

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIA
POLSKIEJ AKADEMII NAUK — KRAKÓW

STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE **198**

Radosław Tarkowski, Wiesław Sroczyński

ZMIENNOŚĆ SEZONOWA STĘŻENIA CO₂ W POWIETRZU
GLEBOWYM W WARUNKACH KLIMATU POŁUDNIOWEJ POLSKI

WYDAWNICTWO INSTYTUTU GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI
I ENERGIA PAN • KRAKÓW • 2016

KOMITET REDAKCYJNY

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki (redaktor naczelny serii)
dr hab. inż. Lidia Gawlik (sekretarz redakcji), prof. IGSMiE PAN
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN
prof. dr hab. inż. Wojciech Suwała
dr hab. inż. Alicja Uliasz-Bocheńczyk, prof. AGH

RECENZENCI

prof. dr hab. inż. Aleksander Garlicki
dr hab. Katarzyna Zarębska, prof. AGH

ADRES REDAKCJI

31-261 Kraków, ul. Józefa Wybickiego 7
tel. 12-632-33-00, fax 12-632-35-24

Redaktor Wydawnictwa: mgr Emilia Rydzewska
Redaktor techniczny: Beata Stankiewicz

© *Copyright by Autorzy*

© *Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN – Wydawnictwo*

Printed in Poland

Kraków 2016

ISSN 1895-6823

ISBN 978-83-62922-60-4

IGSMiE PAN – Wydawnictwo, Kraków 2016

Nakład 150 egz.

Objętość ark. wyd. 7,85; ark. druk. 11,00 (×8)

Druk i oprawa: Agencja Reklamowo-Wydawnicza „Ostoja” Maciej Hubert Krzemień,
Cianowice, ul. Niebyła 17, 32-043 Skała

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Istota problemu oraz przegląd dotychczasowych wyników badań	7
1.1. Przegląd dotychczasowych wyników badań na świecie	7
1.2. Przegląd wyników badań w Polsce	14
2. Rola gleby w bilansie CO ₂	17
3. Charakterystyka obszaru badań	19
3.1. Położenie geograficzne i klimat	19
3.2. Uwarunkowania geologiczne	19
4. Aparatura pomiarowa oraz metodyka prowadzenia pomiarów	23
4.1. Aparatura pomiarowa i jej lokalizacja	23
4.2. Konstrukcja sond pomiarowych	28
4.3. Warunki klimatyczne i pogodowe	30
4.4. Cel oraz metodyka prowadzenia pomiarów	36
5. Wyniki pomiarów stężenia CO ₂	39
6. Analiza wyników pomiarów stężenia CO ₂	51
6.1. Różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami	51
6.2. Zmienność wieloletnia (wielosezonowa)	54
6.3. Zmiany sezonowe	54
6.4. Zmiany kilkudniowe	57
6.5. Zmiany dobowe	57
6.6. Pomiary odbiegające	57
7. Omówienie wyników	59
Wnioski	63
Literatura	65
Zmienność sezonowa stężenia CO ₂ w powietrzu glebowym w warunkach klimatu południowej Polski – Streszczenie	71
Seasonal variations in CO ₂ concentration in soil air under climatic conditions of southern Po- land – Abstract	73

Wprowadzenie

W Pracowni Geotechnologii Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN od 2002 roku prowadzone są badania dotyczące składowania CO₂ w głębokich strukturach geologicznych. Wśród licznych aspektów badawczych z tym związanych, istotnym zagadnieniem jest weryfikacja i monitoring podziemnego składowania dwutlenku węgla. W tym zakresie w Pracowni realizowane były prace w ramach dwóch projektów 6 PR UE dotyczących geologicznego składowania CO₂ (CO₂SINK, CO₂ReMoVe) oraz krajowego programu pt. *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania*. Jednocześnie, w ramach badań statutowych prowadzono pomiary stężenia CO₂ w powietrzu glebowym, początkowo na eksploatowanym złożu ropy naftowej Jastrząbka Stara k. Tarnowa, a następnie na obszarze naturalnych wycieków tego gazu w Karpatach – w uzdrowisku Szczawnica-Zdrój. Badania były prowadzone z wykorzystaniem aparatury pomiarowej zbudowanej w Instytucie GSMiE PAN i miały na celu: przetestowanie jej działania, określenie tła stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na badanym obszarze, stwierdzenie ewentualnych wycieków endogenicznego CO₂, a także określenie istotnych czynników wpływających na stężenie tego gazu w powietrzu glebowym w zmiennym przedziale czasowym.

Prezentowane w opracowaniu wyniki badań mają aspekt praktyczny. Nakierowane są na wykrycie wycieków dwutlenku węgla, zarówno antropogenicznego – zatłoczonego do głębokiej struktury geologicznej, jak i endogenicznego – wydostającego się wzdłuż głębokich rozłamów w skorupie ziemskiej. Należy podkreślić, że sukces przedsięwzięcia związanego z wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla (CCS) opiera się na długotrwałej izolacji CO₂ od atmosfery. Dlatego też techniki towarzyszące podziemnemu składowaniu CO₂, takie jak rzetelne pomiary, monitoring i weryfikacja składowania są istotne, a określenie tła stężenia CO₂ w powietrzu glebowym jest niezbędnym punktem odniesienia we wszelkich późniejszych wnioskowaniach. Bezpośrednie pomiary stężenia CO₂ w gruncie lub w wodzie, stanowią istotną część monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla. Pozwalają na bieżąco kontrolować obecność CO₂ w przypowierzchniowych warstwach ziemi, w glebie i bezpośrednio poniżej, w pobliżu otworu zatłaczającego, czy też zlikwidowanych otworów. Pozwalają również na wykrycie endogenicznego dwutlenku węgla.

Miejsca występowania naturalnych wód kwasowęglowych i wycieków CO₂ (naturalne analogi) są cennym i dogodnym miejscem do prowadzenia badań stężenia tego gazu. Dlatego

go też po sprawdzeniu działania aparatury pomiarowej badającej stężenie CO_2 na złożu ropy naftowej Jastrząbka Stara, przeniesiono ją na teren uzdrowiska Szczawnica-Zdrój, na obszar występowania szczaw i wód kwasowęglowych.

Prezentowane opracowanie to studium przypadku praktycznego programu monitorowania powietrza glebowego, które ilustruje zarówno użyteczność, jak i ograniczenia wykorzystanej techniki.

