



Radosław TARKOWSKI*, Wiesław SROCZYŃSKI**

Doskonalenie metodyki badawczej pomiarów stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym

Streszczenie: Podsumowano dotychczasowe, blisko dziesięcioletnie, doświadczenia zespołu Pracowni Geotechnologii IGSMiE PAN w zakresie pomiarów *in situ* stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym. W kolejnych latach badania realizowane były różnymi metodami i przy wykorzystaniu aparatury o rosnącym stopniu złożoności. W latach 2005–2008 wykonano pilotażowe badania koncentracji CO₂ na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara k. Tarnowa, przy wykorzystaniu płytkich tymczasowych odwiertów. W 2009 r. w tej samej okolicy zainstalowano i przetestowano aparaturę do ciągłego pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym, skonstruowaną w Instytucie. W kolejnych latach – od listopada 2009 r. do listopada 2014 r., prowadzono ciągle pomiary na obszarze występowania wód mineralnych typu szczaw w Szczawnicy-Zdroju. Miały one na celu: przetestowanie jej działania, określenie tła stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym na badanym obszarze, stwierdzenie ewentualnych wycieków endogenicznego CO₂, a także określenie istotnych czynników wpływających na stężenie tego gazu w powietrzu podglebowym w zmiennym przedziale czasowym.

Uzyskane doświadczenia pozwoliły na udoskonalenie metodyki wykonywania pomiarów stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym. Mogą być pomocne przy tworzeniu efektywnych systemów monitoringu na obszarach planowanych składowisk dwutlenku węgla w strukturach geologicznych.

Słowa kluczowe: pomiary stężenia CO₂, powietrze podglebowe, monitoring wycieków CO₂, naturalne wycieki CO₂

Adjustment of research methodology of CO₂ in concentration measurement in soil air

Abstract: The present paper summarizes the nearly 10-year-long experiments conducted up to the present date by the Geotechnology Section of MEERI PAS on in situ measurements of CO₂ concentration in soil air. Over the consecutive years, the studies were carried out using different methods and successively sophisticated instruments. In the years 2006–2008, a pilot study of CO₂ concentration was performed on a hydrocarbon deposit of Jastrząbka Stara near Tarnów (Podkarpackie Province) using shallow boreholes. In 2009, the instruments for the continuous measurement of CO₂ concentration in soil air were tested. The instruments were constructed

* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, ** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: tarkowski@min-pan.krakow.pl, wues@min-pan.krakow.pl

at the Geotechnology Section. During the next years – from November 2009 to November 2014, continuous measurements were made in the area of carbonated mineral water occurrence in Szczawnica-Zdrój. The aim of the measurements was to test the instruments, to determine the background concentration of CO₂ in soil air in the study area, to find possible leaks of endogenous CO₂, as well as to identify important factors affecting the concentration of this gas in soil air in a varying time interval.

The gained experience made it possible to improve the methods of measuring the concentration of carbon dioxide in soil air. They can be helpful in creating effective monitoring systems in areas of planned carbon dioxide storage in geological formations

Keywords: CO₂ concentration measurements, soil air, CO₂ leak monitoring, CO₂ natural leaks

Wprowadzenie

W prezentowanym artykule podsumowano dotychczasowe, blisko dziesięcioletnie, doświadczenia zespołu Pracowni Geotechnologii IGSMiE PAN w zakresie pomiarów *in situ* stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym. W kolejnych latach badania realizowane były różnymi metodami i przy wykorzystaniu aparatury o rosnącym stopniu złożoności. W latach 2005–2008 wykonano pilotażowe badania stężenia CO₂ na złożu węglowodorów Jastrząbka Stara (województwo podkarpackie), przy wykorzystaniu płytkich tymczasowych odwiertów. W 2009 r. w tej samej okolicy zainstalowano i przetestowano aparaturę do ciągłego pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym, skonstruowaną w pracowni. W kolejnych latach – od listopada 2009 r. do końca października 2014 r. prowadzono ciągle pomiary na obszarze występowania wód mineralnych typu szczaw uzdrowiska Szczawnica-Zdrój.

Badania stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym służą różnym celom. Pomiary wykonywane są w rejonach występowania i eksploatacji szczaw oraz wycieków endogenicznego dwutlenku węgla w celu prowadzenia racjonalnej gospodarki wodami oraz oceny zagrożenia, jakie ten gaz może stanowić dla ludzi. Zostały także wykonane dla obszarów likwidowanych kopalń węgla kamiennego w rejonie wałbrzyskim. Prowadzone w wodzie lub powietrzu podglebowym stanowią integralną część monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla, co pozwala na obserwacje potencjalnych wycieków tego gazu z podziemnego składowiska. Monitorowanie stężenia CO₂ pozostaje również w polu zainteresowań firm naftowych.

1. Przegląd dotychczasowych wyników badań

Gleba jest największym lądowym źródłem emisji CO₂ do atmosfery oraz kluczowym komponentem w globalnym bilansie węgla. Jest miejscem nieustannego wiązania tlenu i tworzenia dwutlenku węgla (poprzez respirację korzeni roślinnych i drobnoustrojów oraz rozkład materii organicznej przez mikroorganizmy). Jest nie tylko istotnym źródłem emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych, lecz przyczynia się również do wiązania tego gazu i łagodzenia efektu cieplarnianego.

Dwutlenek węgla występujący w powietrzu podglebowym może być pochodzenia biologicznego, atmosferycznego, antropogenicznego, niekiedy magmatycznego czy też metamorficznego. Stężenie tego gazu jest uwarunkowane różnymi czynnikami egzo- i endogenicznymi (wilgotność, temperatura, wiatr, nawożenie organiczne i mineralne, gęstość i typ

roślinności, dopływ endogenicznego gazu oraz inne). Osiąga wartość dziesiątych części (w powietrzu atmosferycznym ok. 0,03% CO₂), a niekiedy nawet kilkanaście procent. Istotna jest tu aktywność respiracyjna gleb, na co mają wpływ zarówno rodzaj gleby, jak i jej skład mineralny oraz struktura. Wpływ naturalnego, endogenicznego CO₂ z wnętrza ziemi na powietrze podglebowe jest niewielki poza obszarami naturalnych wycieków tego gazu (Barron-Gafford i in. 2011; Ciężkowski red. 2002; Maier i in. 2010; Nickerson i Risk 2007; Yonemura i in. 2013).

Istnieje obszerna literatura dotycząca metodyki badań stężenia/strumienia oraz przemieszczania się CO₂ w glebie. W monograficznym opracowaniu Klusman (1993) omówił m.in. metodykę pomiarów oraz zmiany stężenia tego gazu w glebie w zależności od głębokości pomiarów, ciśnienia parcjalego CO₂ w powietrzu glebowym oraz pory roku. Nickerson i Risk (2007) pokazali, jak parametry fizyczne gleby, takie jak jej wilgotność i struktura oraz długotrwałe działanie wiatru na powierzchnię ziemi wywierają wpływ na stężenie CO₂ w glebie. Yasuda i in. (2008) wykorzystując analizator do pomiaru stężenia CO₂ w glebie stwierdzili, że podczas gdy stężenie CO₂ zasadniczo wzrasta z głębokością, amplituda zmian stężenia CO₂ wraz z głębokością maleje. Eksperymentalne badania zatłaczania CO₂ przedstawione przez Lewicki i in. (2010) pokazały korelację zawartości CO₂ w glebie w zależności od temperatury (dodatnia) oraz właściwości gleby. Zauważono, że wzrost jej wilgotności wskutek opadów może prowadzić do zwiększenia stężenia CO₂, co interpretowane jest intensyfikacją oddychania i/lub spadkiem porowatości i przepuszczalności gleby wypełnionej wodą. Barron-Gafford i in. (2011) przedstawili wpływ temperatury, wilgotności gleby i typów roślin na stężenie CO₂ w glebie w różnych porach roku. Podkreślili rolę roślinności w regulacji oddychania gleby i jej wpływ na przepływ CO₂ w ekosystemie. Yonemura i in. (2013) badając pionową dynamikę zmian CO₂ w powietrzu podglebowym, pokazali sinusoidalne wahania zawartości CO₂ z maksimum w miesiącach letnich i minimum w zimowych. Wyniki badań Schloemer i in. (2014) wykazały istotne oraz charakterystyczne dla konkretnego miejsca różnice stężenia CO₂ na niewielkich głębokościach. Wykazały, że stężenie CO₂ jest stabilne w długim okresie czasu (więcej niż jeden rok), kiedy mierzone jest poniżej aktywnej biologicznie strefy gleby i powyżej zwierciadła wody, gdzie w niewielkim stopniu zależne jest od czynników atmosferycznych. Badania pokazały również, że tło zawartości gazu w glebie powinno się określać za pomocą długoterminowego ciągłego monitorowania, z rejestracją wyników w krótkich odstępach czasu. Istotne jest przy tym prawidłowe dobranie miejsca i głębokości pomiarów. Badania stężenia i przepływu gazów w glebie Gal i in. (2014) potwierdziły, że przepływ i stężenie CO₂ w glebie zmienia się w cyklu rocznym, ze zwiększoną emisją CO₂ odpowiadającą rocznemu cyklowi aktywności biologicznej gleby. Schloemer i in. (2013) wykazali, że zmienność stężenia CO₂ dla różnych rodzajów gleb jest bardzo duża, a wiarygodne określenie rzeczywistych emisji CO₂ powinno być prowadzone za pomocą ciągłych i długoterminowych pomiarów stężenia tego gazu, w obszarze szczegółowo rozpoznany w odniesieniu do głębokości strefy aktywnej biologicznie i poziomu zwierciadła wody, przy uwzględnieniu standardowych parametrów gleby i warunków pogodowych. Eksperymentalne badania Brydie i in. (2013) w kolumnach gleby poddanych zmiennym zakresom temperatury i wilgotności wskazały na silną korelację temperatury i stężenia CO₂ oraz jego dobową zmienność. Pokazały, że pełny zakres zmian stężenia tego gazu może nie zostać uchwycony w ciągu jednego/kilku sezonów pomiarowych z powodów zależności od środowiska.

