



II. KRÓTKIE ARTYKUŁY / SHORT PAPERS

Badania składu chemicznego aerozolu w Uzdrowisku Kopalnia Soli „Wieliczka” metodą „płuczkową”

Chemical composition testing of aerosol spray in the “Wieliczka” Salt Mine using the “scrubbing” method

Magdalena KOSTRZON¹, Teresa LATOUR², Artur Jerzy BADYDA³,
Wioletta ROGULA – KOZŁOWSKA^{4,5}, Marian LEŚNY¹

¹ Kopalnia Soli „Wieliczka” Trasa Turystyczna Sp. z o.o., Park Kingi 10, 32-020 Wieliczka, e-mail: magdalena.kostrzon@kopalnia.pl;

² Zakład Tworzyw Uzdrowskich, Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – PZH,
ul. Słowackiego 8, 60-823 Poznań, e-mail: tlatour@pzh.gov.pl

³ Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Warszawa

⁴ Instytut Podstaw inżynierii Środowiska PAN, ul. M. Skłodowskiej-Curie 34; 41-819 Zabrze

⁵ Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, ul. Słowackiego 52/54; 01-629 Warszawa

STRESZCZENIE

Subterraneoterapia (speleoterapia) stosowana jest w leczeniu przewlekłych chorób układu oddechowego. Jednym z czynników leczniczych występujących w atmosferze podziemnej Uzdrowiska Kopalnia Soli „Wieliczka” jest obecność aerozolu solnego. Ma on działanie osmotyczne, zwiększa aktywność ruchu migawkowego rzęsek nabłonka oskrzeli i pobudza czynność wydzielniczą dróg oddechowych.

W dniach 29.03 – 04.04.2017 roku w kompleksie komór Uzdrowiska Kopalnia Soli „Wieliczka” przeprowadzono badanie powietrza metodą aspiracyjną z wykorzystaniem płuczek. W pobranych próbkach dokonano pomiaru stężenia jonów: Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, F⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺.

Stężenie składników mineralnych w powietrzu podziemnym wyniosło od 2,7 – 8,1 mg/m³ - średnio we wszystkich próbkach 4,4 mg/m³. W pobranych próbkach powietrza dochodzącego do kompleksu komór uzdrowskich wśród oznaczonych składników dominowały: sód, potas, wapń i chlorki. Stężenie aerozolu w granicach oznaczonych aktualnie jest porównywalne z aerozolem nadmorskim. Aerozol wytwarzany obiektach subterraneoterapii charakteryzuje bardzo niska zawartość składników nierozpuszczalnych. Warunki panujące w podziemnym kompleksie komór uzdrowskich, sprzyjają działalności leczniczej ukierunkowanej na leczenie przewlekłych schorzeń układu oddechowego.

Słowa kluczowe: Subterraneoterapia, speleoterapia, aerozol solny, kopalnia soli,

ABSTRACT

Subterraneotherapy (speleotherapy) is used in the treatment of chronic respiratory diseases. Salt aerosol is one of the therapeutic agents that occur in the underground atmosphere of the “Wieliczka” Salt Mine. It has an osmotic effect, increases the activity of the ciliary movement of the bronchial epithelium and stimulates respiratory secretion.

In the period between 29th March and 4th April 2017, the air in the complex of the “Wieliczka” Salt Mine chambers was tested using the aspiration method with scrubbers. The measurements of ionic concentrations for Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, F⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ were followed by an analysis of the elements in the samples.

In all samples, the concentration of minerals in the underground air was from 2.7 to 8.1 mg/m³ - 4.4 mg/m³ on average. Sodium, potassium, calcium and chloride were dominant in the samples of air coming from the complex of spa chambers. The currently determined concentration of aerosol is comparable to coastal aerosol. Aerosol produced by subterraneotherapy objects has a very low content of insoluble constituents. The conditions in the underground complex of the spa chambers are beneficial to therapeutic activities aimed at treating chronic respiratory diseases.

Key words: Subterraneotherapy, speleotherapy, salt aerosol, salt mine

1. WSTĘP

Jedną z metod leczenia, należących do grupy metod klimatoterapeutycznych, jest subterraeoterapia, opierająca się na wykorzystaniu naturalnych właściwości mikroklimatu komór podziemnych (najczęściej wyrobisk solnych) (Ponikowska, Ferson, 2008).

Wartość subterraneoterapii jako metody leczniczej opiera się na synergistycznym wpływie na organizm człowieka zespołu czynników natury fizycznej, chemicznej i biologicznej, występujących w przestrzeniach podziemnych (Skulimowski, 1964). Warunki panujące w podziemnych komorach solnych sprzyjają leczeniu przewlekłych schorzeń układu oddechowego oraz schorzeń o podłożu alergicznym (Obtułowicz, 2013, Kalinowska i in., 2013, Czarnobilski i in., 2013, Nurov, 2010). Dotychczasowe badania wskazują, że w mechanizmie leczniczego oddziaływania atmosfery podziemnej zasadnicze znaczenie mają takie czynniki, jak:

- czystość powietrza, która izoluje osoby chore od czynników wpływających drażniąco i alergizująco na układ oddechowy;
- stężenie chlorku sodu (NaCl);
- silnie bodźcowe działanie mikroklimatu wynikające z dwukrotnej (w ciągu dnia) zmiany warunków klimatycznych (codzienne zjazdy i wyjazdy pacjentów do kopalni) (Obtułowicz, 2013).

