



## Wstępne wyniki testu aparatury do ciągłego pomiaru stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym na stanowisku w Szczawnicy

*Radosław Tarkowski, Wiesław Sroczyński,  
Katarzyna Luboń, Magdalena Wdowin  
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi  
i Energią PAN, Kraków*

### 1. Wstęp

Bezpośrednie pomiary stężenia dwutlenku węgla w gruncie i/lub w wodzie gruntowej należą do podstawowych metod monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla. Ważne jest przy tym nie tyle samo stwierdzenie obecności CO<sub>2</sub> i pomiar jego stężenia, co zidentyfikowanie anomalii mogących wskazywać na ewentualne nieszczelności kompleksu składowania. Może temu służyć aparatura do ciągłego pomiaru stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym jaką zaprojektowano w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.

Prezentowane badania, wykonane w latach 2009–2010 na stanowisku badawczym w Szczawnicy, miały na celu: (1) przetestowanie prototypowego urządzenia pod kątem bezawaryjnej pracy w trudnych warunkach terenowych; (2) rozpoznanie zmienności zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w miejscu potencjalnego występowania ekshalacji endogenicznego CO<sub>2</sub>.

Działanie omawianej aparatury oparte jest na absorpcji promieniowania podczerwonego przez dwutlenek węgla. Została ona zainstalowana na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara, gdzie testowano ją przez trzy miesiące [14]. Następnie została przeniesiona na teren zakładu górniczego Przedsiębiorstwa Uzdrawisko Szczawnica, gdzie po okresie próbnym, od listopada 2009 roku w sposób ciągły mierzy poziom

stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym. Pozwoliło to otrzymać wyniki pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> z pełnego rocznego cyklu pogodowego. Ich próba interpretacji była nakierowana na odpowiedź na następujące pytania: (1) jakie czynniki i w jakim stopniu decydują o zmienności przestrzenno-czasowej (krótko- i długoterminowej) stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym oraz (2) czy w poszczególnych punktach pomiarowych stacji pomiarowej w Szczawnicy został zarejestrowany dwutlenek węgla pochodzenia endogenicznego.

## **2. Przegląd dotychczasowych badań**

Stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym jest zmienne i uwarunkowane różnymi czynnikami – egzo- i endogenicznymi. Osiąga ono wartość dziesiątych części, a niekiedy nawet kilka procent [4]. Mają na to wpływ czynniki zewnętrzne: wilgotność, temperatura, nawożenie organiczne i mineralne, roślinność, rodzaj gleby (skład mineralny) i inne. Wpływ naturalnego CO<sub>2</sub> z wnętrza ziemi jest niewielki poza obszarami naturalnych wycieków tego gazu. Istniejąca literatura w tym zakresie wskazuje na zależność aktywności respiracyjnej gleb od warunków atmosferycznych (temperatury i wilgotności) [5]. Potwierdzają to również wyniki symulacji komputerowych [8].

W Polsce badania stężenia i przepływu CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym były prowadzone w obszarach występowania szczaw. Prowadzono je w celu oceny racjonalnej gospodarki wodami mineralnymi, jak i określenia ewentualnego zagrożenia dla ludzi spowodowanego wyciekiem tego gazu. Były one prowadzone na obszarach naturalnych wycieków CO<sub>2</sub> (Sudety – rejon Kotliny Kłodzkiej, Karpaty – rejon Krynicy) [4, 17]. Wyniki badań stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym dla obszaru likwidowanych kopalń węgla kamiennego w Wałbrzyskim Zagłębiu Węglowym przedstawili Dzieńiewicz i in. [6, 7], Kotarba i in. [9], a dla potencjalnych miejsc zatłaczania dwutlenku węgla Tarkowski i in. [16].

W IGSMiE PAN realizowane są badania dotyczące monitoringu składowania dwutlenku węgla [12, 15]. Badania takie prowadzono w miejscach naturalnych wycieków CO<sub>2</sub> oraz na obszarach potencjalnych podziemnych składowisk dwutlenku węgla, w celu ustalenia "tła" stężenia CO<sub>2</sub> (monitoring stanu początkowego) w powietrzu glebowym [13, 14]. Podkreślić należy, że bezpośrednie pomiary stężenia CO<sub>2</sub> w wodzie lub

gruncie stanowią istotną część monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla [1–3]. Pozwalają one na bieżąco kontrolować stężenie CO<sub>2</sub> w przypowierzchniowych warstwach ziemi, w glebie i bezpośrednio poniżej, w pobliżu otworu zatłaczającego, czy zlikwidowanych otworów [11]. Większość stosowanych technik pomiaru stężenia CO<sub>2</sub> oparta jest na absorpcji promieniowania podczerwonego przez dwutlenek węgla [10].