1. Istota problemu oraz przegląd dotychczasowych wyników badań

1.1. Przegląd dotychczasowych wyników badań na świecie

Gleby są największym lądowym źródłem emisji CO₂ do atmosfery oraz kluczowym elementem w globalnym bilansie węgla. Dwutlenek węgla w nich występujący może być pochodzenia atmosferycznego, antropogenicznego, biologicznego, niekiedy magmatycznego czy też metamorficznego. Stężenie tego gazu w powietrzu glebowym jest zmienne i uwarunkowane różnymi czynnikami egzo- i endogenicznymi (wilgotność, temperatura, wiatr, nawożenie organiczne i mineralne, gęstość i typ roślinności, dopływ endogenicznego gazu i inne). Osiąga ono wartość dziesiątych części, a niekiedy nawet kilka/kilkanaście procent (Ciężkowski red. 2002; Tarkowski, Luboń i Wdowin 2012a). Istotna jest tu aktywność respiracyjna gleb, na co ma wpływ rodzaj gleby, skład mineralny i jej struktura (Barron-Gafford i in. 2011; Dobrzański i Zawadzki 1995; Dowgiałło i in. 2002; Maier i in. 2010; Nickerson 2014; Nickerson i Risk 2007; Yonemura i in. 2013). Wpływ naturalnego, endogenicznego CO₂ z wnętrza ziemi jest niewielki poza obszarami naturalnych wycieków tego gazu (por. Ciężkowski (red.) 2002; Rajchel 2012).

Ronald W. Klusman (1993) w podręczniku *Soil gas and related methods for natural resource exploration* kilkakrotnie porusza temat dwutlenku węgla jako jednego z istotnych gazów glebowych w prospekcji złóż mineralnych. W rozdziale *Chemical and Microbiological Reactions of Light Hydrocarbons* jest mowa o wpływie bakterii na gazowe węglowodory absorbowane w glebie, utlenianiu węglowodorów w środowisku aerobowym oraz produkcji CO₂ i minerałów węglanowych przez bakterie aerobowe. W rozdziale *Chemical Reactions in the Production of Gases in Geothermal Systems and Weathering of Mineral Deposits* omawia liczne komponenty gazowe, w tym CO₂ oraz ich wpływ na chemiczne reakcje w zbiornikach geotermalnych. Istotne informacje przedstawiono w *Physical Processes of Modification of Soil Gas Concentrations*, w którym to omówiono zróżnicowanie oraz zmiany stężenia CO₂ w gazach glebowych, podkreślając największe jego stężenie w miesiącach letnich (również największe jego wahania), znacznie mniejsze i stałe poziomy stężenia w miesiącach zimowych. Przedstawiono zmiany stężenia CO₂ w zależności od głębokości pomiarów, ciśnienia parcjalego CO₂ w gazie glebowym oraz pory roku. Zilustrowano to przykładami z Dakota i Utah (USA), gdzie okresy pomiarowe obejmowały kilka lat, przy znaczących zmianach temperatury powietrza glebowego. Rozdział *Use of Gases in the De-*

tection of Base and Precious Metal Mineralisation pokazuje możliwości wykorzystania badań stężenia CO₂ do prospekcji złóż. W powietrzu glebowym bezpośrednio nad złożami miedzi w Arizonie (USA) stwierdzono zwiększone stężenie tego gazu. Zdjęcie gazowe CO₂ daje również pozytywne rezultaty w prospekcji mineralizacji siarczkowej czy w poszukiwaniach złóż uranu.

Istnieje obszerna literatura dotycząca badań stężenia/strumienia oraz przemieszczania się CO₂ w glebie i skałach. Związana jest ona z badaniami gleby jako składnika ekosystemu, ekshalacjami gazów wulkanicznych, a ostatnio również z monitoringiem składowania CO₂ (CCS). W ramach każdego projektu CCS opracowywany jest plan monitoringu i weryfikacji (*Measurement Monitoring and Verification* – MMV) związany z ryzykiem podziemnego składowania. Obejmuje on pomiar stężenia gazu glebowego i powierzchni powiązanej z przepływem CO₂ w celu ustalenia naturalnego (bazowego) tła, w tym zakresu zmienności i stężenia CO₂.

Badania stężenia CO₂ w profilu glebowym oraz bezpośrednio przy powierzchni przeprowadzone przez Nickerson i Risk (2007) pokazały, że parametry fizyczne gleby, takie jak jej wilgotność i struktura wywierają silny wpływ na produkcję CO₂ w glebie. Autorzy wskazali na istotny wpływ wiatru, którego długotrwałe działanie na powierzchnię ziemi wpływa na zmiany stężenia gazu w glebie, jak również na strumień gazu przenikającego do i z matrycy gleby.

Badanie stężenia CO₂ w profilu pionowym gleby dla oceny dynamiki składowanego CO₂ (Maier i in. 2010) pozwoliło zidentyfikować czynniki wpływające w stanie równowagi na składowanie CO₂: wahania zwierciadła wód gruntowych zmieniające objętość strefy aeracji, turbulencje atmosferyczne spowodowane ciśnieniem atmosferycznym na granicy gleba-atmosfera oraz intensywne opady znacznie zmniejszające dyfuzyjność najwyższej warstwy gleby. Odnotowano krótkoterminowe spadki stężenia CO₂ w glebie podczas intensywnych opadów deszczu.

Yasuda i in. (2008) zbudowali niewielki analizator służący do pomiaru stężenia CO₂ w glebie, składający się z modułu zawierającego czujnik CO₂ w podczerwieni, czujnik temperatury oraz czujnik wilgotności względnej. Urządzenie w okresie 2,5 miesiąca mierzyło stężenie CO₂ w glebie na pięciu głębokościach (0–50 cm). Stwierdzono, że podczas gdy stężenie CO₂ wzrastało z głębokością, amplituda zmian stężenia CO₂ spadała z głębokością. Opóźnienie fazowe zmian stężenia CO₂ w glebie również rosło wraz z głębokością, podobnie jak i z temperaturą gleby.