Literatura dotycząca monitoringu wycieków (antropogenicznego i naturalnego) CO₂, związana ostatnio z rozwojem CCS, podaje różne sposoby śledzenia tego gazu. Dla przykładu Romanak i in. (2012) dla szybkiego odróżnienia wycieku od naturalnie występującego CO₂ w strefie aeracji zaproponowali badania relacji chemicznych pomiędzy N₂, O₂, CO₂ i CH₄ bez konieczności pomiarów tła. Ortega i in. (2014) na przykładzie badań naturalnego analogu Campo de Calatrava (Hiszpania) wskazali, że dla właściwej interpretacji i ilościowej oceny wycieku CO₂ niezbędne jest ustalenie charakterystyki tła na obszarze objętym składowaniem, na różnych głębokościach, poprzez pomiary gazów glebowych oraz innych gazów znacznikowych. Schacht i Jenkins (2014) wykorzystując wieloletnie obserwacje gazów w glebie (dwutlenek węgla, metan, tlen i azot) dla celów monitoringu CCS w miejscu demonstracyjnego projektu CO2CRC Otway stwierdzili, że większość emisji CO₂ w glebie była pochodzenia biogenicznego. Sauer i in. (2014) pokazali, że kombinacja metod geofizycznych w połączeniu z analizą powietrza glebowego w miejscach geologicznego składowania CO₂ może być użytecznym narzędziem do kartowania i monitorowania potencjalnego rozprzestrzeniania się CO₂ w górotworze. Wykazali również, że specyfika miejsca, budowa geologiczna oraz uwarunkowania meteorologiczne wydają się mieć istotny wpływ na przepływ i stężenie CO₂.

W Polsce badania stężenia i przepływu CO₂ w powietrzu glebowym były prowadzone m.in. na obszarach naturalnych wycieków CO₂ w obszarach występowania szczaw i wód kwasowęglowych (Sudety – rejon Kotliny Kłodzkiej, Karpaty – rejon Krynicy) (Ciężkowski red. 2002; Żak, i in. 2008). Wyniki badań dla obszaru likwidowanych kopalń węgla kamiennego w Wałbrzyskim Zagłębiu Węglowym przedstawili Dzieńiewicz i in. (2002a, b), Kotarba i in. (2002). W latach 2006–2008 w Kaniowie na Górnym Śląsku, przy użyciu sensorów na podczerwień, prowadzono powierzchniowe, ciągle pomiary stężenia tego gazu w ramach projektu RECOPOL (i jego kontynuacji MOVECBM). Związane one były z monitoringiem oraz weryfikacją składowania CO₂ w pokładach węgla (Vandeweyer i in. 2009).

Od 2005 roku, w Pracowni Geotechnologii IGSMiE PAN prowadzone są badania dotyczące monitoringu składowania dwutlenku węgla oraz wycieków endogenicznego dwutlenku węgla, z wykorzystaniem pomiarów stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym. We wszystkich przypadkach istotnym zagadnieniem jest wypracowanie i dostosowanie metodyki badawczej do badań stężenia CO₂ na konkretnym obszarze. Początkowo były prowadzone na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara k. Tarnowa, od jesieni 2009 do końca października 2014 na terenie zakładu górniczego Przedsiębiorstwo Uzdrawisko Szczawnica (Tarkowski i in. 2008; Tarkowski i in. 2010; Tarkowski i in. 2012a; Tarkowski i in. 2012b).

2. Badania pilotażowe stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym na obszarze złoża węglowodorów Jastrząbka Stara

W ramach prac statutowych w latach 2005–2009, za zgodą PGNiG Oddział w Sanoku, zespół z IGSMiE PAN prowadził badania stężenia dwutlenku węgla na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara (na NE od Tarnowa). Ich celem było wypracowanie metodyki badań oraz ustalenie tła stężenia tego gazu w powietrzu podglebowym. Jest to potencjalne miejsce na poligon doświadczalny do przetestowania wpływu zatłaczania CO₂ na wzrost wydobywania ropy naftowej (CO₂-EOR), ze złoża będącego w końcowym stadium eksplo-

atacji. Wyniki badań stężenia tego gazu mogą stanowić punkt odniesienia (tło, monitoring zerowy) dla stwierdzenia ewentualnych wycieków, w trakcie i po zatłoczeniu do złoża dwutlenku węgla.

Złoże ropy naftowej Jastrząbka Stara znajduje się na terenie województwa podkarpackiego, w gminie Czarna. Obszar ten jest słabo urozmaicony morfologicznie, a wysokości bezwzględne terenu wahają się od 210 do 255 m n.p.m. Są to przeważnie pola uprawne, łąki, a teren charakteryzuje się wiejską zabudową. Pod względem geologicznym złożo znajduje się na terenie zapadliska przedkarpackiego wypełnionego utworami miocenu autochtonicznego. W podłożu występują osady jury górnej (kimerydu) oraz utwory kredy górnej, reprezentowane przez piaskowce cenomanu (skała zbiornikowa ropy naftowej) oraz serię węglanową turonu i senonu. Uszczelnieniem dla akumulacji węglowodorów są młodsze ogniwa kredy, zaś w strefach peryferyjnych kompleks mioceniński. Niewielkie złożo ropy naftowej zostało rozpoznane kilkunastoma otworami, z których część stanowią do dzisiaj otwory eksploatacyjne (rys. 1).