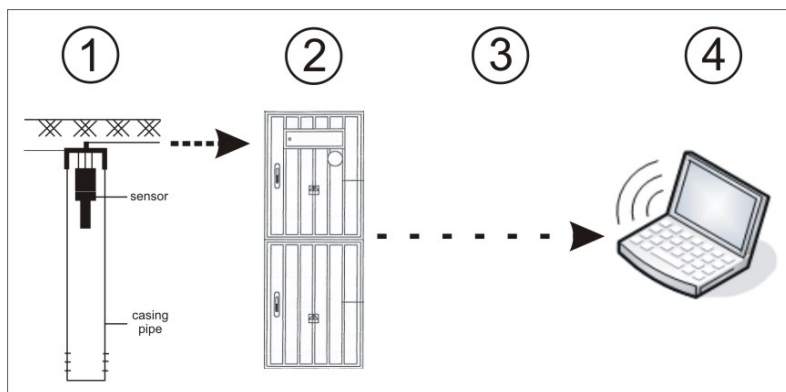
### **3. Aparatura oraz metodyka pomiarów**

Aparatura do ciągłego pomiaru i rejestracji stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym zainstalowana na terenie Uzdrowiska Szczawnica składa się z trzech podstawowych elementów: układu pomiarowego umieszczonego płytko pod powierzchnią ziemi, rejestratora wyników pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> (na terenie badań) oraz oprogramowania komputerowego mieszczącego się w centrum pomiarowym w IGSMiE PAN w Krakowie (rys. 1) [więcej: 14]. Rejestrator wyników posiada teletryczne łącze umożliwiające bezpośrednią transmisję danych z rejestratora do komputera znajdującego się w odległym centrum pomiarowym (IGSMiE PAN w Krakowie). Pomiar stężenia CO<sub>2</sub> dokonywany jest w sposób ciągły, natomiast rejestracja odbywa się z zaprogramowaną częstotliwością co 2 minuty.

Układ mierzący stężenie CO<sub>2</sub> składa się z czterech sond pomiarowych (PP1, PP2, PP3, PP4). Zostały one rozmieszczone w odległości kilkunastu-kilkudziesięciu metrów jedna od drugiej, wokół studni „Jan” eksploatującej szczawę na terenie górniczym Przedsiębiorstwo Uzdrowisko Szczawnica (PUS) w Szczawnicy.

Stacja pomiarowa CO<sub>2</sub> położona jest na wysokości ok. 514 m n.p.m., w dnie lokalnej dolinki o południowej ekspozycji (rys. 2). Obszar ma cechy klimatu gór niskich i pogórzy, z dużym udziałem cech własnych. Wiedza o głębokiej budowie geologicznej tego terenu jest skąpa. Jest to obszar zbudowany z utworów fliszu karpackiego pociętego intruzjami andezytu o charakterze dajek. W płytkim podłożu – do ok. 1–2 m p.p.t. zalegają grunty nasypowe, przemieszczone, pochodzenia miejscowego. Aluwia, tam gdzie występują, są złożone ze słabo obtoczonych i źle wysortowanych okruchów piaskowca (tutaj także andezytu), tkwiących w materiale gliniastym. Z wierzchu może zalegać cienka warstwa mad gliniastych. Zdrój "Jan" odkryty w 1869 r. ma wodę typu szczawa

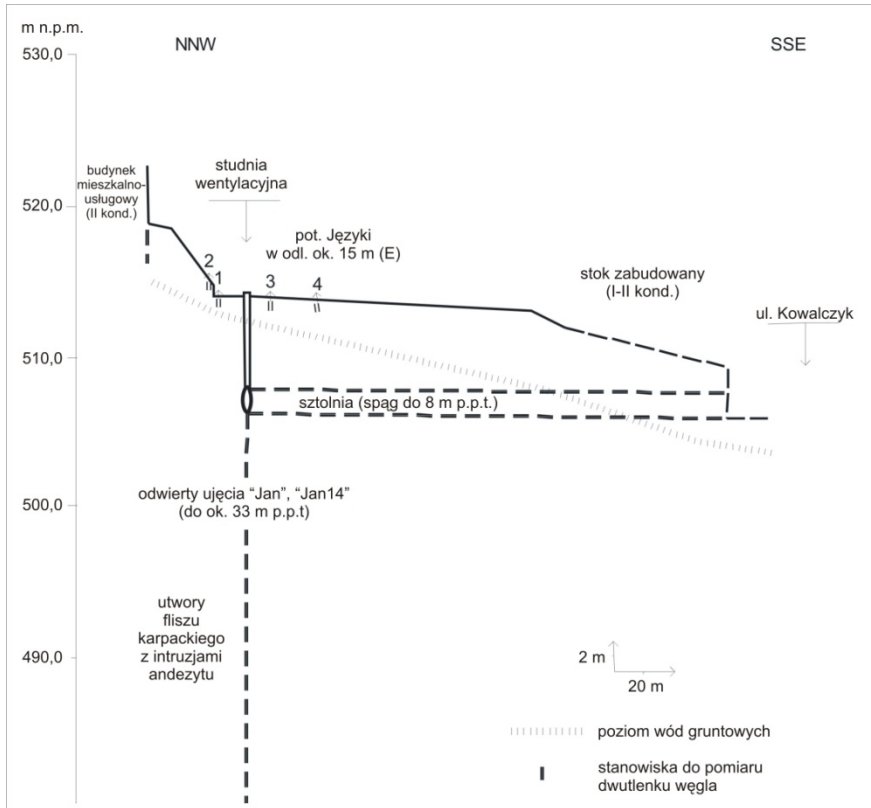
wodorowęglanowo-sodowo-chlorkowa, ze znaczną ilością żelaza. W latach 70-tych XX w. wykonana została tutaj sztolnia o długości około 200 m. w celu ujęcia wody mineralnej, a przy jej końcu znajduje się studnia wentylacyjna. Warunki hydrogeologiczne są złożone i zaburzone na skutek działalności człowieka. Podłoże gruntowe jest ogólnie słabo przepuszczalne, ze strefami naruszonymi przez roboty górnicze. Spływ wód podziemnych odbywa się od strony stoków do potoku i dalej wzdłuż biegu doliny.