Bioklimat podziemnych komór, wykorzystywanych do celów leczniczych cechuje duża stabilność panujących tam warunków: temperatury, wilgotności, przepływu powietrza, składu chemicznego powietrza, poziomu jonizacji oraz ciśnienia atmosferycznego. Wilgotne powietrze jest zalecane w chorobach dróg oddechowych, ponieważ zapobiega szkodliwemu wysychaniu błony śluzowej układu oddechowego (Ponikowska, Ferson, 2008). Ciśnienie atmosferyczne w komorach podziemnych jest wyższe niż na powierzchni, wzrost ten jest proporcjonalny do głębokości. Wzrost ciśnienia jest pozytywnym bodźcem klimatycznym dla organizmu człowieka, gdyż przy prawidłowym wysyceniu powietrza tlenem (jak na powierzchni ziemi) dochodzi do zwiększenia jego ciśnienia parcjalnego we krwi i tym samym lepszego zaopatrzenia tkanek w tlen (Ponikowska, Ferson, 2008). Ruch powietrza w podziemnych wyrobiskach jest wymuszony systemem przewietrzania wyrobisk. Wpływa on na tworzenie się aerozolu solnego i jest istotnym czynnikiem sprzyjającym szybkiej regeneracji powietrza w komorach, po pobycie większych grup pacjentów (Obtułowicz 2002).

Aerozol to układ koloidalny cząstek stałych lub ciekłych rozproszonych w fazie gazowej. W skład aerozolu kopalnianego wchodzi zarówno substancje, których obecność jest pożądana ze względu na walory zdrowotne (głównie sole,

w szczególności NaCl), jak również substancje organiczne i nieorganiczne pochodzenia zewnętrznego (materiał wniesiony wraz z powietrzem ze środowiska zewnętrznego lub związany z przebywaniem w kopalni ludzi, a także niezbędnym wyposażeniem) (Obtułowicz, 2002). Dobrze rozpuszczalne sole, jak NaCl, wchodzące w skład aerozolu kopalnianego, z uwagi na warunki wilgotnościowo-temperaturowe panujące w środowisku podziemnym, występują głównie w formie zdysocjowanej, dzięki czemu związki te są dobrze absorbowane, również w górnych drogach oddechowych (Czajka i in., 2006).

Jakość powietrza wewnętrznego w podziemnych komorach solnych nie może być oceniana jedynie pod kątem potencjału leczniczego powietrza, utożsamianego głównie z ilością zdysocjowanego chlorku sodu w powietrzu. Decydują o nim także korzystne warunki mikrobiologiczne (Obtułowicz i in., 2013, Frączek i in., 2013). Prowadzony od 2012 roku monitoring biologiczny powietrza w komorach Uzdrowiska wskazuje, iż stężenie pyłku roślin, zarodników grzybów oraz alergenu roztoczy utrzymuje się na stałym i niskim poziomie, niezależnie od wysokich stężeń stwierdzanych w powietrzu atmosferycznym na powierzchni ziemi w okresie wiosennym i letnim (Myszkowska i in., 2013).

W ostatnich kilku dziesięcioleciach badania środowiskowe, epidemiologiczne i toksykologiczne zdominowane są przez tematykę oddziaływania drobnocząsteczkowego pyłu zawieszonego (ang. *particulate matter*) w środowisku. W badaniach prowadzonych w 2015 roku stwierdzono, iż stężenie aerozolu respirabilnego w Uzdrowisku Kopalnia Soli „Wieliczka” wyniosło średnio 7 µg/m³. Takie stężenia należy uznać za poziom wyjątkowo niski. Uzyskane wyniki świadczą o znacznej czystości powietrza w kompleksie komór uzdrowskowych (Rogula-Kozłowska i in., 2016)

Przebywanie w atmosferze podziemnej, wolnej od zanieczyszczeń antropogenicznych, o bardzo niskim stężeniu alergenów (także w szczycie sezonu pylenia), wysokiej czystości pod względem bakteriologicznym oraz wielokrotnie niższej ilości pyłu drobnocząsteczkowego niż na powierzchni, ma duże znaczenie dla procesu leczniczego. Synergistyczny wpływ wymienionych czynników stanowi intensywny bodziec terapeutyczny o działaniu przeciwwzapalnym, regenerującym i przeciwalergicznym (Obtułowicz i in., 2013).