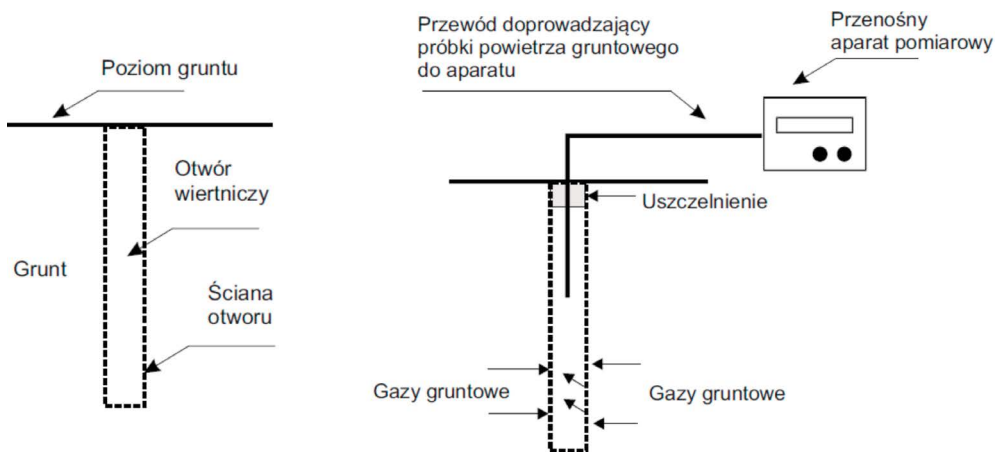


Rys. 1. Obszar pilotażowych badań stężenia CO₂ w powietrzu gruntowym na złożu ropy naftowej w Starej Jastrzębce
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN 2009

Fig. 1. Area of pilotage study for CO₂ concentration measurement in soil air of the Stara Jastrząbka oil deposit

Badania stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym prowadzono w specjalnie odwierconych płytkich otworach z wykorzystaniem detektora wielogazowego MultiRaePlus IR (rys. 2). W urządzeniu czujnik CO₂ jest niedyspersyjnym czujnikiem na podczerwień (NDIR – *Non-Dispersive Infrared*). Stężenia mierzone przez sensory to odpowiednio 0–5% dla CO₂ i 0–100% dla metanu (pomiar tego gazu nie był przedmiotem badań).

Aby wypracować metodykę przeprowadzono próbne pomiary. Miały one na celu określenie czasu od wykonania otworu do pomiaru miernikiem oraz sposobu przygotowania otworu. Uzyskanie powtarzalności wyników miało świadczyć o poprawnie dobranej metodyce i wiarygodności wyników. Na terenie o jednolitym podłożu odwiercono cztery otwory



Rys. 2. Pobór prób powietrza gruntowego i pomiar stężenia CO₂ przenośnym aparatem pomiarowym
 Źródło: Tarkowski i zespół 2004–2008

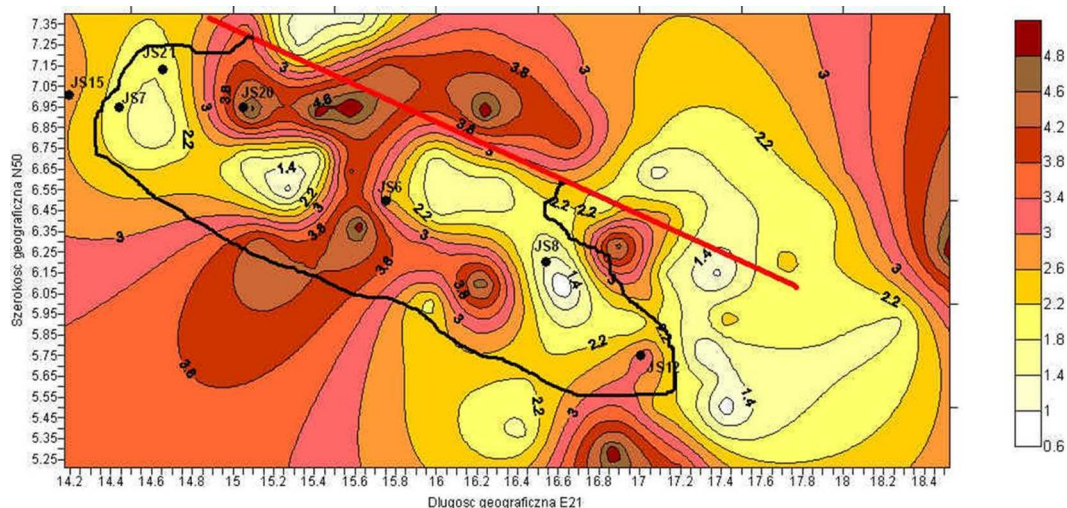
Fig. 2. Soil air collecting and CO₂ concentration measuring using a mobile measuring device

o głębokości 80 cm i średnicy 4 cm. Trzy z nich przykryto korkiem, jeden pozostawiono odkryty. W otworach wykonano pomiary w różnych interwałach czasowych od odwiercenia otworu. Stwierdzono, że minimalny czas potrzebny na uzyskanie równowagi stężenia CO₂ w otworze wynosi około 60 minut, a otwór po odwierceniu należy uszczelnić od góry, co zabezpiecza mieszanie się powietrza glebowego z powietrzem atmosferycznym.

Poprawność przyjętej metodyki została potwierdzona kolejnymi badaniami. W pobliżu otworu JSt-12 odwiercono 16 otworów: otwory nieorurowane, otwory z rurą nieperforowaną PCV, otwory z rurą perforowaną PCV (perforacja rury na długości 20 cm od dna otworu), otwory nieorurowane zasypane piaskiem (po 4 każdego typu). W każdym z nich wykonano pomiary stężenia CO₂ w różnych interwałach czasowych. Ze względu na to, że wyniki uzyskane w nieorurowanym otworze są najbardziej stabilne przyjęto, że pomiary koncentracji najlepiej jest wykonywać w otworach tego typu. Przeprowadzone badania pokazały, że stężenie dwutlenku węgla stabilizuje się po upływie około 2 godzin. Uwzględniając wyniki badań metodycznych przyjęto następujący schemat postępowania przy badaniach stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym:

- zlokalizowanie punktów pomiarowych przy pomocy GPS-u i ich oznaczenie w terenie,
- odwiercenie otworów o głębokości 80 cm i średnicy 4 cm, przy użyciu wiertnicy ręcznej,
- odizolowanie otworów od kontaktu z powietrzem atmosferycznym poprzez zatkanie otworu korkiem,
- pomiar stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym na dnie otworu po upływie około 2 godzin.

Przy wykorzystaniu wypracowanej metodyki badawczej, w 2005 roku wykonano punktowe pomiary stężenia CO₂ na obszarze całego złoża. Stwierdzono duże zróżnicowanie wyników, od 0,6 do ponad 5% (maksymalne mierzone przez urządzenie stężenie). Mapa z izoliniami co 0,4 % (rys. 3) przedstawia rozkład stężeń CO₂ w powietrzu podglebowym. Oprócz otworów wydobywczych zaznaczono na niej również przybliżony przebieg uskoku



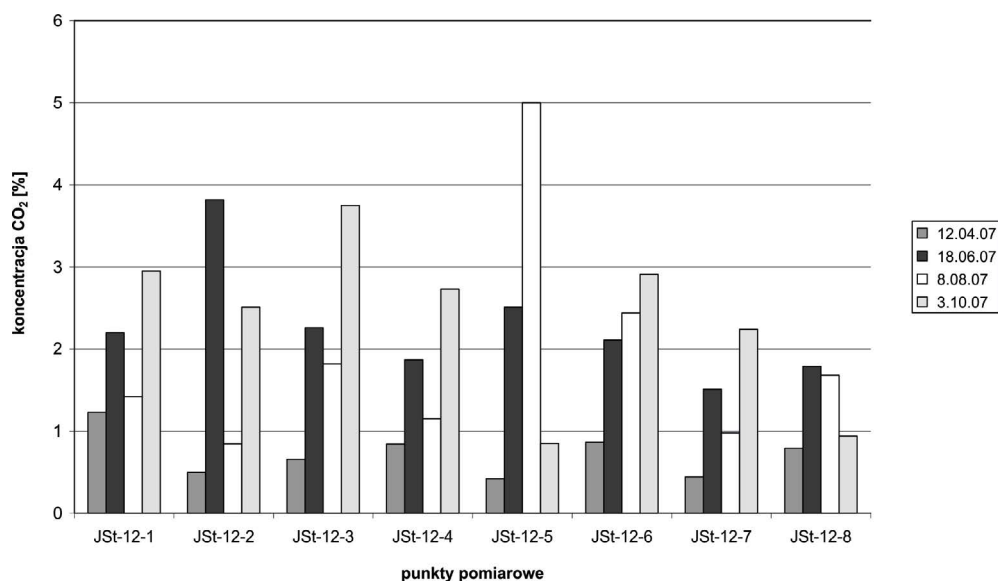
Rys. 3. Rozkład stężeń CO₂ w gruncie na obszarze złoża Jastrząbka Stara oraz otwory wydobywcze (izolinie co 0,4%, Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN 2005)
Źródło: Tarkowski i zespół 2004–2008

Fig. 3. CO₂ concentration distribution in soil air of the Jastrząbka Stara deposit, and production wells

(linia czerwona) oraz zasięg złoża ropy naftowej (linia czarna). Izolinie w północno-zachodniej części mapy mają przebieg równoleżnikowy, zaś w pozostałych częściach tworzą układy koncentryczne. Przebieg izoliny nie ma związku z otworami wydobywczymi ani z obecnością uskoku i jest trudny do jednoznacznej interpretacji. Stwierdzono, że występowanie tak dużych różnic stężeń CO₂ w powietrzu podglebowym wymaga dalszych i dokładniejszych badań. W podsumowaniu prac zaproponowano punktowe zagęszczenie siatki pomiarowej w celu dokładnego zidentyfikowania miejsc pojawienia się wyższego stężenia, zwrócenie uwagi na rodzaj podłoża oraz wykonywanie pomiarów w różnych porach roku.