**Rys. 1.** Schemat aparatury badawczej do ciągłego pomiaru stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym, 1 – sonda pomiarowa zabudowana pod powierzchnią ziemi, 2 – skrzynka pomiarowa z wbudowanym rejestratorem pomiarów oraz modemem do przesyłu danych, 3 – łącze telemetryczne GPRS, 4 – komputer z modemem do którego na bieżąco przesyłane są wyniki pomiarów.

**Fig. 1.** Scheme of the testing equipment for continuous measurement of CO<sub>2</sub> content in the soil air, 1 – sensor beneath the surface, 2 – measurement box with built-in measurement recorder and a modem for data transferring, 3 – GPRS transfer link, 4 – computer with a modem to register the measurement results.

Występowanie endogenicznego dwutlenku węgla jest tutaj ściśle związane z wystąpieniami szczaw. CO<sub>2</sub> pochodzi niewątpliwie z głębi ziemi, natomiast geneza wód mineralnych jest złożona. Na podstawie przesłanek geologicznych trudno jednoznacznie rozstrzygnąć, czy endogeniczny CO<sub>2</sub> może docierać do powierzchni i w jakiej ilości. Ujęcie jest otworowe, a sztolnia ma murowaną szczelną obudowę.



**Rys. 2.** Przekrój poprzeczny przez dolinę potoku Języki w Szczawnicy, w rejonie ujęcia wody mineralnej "Jan" (przewyższenie 5x)

**Fig. 2.** Cross section of the Języki Stream valley in Szczawnica near the "Jan" mineral water intake (vertical exaggeration x5).

#### 4. Warunki klimatyczne i pogodowe

W okresie wykonywania pomiarów dokonywane były przez PUS w Szczawnicy pomiary meteorologiczne: ciśnienie, temperatura, opad oraz informacje o zaleganiu pokrywy śnieżnej. Od 31 maja 2010 bezpośrednio na stacji pomiarowej zamontowano dodatkowe własne czujniki rejestrujące: ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza, temperaturę oraz stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu atmosferycznym.

Rok hydrologiczny 2010 (od 1 listopada 2009 r. do 31 października 2010 r.), którego dotyczą omawiane badania, odznaczał się średnią tempe-

raturą roczną 7,7°C zbliżoną do przeciętnej w ostatnich latach, przy zdecydowanie większych opadach – 1314 mm (zwykle 800–900 mm/rok). Odnotowano aż 163 dni z opadem, a najdłuższe przerwy między opadami trwały do 11 dni (w sezonie wegetacyjnym – do 9 dni). Największe ich nasilenie wystąpiło w maju (dobowy opad 115,7 mm w dn. 16 maja 2010 r.) i na początku czerwca. Miały wówczas miejsce dwa epizody powodziowe. Pomimo fal upałów, jakie wystąpiły w drugim tygodniu czerwca, w lipcu i sierpniu nie odnotowano suszy. Warto nadmienić, że jesień 2009 r. była nietypowa, przzerwana w połowie października atakiem chłódów, z obfitym opadem śniegu.

Warunki pogodowe mają decydujący wpływ na zawartość w powietrzu gruntowym organogenicznego dwutlenku węgla. Biorąc pod uwagę temperatury dobowe, rok hydrologiczny 2010 (od 1 listopada 2009 r. do 31 października 2010 r.) można podzielić na następujące pory klimatyczne (termiczne):

- przedzimie – od 1 listopada do 12 grudnia 2009 r.,
- zima – od 13 grudnia 2009 r. do 2 marca 2010 r.,
- przedwiosnie – od 3 marca do 30 marca 2010 r.,
- wiosna – od 31 marca do 31 maja 2010 r.,
- lato – od 1 czerwca do 30 sierpnia 2010 r.,
- jesień – od 31 sierpnia do – 31 października 2010 r..