Subterraneoterapia prowadzona jest obecnie w zespole komór solnych: Smok, Boczkowskiego i Stajnia Gór Wschodnich na III poziomie Kopalni Soli „Wieliczka” głębokości 135 m. Komora Smok przystosowana jest do treningów fizycznych i zabiegów z zakresu kinezyterapii. Znajdują się w niej również stanowiska do inhalacji indywidualnych z użyciem roztworu solanki wielickiej z samowypływu W-VII-16.

Komora Stajnia Gór Wschodnich składa się z dwóch części. W pierwszej z nich zamontowane jest urządzenie (typu

„tężnia”) służące do wytwarzania aerozolu solnego z użyciem w/wym. solanki oraz wyodrębnione miejsce do treningów indywidualnych. W drugiej części kuracjusze mogą korzystać z noclegów jak również odpocząć między zajęciami. Komora Boczkowskiego, w której pobierano próby do badań, jest miejscem odpoczynku dla pacjentów oraz służy do prowadzenia zajęć z zakresu edukacji zdrowotnej.

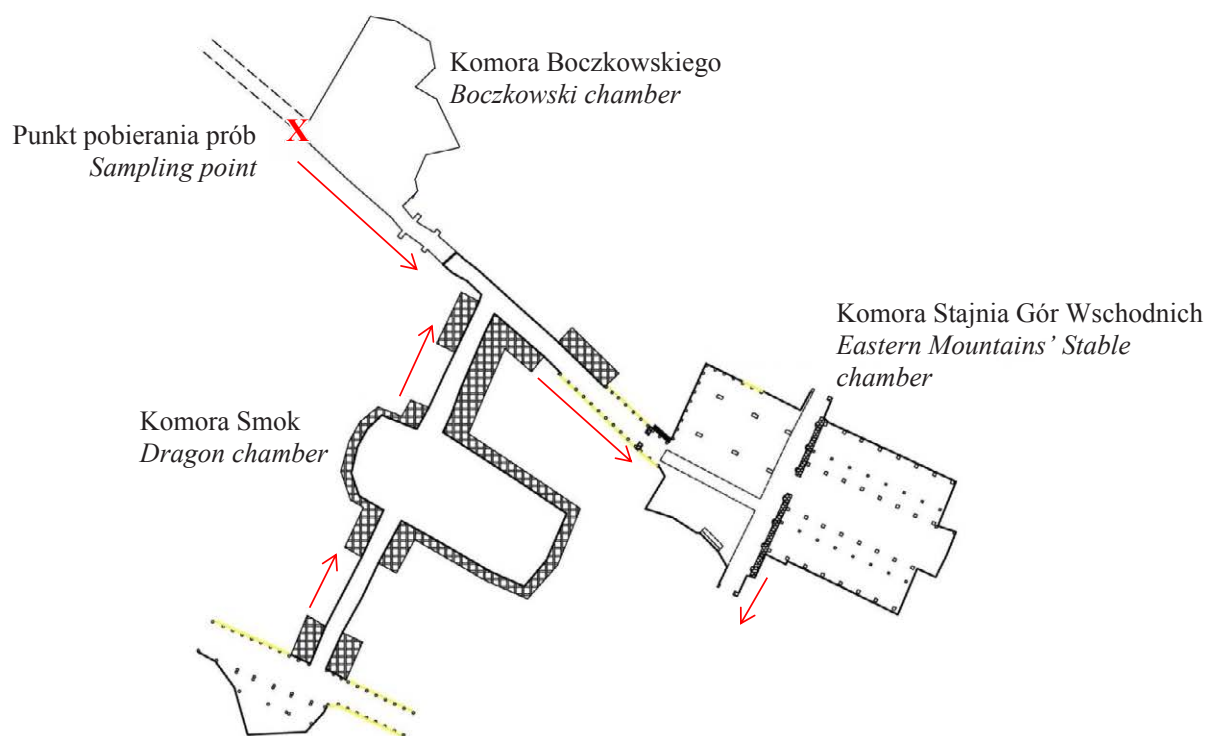
2. METODY BADAŃ

Badania przeprowadzono w dniach 29.03 – 04.04.2016 roku. Do badań wytypowano miejsce wlotu powietrza do kompleksu komór uzdrowiskowych w komorze Boczkowskiego – Rycina 1. Rejon komór Uzdrawiska na poz. III przewietrzany jest w układzie szybów Regis (wdechowy) – oraz Wilson (wydechowy). Ruch powietrza w kopalni wymuszony jest przez wentylatory głównego przewietrzania, zabudowane przy szybie wydechowym Wilson, które wymuszają przepływ powietrza w wyrobiskach podziemnych. Powietrze, oczyszczone na powierzchni z zanieczyszczeń stałych na filtrach wlotowych, sphywa na poziom III i płynie do zespołu komór Boczkowski, Stajnia Gór Wschodnich, Smok. Trasa przepływu powietrza wynosi około 700 – 800 m. Przez zespół komór uzdrowiskowych przepływało średnio ok 180 m³/min powietrza. Próby do badań pobierane były przez 7 kolejnych dni metodą aspiracyjną za pomocą dwukanałowego Aspiratora ASP-3II, (prod. LAT Sp. z o.o.) i płuczek Dreschla ze

spiekim szklanym G-1. Aspirator ustawiony był na wysokości 150 cm od poziomu podłogi w komorze Boczkowskiego (wlot powietrza do komory znajduje się na wysokości 80 cm i ma średnicę ok 140 cm, pobierano powietrze ze środka strumienia powietrza