W latach 2006–2008 pomiary stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym były prowadzone w SE części złoża Jastrząbka Stara, na obszarze wokół i pomiędzy otworami JSt-12 i JSt-8, oddległymi od siebie o około 1100 metrów. Na tym obszarze zlokalizowano 25 punktów pomiarowych, w 12 seriach pomiarowych (łącznie 300 pomiarów). Punkty pomiarowe zostały rozlokowane w sąsiedztwie wspomnianych otworów produkcyjnych oraz na polach uprawnych i łąkach przy drodze pomiędzy nimi. Dziewięć z nich zlokalizowano wokół otworu JSt-8, kolejnych 8 wokół otworu JSt-12 i 8 na drodze łączącej obydwie otwory. Pomiary stężenia CO₂ prowadzone były również w punktach zastabilizowanych przy otworach produkcyjnych JSt-12 i JSt-8. Przeprowadzono je z wykorzystaniem wcześniejszych doświadczeń, przy pomocy sondy pomiarowej połączonej z detektorem MultiRaePlus IR.

Wyniki pokazały, że wielkości stężenia dwutlenku węgla zmieniają się w bardzo szerokim zakresie od około 0,15% dochodząc do 5% (rys. 4). Obserwowane wartości CO₂ w gruncie są znacznie wyższe od tych stwierdzonych i cytowanych z innych obszarów. Zaobserwowano zmienność w zależności od pory roku oraz lokalizacji punktu pomiarowego. Najwyższe pomierzone stężenia CO₂ stwierdzono w miesiącach letnich na obszarze pól uprawnych przy drodze pomiędzy otworami produkcyjnymi oraz w ich bezpośrednim



Rys. 4. Pomiary stężenia CO₂ w powietrzu glebowym wokół otworu JSt-12 na złożu Jastrząbka Stara (Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN 2007)
Źródło: Tarkowski i zespół 2004–2008

Fig. 4. CO₂ concentration measurements in soil air around the JSt-12 well in the Jastrząbka Stara deposit

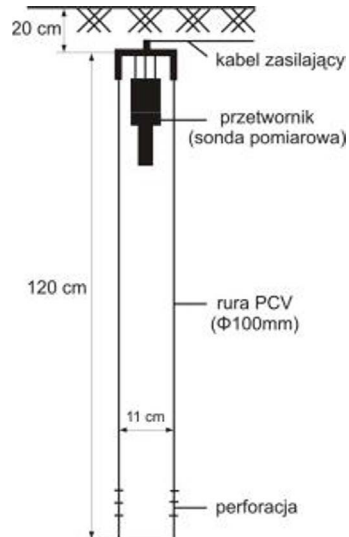
śledztwie. Porównując wyniki otrzymane w poszczególnych sezonach zauważono ich powtarzalność. Uzyskane rezultaty dały wstępny obraz stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym. Wyniki pomiarów wskazały na celowość prowadzenia dalszych pomiarów, również w okresie zimowym (co ze względu na konieczność ręcznego odwiercania otworów było utrudnione lub wręcz niemożliwe), prowadzenia ciągłego pomiaru w kilku punktach, przy jednoczesnej rejestracji różnych parametrów mogących mieć wpływ na wynik pomiarów, urządzeniem o zakresie pomiarów do 20%.

3. Badania na obszarze złoża węglowodorów Jastrząbka Stara, z wykorzystaniem aparatury do ciągłego pomiaru stężenia CO₂

Kontynuując badania stężenia CO₂, w 2009 r. w IGSMiE PAN zaprojektowano i wykonano aparaturę do ciągłego pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym. Została ona zainstalowana na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara we wsi Róża. W pierwszych trzech miesiącach była testowana w celu kontroli sprawności działania oraz ewentualnego jej usprawnienia czy udoskonalenia, po czym została przeniesiona na teren Uzdrowiska Szczawnica-Zdrój.

Zbudowana w Pracowni Geotechnologii aparatura badawcza składa się z dwóch podstawowych elementów – układu pomiarowego umieszczonego płytko pod powierzchnią ziemi oraz oprogramowania komputerowego mieszczącego się w centrum pomiarowym w IGSMiE PAN w Krakowie. Układ pomiarowy zbudowany jest z czterech przetworników

(sond pomiarowych), umożliwiających pomiar stężenia CO₂ w zakresie 0–20%, rejestratora wyników oraz modułu zasilającego, zamontowanych w hermetycznej obudowie. Każdy z przetworników umieszczono w jednym z czterech odwiertów – punktach pomiarowych, na głębokości około 1,4 m, zabezpieczonych rurami PCV perforowanymi od dołu na odcinku 30 cm (rys. 5, rys. 6). Część górna otworu została uszczelniona i przysypana 20-centy-



Rys. 5. Schemat sondy pomiarowej i zabudowy sondy
Źródło: Tarkowski i zespół 2009–2015

Fig. 5. Schematic diagram of a measuring probe and its casing



Rys. 6. Fotografia sondy pomiarowej i zabudowy sondy
Źródło: Tarkowski i zespół 2009–2015

Fig. 6. Photograph of a measuring probe and its casing

metrową warstwą gleby w celu odizolowania otworu od kontaktu z powietrzem atmosferycznym oraz ochrony przed zniszczeniem. Cztery zestawy (sondy) pomiarowe mierzące stężenie CO₂ zostały rozmieszczone na rogach obszaru o zarysie prostokąta, o wymiarach 35 × 18 metrów. Połączono je kablami sygnałowymi ze skanerem pomiarowym (rejestratorem wyników), zabudowanym w oddzielnej skrzynce pomiarowej wolnostojącej, posadowionej w bezpośredniej bliskości źródła zasilania. Pomiar stężenia CO₂ dokonywany był w sposób ciągły, natomiast rejestracja odbywała się z częstotliwością zaprogramowaną co 2 minuty.

Rejestrator wyników wyświetla bieżące wyniki pomiarów stężenia CO₂ oraz archiwizuje dane na karcie pamięci umieszczonej w mechanizmie rejestratora. Posiada łącze telemetryczne w postaci pary modemów GPRS, umożliwiając bezpośrednią transmisję danych z rejestratora umieszczonego w szafce w miejscu dokonywania pomiarów do komputera znajdującego się w odległym centrum pomiarowym (IGSMiE PAN w Krakowie). Dane są zdalnie i na bieżąco przekazywane do IGSMiE PAN, gdzie również są zapisywane w pamięci komputera.

Działanie zaprojektowanej i zbudowanej w IGSMiE PAN aparatury do ciągłego pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym zostało pozytywnie sprawdzone w okresie pierwszych trzech miesięcy jej działania. Ograniczony jeszcze zestaw wyników pomiarów stężenia CO₂ pozwolił na dokonanie wstępnej analizy działania aparatury. Stwierdzono, że urządzenie do ciągłego pomiaru CO₂ wymaga okresu około dwóch tygodni stabilizacji w celu unormowania się pomiaru (po zainstalowaniu jej w miejscu pomiarowym). Wyniki pomiarów pokazały, że wielkość pomierzonego stężenia CO₂ jest zróżnicowana w zależności od okresu dokonania pomiarów oraz od punktu pomiarowego, temperatury oraz opadów, a pomierzone wartości wahały się od około 1% w punkcie do powyżej 13%. Wyniki potwierdziły celowość monitoringu CO₂ prowadzoną w kilku punktach pomiarowych oraz ciągłego pomiaru stężenia tego gazu. Umieszczenie dodatkowych czujników (np. dla pomiaru ciśnienia i wilgotności powietrza) mogłoby rozszerzyć możliwości interpretacji o zmiany ciśnienia atmosferycznego czy wilgotności powietrza.