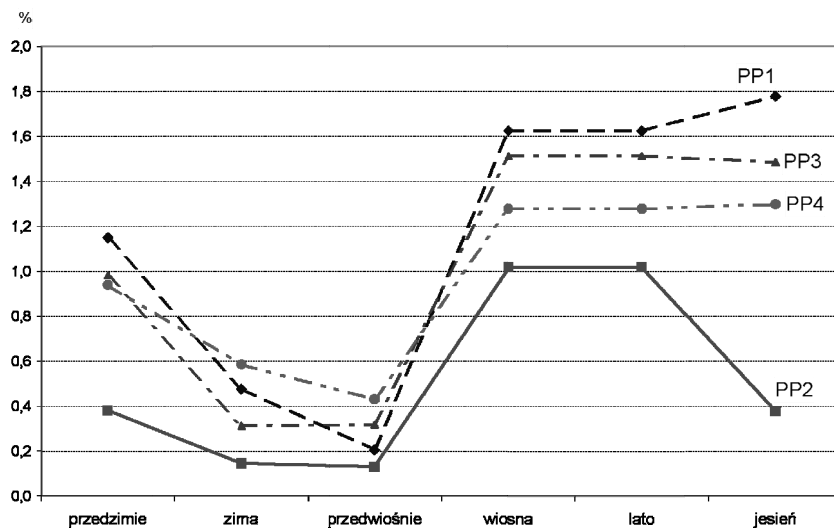
## **5. Wyniki ciągłego pomiaru stężenia CO<sub>2</sub>**

Dane z pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym na terenie górniczym PUS w Szczawnicy obejmują okres od 1 listopada 2009 do 31 października 2010 – cały rok hydrologiczny. Rejestracja pomiarów prowadzona była z częstotliwością co 2 minuty w przeciągu całego okresu badań (z wyłączeniem przerw z powodu awarii instalacji na skutek okresowych braków dopływu energii elektrycznej: 10.01.2010, 24.02.2010–01.03.2010, 07.03.2010–18.03.2010, 11.09.2010–22.09.2010 oraz na skutek awarii rejestratora wyników pomiarów stężenia CO<sub>2</sub>: 30.03.2010–13.05.2010). Wyniki były zapisywane z dokładnością trzech miejsc po przecinku. Ze względu na dużą ilość danych, zgeneralizowano je do średnich godzinnych i dobowych. Uśrednione wielkości wskaźników dobowych podano w tabeli poniżej (tab. 1).

**Tabela 1.** Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> w punktach pomiarowych (PP1–PP4) za okres od 1 listopada 2009 do 31 października 2010**Table 1.** Averaged results of measurements of CO<sub>2</sub> concentrations at the measuring points (PP1–PP4) for the period from 1 November 2009 to 31 October 2010

| Punkt pomiarowy klimatyczna pora roku | Liczba dni pomiarowych | Stężenie CO <sub>2</sub> w powietrzu glebowym [%] |              |               |              |          |
|---------------------------------------|------------------------|---|--------------|---------------|--------------|----------|
|                                       |                        | średnie   | wartość min. | wartość maks. | odch. stand. | wsp. zm. |
| p u n k t   p o m i a r o w y   P P 1 |                        |   |              |               |              |          |
| przedzime                             | 42                     | 1,150   | 0,513        | 1,264         | 0,156        | 0,14     |
| zima                                  | 77                     | 0,476   | 0,245        | 1,171         | 0,264        | 0,55     |
| przedwiośnie                          | 16                     | 0,206   | 0,000        | 0,272         | 0,081        | 0,39     |
| wiosna                                | 18                     | 0,750   | 0,656        | 0,863         | 0,073        | 0,10     |
| lato                                  | 92                     | 1,625   | 0,820        | 2,291         | 0,432        | 0,27     |
| jesień                                | 49                     | 1,779   | 1,283        | 2,123         | 0,238        | 0,13     |
| rok                                   | 294                    | 1,151   | 0,000        | 2,291         | 0,636        | 0,55     |
| p u n k t   p o m i a r o w y   P P 2 |                        |   |              |               |              |          |
| przedzime                             | 42                     | 0,380   | 0,123        | 0,881         | 0,181        | 0,48     |
| zima                                  | 77                     | 0,146   | 0,038        | 0,351         | 0,084        | 0,58     |
| przedwiośnie                          | 16                     | 0,130   | 0,000        | 0,261         | 0,058        | 0,45     |
| wiosna                                | 18                     | 0,473   | 0,275        | 0,671         | 0,131        | 0,28     |
| lato                                  | 92                     | 1,017   | 0,560        | 1,573         | 0,249        | 0,25     |
| jesień                                | 49                     | 0,377   | 0,094        | 0,870         | 0,164        | 0,44     |
| rok                                   | 294                    | 0,509   | 0,000        | 1,573         | 0,400        | 0,79     |
| p u n k t   p o m i a r o w y   P P 3 |                        |   |              |               |              |          |
| przedzime                             | 42                     | 0,982   | 0,642        | 1,311         | 0,171        | 0,17     |
| zima                                  | 77                     | 0,312   | 0,000        | 0,501         | 0,112        | 0,36     |
| przedwiośnie                          | 16                     | 0,317   | 0,000        | 0,486         | 0,145        | 0,46     |
| wiosna                                | 18                     | 1,178   | 0,297        | 1,530         | 0,295        | 0,25     |
| lato                                  | 92                     | 1,513   | 0,501        | 2,534         | 0,355        | 0,23     |
| jesień                                | 49                     | 1,485   | 0,826        | 2,463         | 0,470        | 0,32     |
| rok                                   | 294                    | 1,032   | 0,000        | 2,534         | 0,601        | 0,58     |
| p u n k t   p o m i a r o w y   P P 4 |                        |   |              |               |              |          |
| przedzime                             | 42                     | 0,939   | 0,028        | 1,167         | 0,207        | 0,22     |
| zima                                  | 77                     | 0,585   | 0,379        | 0,822         | 0,097        | 0,17     |
| przedwiośnie                          | 16                     | 0,429   | 0,040        | 0,649         | 0,178        | 0,42     |
| wiosna                                | 18                     | 0,940   | 0,535        | 1,258         | 0,244        | 0,26     |
| lato                                  | 92                     | 1,278   | 0,779        | 1,698         | 0,241        | 0,19     |
| jesień                                | 49                     | 1,298   | 0,853        | 1,844         | 0,253        | 0,19     |
| rok                                   | 294                    | 0,984   | 0,028        | 1,844         | 0,381        | 0,39     |