Lewicki i in. (2010) przeprowadzili eksperyment zatłaczania niewielkiej ilości CO₂ (0,3 tony na dzień) na głębokość 2,5 metra, 100-metrowej długości kierunkowym wierceniem poziomym. W glebie na różnej głębokości i w zróżnicowanej odległości od otworu zatłaczającego zainstalowano czujniki CO₂ w podczerwieni. Rejestrowały one dynamikę strumienia CO₂ i jego stężenie podczas migracji gazu ku powierzchni. Zmiany stężenia CO₂ skorelowano z temperaturą powietrza i gleby, prędkością wiatru, ciśnieniem atmosferycznym, opadami oraz wydajnością zatłaczania CO₂. Zauważono dodatnią, jak i ujemną korelację zawartości CO₂ w glebie w zależności od temperatury. Dodatnia mogła być spowodowana intensyfikacją procesów związanych z oddychaniem w wyższych temperaturach oraz dodat-

nią korelacją pomiędzy prędkością wiatru i temperaturą w tym samym okresie, natomiast negatywna mogła być związana z właściwościami gleby w danym miejscu. Zaobserwowano również dodatnią i ujemną korelację prędkości wiatru i zawartości CO_2 w glebie. W tym przypadku jest ona uzależniona od szeregu dodatkowych czynników, takich jak: prędkość i kierunek wiatru, właściwości fizyczne gleby, „porowatość” powierzchni. Ujemne korelacje zaobserwowano w okresie silnych wiatrów i rosnącego ciśnienia atmosferycznego, co było prawdopodobnie odzwierciedleniem zwiększonego przepływu powietrza atmosferycznego poprzez glebę. W pozostałej części okresu obserwacji, silne korelacje między prędkością wiatru a zawartością CO_2 w glebie były odwrotne. Zauważono, że wzrost wilgotności gleby związany z okresowymi opadami może prowadzić do zwiększenia zawartości CO_2 w glebie z powodu intensyfikacji oddychania i/lub spadkiem porowatości i przepuszczalności gleby wypełnionej powietrzem (tłumiony wypływ CO_2 z gleby).

Barron-Gafford i in. (2011) przedstawili wpływ temperatury, wilgotności gleby i typów roślin (fenologię) na stężenie CO_2 w glebie, w różnych porach roku. Wskazali na rolę roślinności w regulacji oddychania gleby, co jest dominującą, ale i zmienną przyczyną przepływu CO_2 w ekosystemie. Podkreślili utrudnioną ocenę wpływu badanych parametrów, ze względu na fenologię roślin i wpływ mikrosiedlisk gleby.

Yonemura i in. (2013) wykorzystując czujniki w podczerwieni, przedstawili pionową dynamikę zmian CO_2 w powietrzu glebowym na obszarze lasów liściastych. Badania obejmowały okres pełnego cyklu rocznego i pokazały sinusoidalne wahania zawartości CO_2 , z maksimum w lipcu i minimum w zimie, podobnie do wypływu CO_2 z gleby, mierzonego jednocześnie przy użyciu komór o otwartym przepływie. Stężenie CO_2 w powietrzu glebowym wzrastało wraz z głębokością (od 5 do 50 cm): od 2000 do 8000 ppm w okresie letnim i od 2000 do 3000 ppm w zimie pod pokrywą śnieżną. W lecie było ono skorelowane z wilgotnością gleby (w skali: dziennej i tygodniowej). Podkreślono korelację głębokości zamrażanej ziemi i prędkości wiatru na stężenie CO_2 w powietrzu glebowym w zimie, a transfer CO_2 przez śnieg określono na setną część dyfuzji gazów w glebie.

Schloemer i in. (2014) opracowali system ciągłego monitorowania gazów w glebie z automatycznym transferem danych. Przedstawili 4-letni okres zbiorów danych pomiarowych, uzyskanych w wyniku ciągłego monitorowania gazów w glebie, w kilkunastu miejscach pomiarowych. Badania pokazały znaczne oraz charakterystyczne dla konkretnego miejsca różnice stężenia CO_2 na niewielkich głębokościach (1–3 m). Wykazały, że stężenie CO_2 jest stabilne w długim okresie czasu (więcej niż jeden sezon roczny), kiedy mierzone jest poniżej aktywnej biologicznie strefy gleby (ok. 0,5 m) i powyżej zwierciadła wody, gdzie w niewielkim stopniu zależne jest od czynników atmosferycznych. Pomiar pokazały, że tło zawartości gazu w glebie, włączając zmiany spowodowane przez naturalne czynniki, można zbadać tylko za pomocą długoterminowego ciągłego monitorowania, z rejestracją wyników w racjonalnie krótkich odstępach pomiarowych. Istotne jest prawidłowe dobranie miejsca i głębokości pomiarów.

Gal i in. (2014) przeprowadzili bazowy monitoring (w ujęciu kwartalnym, w ramach rocznego cyklu temperaturowego) przypowierzchniowych warstw, w celu scharakteryzowa-

nia stężenia i przepływu gazów glebowych z upływem czasu. Wyniki pokazały, że przepływ i stężenie CO₂ w glebie następuje w rocznym cyklu – zwiększonej emisji w trakcie „wysokiego” sezonu (lato) oraz niższych emisji podczas „niskiego” sezonu (zima) – co odpowiada rocznemu cyklowi aktywności biologicznej gleby.

Brydie i in. (2013) w zbudowanym laboratorium, w kolumnach gleby poddanych zmiennym zakresom temperatury i wilgotności (odpowiadającym cyklom sezonowym w okresie 12 miesięcy) odtworzyli warunki odpowiadające tym w terenie. Porównanie pomiędzy symulacją laboratoryjną i danymi terenowymi wskazuje na silną korelację wpływu temperatury, zgodną z wieloma badaniami związanymi z obiegiem węgla i produktywnością ekosystemu. Badania te potwierdzają, że symulacja warunków środowiskowych z wykorzystaniem gleby z obszaru prowadzenia CCS może być użytecznym narzędziem do przewidywania oczekiwanego zakresu przepływu CO₂. Może ona przyspieszyć podstawowe badania mające na celu ustalenie zakresu zmienności strumienia CO₂, w celu określenia strategii monitorowania. Autorzy wskazali na kilka praktycznych zagadnień dotyczących prowadzenia reprezentatywnych pomiarów wypływu CO₂ z gleby. Podkreślono, że oceny naturalnych zmian wyjściowego przepływu CO₂ oddychającej gleby należy dokonać wzdłuż całego potencjalnie przewidywanego dużego obszaru operacji CCS. Nawet gdy pomiary terenowe CO₂ są zapisywane w przeciągu jednego lub kilku cykli sezonowych, pełny zakres zmian strumienia CO₂ może nie zostać uchwyciony z powodów zależności od środowiska – warunków atmosferycznych, warunków w trakcie badań terenowych oraz w przypadku badań polowych – pomiarów strumienia CO₂ w glebie. Warunki klimatyczne i środowiskowe mogą zmieniać się nawet w ciągu dnia, co może powodować liczne fluktuacje w wynikach pomiarów otrzymanych w różnych warunkach. Najlepiej przeprowadzić jest wstępne pomiary w trakcie badań terenowych, pobrać próbki gleby w miejscu projektu, a na ich bazie przeprowadzić symulację w laboratorium w warunkach kontrolowanych. Ogranicza to czas badań podstawowych z jednego/dwóch lat do kilku tygodni, poprzez symulację popartą weryfikacją w terenie.