4. Badania stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym na obszarze złoża wód mineralnych typu szczaw w Szczawnicy-Zdrój

Aparatura do pomiarów stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym zlokalizowana pierwotnie na terenie złoża Jastrząbka Stara została przeniesiona w 2009 r. w nowe miejsce, na teren uzdrowiska górskiego Szczawnica-Zdrój. Obszar ten położony jest w strefie kontaktu polskich Karpat zewnętrznych (fliszowych) oraz Pienin, na wysokości 440–520 m n.p.m. Pod względem geologicznym znajduje się na pograniczu zewnętrznych Karpat fliszowych i Karpat wewnętrznych, oddzielonych pienińskim pasem skałkowym. Na północ od granicy z Pienińskim Pasem Skałkowym (PPS), na bezpośrednim obszarze badań, występują osady fliszu karpackiego wieku paleocen-eocen na których zalegają utwory czwartorzędowe. Tektonika tego obszaru jest skomplikowana, szczególnie przy granicy z PPS (Birkenmajer 1986, 1996; Kulka i in. 1991).

Na omawianym obszarze występują wody mineralne zawierające dwutlenek węgla (szczawy i wody kwasowęglowe). Chemizm wód jest kształtowany przez charakter litologiczny skał, głównie obecność intruzji andezytowych (sille i dajki wieku neogeńskiego)

(Birkenmajer 1986, 1996; Birkenmajer in. 1979; Rajchel 2012). Składnikiem swoistym wszystkich występujących tutaj wód jest CO_2 – 550–2259 mg/dm^3 (Rajchel 2012).

Dzięki uprzejmości Zarządu Uzdrowiska Szczawnica SA była możliwość przeprowadzenia badań na terenie uzdrowskiego ujęcia wody Zdrój Jan (rys. 7), jak również wykorzystania danych pogodowych. Stacja pomiarowa zlokalizowana została na wysokości około 514 m n.p.t., w dnie lokalnej dolinki o południowej ekspozycji. W płytkim podłożu – do około 1–2 m p.p.t. zalegają grunty nasypowe, przemieszczone, pochodzenia miejscowego oraz aluwia, a głębiej utwory fliszu karpackiego. Zdrój Jan odkryty w 1869 r. (506,22 n.p.m., głębokość ujęcia 32,78 m) ma wodę typu szczawa wodorowęglanowo-sodowo-chlorkowa, ze znaczną ilością żelaza. W latach siedemdziesiątych XX w., w ramach renowacji ujęcia, wykonano tutaj sztolnię (z murowaną obudową) o długości około 200 m, w celu ujęcia wody mineralnej; przy jej końcu znajduje się studnia wentylacyjna.



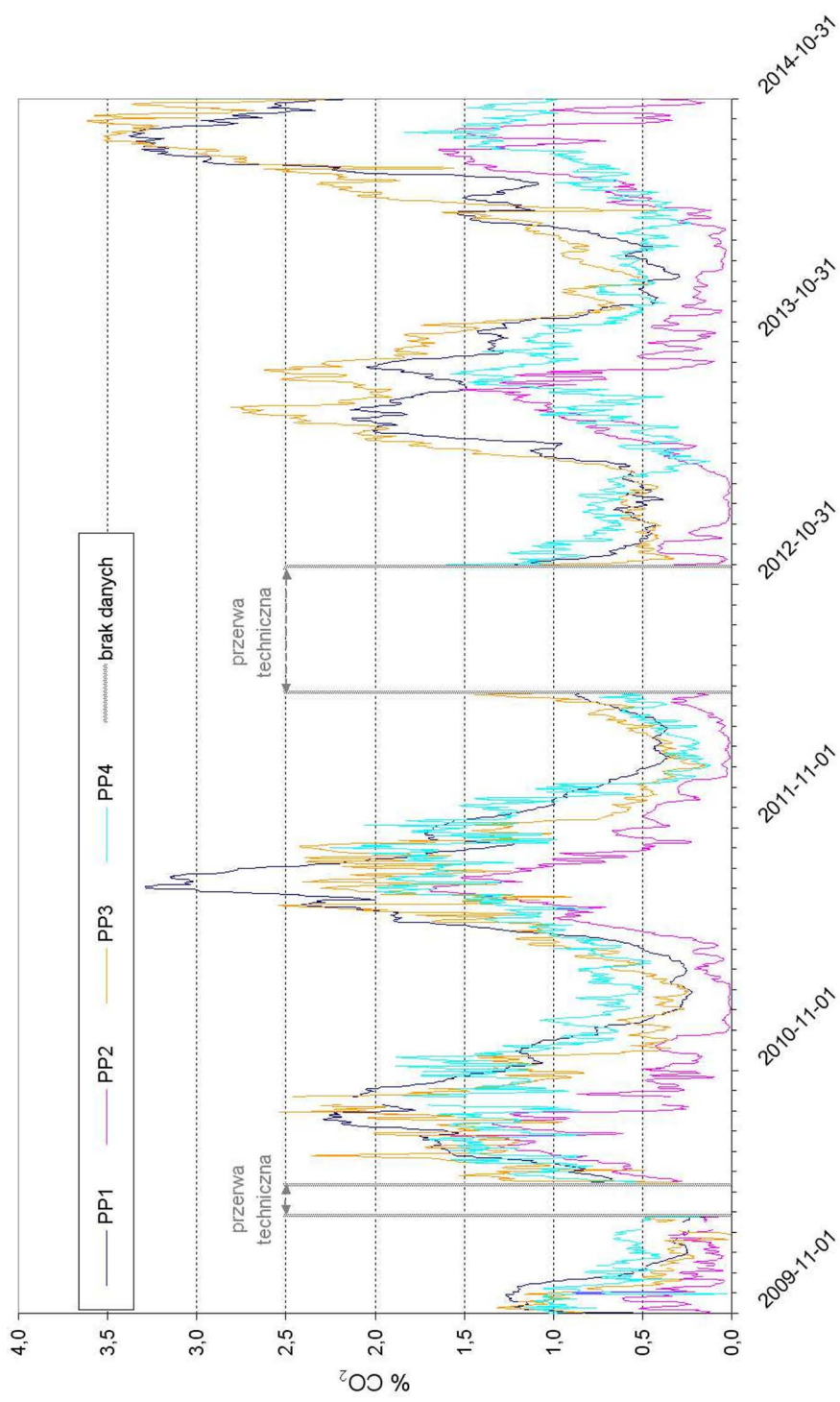
Rys. 7. Obszar doświadczalny badań stężenia CO_2 w powietrzu gruntowym nad ujęciem wody mineralnej Jan uzdrowiska Szczawnica-Zdrój
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN 2010

Fig. 7. Test area for CO_2 measurements in soil air at the Jan mineral water intake in Szczawnica-Zdrój

Układ mierzący stężenie CO_2 składał się z czterech sond pomiarowych. Sondy zostały rozmieszczone w odległości kilkunastu-kilkudziesięciu metrów jedna od drugiej, wokół ujęcia wody mineralnej Jan. Jednocześnie z wykonywaniem pomiarów prowadzone były pomiary meteorologiczne (temperatura, ciśnienie atmosferyczne, opad, wilgotność powietrza, informacje o zaleganiu pokrywy śnieżnej) oraz stężenie CO_2 w powietrzu atmosferycznym. Pomiary stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym odniesiono do klimatycznych (termicznych) pór roku (przedzimy, zima, przedwiośnie, wiosna, lato oraz jesień).

Badania z wykorzystaniem stacji pomiarowej miały na celu określenie, jakie czynniki i w jakim stopniu decydują o zmienności przestrzenno-czasowej (krótko- i długoterminowej) stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz czy został zarejestrowany dwutlenek węgla pochodzenia endogenicznego.