Do każdego z 2 torów podłączono po 2 płuczki napełnione wodą bidestylowaną do objętości 100 ml. Szybkość przepływu powietrza przez płuczki ustawiono na 20 l/h; powietrze przepuszczano przez wodę przez 1 h.

W roztworze uzyskanym przez rozpuszczenie składników mineralnych zawartych w 20 l powietrza oznaczono zawartość: jonu sodu Na⁺, jonu potasu K⁺, jonu wapnia Ca²⁺, jonu magnezu Mg²⁺, jonu amonowego NH₄⁺, jonu fluorowego F⁻, jonu azotanowego NO₃⁻, jonu fosforanowego PO₄³⁻, jonu siarczanowego SO₄²⁻. Zawartość wymienionych jonów w roztworach wodnych oznaczono metodą chromatografii jonowej z wykorzystaniem chromatografu jonowego firmy *Metrohm* (*Herisau Metrohm AG*, Szwajcaria; wyposażonego w: 818 *IC Pump*, 819 *IC Detector*, 837 *IC Eluent Degasser*, 830 *IC Interface*, 820 *IC Separation Center*, program *Metrodata 2.3*). Metoda została wcześniej zwalidowana w oparciu o oznaczenia certyfikowanego materiału odniesienia (*CRM Fluka products* nos. 89316 i 89886, odzysk certyfikowanej wartości mieścił się w granicach 92-109%). Limity detekcji były na poziomie: 20 mg/m³ dla NH₄⁺, 50 mg/m³ dla Cl⁻, SO₄²⁻ i K⁺, 70 mg/m³ dla PO₄³⁻, F⁻, NO₃⁻ i Na⁺, 120 mg/m³ dla Ca²⁺ i Mg²⁺.



Ryc. 1. Lokalizacja punktu pobierania prób metoda aspiracyjną w komorze Boczkowskiego (X).
Strzałkami zaznaczono kierunek przepływu powietrza w badanym okresie.

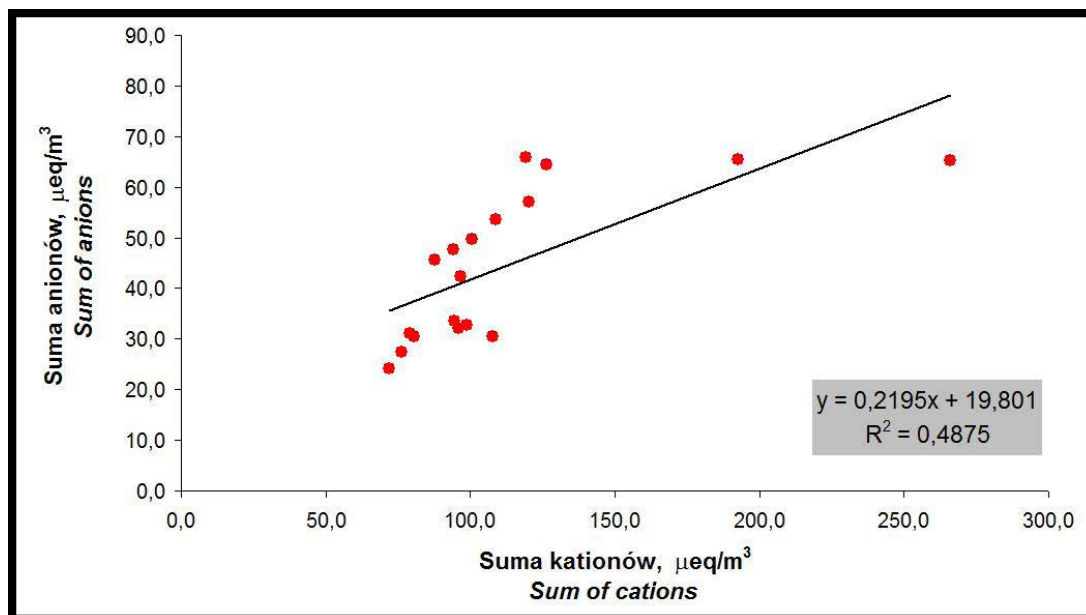
Fig. 1. Location of the sampling point for the aspiration method in the Boczkowski chamber (X).
Arrows indicate the direction of air flow in the tested area.