Amonette i in. (2013) przeprowadzili badania adwektywnego strumienia CO₂ w terenie, a następnie laboratoryjne przy użyciu komór wypełnionych suchym piaskiem. Przez 27 dni, codziennie zatłaczano do otworu 52 kg CO₂, a wypływ gazu z gleby monitorowano w komorach przed, podczas i po zatłaczaniu. Wyniki pokazały na promienisty model przepływu skoncentrowany na znanym „gorącym punkcie” (*hot spot*) oraz szybkie reakcje na zmiany wydajności zatłaczania oraz spowodowane siłą wiatru. Poziom wilgotności gleby był zróżnicowany w trakcie trwania eksperymentu od umiarkowanego do najwyższego, występującego stale w „gorącym punkcie” (*hot spot*). Wpływ wiatru na mierzony strumień był skomplikowany i zmniejszał się podczas gdy wilgotność gleby się zwiększała. W laboratorium, badania strumienia w komorze wykazały ogólny spadek mierzonego strumienia CO₂, gdy wytworzony wiatr osiągnął powierzchnię piasku.

Wei i in. (2013) w ramach eksperymentalnych badań zaprojektowali układ kolumn dla badań przepływu CO₂ w celu zrozumienia potencjalnych skutków spowodowanych napływem CO₂, koncentrując się na zmianach geochemii gleby. Wyniki pokazały, że zwiększenie

stężenia CO₂ powoduje szybki spadek pH, zarówno w badanych piaskowcach wapiennych, jak i piaskowcach krzemionkowych oraz nieco zwiększone stężenie jonów w roztworze.

Romanak i in. (2012) zaproponowali inne podejście zakładające badania relacji chemicznych pomiędzy N₂, O₂, CO₂ i CH₄, co umożliwiłoby szybkie odróżnienie wycieku od naturalnie występującego CO₂ w strefie aeracji. Zaproponowana metoda wykorzystuje sekwencyjną kontrolę następujących zależności stężeń gazów: O₂ do CO₂ dla rozróżnienia procesów tła in situ w strefie aeracji (biologiczne oddychanie, utlenianie metanu i rozpuszczanie CO₂) od egzogennej głębokiego wycieku; CO₂ do N₂ dla odróżnienia rozpuszczonego CO₂ od egzogennej głębokiego wycieku; CO₂ do N₂/O₂ dla oceny stopienia oddychania, utleniania CH₄ i atmosferycznego mieszania/rozcieńczania pojawiającego się w całym systemie. Podejście wypracowano w naturalnym miejscu bogatym w CO₂, w którym występują naturalne wycieki gazów z głębokich stref Ziemi. Zdaniem autorów, umiejętność identyfikowania wycieku gazu do strefy aeracji bez konieczności pomiarów tła, może zmniejszyć niepewność w ich wykrywaniu i przyspieszyć realizację przyszłych projektów składowania CO₂ w głębokich strukturach geologicznych.

Ortega i in. (2014) wskazali, że dla właściwej interpretacji i ilościowej oceny ewentualnego wycieku CO₂ niezbędne jest ustalenie charakterystyki tła na obszarze objętym składowaniem, zarówno na poziomie zbiornika, jak i na małej głębokości, przy powierzchni gleby i w atmosferze, poprzez pomiary gazów glebowych. W tym celu za pomocą przenośnych analizatorów na podczterwień, zostały wykonane pomiary strumienia CO₂, dostosowane do monitorowania CO₂ i innych gazów znacznikowych, m.in. izotopów radonu oraz teledetekcji obrazów, co przetestowano na przykładzie naturalnego analogu Campo de Calatrava (Hiszpania).

Elio i in. (2015) na naturalnym analogu – polu wulkanicznym Campo de Calatrava Volcanic Field – przebadali relację CO₂-Rn dla oceny roli CO₂ jako gazu nośnego dla radonu. Pomiary radonu, dla rozróżnienia pomiędzy płytkim i głębokim pochodzeniem CO₂, były oceniane również w perspektywie ich stosowania w programach monitoringu składowania dwutlenku węgla. Wskaźniki 222Rn/220Rn zostały wykorzystane do odszukania źródła gazów glebowych Campo de Calatrava. Stwierdzono dodatnią korelację pomiędzy wskaźnikiem izotopu radonu i wpływem CO₂ oraz, że dwutlenek węgla jest wydajnym nośnikiem dla Rn.

Magnier i in. (2012) zaproponowali metodykę wykorzystującą stabilne izotopy węgla z gazów szlachetnych w celu zbadania przydatności monitoringu geochemicznego do śledzenia wycieku CO₂ na powierzchni. Rozkład zawartości CO₂ w glebie mieścił się pomiędzy 0,8 a 14% i był w dużej mierze regulowany przez właściwości gleby oraz uwarunkowania topograficzne. Wyniki te, wraz z wartością $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ pomiędzy 15 a 23‰ sugerują, że większość CO₂ w glebie jest pochodzenia biologicznego. Badania pokazują, że gazy szlachetne mogą być istotnymi dyskrminatorami wycieków i mogą być wykorzystane do śledzenia chmury CO₂ w projektach CCS.

Peter i in. (2011) przeprowadzili badania, których celem było określenie wpływu wycieku CO₂ na wody gruntowe pod kątem rozwoju metod monitoringu podziemnego składowa-

nia tego gazu. W szczególności dotyczyły one określenia wpływu CO₂ na hydrogeochemię wód podziemnych jako podstawy do oceny ryzyka przedostania się gazu do wód gruntowych oraz opracowania i zastosowania metod monitorowania i koncepcji monitoringu do wykrywania wycieków CO₂ w płytkich poziomach wodonośnych.