W badanym okresie (od 1 listopada 2009 r. do 31 października 2014 r.) na poszczególnych stanowiskach odnotowano: sezonową zmienność stężeń CO_2 (w profilu całoro-



Rys. 8. Porównanie stężeń CO₂ zarejestrowanych przez sondy pomiarowe w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014 (od listopada 2009 r. do października 2014 r.)
Opracowanie własne

Fig. 8. Comparison of CO₂ concentrations recorded by measuring probes during the 5-year measuring cycle of 2009–2014

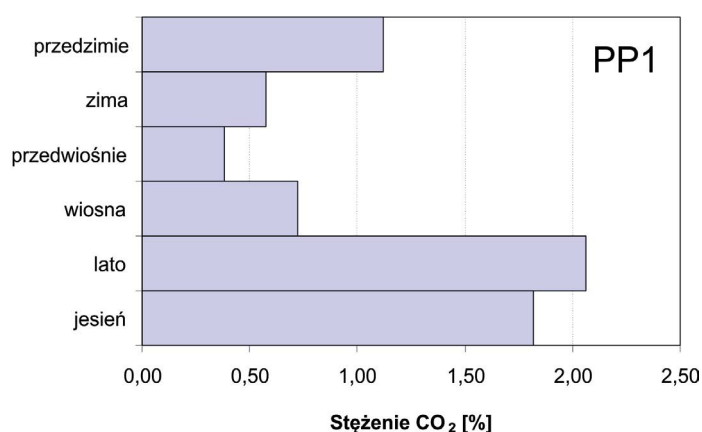
cznym), nieregularną zmienność w okresach kilkudniowych (tylko na niektórych stanowiskach), zmienność w cyklu dobowym (j.w.) oraz stosunkowo nieliczne pomiary odstające (rys. 8–13) (Tarkowski i Sroczyński 2016).

Zmienność sezonowa stężenia CO₂ na stanowiskach pomiarowych jest wyraźnie zaznaczona. Wyniki badań obejmujące pięcioletni cykl pomiarowy (2009–2014), w cyklu rocznym pokazują na wyraźne sinusoidalne wahania stężenia dwutlenku węgla, z maksimum w miesiącach letnich i minimum w zimie oraz w okresie przedwiośnia. Największe wahania obserwuje się w miesiącach letnich, znaczne mniejsze i stałe jego poziomy w miesiącach zimowych. W ciepłych porach roku stężenia CO₂ są wyższe aniżeli w chłodnych, nawet kilkakrotnie. W porównywalnych całorocznych cyklach pomiarowych (termiczne pory roku), średnioroczne stężenia CO₂ na tych samych stanowiskach (w zakresie wielkości średnich jak i przebiegów zmienności) mało się od siebie różnią.

Zmienność w okresach kilkudniowych jest zauważalna w porach cieplejszych, od późnej wiosny do przedzimia, najczęściej w powiązaniu z opadami, a typowa sekwencja to wzrost stężenia CO₂ następujący w kilka dni po opadzie (po obfitych i krótkotrwałych deszczach obserwuje się najpierw skokowy spadek, a następnie wzrost stężeń CO₂).

Zanotowana zmienność dobową stężenia CO₂ występuje w okresach ciepłych, kiedy ziemia jest nagrzana (lato, jesień) i tylko na niektórych stanowiskach (odsloniętych, nasłonecznionych).

Odnotowane duże różnice stężeń CO₂ pomiędzy poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi, pomimo bliskiego sąsiedztwa punktów pomiarowych, przejawiają się w różnicach w amplitudzie stężeń pomiędzy stanowiskami oraz w dynamice krótkookresowych zmian stężeń CO₂. Związane jest to z lokalizacją punktów pomiarowych. Stanowisko w miejscu osłoniętym, w cieniu, charakteryzuje powolna reakcja na bodźce zewnętrzne, liczona raczej w tygodniach niż w dniach, a krótkoterminowa zmienność nie występuje. Z kolei na stanowisku położonym w terenie otwartym, z dala od drzew, w miejscu eksponowanym na bezpośrednie

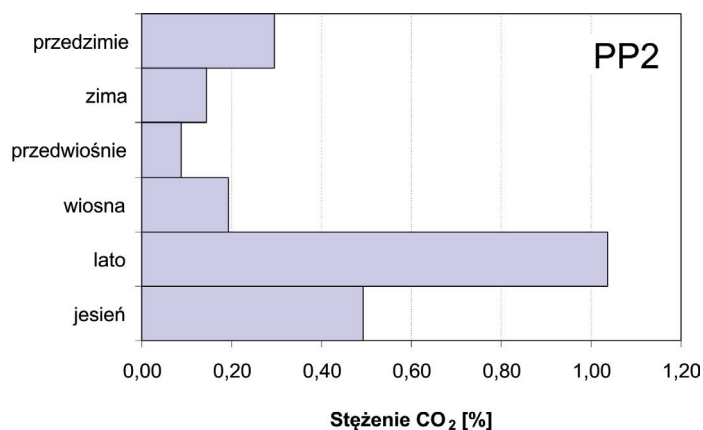


Rys. 9. Rozkład średnich sezonowych stężeń CO₂ zarejestrowanych przez sondę pomiarową PP1 w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014
Opracowanie własne

Fig. 9. Distribution of seasonal average CO₂ concentrations recorded by a PP1 measuring probe during the 5-year measuring cycle from 2009–2014

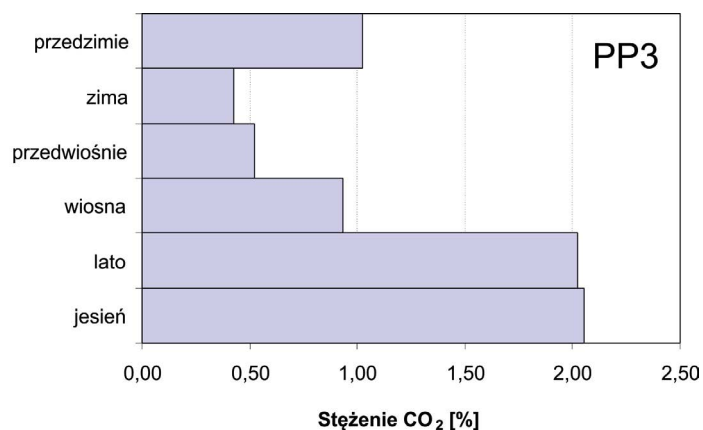
promienie, dynamika zmian stężeń CO_2 jest nieporównanie większa a przez znaczną część roku, choć słabo, zauważalne są cykle dobowe. Ze względu na to, że największe wahania występują w dniach słonecznych, w miejscach niezacienionych, takie lokalizacje należałoby uznać za nieodpowiednie do monitorowania zmian stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym.

Wyniki pomiarów obejmują sumaryczne stężenia dwutlenku węgla – biogenicznego, a być może także CO_2 wydostającego się z głębi ziemi. Nie ma przekonujących przesłanek, że do wierzchniej warstwy gruntu na omawianym terenie dociera endogeniczny dwutlenek węgla związany z występowaniem szczaw, a jeżeli tak, to w śladowych ilościach



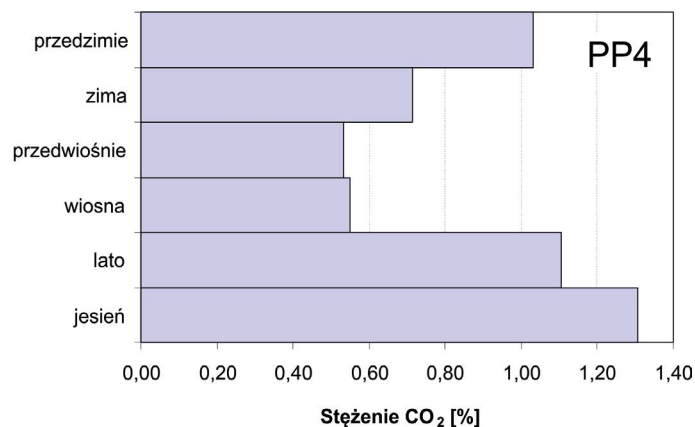
Rys. 10. Rozkład średnich sezonowych stężeń CO_2 zarejestrowanych przez sondę pomiarową PP2 w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014
Opracowanie własne

Fig. 10. Distribution of seasonal average CO_2 concentrations recorded by a PP2 measuring probe during the 5-year measuring cycle from 2009–2014



Rys. 11. Rozkład średnich sezonowych stężeń CO_2 zarejestrowanych przez sondę pomiarową PP3 w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014
Opracowanie własne