Tabela 1. Zawartość jonów soli rozpuszczalnych w wodzie w powietrzu w komorze Boczkwoskiego ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Table 1. Content of water-soluble ions in the Boczkwoski chamber air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Pomiar Measurement	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
*2	250,1	813,5	251,7	bld	215,3	964,5	bld	491,6	191,0	348,4
Tor I (płuczka 1 + 2) Track I (scrubber 1 + 2)	408,3	1148,3	321,8	bld	243,8	1565,9	bld	997,6	147,7	265,8
	358,6	879,6	227,9	bld	232,8	1629,4	bld	821,6	139,7	103,9
	351,9	1282,1	174,4	bld	257,9	1994,3	bld	1061,4	151,2	bld
	154,5	592,6	210,9	bld	152,6	1607,7	bld	312,3	132,5	139,5
	99,6	461,8	183,8	bld	115,4	1281,1	bld	199,3	135,9	bld
	261,1	876,9	258,7	bld	284,2	949,4	bld	604,9	220,1	509,0
Tor II (płuczka 1 + 2) Track II (scrubber 1 + 2)	397,4	1200,9	181,7	bld	289,2	1574,4	bld	1258,5	168,7	3021,5
	175,9	559,4	173,2	bld	124,6	1306,6	bld	442,6	131,6	bld
	bld	827,1	188,6	bld	179,0	1767,8	bld	490,1	140,2	130,6
	166,5	608,1	289,3	bld	109,2	1689,0	bld	378,4	137,6	bld
	179,9	512,5	225,3	bld	110,1	1390,4	bld	335,8	136,3	bld
	255,6	845,2	255,2	bld	249,8	957,0	bld	548,2	205,6	428,7
Srednia Tor I i II Mean (track I and II)	402,9	1174,6	251,8	bld	266,5	1570,2	bld	1128,0	158,2	1643,6
	267,3	719,5	200,6	bld	178,7	1468,0	bld	632,1	135,6	103,9
	351,9	1054,6	181,5	bld	218,5	1881,0	bld	775,7	145,7	130,6
	160,5	600,3	250,1	bld	130,9	1648,3	bld	345,4	135,1	139,5
	139,7	487,1	204,6	bld	112,8	1335,8	bld	267,5	136,1	bld
Średnia Mean $\mu\text{g}/\text{m}^3$	257,8	813,6	223,9	bld	192,8	1476,7	bld	616,2	152,7	580,4

* w analizie wyników pominięto pomiar 1 ze względu na źle ustawiony przepływ; **bld – poniżej granicy oznaczalności (below limit of detection)

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA



Ryc. 2. Zawartość sumy kationów vs. zawartość sumy anionów w pojedynczych pomiarach wyrażona jako mikroekwiwalent* (μeq) w m^3 powietrza w komorze Boczkowskiego.

Fig. 2. The sum of cations vs. the sum of anions in individual measurements expressed as microequivalence* (μeq) in m^3 of the Boczkowski chamber air.

Tabela 2. Suma kationów i anionów oraz stosunek ilości kationów i anionów w m^3 powietrza w komorze Boczkowskiego

Table 2. Sum of cations and anions and the ratio of cations and anions in m^3 of air in the Boczkowski chamber:

Pomiar Measurement		Suma kationów Sum of cations [$\mu\text{eq}/\text{m}^3$]	Suma anionów Sum of anions [$\mu\text{eq}/\text{m}^3$]	Suma kationów/Suma anionów Sum of cations/sum of anions
Tor I (płuczka 1 + 2) Track I (scrubber I + 2)	2	87,9	45,7	1,9
	3	119,3	65,8	1,8
	4	108,7	53,6	2,0
	5	126,5	64,4	2,0
	6	95,9	32,1	3,0
	7	72,1	24,1	3,0
Tor II (płuczka 1 + 2) Track II (scrubber I + 2)	2	100,6	49,7	2,0
	3	265,9	65,3	4,1
	4	79,1	31,1	2,5
	5	107,6	30,4	3,5
	6	94,6	33,6	2,8
	7	80,4	30,6	2,6
Średnia Tor I i II Mean (track I and II)	2	94,2	47,7	2,0
	3	192,6	65,6	2,9
	4	96,5	42,4	2,3
	5	120,3	57,2	2,1
	6	98,8	32,8	3,0
	7	76,3	27,3	2,8
Średnia Mean $\mu\text{eq}/\text{m}^3$		117,2	45,5	2,6

* mikroekwiwalent – suma mas jonów wyrażona w mikrogramach w stosunku do ich masy molowej / microequivalence – sum of ions' mass expressed in micrograms to their molar mass