Stężenia chwilowe CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym na terenie górniczym PUS w Szczawnicy (uśredniane co 2 min.) wahały się w granicach od zera do blisko 2,6%. Taki przedział odnotowano w punkcie PP3, który charakteryzował się największymi zmianami stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym. W kolejnych punktach pomiarowych także występowały wahania stężenia CO<sub>2</sub>, lecz na mniejszą skalę: PP1 – 0,067–2,291%, PP2 – 0,038–1,573%, PP4 – 0,028–1,844%. W rocznym cyklu pomiarowym dla wszystkich punktów pomiarowych można zauważyć cykliczność wzrostu oraz spadku wartości stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym (Rys. 3). Począwszy od klimatycznego przedzimia obserwuje się spadek stężenia CO<sub>2</sub> poprzez zimę do przedwiośnia, kiedy występują najmniejsze stężenia tego gazu (maksymalnie w PP1 – nieco ponad 0,5%). Poczynając od wiosny stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym wzrasta aż do końca lata, kiedy osiąga maksymalne wielkości we wszystkich punktach pomiarowych (np. 15 lipca 2010: PP1 = 1,643%; PP2 = 1,134%; PP3 = 1,230%; PP4 = 1,466%) czyli średnio 1,370%. Stężenie pod koniec lata jest więc prawie trzykrotnie większe aniżeli w zimie. Następnie poprzez jesień i przedzimie do zimy stężenie znów opada, zmierzając do kolejnego minimum.



**Rys. 3.** Średnie stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w kolejnych porach roku (hydrologicznego) w każdym z punktów pomiarowych

**Fig. 3.** The average CO<sub>2</sub> concentration in the soil air by seasons of the hydrological year in each of the measuring points



Zaobserwowano cykliczność dobową spadku i wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w niektórych dniach i punktach pomiarowych. Jest to najlepiej widoczne latem i jesienią oraz w okresie przedzima. W porze zimowo-przedwiosennej wahania takie zanikają. Wyjątkiem jest punkt PP4, gdzie były zauważalne w całym cyklu rocznym (lecz z wyraźnym nasileniem latem i jesienią) [por. 14].

Punkt PP1 charakteryzuje się najmniejszymi wahaniami stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w skali dobowej. Jedynie w lecie, a zwłaszcza w drugiej jego połowie, w ciągu kilku dni odnotowano niewielkie dobowe wahania tego stężenia (np. 22 lipca 2010 r. największe stężenie CO<sub>2</sub> w tym punkcie wynosiło 1,751% około godziny 9:00 a najmniejsze 1,696% około godziny 14:00, a więc różnica 0,055%). W pozostałym czasie wahania te były mniej zauważalne. W punkcie PP2 całe przedwiośnie i wiosną stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym nie wykazywało wahań dobowych. W pozostałych porach roku wahania te były zauważalne, zwykle rano stężenie CO<sub>2</sub> było większe a po południu mniejsze (np. 22 lipca 2010 roku 1,383% około godziny 8:00 – 1,161% około godziny 18:00) jednak w drugiej połowie jesieni sytuacja była odmienna (np. 18 październik 2010 roku, najmniejsze 0,445% około godziny 23:00 – największe 0,486% około godziny 6:00). W punkcie PP3 wahań dobowych nie odnotowano podobnie jak w poprzednich punktach w okresie zimy i przedwiośnia a także wiosną. Wahania takie zaznaczają się dopiero latem a najbardziej jesienią (np. 11 październik 2010 roku, najmniejsze 1,187% około godziny 13:00 – 14:00, największe 1,313% o północy). Natomiast punkt PP4 w odróżnieniu od pozostałych charakteryzuje się największymi dobowymi wahaniami stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w ciągu całego roku. Wahania te dostrzegalne są o każdej porze roku i ciężko określić, w których porach dnia stężenie jest największe a w których najmniejsze (np. 15 lipiec 2010 r., najmniejsze 1,166% około godziny 6:00 i największe 1,839% około godziny 17:00 oraz 20 sierpnia 2010 r., najmniejsze 1,044% około godziny 14:00 i największe 1,365% około godziny 23:00).