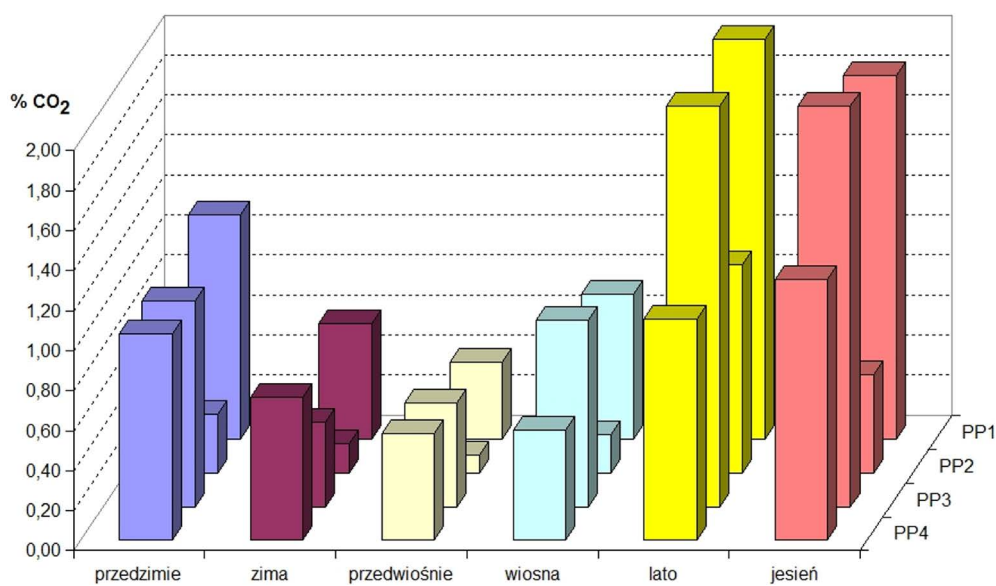
Fig. 11. Distribution of seasonal average CO_2 concentrations recorded by a PP3 measuring probe during the 5-year measuring cycle from 2009–2014



Rys. 12. Rozkład średnich sezonowych stężeń CO₂ zarejestrowanych przez sondę pomiarową PP4 w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014

Opracowanie własne

Fig. 12. Distribution of seasonal average CO₂ concentrations recorded by a PP4 measuring probe during the 5-year measuring cycle from 2009–2014



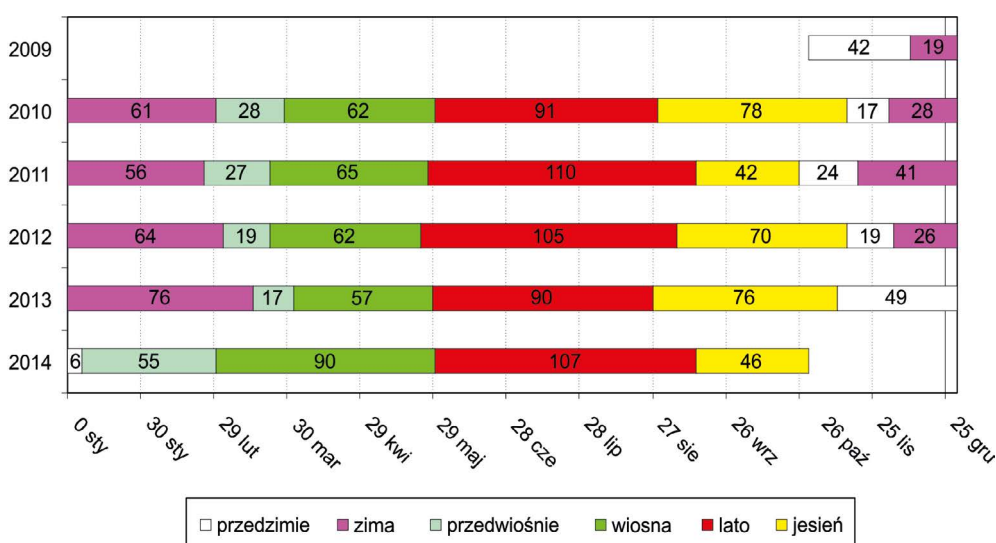
Rys. 13. Porównanie średnich stężeń sezonowych CO₂ zarejestrowanych przez poszczególne sondy pomiarowe w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014

Opracowanie własne

Fig. 13. Comparison of seasonal average CO₂ concentrations recorded by the individual measuring probes during the 5-year measuring cycle from 2009–2014

(efekt $<0,5\%$ CO₂). Nie zauważono wzrostu stężenia dwutlenku węgla podczas mrozów i przy zalegającej pokrywie śniegowej (co mogłoby świadczyć o napływie endogenicznego CO₂). W przeciwieństwie do biogenicznego, ewentualny strumień endogenicznego dwutlenku węgla powinien być mało zróżnicowany w cyklu rocznym.

Zarejestrowana na stanowisku w uzdrowisku Szczawnica-Zdrój zmienność stężenia CO₂ odzwierciedla zmiany zawartości biogenicznego CO₂ w powietrzu podglebowym, a czynnikiem decydującym o jego poziomie jest temperatura gruntu. W warunkach klimatu Polski, gdzie zmienność warunków termicznych rzadko kiedy pokrywa się z kalendarzowymi porami roku, przy analizie zmienności stężenia CO₂ lepiej jest się posługiwać termicznymi porami roku, wyznaczanymi według kryteriów klimatologicznych (rys. 14).



Rys. 14. Termiczne pory roku w Szczawnicy w pięcioletnim cyklu pomiarowym 2009–2014 (etykiety wskazują liczbę dni przypisanych w danym roku kalendarzowym do termicznej pory roku; na przełomie lat 2013–2014 nie odnotowano termicznej zimy)
Opracowanie własne

Fig. 14. Thermal seasons in Szczawnica-Zdrój during the 5-year measuring cycle from 2009–2014

Z wykonanych badań wynika, że pojedynczy roczny cykl pomiarowy jest zdecydowanie niewystarczający do miarodajnego ustalenia wzorca tła dla stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym. Również pięcioletni okres pomiarowy jest niewystarczający do oceny powiązań ze zmianami zachodzącymi w klimacie.

Podsumowanie wyników badań

Uzyskane doświadczenia pozwoliły na udoskonalenie metodyki wykonywania pomiarów stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym. Mogą one być pomocne przy tworzeniu efektywnych systemów monitoringu na obszarach planowanych składowisk w strukturach geologicznych, jak również rejestracji wpływów endogenicznego dwutlenku węgla.

Na podstawie uzyskanych doświadczeń metodycznych oraz otrzymanych wyników planuje się dalsze badania nakierowane na rozpoznanie głębokościowego rozkładu CO₂ w powietrzu podglebowym. Wykonane w interdyscyplinarnym zespole (geologów, mineralogów, gleboznawców, geografów, mikrobiologów) z wykorzystaniem zaprojektowanej i zbudowanej na potrzeby badań aparatury miałyby na celu określenie wpływu czynników (naturalnych i antropogenicznych) na zmiany stężenia tego gazu w profilu podglebowym.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej IGSMiE PAN.