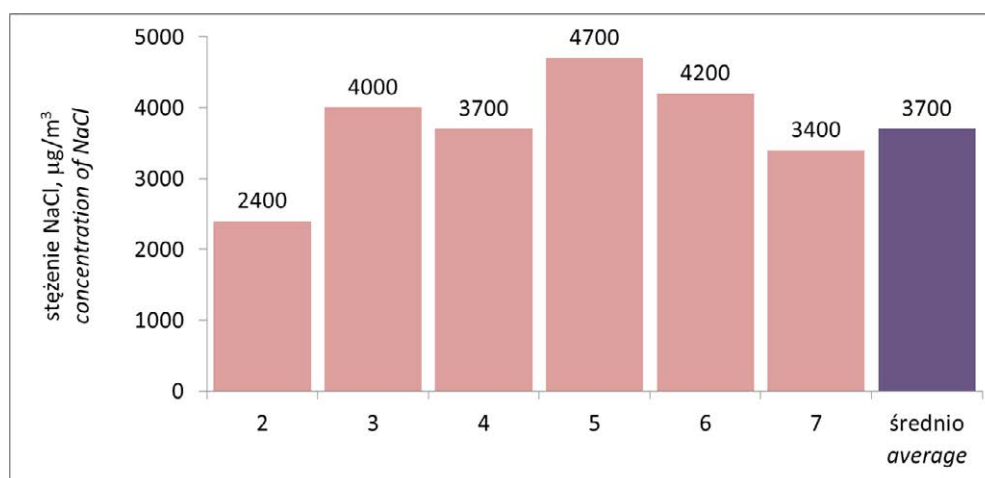
Tabela 3. Czynniki mikroklimatu (temperatura, wilgotność względna, ciśnienie) w trakcie prowadzenia pomiarów
Table 3. Microclimate factors (temperature, relative humidity, pressure) during measurements.

	Pomiar Measurement	1	2	3	4	5	6	7
Wilgotność względna powietrza (komora Boczkowskiego) <i>Relative air humidity (Boczkowski chamber)</i>	średnia [%] <i>mean [%]</i>	65,3	64,7	66,2	66,7	66,4	66,7	66,9
	SD <i>SD</i>	0,40	0,31	0,53	0,33	0,34	0,39	1,35
	min <i>min</i>	64,4	64,3	65,3	66,1	65,9	66,2	63,8
	maks <i>max</i>	65,7	65,2	67,1	67,2	66,9	67,4	68,3
Temperatura <i>Temperature (Boczkowski)</i>	średnia [°C] <i>mean [°C]</i>	14,1	14,0	14,3	14,4	14,3	14,2	14,1
	SD <i>SD</i>	0,02	0,11	0,07	0,10	0,04	0,07	0,22
	min <i>min</i>	14,1	14,0	14,2	14,3	14,3	14,1	13,7
	maks <i>max</i>	14,1	14,2	14,4	14,6	14,3	14,3	14,2
Ciśnienie (komora Smok) <i>Pressure (Dragon chamber)</i>	średnia [hPa] <i>mean [hPa]</i>	991,4	997	997,1	1000,5	1008,5	995,1	991,1
	SD <i>SD</i>	0,14	0,16	0,14	0,77	0,60	1,29	0,79
	min <i>min</i>	991,2	996,8	996,9	999,2	1007,7	993,7	990,6
	maks <i>max</i>	991,6	997,2	997,3	1001,6	1009,4	997,5	993,4

W aerozolu pobranym do płuczek z wodą bidestylowaną zawartość oznaczonych składników mineralnych w przeliczeniu na m³ powietrza wyniosła od ok. 2700 µg do 8100 µg (średnia ze wszystkich prób: 4400 µg) (Tabela 1). Wśród oznaczonych składników dominują sód, potas, wapń i chlorki, będące głównymi składnikami soli kamiennej, która jest źródłem aerozolu wytwarzającego się w komorach poworobiskowych i korytarzach. Obecność niektórych spośród oznaczonych lub nieoznaczonych (wodorowęglany, azotany) składników może być wynikiem rozpuszczenia znajdujących się w powietrzu gazów, w tym dwutlenku węgla. Niektóre ze składników powietrza w komorach solnych mogą pochodzić także z powietrza zewnętrznego, a dokładniej mogą dopływać wraz z powietrzem atmosferycznym do komory. Dotyczy to, między innymi, jonu siarczanowego i azotowego, które są głównymi składnikami wtórnego aerozolu atmosferycznego (Rogula-Kozłowska, 2016). Sód i chlorki w powietrzu komory Boczkowskiego pochodzą z całą pewnością w całości z ługowania ścian tunelu przez wodę zawartą w powietrzu. W powietrzu atmosferycznym na powierzchni ziemi, składniki te stanowią około 20% masy drobnego pyłu atmosferycznego i występują w formie soli zaadsorbowanych na powierzchni cząstek drobnego pyłu albo zaabsorbowanych

w składnikach cząstek drobnego pyłu, np. w wodzie (Rogula-Kozłowska i inni 2017) w stężeniach kilkaset razy niższych niż w komorze (Rogula-Kozłowska, 2016; Błaszczuk i in., 2016; Rogula-Kozłowska i in., 2014; Seinfeld, Pandis, 2006; Chow, 1995).