Metcalf i in. (2014) wykazali, że stabilne izotopy węgla rozpuszczonego w wodach powierzchniowych mogą być wykorzystywane jako narzędzie monitoringu geologicznego składowania CO₂ oraz przydatne jako dobry wskaźnik potencjalnych wycieków CO₂, ponieważ każde źródło węgla ma specyficzne oznaczenie izotopowe. Średnia wartość dla $\delta^{13}\text{C-DIC}$ w miejscu badania wynosiło $-10,7\text{‰}$ (V-PDB), co bardzo różni się od CO₂ generowanego podczas procesu spalania w atmosferze tlenu (ok. -28‰ vs V-PDB).

Schacht i Jenkins (2014) przeprowadzili bazowy i asekurowany monitoring gazu w glebie w miejscu demonstracyjnego projektu CO2CRC Otway, w okresie sześciu lat (2007–2012). Pobieranie próbek gazów z gleby prowadzone było corocznie w zdefiniowanej siatce, w ramach przygotowań do zatłaczania oraz podczas eksperymentalnego zatłaczania 65 000 ton dwutlenku węgla na głębokość 2 km. Głównymi analizowanymi gazami były: CO₂, metan, tlen i azot. Bazowy monitoring pozwolił na lepsze zrozumienie lokalnej zmienności stężeń CO₂ w powietrzu glebowym przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂. Porównanie danych uzyskanych po zatłoczeniu z danymi bazowymi oraz badanie powiązania mieszanki gazowej i izotopów $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{CO}_2}$ wykazało, że większość emisji CO₂ w glebie była pochodzenia biogenicznego.

Hortle i in. (2011) w ramach projektu CO2CRC Otway przedstawili wyniki monitoringu i weryfikacji składowania dwutlenku węgla (monitoring zerowy). W ramach projektu zatłoczono pod ziemię 65 tys. ton CO₂ i CH₄. Zaplanowano monitoring wód podziemnych poczynając od utworzenia bazy odniesienia. Monitoring przeprowadzono na różnych głębokościach, w licznych otworach znajdujących się w promieniu kilku kilometrów (do 10 km) od miejsca zatłaczania. Program badań obejmował: kontrolę geochemiczną składu wód podziemnych, monitorowanie poziomu wody w celu określenia zmian sezonowych przepływu wody i kierunku oraz pobieranie próbek gazów z przestrzeni nad powierzchnią warstwy wodonośnej.

Sauer i in. (2014) przedstawili rezultaty kompleksowej interpretacji wyników uzyskanych różnymi metodami (pomiar stężenia i strumienia dwutlenku węgla, potencjał własny (*self-potential* SP, badania geoelektryczne). Badania pokazały, że kombinacja metod geofizycznych w połączeniu z analizą powietrza glebowego w mezoskalowym monitoringu płytkich powierzchni górotworu, w miejscach geologicznego składowania CO₂, może być cennym narzędziem do kartowania i monitorowania potencjalnego rozprzestrzeniania się CO₂ w górotworze. W celu przestudiowania wycieków CO₂, ich czasowego oraz przestrzennego zachowania, w latach 2011–2012 wykonano pomiary w niecce Cheb w Czechach. Stwierdzono, że specyfika miejsca, warunki geologiczne warstw przypowierzchniowych oraz warunki meteorologiczne wydają się mieć istotny wpływ na przepływ i zmierzone wartości CO₂. Obserwowane anomalie zawartości CO₂ w powietrzu glebowym oraz wyniki modelowania sugerują, że wpływ gazu ze składowiska CO₂ będzie ograniczony do ściśle określonych obszarów, często wyznaczonych przez lokalne uwarunkowania przepuszczalności.

Schloemer i in. (2013) wykazali, że zmienność emisji CO₂ dla różnych rodzajów gleb i roślinności jest bardzo duża. Dlatego wiarygodne określenie rzeczywistych emisji CO₂ może być dokonywane jedynie za pomocą ciągłych i długoterminowych pomiarów stężenia tego gazu. Przedstawiono wnioski z pierwszego ogólnoswiatowego ciągłego programu monitorowania stężenia CO₂ w wybranym miejscu na terenie Altmark (Niemcy). Autorzy podkreślają, że każde wybrane miejsce wymaga dokładnego wstępnego zbadania w odniesieniu do głębokości strefy aktywnej biologicznie i poziomu zwierciadła wody. Standardowe parametry gleby (wilgotność, temperatura), a także lokalne dane pogodowe są niezbędne do interpretacji danych z konkretnego miejsca.

Schulz i in. (2012) przedstawili wyniki monitorowania symulowanego wycieku CO₂ w płytkim poziomie wodonośnym z wykorzystaniem stabilnych izotopów węgla. Sztuczny wyciek dwutlenku węgla w płytkiej warstwie wodonośnej monitorowano za pomocą stabilnych izotopów węgla na miejscu w terenie, w pobliżu miasta Wittstock, Brandenburgia. Około 400 ton CO₂ zatłoczono do płytkiego poziomu wodonośnego na głębokość 18 m w okresie 10 dni. Stosunek ¹³C/¹²C dwutlenku węgla mierzono w próbkach wód i gazu glebowego w celu monitorowania pióropusza zatłoczonego CO₂ oraz dla oceny możliwości i niezawodności proponowanego podejścia wykrywania potencjalnego wycieku gazu. Sztuczną chmurę/pióropusz CO₂ monitorowano przez ponad 204 dni.

Locke i in. (2011) przedstawili obszerny program monitorowania, weryfikacji i szacowania CO₂. Został on przygotowany dla Illinois Basin Decatur Project i koncentrował się na obszarze 0,65 km². Cele obejmowały ustalenie bazowych warunków dla oceny potencjalnych oddziaływań zatłaczania CO₂, dla wykazania, że działania w ramach projektu są podejmowane w celu ochrony zdrowia ludzkiego i środowiska oraz zapewnienia dokładnego oszacowania składowanego CO₂. Monitorowanie gleby i strumienia CO₂ było prowadzone przez przeszło jeden rok, tak aby scharakteryzować warunki występowania CO₂ przy powierzchni ziemi.

Barrio i in. (2014) w ramach projektu CO2FIELDLAB opisali wyniki eksperymentu, w którym do płytkiej warstwy wodonośnej, na głębokość 18 m zatłoczono około 1,7 ton CO₂. Scharakteryzowali przemieszczanie się gazu (jego stężenie) jak również wpływ strefy aeracji na wyniki pomiarów. W ramach tego samego projektu Gal i in. (2013) monitorowali wyciek CO₂ w fazie wodnej, na różnych głębokościach (5, 10 i 15 m). W horyzontach objętym wtargnięciem CO₂ stwierdzili istotne zmiany pH oraz przewodnictwa skał.