Literatura

- Atlas klimatu Polski*. Red. H. Lorenc. IMGW Warszawa 2005.
- Barron-Gafford i in. 2011 – Barron-Gafford, G.A., Scott, R.L., Jenerette, G.D. i Huxman, T.E. 2011. The relative controls of temperature, soil moisture, and plant functional group on soil CO₂ efflux at diel, seasonal, and annual scales. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 116, G01023. DOI: 10.1029/2010JG001442.
- Birkenmajer, K. red. 1986. *Przewodnik LVII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Pieninach*. Kraków.
- Birkenmajer, K. 1979. *Przewodnik geologiczny po Pienińskim Pasie Skalkowym*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Birkenmajer, K. 1996. Mioceńskie intruzje andezytowe rejonu Pienin: ich formy geologiczne i rozmieszczenie w świetle badań geologicznych i magnetycznych. *Kwart. Geologia*, 22(1), s. 15–25.
- Biuletyn monitoringu klimatu Polski*. Rok 2010. (Miętus M. i in.). Rok 2011–2014 (Ustrnul Z. i in.). IMGW PIB Warszawa 2010–2014.
- Biuletyn monitoringu klimatu Polski*. Rok 2011. IMGW PIB (Ustrnul Z. i in.). Warszawa 2011.
- Bochenek, W. 2014. Sezonowa zmienność i wieloletnie tendencje pH w opadzie atmosferycznym na Stacji Bazowej ZMŚP w Szymbarku w latach 1999–2013 (Seasonal variability and long-term trends of pH in precipitation on the Base Station of IMNE in Szymbark in the years 1999–2013). *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, Vol. 16, s. 41–47.
- Brydie i in. 2013 – Brydie, J., Faught, B., Olson, M., Underwood, A. i Drozdowski, B. 2013 – The Laboratory Simulation and Field Verification of Seasonal Soil-Respired CO₂ flux at a Proposed CCS Project Site. *Energy Procedia* 37, s. 4041–4048; DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.304.
- Ciężkowski, W. red. 2002. *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*. Wrocław.
- Gal i in. 2014 – Gal, F., Michel, K., Pokryszka, Z., Lafortune, S., Garcia, B., Rouchon, V., de Donato, P., Pironon, J., Barres, O., Taquet, N., Radilla, G., Prinet, C., Hy-Billiot, J., Lescanne, M., Cellier, P., Lucas, H. i Gibert, F. 2014 – Study of the environmental variability of gaseous emanations over a CO₂ injection pilot–Application to the French Pyrenean foreland. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 21, s. 177–190; DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.12.015
- Hashimoto, S. i Komatsu, H. 2006. Relationships between soil CO₂ concentration and CO₂ production, temperature, water content, and gas diffusivity: implications for field studies through sensitivity analyses. *J. For. Res.*, 11, s. 41–50.
- Hortle i in. 2011 – Hortle, A., de Caritat, P., Stalvies, C. i Jenkins, C. 2011. Groundwater monitoring at the Otway Project site, Australia. *Energy Procedia* 4, s. 5495–5503; DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.535.
- Klusman, R.W. 1993. *Soil gas and related methods for natural resource exploration*. WileySons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Kulka i in. 1991 – Kulka, A., Rączkowski, W., Żytko, K. i Paul, Z. 1991. *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, skala 1:50 000*. Arkusz Szczawnica-Krościenko (1050). Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Lewicki i in. 2010 – Lewicki, J.L., Hilley, G.E., Dobeck, L. i Spangler, L. 2010. Dynamics of CO₂ fluxes and concentrations during a shallow subsurface CO₂ release. *Environmental Earth Sciences* 60, s. 285–297; DOI: 10.1007/s12665-009-0396-7.
- Locke i in. 2011 – Locke, R.A., Krapac, I.G., Lewicki, J.L. i Curtis-Robinson, E. 2011. Characterizing near-surface CO₂ conditions before injection - Perspectives from a CCS project in the Illinois Basin, USA. *Energy Procedia* 4, s. 3306–3313; DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.251.

- Maier i in. 2010 – Maier, M., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E.E. i Holst, J. 2010 – Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science* 61(6), s. 877–887; DOI: 10.1111/j.1365-2389.2010.01287.x.
- Nickerson, N. i Risk, D. 2007. Soil CO₂ Emissions: Changes in effective diffusivity due to sustained winds. American Geophysical Union, *Fall Meeting*, Suppl. Volume 1–288, 52 s.
- Ortega i in. 2014 – Ortega, M.F., Rincones, M., Elío, J., Gutiérrez del Olmo, J., Nisi, B., Mazadiego, L.F., Iglesias, L., Vaselli, O., Grandia, F., Garcia, R., de la Vega, R. i Llamas, B. 2014 – Gas monitoring methodology and application to CCS projects as defined by atmospheric and remote sensing survey in the natural analogue of Campo de Calatrava. *Global NEST Journal* 16(2), s. 269–279.
- Rajchel, L. 2012. *Szczawy i wody kwasowęglowe Karpat Polskich*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Romanak i in. 2012 – Romanak, K.D., Bennett, P.C., Yang, C. i Hovorka, S.D. 2012. Process-based approach to CO₂ leakage detection by vadose zone gas monitoring at geologic CO₂ storage sites. *Geophysical Research Letters* 39(L15405); DOI: 10.1029/2012GL052426.
- Sauer i in. 2014 – Sauer, U., Watanabe, N., Singh, A., Dietrich, P., Kolditz, O. i Schütze, C. 2014. Joint interpretation of geoelectrical and soil-gas measurements for monitoring CO₂ releases at a natural analogue. *Near Surface Geophysics* 12(1), s. 165–187; DOI: 10.3997/1873-0604.2013052.
- Schacht, U. i Jenkins, C. 2014. Soil gas monitoring of the Otway Project demonstration site in SE Victoria, Australia. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 24, s. 14–29; DOI: 10.1016/j.ijggc.2014.02.007.
- Schloemer i in. 2013 – Schloemer, S., Furche, M., Dumke, I., Poggenburg, J., Bahr, A., Seeger, C., Vidal, A. i Faber, E. 2013. A review of continuous soil gas monitoring related to CCS – Technical advances and lessons learned. *Applied Geochemistry* 30, s. 148–160; DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.08.002.
- Schloemer i in. 2014 – Schloemer, S., Moeller, I. i Furche, M. 2014. Baseline soil gas measurements as part of a monitoring concept above a projected CO₂ injection formation-A case study from Northern Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 20, s. 57–72; DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.10.028
- Tarkowski i in. 2012 – Tarkowski, R., Luboń, K. i Wdowin, M. 2012. Aparatura oraz wstępne wyniki pomiarów stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym dla potrzeb monitoringu wycieków. *Przegląd Górniczy*, nr 2, s. 50–59.
- Tarkowski i in. 2009 – Tarkowski, R., Królik, W., Uliasz-Misiak, B. i Barabasz, W. 2009. Indicative microorganisms as a tool for testing the underground storage of carbon dioxide, in: Grobe M., Pashin J. C., Dodge R.L., eds. Carbon dioxide sequestration in geological media – State of the science: *AAPG Studies in Geology* 59, s. 637–642.
- Tarkowski, R. i Sroczyński, W. 2016. Zmienność sezonowa stężenia CO₂ w powietrzu glebowym w warunkach klimatu południowej Polski. *Studia Rozprawy i Monografie* nr 198, IGSMiE PAN.
- Tarkowski i in. 2012 – Tarkowski, R., Sroczyński, W., Luboń, K. i Wdowin, M. 2012. Wstępne wyniki testu aparatury do ciągłego pomiaru stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na stanowisku w Szczawnicy. *Rocznik Ochrona Środowiska* 14, s. 930–944.
- Tarkowski i in. 2010 – Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., Wdowin, M. i Batkiewicz, K. 2010. Badania stężenia CO₂ w powietrzu podglebowym w rejonie Tarnowa pod kątem monitoringu składowania dwutlenku węgla. *Rocznik Ochrona Środowiska* 12, s. 847–860.
- Tarkowski i zespół 2004–2008. *Wstępne badania i analiza danych do monitoringu podziemnego składowania CO₂ na złożu ropy naftowej Jastrząbka Stara*. Etapy I–IV. IGSMiE PAN, Pracownia Geotechnologii, Kraków (maszynopis).
- Tarkowski i zespół 2009–2015. *Badania zmian koncentracji CO₂ w powietrzu glebowym na wybranym obszarze*. IGSMiE PAN, Pracownia Geotechnologii, Kraków (maszynopis).
- Yasuda i in. 2008 – Yasuda, Y., Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Nakamura, T. i Miyahara, H. 2008. Development of a CO₂ gas analyzer for monitoring soil CO₂ concentrations. *Journal of Forest Research* 13(5), s. 320–325; DOI: 10.1007/s10310-008-0079-3.
- Yonemura i in. 2013 – Yonemura, S., Yokozawa, M., Sakurai, G., Kishimoto-Mo, A.W., Lee, N., Murayama, S., Ishijima, K., Shirato, Y. i Koizumi, H. 2013. Vertical soil–air CO₂ dynamics at the Takayama deciduous broadleaved forest AsiaFlux site. *Journal of Forest Research* 18, s. 49–59; DOI: 10.1007/s10310-012-0385-7.
- Żak i in. 2008 – Żak, S., Przylibski, T.A. i Ciężkowski, W. 2008. *Określenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w Sudetach w rejonach występowania szczaw*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.