Generalnie suma kationów i anionów (wyrażona w µeq/m³) w kolejno oznaczanych próbkach przebadanego powietrza wskazuje, że wielkości te są dość dobrze skorelowane (współczynnik determinacji R² na poziomie 0,5). Potwierdza to poprawność wykonania analiz chemicznych. W powietrzu przebadanym, niezależnie od pomiaru i numeru płuczki, oznaczono więcej kationów niż anionów (Tabela 2). Stosunek sumy kationów do anionów, wyrażony w µeq/m³, średnio dla wszystkich pomiarów wyniósł 2,6 (w każdym pomiarze większy niż 1). Przy stosunku równym 1 można by uznać, że odczyn aerozolu byłby w przybliżeniu obojętny, a jednocześnie stosunek na tym poziomie oznaczałby, że oznaczono wszystkie składniki roztworu (liczba anionów i kationów wyrażona jako mikroekwiwalent w roztworze powinna być mniej więcej wyrównana). Najprawdopodobniej zatem większość pominiętych w oznaczeniach składników stanowiły aniony, między innymi, wodorowęglanowy, wodorotlenowy.



Ryc. 3. Stężenie NaCl w powietrzu komory Boczkowskiego w kolejnych pomiarach.

Fig. 3. NaCl concentration in the air of the Boczkowski chamber in subsequent measurements.

Część nieoznaczonych anionów mogły też stanowić jony jodków i bromków.

Różnice w stężeniu aerozolu, rozumianym jako suma mas składników rozpuszczonych w wodzie związków w przeliczeniu na objętość powietrza z jakiej zostały pobrane, w poszczególnych dniach nie są znaczące ($p > 0,05$ przy założonym $p = 0,05$ w teście U Manna Whitneya dla 6 pomiarów) i nie są wynikiem różnic w wilgotności względnej powietrza, która w okresie pomiarów wahała się w przedziale 64,4% do 66,9% (Tabela 3). Wahania stężeń poszczególnych składników aerozolu solnego w komorze również nie były duże, choć w niektórych przypadkach (F^- , Cl^- , K^+ , Ca^{2+}) istotne statystycznie ($p < 0,05$). Dość wyrównane w kolejnych pomiarach, dla obu płuczek, były stężenia Na^+ , natomiast stężenia Cl^- mocno się różniły w kolejnych dniach pomiarów. Można podejrzewać, że Na^+ w powietrzu pochodzi głównie od NaCl, natomiast Cl^- jest również składnikiem wielu innych związków jak $MgCl_2$, $CaCl_2$, KCl , których obecność jest uzależniona od zawartości w ścianach tunelu. Można sobie wyobrazić, że o ile tunel zbudowany jest praktycznie w całości z NaCl (w rozumieniu, że w każdym cm^2 i na każdej głębokości jest NaCl) to już rozłożenie w ścianach tunelu innych soli jest nierównomierne i najprawdopodobniej niemożliwe do dokładnego określenia (zmienia się w zależności od głębokości).

Ze względu na to, że zawartość Na^+ w powietrzu jest mniej więcej wyrównana w kolejnych dniach i jak pokazano powyżej najprawdopodobniej w całości Na^+ pochodzi od NaCl, łatwo stechiometrycznie można określić stężenia NaCl w aerozolu w komorze Boczkowskiego. Zmiany tych oszacowanych stężeń pokazano na rycinie 3.

Oznaczana aktualnie zawartość aerozolu solnego w komorze Boczkowskiego jest niższa od wykazanej we wcześniejszych prowadzonych badaniach w komorach uzdrawiskowych na głębokości 200 m, w których stwierdzono stężenie NaCl

na poziomie 24 000 $\mu g/m^3$, przy wilgotności powietrza wynoszącej od 77% do 92% (Czajka i in., 2006; Latour 1992).

4. WNIOSKI

Stężenie aerozolu w komorze Boczkowskiego jest porównywalne ze stężeniem aerozolu na wybrzeżu Bałtyku (Świnoujście, Kołobrzeg) (Czajka i in., 2006).

Aerozol wytwarzany w obiektach subterraneoterapii charakteryzuje bardzo niska zawartość składników nierozpuszczalnych oraz alergenów występujących w środowisku naziemnym (Rogula-Kozłowska i in. 2016; Frączek i in. 2013; Obtulowicz i in. 2013). Istotne znaczenie dla uzyskania pozytywnego oddziaływania subterraneoterapii ma stabilność czynników mikroklimatu, czas pobytu kuracjuszy w komorach powyrobiskowych oraz dodatkowe ćwiczenia fizyczne wzmagające proces oddychania i wymiany powietrza (Obtulowicz 2013, Mętel i in. 2013).

Warunki aerosanitarne panujące w podziemnym kompleksie komór uzdrawiskowych, wyjątkowe zarówno pod względem składu, jak i stężenia aerozolu, są jednym z istotnych czynników klimatycznych, stanowiących o leczniczych właściwościach mikroklimatu podziemnych wyrobisk kopalni soli. Za zasadne uznać zatem należy prowadzenie działalności leczniczej o profilu ukierunkowanym na leczenie schorzeń układu oddechowego w takich warunkach.