## 6. Dyskusja

W omawianym okresie badawczym na stanowiskach pomiarowych w Szczawnicy odnotowano:

- sezonową zmienność stężenia CO<sub>2</sub> (w profilu całorocznym),
- nieregularną zmienność w okresach kilkudniowych, którą można powiązać z epizodami pogodowymi takimi jak deszcze, upały itp.,
- zmienność w cyklu dobowym (tylko na niektórych stanowiskach),
- nieliczne skokowe fluktuacje (zwykle spadki), spowodowane zapewne problemami w pracy rejestratora – niewytlumaczalne i traktowane jako pomiary odstające.

**Zmienność sezonowa** zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (płytkim powietrzu gruntowym) jest zjawiskiem zrozumiałym i naturalnym dla stref klimatu umiarkowanego. W "ciepłych" porach roku stężenia CO<sub>2</sub> są zdecydowanie wyższe aniżeli w chłodnych, nawet kilkakrotnie. Ta zmienność dotyczy organogenicznego CO<sub>2</sub> i jest szeroko opisywana w literaturze [5, 8]. W omawianym tu przypadku duże i szybkie spadki stężeń na wszystkich stanowiskach odnotowano w porze zimowej dopiero pod koniec grudnia, zaś wiosenny wzrost – w połowie maja. Opóźnienie reakcji było zapewne spowodowane tym, że ziemia nagrzewa się i stygnie powoli. Na głębokość zafiltrowania rzędu 0,8÷1,2 m p.p.t. mróz dociera tylko wyjątkowo (głębokość przemarzania w rejonie Szczawnicy wynosi ok. 1÷1,2 m p.p.t.). Jakiś wpływ na wyniki pomiarów może mieć także "bezwładność" układu pomiarowego (omówiona w dalszej części tekstu, poświęconej zmienności między poszczególnymi stanowiskami). Nie zauważono wzrostu stężenia dwutlenku węgla podczas mrozów i przy zalegającej pokrywie śniegowej (co mogłoby świadczyć o napływie endogenicznego CO<sub>2</sub>).

**Zmienność w okresach kilkudniowych** daje się zauważyć w porach cieplejszych, od późnej wiosny do przedzimia, najczęściej w powiązaniu z opadami. Typowa sekwencja to wzrost stężeń CO<sub>2</sub> następujący w kilka dni po opadzie [por. 14]. Jednak zdarzało się, że ten sam opad powodował wzrost zawartości CO<sub>2</sub> na jednym stanowisku, a na drugim – jego spadek. Mechanizm takich cykli wydaje się dość oczywisty, choć trudny do ujęcia w kategoriach ilościowych. Mikroorganizmy produkujące dwutlenek węgla dobrze rozwijają się tylko w pewnym określonym przedziale wilgotności i temperatury. Czynniki wspomagające osiągnięcie

tego optimum będą powodowały wzrost stężenia CO<sub>2</sub>, a wytrącające układ z optymalnego stanu – spadek. Przykładowo, deficyt wilgoci w gruncie może być podobnie niekorzystny dla organizmów żywych jak jej nadmiar.

**Zmienność dobową** występuje prawie wyłącznie w okresach "ciepłych", kiedy ziemia jest nagrzana (lato, jesień) i tylko na niektórych stanowiskach. Najwyraźniej można to było zaobserwować na stanowisku PP4, gdzie wahania dobowe, dość wyraźne, obejmowały cały sezon późnowiosenny i letni – od 21 maja do końca sierpnia 2010 r., a później jeszcze okres od 19 października do końca tego miesiąca. Względne dobowe wahania stężeń zawierały się wówczas w przedziale od kilku procent do ok. 15%. Na stanowisku PP2 zmienność dobową, mniej wyraźną, odnotowano w dniach 10÷24 lipca, a później dopiero w październiku. Na stanowisku PP3 wahania dobowe, stosunkowo nieznaczne, były zauważalne tylko jesienią, natomiast w przypadku stanowiska PP1 żadnych istotnych zmian w cyklu dobowym nie odnotowano. Występowanie zmian dobowych nie jest wyraźnie skorelowane z zarejestrowanymi wskaźnikami pogodowymi. Niepotwierdzoną, lecz przekonującą tezę może być powiązanie wahań stężeń CO<sub>2</sub> w cyklu dobowym z nasłonecznieniem. Co oczywiste, największe wahania powinny występować w dniach słonecznych, w miejscach niezacienionych (PP4). Taką lokalizację należałoby uznać za nieodpowiednią do monitorowania zmian endogenicznych stężeń CO<sub>2</sub>.

