ICP-MS: Ag, Al, As, Be, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hg, I, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Te, Ti, Tl, U, V, W, Y, Sr, Zn, Zr. Stężenia  $\text{HCO}_3^-$  oraz  $\text{Cl}^-$  oznaczono wolumetrycznie oraz argentometrycznie (metodą Mohra). Do oznaczenia stężenia  $\text{NO}_3^{2-}$  wykorzystano spektrofotometr DR 2800 firmy HACH Lange. W pracy dokonano próby powiązania składu fizykochemicznego z cechami środowiska geograficznego zlewni.

## Summary

**Physico-chemical characteristics of water and the ionic composition of the upper Soła.** In the article the authors present the results of water quality in the upper section of the Soła (from Rajczy to the dam Tresna). The chemical composition of water dominated by  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ , and the biogenic compounds  $\text{NO}_3^{2-}$ . Water characterized by low mineral content in the range of 195.6 to 246.3  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . In the field, the pH measured, and *EC* water were measured. In the laboratory HGI AGH determined by methods ICP-OES:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , and ICP-MS: Ag, Al, As, Be, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hg, I, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Te, Ti, Tl, U, V, W, Y, Sr, Zn, Zr. Concentrations of  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Cl}^-$  were determined volumetrically and argentometrically (Mohr's method). To determine the concentration of  $\text{NO}_3^{2-}$  used the DR 2800 spectrophotometer HACH Lange. The paper attempts ties physico-chemical composition of the characteristics of the geographical environment catchment.

### Authors' address:

Małgorzata Malata, Jacek Motyka,  
Adam Postawa, Bartłomiej Byrski  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony  
Środowiska  
Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland  
e-mail: malatamalgorzata@wp.pl