Anomalne zmiany składu gazu glebowego w miejscu sekwestracji CO₂ mogą dostarczyć ważnych i bezpośrednich oznak wycieku CO₂ oraz istotnych informacji jego wpływu na środowisko, w szczególności wpływu O₂ na procesy oddychania w glebie. Zhou i in. (2013) badali stężenie O₂ w glebie w relacji do sztucznie uwolnionego dwutlenku węgla. Wyniki pokazały, że w miejscu badań produkcja CO₂ była głównie wynikiem utleniania materii organicznej gleby. Stężenie O₂ w glebie korelowało się ujemnie ze stężeniem CO₂ oraz wilgotnością gleby, a dodatkowo z temperaturą gleby. W momencie gdy pojawił się wyciek CO₂, stężenie O₂ w glebie korelowało się ujemnie ze stężeniem CO₂ w glebie i dodatkowo z wilgotnością i temperaturą gleby. Obserwacja stwierdzająca, że korelacja stężenia O₂ w glebie i jej

wilgotności ulega odwróceniu z ujemnej na dodatnią, gdy istnieje dopływ CO_2 , może być przydatna do identyfikacji wycieku CO_2 .

1.2. Przegląd wyników badań w Polsce

W Polsce badania stężenia i przepływu CO_2 w powietrzu glebowym były prowadzone w obszarach występowania szczaw i wód kwasowęglowych. Wykonano je w celu oceny racjonalnej gospodarki wodami mineralnymi jak również określenia ewentualnego zagrożenia dla ludzi, spowodowanego wyciekami tego gazu. Zostały one przeprowadzone na obszarach naturalnych wycieków CO_2 (Sudety – rejon Kotliny Kłodzkiej, Karpaty – rejon Krynicy) (Ciężkowski red. 2002; Żak, Przylibski i Ciężkowski 2008). Wyniki badań stężenia CO_2 w powietrzu glebowym dla obszaru likwidowanych kopalń węgla kamiennego w Wałbrzyskim Zagłębiu Węglowym przedstawili Dzieńiewicz i in. (2002a,b), Kotarba i in. (2002).

Od 2004 roku, w Pracowni Geotechnologii IGSMiE PAN prowadzone są badania dotyczące monitoringu składowania dwutlenku węgla. Dotyczą one biomonitoringu wycieków CO_2 z wykorzystaniem bakterii (Tarkowski, Królik 2005; Tarkowski, Królik, Uliasz-Misiak i Wdowin, 2008a; Tarkowski, Barabasz, Królik i Uliasz-Misiak 2008b; Tarkowski, Królik, Uliasz-Misiak i Barabasz 2009; Uliasz-Misiak red. 2006), badań stężenia CO_2 w powietrzu glebowym dla potrzeb monitoringu składowania CO_2 (Tarkowski Uliasz-Misiak, Wdowin i Batkiewicz 2010; Tarkowski, Luboń i Wdowin 2012a) oraz na obszarach naturalnych wycieków tego gazu (Tarkowski, Sroczyński, Luboń i Wdowin 2012b). We wszystkich tych przypadkach, jednym z celów było ustalenie tła stężenia CO_2 (monitoring zerowy) na obszarach potencjalnych podziemnych składowisk i/lub wpływu egzogenicznego dwutlenku węgla.

Tarkowski i in. (2008a, 2010) przedstawili wyniki pomiarów stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym na obszarze złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara k. Tarnowa. Badania wykonano w 25 punktach pomiarowych wokół dwóch otworów produkujących ropę naftową oraz przy drodze pomiędzy nimi, w 12 seriach pomiarowych. Zaobserwowano zmienność stężenia tego gazu w zależności od pory roku oraz lokalizacji punktu pomiarowego. Najmniejsze wartości odnotowano jesienią, nieco wyższe na wiosnę, najwyższe zaś w okresie letnim (zimę nie prowadzono pomiarów). W pobliżu otworów wydobywczych stwierdzono podwyższone koncentracje dwutlenku węgla. Wyniki pomiarów często przekraczały 1% dochodząc do 5%, co znacznie odbiega od wyników z innych obszarów Polski (poniżej 0,5%). Zmienne stężenie gazu zinterpretowano aktywnością biologiczną gleby oraz innymi naturalnymi czynnikami. Porównując wyniki uzyskane z poszczególnych lat zauważono ich powtarzalność. Otrzymane rezultaty można traktować jako tło tego gazu na badanym obszarze.

Tarkowski i in. (2012a) opisali zbudowaną w IGSMiE PAN aparaturę do ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym oraz przedstawili wyniki pomiarów z pierwszych 3 miesięcy jej działania na terenie złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara. Badania potwierdziły, że istnieje zależność stężenia tego gazu w powietrzu podglebowym od pory

roku. Wskazano, że w celu określenia tła CO_2 , w miejscu monitoringu wskazane są przy najmniej 1–2 letnie pomiary przy wykorzystaniu czujników rozmieszczonych w pobliżu potencjalnych miejsc wycieku. Podkreślono, że uzyskane doświadczenie może być pomocne w zbudowaniu efektywnego systemu służącego do monitoringu na obszarze planowanych składowisk dwutlenku węgla.

Tarkowski i in. (2012b) przedstawili wstępne wyniki ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu glebowym na stanowisku w Szczawnicy. Obejmowały one cykl roczny i zostały przeprowadzone z użyciem własnej aparatury. Celem badań było stworzenie wzorca uwzględniającego wpływ warunków położenia i zmienności pogodowej na wyniki pomiarów. Podstawą dla takiego wzorca były klimatyczne pory roku. Stwierdzono, że pojedynczy cykl roczny jest niewystarczający do miarodajnego ustalenia wzorca tła stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym, a wpływ krótkotrwałych zmian warunków pogodowych jest mało znaczący.