**Zmienność między poszczególnymi stanowiskami** przejawia się nie tyle w ogólnym przebiegu cyklu, co w dynamice krótkookresowych zmian stężeń CO<sub>2</sub>. Przykłady skrajne to stanowiska PP1 i PP4. W tym pierwszym przypadku reakcje na bodźce zewnętrzne są powolne, liczone raczej w tygodniach niż w dniach. Krótkoterminowa zmienność nie występuje. Świadczy to o słabej wymianie gazowej między komorą pomiarową a środowiskiem zewnętrznym. Stanowisko znajduje się w miejscu osłoniętym, w cieniu, co dodatkowo ogranicza bodźce zewnętrzne. Z kolei na stanowisku PP4 dynamika zmian stężeń CO<sub>2</sub> jest nieporównanie większa (co nie jest równoznaczne z występowaniem najwyższych stężeń), a przez znaczną część roku zauważalne są cykle dobowe. Stanowisko to jest położone w terenie otwartym, oddalonym od drzew, w miejscu eksponowanym na bezpośrednie promienie słońca. W stosunku do wyżej opisanych, stanowiska PP2 i PP3 wykazują cechy pośrednie.

Zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiaru stężeń CO<sub>2</sub> odznaczają się charakterystyczną "bezładnością" w czasie – sąsiadujące pomiary są zwykle do siebie podobne. Można to tłumaczyć tym, że w określonym przedziale czasu tylko część powietrza zamkniętego w kolumnie pomiarowej podlega wymianie z powietrzem gruntowym. Motoryka wymiany gazowej jest złożona. Obok dyfuzji obejmuje swoiste "przepompowywanie" powietrza na skutek przemian izochorycznych w odpowiedzi na zmiany termiki i ciśnienia atmosferycznego. Dużą rolę może odgrywać przepuszczalność gruntów wokół rury pomiarowej, a szczególnie wokół filtra, w tym szczeliny, kanały zwierząt itp. Nie można także wykluczyć, że jakaś część biogenicznego CO<sub>2</sub> jest generowana przez mikroorganizmy bytujące wewnątrz komory pomiarowej. Zjawiska te są trudne do ujęcia w kategoriach ilościowych.

Wyniki pomiarów obejmują sumaryczne stężenia dwutlenku węgla – organogenicznego, a być może także CO<sub>2</sub> wydostającego się z głębi ziemi. W przeciwieństwie do organogenicznego, ewentualny strumień endogenicznego dwutlenku węgla powinien być mało zróżnicowany w cyklu rocznym. Co prawda, w omawianym tu przypadku jakiś wpływ może mieć eksploatacja wód mineralnych, ale według posiadanej wiedzy w okresie badawczym nie było działań mogących zaburzyć funkcjonowanie ujęć. Akceptując powyższe założenia, wypada przyjąć, że udział endogenicznego CO<sub>2</sub> nie powinien odbiegać od najniższych odnotowanych wielkości (pomijając pomiary odstające).

W przypadku pomiarów prowadzonych w 2010 r. w Szczawnicy na stanowiskach PP1, PP2 i PP3 zostały odnotowane średniodobowe wielkości zerowe. Takie wielkości powinny być zasadniczo traktowane jako błędne, bo stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu atmosferycznym utrzymuje się na stałym poziomie ok. 0,03%, a w głębi ziemi raczej nie dochodzi do "konsumpcji" CO<sub>2</sub>. Na stanowisku PP4 najniższa pomierzona wielkość wynosiła 0,03%. Takie spadki stężeń CO<sub>2</sub> w okresie zimowym wskazują, że do wierzchniej warstwy gruntu na omawianym terenie nie dociera endogeniczny dwutlenek węgla związany z występowaniem szczaw, a jeżeli tak, to w śladowych ilościach (efekt <0,5% CO<sub>2</sub>).

## 7. Wnioski

Działalność aparatury do ciągłego pomiaru stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym dla celów monitoringu tego gazu została sprawdzona w cyklu całorocznym. Takie pomiary są stosunkowo tanie i łatwe do wykonania.

Dla stosowalności metody kluczowe znaczenie ma stworzenie wzorca uwzględniającego wpływ warunków położenia i zmienności pogodowej. Podstawą dla takiego wzorca powinny być klimatyczne pory roku. Pojedynczy cykl roczny jest niewystarczający do miarodajnego ustalenia wzorca tła stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym.

Z uwagi na naturalną sezonową zmienność stężenia CO<sub>2</sub> w gruncie, wynikającą z procesów życiowych, badania zmierzające do zidentyfikowania anomalii wynikających z nieszczelności kompleksu składowania muszą być prowadzone w sposób ciągły. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że wpływ krótkotrwałych zmian warunków pogodowych jest mało znaczący. Pomiary na stacji pomiarowej w Szczawnicy są nadal prowadzone i przewiduje się ich kontynuowanie w kolejnych latach.