5. LITERATURA / REFERENCES

- BLASZCZAK B., ROGULA-KOZŁOWSKA W., MATHEWS B., JUDA-REZLER K., KLEJNOWSKI K., ROGULA-KOPIEC P., 2016. Chemical Compositions of PM_{2.5} at Two Non-Urban Sites from the Polluted Region in Europe. *Aerosol and Air Quality Research* 16: 2333-2348.
- CHOW J.C., 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of Air and Waste Management Association* 45: 320–382.

- CZAJKA K., SZIWAD., DROBNIK M., LATOUR T., 2006. Porównanie właściwości mikroklimatu i aerozoli w wyrobiskach kopalnianych i naziemnych grotach solnych. *Balneologia Polska* 3: 176-181.
- CZARNOBILSKI K., SZŁĘK R., LIS G., OBTUŁOWICZ K., CZARNOBILSKA E., LALIK B., 2013. The efficacy of subterranean therapy in the treatment of bronchial asthma evaluated by nitric oxide ENO, *Alergologia i Immunologia* 10: 30-32.
- FRĄCZEK K., GÓRNY R. L., ROPEK D., 2013. Bioaerosols of subterranean therapy chambers at salt mine. *Aerobiologia* 29: 481-493.
- KALINOWSKA A.K., MIRSKA A., DMITRUK E., 2013. Subterranean therapy as a specific method of climate therapy. *Acta Balneologica* 1(131): 55-58.
- LATOUR T., 1992. Obiekty subterranean terapii w Polsce. Poznań. Instytut Medycyny Uzdrawiskowej, Biblioteka Lekarza Uzdrawiskowego.
- MĘTEL S., SŁOWIK A., GŁODZIK J., KRESKA-KORUS A., GOLEC J. SZCZYGIEL E., Postępowanie usprawniające w warunkach subterranean terapii w Uzdrawisku Kopalnia Soli Wieliczka. Rozdz. w: Współczesne kierunki w medycynie prewencyjnej. Red.: Goździalska A., Jaśkiewicz J., Kraków, 2013, Oficyna Wydawnicza KA:113-125.
- MYSZKOWSKA D., KOSTRZON M., OBTUŁOWICZ K., DYGA W., CZARNOBILSKA E., 2013. Porównanie składu bioaerozolu w powietrzu komór solnych Uzdrawiska Kopalni Soli „Wieliczka” oraz w atmosferze w Krakowie. *Acta Balneologica* 3(133): 230.
- NUROVI I., 2010. Immunologic features of speleotherapy in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Medical and Health Science Journal* 2:44-47.
- OBTUŁOWICZ K., MYSZKOWSKA D., DYGA W., MAZUR M., CZARNOBILSKA E., 2013. Hypoalergenowa subterranean terapia w komorach solnych Kopalni w Wieliczce w leczeniu alergii dróg oddechowych i skóry. Znaczenie bioaerozolu. *Alergologia i Immunologia* 10: 20-23.
- OBTUŁOWICZ K., 2002. Aerozole kopalniane. Rozdz. w: Modelowe studium wykorzystania i ochrony surowców balneologicznych Krakowa i okolicy. Red.: Ney R., IGSMiE PAN, Kraków: 34 – 47.
- OBTUŁOWICZ K., 2013. Mechanism of therapeutic effects of subterranean therapy in the chambers of the Salt Mine Wieliczka. *Alergologia i Immunologia* 10: 26 – 29.
- PONIKOWSKA I., FERSON D., 2008. Nowoczesna medycyna uzdrawiskowa. Medi Press, Warszawa: 191 – 196.
- ROGULA-KOZŁOWSKA W., 2016. Size-segregated urban particulate matter: mass closure, chemical composition, and primary and secondary matter content. *Air Quality, Atmosphere and Health* 9 (5): 533–550.
- ROGULA-KOZŁOWSKA W., KOSTRZON M., ROGULA-KOPIEC P., BADYDA A.J., 2016. Particulate Matter in the Air of the Underground Chamber Complex of the Wieliczka Salt Mine Health Resort. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 955: 9-18.
- ROGULA-KOZŁOWSKA W., WIDZIEWICZ K., MAJEWSKI G., 2017. A simple method for determination of total water in PM1 on quartz fiber filters. *Microchemical Journal* 132: 327-332.
- ROGULA-KOZŁOWSKA W., KLEJNOWSKI K., ROGULA-KOPIEC P., OŚRÓDKA L., KRAJNY E., BŁASZCZAK B., MATHEWS B., 2014. Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM2.5 in Poland. *Air Quality, Atmosphere and Health* 7:41-58.
- SEINFELD J.H., PANDIS S.N., 2006. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- SKULIMOWSKI M., 1964. Leczenie chorych na astmę oskrzelową w komorach kopalni soli w Wieliczce. *Przegląd Lekarski* 4-5: 225-228.