2. Rola gleby w bilansie CO₂

Rozważając obecność CO₂ w powietrzu glebowym/podglebowym należy uwzględnić rolę gleby w bilansie tego gazu. Chociaż w przypadku prezentowanych w monografii wyników pomiarów stężenia CO₂ nie jest ona tak istotna (pomiar stężenia był prowadzony dużo poniżej słabo wykształconej gleby, raczej rumoszu skalnego) nie można bagatelizować jego wpływu (np. oddychanie korzeniowe). Problematyka składu powietrza glebowego jest obecna w kilku polskojęzycznych podręcznikach gleboznawstwa (Bednarek i in. 2011; Hillel 2012; Kowalik 2001; Mocek 2015; Uggla 1976; Zawadzki 1999) w których podkreśla się, że gleba odgrywa istotną rolę w globalnej wymianie gazów i wpływa na skład atmosfery.

Stężenie CO₂ w atmosferze w ciągu ostatnich dwóch stuleci zwiększyło się ponad 35%, od 275 do około 385 ppmv i rocznie zwiększa się o 1,5 ppmv (ok. 0,4%). Istotnym źródłem emisji CO₂ (również i innych gazów cieplarnianych) jest gleba. Ocenia się, że ilość węgla organicznego nagromadzonego w glebach na świecie oraz w roślinach lądowych jest większa od ilości węgla w atmosferze jako CO₂. Jeszcze więcej znajduje się w postaci związków mineralnych (kalcyt i dolomit) często obecnych w glebie. W dobrze napowietrzonych glebach drobnoustroje tlenowe utleniają węgiel organiczny do CO₂, który następnie wraca do atmosfery. Według obliczeń sprzed 1960 r. emisja CO₂ z gleb i roślinności do atmosfery była wtedy większa niż emisja pochodząca ze spalania paliw kopalnych. Obecnie emisja netto z samej tylko gleby sięga około 0,5 mld ton rocznie, a zawartość węgla w atmosferze w postaci CO₂ spowodowaną wylesieniem oraz uprawianiem ziemi szacuje się na 1,5 mld ton rocznie, co stanowi prawie 22% całkowitej emisji antropogenicznej ocenianej na 7 mld ton rocznie (Hillel 2012).

Hillel (2012) podkreśla rolę gleby w łagodzeniu efektu cieplarnianego. Zwraca uwagę, że całkowita zawartość węgla w glebie jest ponad trzy razy wyższa od jego zawartości w atmosferze. Obecne zasoby węgla organicznego w glebach świata szacuje się na 1 500 Gt (do głębokości 1 m) i 2 400 Gt (do głębokości 2 m). Jest to porównywalne z zasobem atmosferycznym wynoszącym ok. 750 Gt, lądowo-biotycznym (głównie wegetacyjnym) ok. 560 Gt i znacznie większym zasobem oceanicznym wynoszącym ok. 5 000 Gt.

Zapas węgla w glebie jest zmienny i może być zwiększony przez absorpcję netto z atmosfery lub zmniejszony przez emisję netto do atmosfery. W glebach napowietrzonych materia organiczna utlenia się i wydziela CO₂. Rozkład materii organicznej przyspiesza wyższa temperatura, co powoduje również zwiększoną emisję CO₂ do atmosfery. Obecnie uwalnia-

nie CO₂ do atmosfery w wyniku deforestacji i użytkowania gruntów wynosi ok. 1,5 mld ton rocznie, co stanowi ok. 50% całkowitego CO₂ uwalnianego do atmosfery, a emisja z procesu oddychania biomasy, rozkład i wypalanie stanowią pozostałe 50%. Większość emitowanego CO₂ pobierają rezerwuary węgla, takie jak rośliny gruntowe i biota oceaniczna (Hillel 2012). Należy pamiętać, że wieloletnia zmarzlina przetrzymuje dużą ilość nierozłożonej materii organicznej, która zawiera ok. 1/4, a może nawet 1/3 całego węgla organicznego występującego w glebie. Na Syberii, w Skandynawii i w Kanadzie, na wysokich szerokościach geograficznych, występują wielometrowe pokłady torfu, których rozmarzanie powoduje obecnie uwolnienie dużych ilości gazów cieplarnianych, w tym metanu i dwutlenku węgla (Hillel 2012).

Źródłem powietrza glebowego jest powietrze atmosferyczne, które przenika do gleby m.in. wraz z wodą opadową oraz drogą dyfuzji. Jakościowy skład powietrza glebowego jest często podobny do składu powietrza atmosferycznego (zawartość CO₂ w powietrzu atmosferycznym wynosi zwykle ok. 0,03%). Gleba jest środowiskiem nieustannego wiązania tlenu i tworzenia dwutlenku węgla. Korzenie roślinne zużywają znaczne ilości tlenu w procesie oddychania. Działalność drobnoustrojów powoduje zużywanie tlenu na procesy rozkładu substancji organicznej, a produktem jest zwykle dwutlenek węgla. Duże ilości CO₂ dyfundują z gleby do atmosfery, podobnie jak duża ilość tlenu dyfunduje do gleby (Bednarek i in. 2011; Kowalik 2001). Bednarek i in. (2011) omawiając oddychanie gleby wskazują, że mierząc ilość uwalnianego CO₂ i dynamikę tego procesu można ustalić zarówno charakterystykę ilościową, jak i przebieg mineralizacji w czasie. Podkreślają, że część CO₂ wydzielanego z gleby pochodzi z oddychania korzeniowego, którego udział w całkowitej ilości CO₂ wydzielonego z gleby stanowi około 10%.

Kowalik (2001) wskazuje, że respiracja tlenu przez korzenie i mikroorganizmy zmienia się w zależności od temperatury (tzw. wskaźnik aktywności mikrobiologicznej gleby). I tak np. przy podwyższeniu temperatury z 5 do 10°C wartość tego wskaźnika wzrasta o 11% na każdy 1°C, przy zmianie 10 do 20°C wzrasta o 6,7%. Latem poziom próchniczny gleby pobiera kilka razy więcej tlenu niż ten sam poziom w okresie wiosny lub jesieni. Według Zawadzkiego (1999) pewnych ilości CO₂ dostarczają wybuchy wulkanów, spalanie węgla, torfu, drewna itd. Jednak najważniejszym procesem uzupełniającym zasoby CO₂ jest rozkład materii organicznej powodowany przez mikroorganizmy (bakterie, grzyby). W warunkach aerobowych powstają głównie: H₂O, CO₂, NO_x, SO₂, a w anaerobowych: CH₄, NH₃, H₂S. Zawartość i zasoby materii organicznej w glebach, pośrednio dwutlenku węgla, zależą od wielu czynników środowiskowych i antropogenicznych. Najważniejsze czynniki siedliskowe to: klimat, ukształtowanie terenu, typ gleby, skała macierzysta oraz sposób użytkowania gleby (Mocek 2015).