## Literatura

1. **Benson S.M., Apps J., Hepple R., Lippmann M., Tsang C.F., Lewis C.:** *Health, Safety, and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues*. 6 International GHG Control Technology Kyoto, Japan, 1-4 October, Conference proceedings, 2002.
2. **Benson S.M., Hepple R., Apps J., Tsang C.F., Lippmann M.:** *Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geologic Formations*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51170, 2002.
3. **Benson S.M., Myer L.:** *Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide*. In: IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, Regina, Canada, 18-21 November 2002, ECN, 137–151 (2002).
4. **Ciężkowski W. (red.):** *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*. Poradnik Metodyczny, Wrocław. 2002.
5. **Dobrzański B., Zawadzki S. (red.):** *Gleboznawstwo*. Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa. 1995.

6. **Dzieniewicz M., Sechman H., Kotarba M.J., Korus A.:** *Surface geochemical surveying of methane and carbon dioxide in the selected areas of the Wałbrzych Coal District.* In: Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls. Ed. M. J. Kotarba. Society of Research on Environmental Changes GEOSFERA – SRECh "GEOSPHERE", Kraków, 95–106 (2002).
7. **Dzieniewicz M., Sechman H., Kotarba M. J., Korus A.:** *Periodical changes of methane and carbon dioxide contents in the near-surface zone along the selected four geological cross-sections of the Wałbrzych Coal District.* In: Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls. Ed. M. J. Kotarba. Society of Research on Environmental Changes GEOSFERA – SRECh "GEOSPHERE", Kraków, 107–135 (2002).
8. **Hashimoto S., Komatsu H.:** *Relationships between soil CO<sub>2</sub> concentration and CO<sub>2</sub> production, temperature, water content, and gas diffusivity: implications for field studies through sensitivity analyses.* J. For. Res., 11, 41–50 (2006).
9. **Kotarba M.J., Dzieniewicz M., Sechman H., Kominowski K., Gogolewska A., Grzybek J.:** *Mechanism of coalbed gas flux and prediction of gas hazards in the near-surface zone of the Wałbrzych coal sub-basin.* In: Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls. Ed. M. J. Kotarba. Society of Research on Environmental Changes GEOSFERA — SRECh "GEOSPHERE", Kraków, 189–212 (2002).
10. **Pearce J., Chadwick A., Bentham M., Holloway S., Kirby G.:** *Technology status review – Monitoring Technologies for the Geological Storage of CO<sub>2</sub>.* Report No. COAL. 2005.
11. **Strutt M.H., Beaubien S.E., Baubron J.C., Brach M., Cardellini C., Granieri R., Jones D.G., Lombardi S., Penner L., Quattrocchi F., Voltattorni N.:** *Soil Gas as a Monitoring Tool of Deep Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Preliminary Results from the Encana. EOR Project in Weyburn, Saskatchewan (Canada).* In: Greenhouse Gas Control Technologies, Volume L., Ed. J. Gale, Y. Kaya. Oxford: Elsevier Science Limited, 391–396 (2002).
12. **Tarkowski R.:** *Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>.* Studia, Rozprawy i Monografie nr 132, Kraków. 2005.
13. **Tarkowski R., Królik W., Uliasz-Misiak B., Wdowin M.:** *CO<sub>2</sub> contents in soil air for needs of carbon dioxide storage monitoring.* Slovak Geological Magazine, 15–18 (2008).

14. **Tarkowski R., Luboń K., Wdowin M.:** *Aparatura oraz wstępne wyniki pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym dla potrzeb monitoringu wycieków.* Przegląd Górniczy 2, 50–59 (2012).
15. **Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., Szarawska E.:** *Monitoring podziemnego składowania CO<sub>2</sub>.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi 21 (2), 35–48 (2005).
16. **Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., Wdowin M., Batkiewicz K.:** *Badania stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym w rejonie Tarnowa pod kątem monitoringu składowania dwutlenku węgla.* Rocznik Ochrona Środowiska, Tom 12, 847–860 (2010).
17. **Żak S., Przylibski T.A., Ciężkowski W.:** *Określenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w Sudetach w rejonach występowania szczaw.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław. 2008.

## **Results of Preliminary Test of Equipment for Continuous Measurement of CO<sub>2</sub> Concentration in Soil Air in Szczawnica Area, Poland**

### **Abstract**

This paper presents the results of CO<sub>2</sub> concentration in the soil air in attempt to determine the influence of exogenous and endogenous factors on the recorded measurement. The tests were conducted in the area of Szczawnica Spa (S Poland) using an equipment for continuous CO<sub>2</sub> measurement, constructed at the Mineral and Energy Economy Research Institute Polish Academy of Science. The device measured and logged the results from 4 points for a 12-month period. The measurements were aimed to answer the following questions: what factors and to what extent determine the spatial and temporal (short- and long-term) variability in the concentration of carbon dioxide in the soil air, and whether the individual measuring points of the Szczawnica measuring station registered any signs of carbon dioxide of endogenous origin. The obtained results allowed the interpretation of seasonal variability of CO<sub>2</sub> (in a year-round profile), irregular variations in periods lasting several days, diurnal cycle variability, and others. The results clearly show the dependence of CO<sub>2</sub> concentration on both the season and the weather conditions (especially temperature and precipitation).