3. Charakterystyka obszaru badań

3.1. Położenie geograficzne i klimat

Rejon Szczawnicy leży w megaregionie Karpaty, prowincji zachodniokarpackiej, w Zewnętrznych Karpatach Zachodnich, w mezoregionie Beskid Sądecki, u zbiegu mezoregionów: Kotliny Orawsko-Nowotarskiej, pasma Pienin (Centralne Karpaty Zachodnie) oraz pasma Gorców i Beskidu Sądeckiego (Zewnętrzne Karpaty Zachodnie) (Kondracki 2014). Ten ostatni rozpościera się pomiędzy Doliną Dunajca na zachodzie a dolinami Kamienicy, Przełęczą Tylicką na dziale wodnym bałtycko-czarnomorskim. Od Pienin oddziela go dolina Grajcarka.

Szczawnica-Zdrój to uzdrowisko górskie położone w kotlinie, u podnóża Pienin i pasma Małych Pienin, na południowych zboczach doliny potoku Grajcarek. Leży na wysokości 440–520 m n.p.m. Przez centrum miejscowości przepływają: Biały Potok, Potok Czarny łączące się w Potok Skotnicki. Ten ostatni łączy się z potokiem Grajcarek, który ok. 2 km niżej uchodzi do Dunajca (u wylotu Przełomu Pienińskiego).

Obszar ten mieści się w obrębie regionu klimatu górskiego bogatego w opady z dominującym wpływem wysokości, objawiającym się piętrowym zróżnicowaniu klimatu. W zależności od wysokości, średnia temperatura roczna waha się od 4 do 6°C. Średnie roczne sumy opadów atmosferycznych wykazują zależność od rzeźby terenu i wysokości nad poziom morza. Średnia suma opadów rocznych z wielolecia 1956–1980 wynosiła 863 mm. Obszar ten obejmuje arkusz mapy geologicznej i hydrogeologicznej Szczawnica-Krościenko w skali 1:50 000 i należy do zlewni Morza Bałtyckiego, odwadniany jest przez Dunajec i jego dopływy (Chowaniec i Witek 1997).

3.2. Uwarunkowania geologiczne

Budowa geologiczna

Pod względem geologicznym teren badań znajduje się na pograniczu zewnętrznych Karpat fliszowych i Karpat wewnętrznych, oddzielonych pienińskim pasem skałkowym. Obejmuje on arkusz Szczawnica-Krościenko Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1: 50 000, a zdjęcie geologiczne osadów czwartorzędowych wykonał dla całego arkusza

Rączkowski (Kulka i in. 1991). Mapę hydrogeologiczną Polski w skali 1:50 000 – arkusz Szczawnica-Krościenko – opracowali Chowaniec i Witek (1997). Geologia była przedmiotem badań: Birkenmajera (1965, 1979, 1986) oraz innych, a analiza wód mineralnych tego rejonu została ostatnio przedstawiona przez Rajchel (2012).

Okolice Szczawnicy budują utwory fliszowe wieku trzeciorzędowego reprezentowane przez osady wieku paleogeńskiego oraz przez utwory czwartorzędowe. Tektonika tego obszaru jest skomplikowana. Utwory geologiczne są silnie zaburzone tektonicznie, szczególnie przy granicy z pienińskim pasem skałkowym (PPS). Główne jednostki geologiczne mają przebieg zbliżony do równoleżnikowego. Teren ten leży w strefie aktywnej sejsmicznej. Trzęsienia ziemi o intensywności do 7^o MSC notowane są z rejonu Niedzicy, a obecnie obserwuje się wypiętrzenie PPS między Nowym Targiem a Czorsztynem z prędkością + 0,5 mm/rok (Kulka i in. 1991).

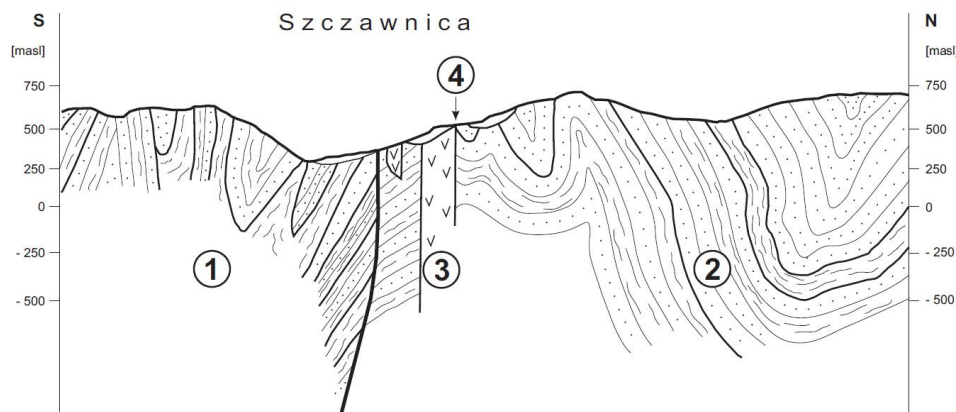
Obszar wspomnianego arkusza położony jest w obrębie karpackiego regionu hydrogeologicznego, a na całym obszarze zaznacza się zależność zawodnienia od morfologii terenu, wykształcenia litologicznego, tektoniki skał i pokrycia szatą roślinną. Wydzielono tu dwa poziomy wodonośne związane z utworami czwartorzędowymi doliny Dunajca oraz trzeciorzędowymi (piaskowców magurskich, podmagurskich, szczawnickich, szaflarskich i chochołowskich) (Chowaniec i Witek 1997). Wody podziemne związane są z utworami czwartorzędowymi akumulacji rzecznej (lokalnie z koluwiami osuwiskowymi i glinami zwietrzelinowymi), utworami fliszowymi niecki Podhala i płaszczowiny magurskiej oraz z utworami pienińskiego pasa skałkowego (Kulka i in. 1991).

Wulkanizm jest wieku trzeciorzędowego (neogeńskiego). Andezyty występują na tym obszarze na dużą skalę, tworzą sille i dajki, znane są od dawna i wielokrotnie opisywane (andezyty amfibolitowe i amfibolitowo-augitowe). Występują one w utworach serii magurskiej, przy granicy z PPS. Starsze intruzje mają rozciągłość głównie równoleżnikową, natomiast młodsze NWW-SEE. Wyróżniane są dwa odrębne skupienia intruzji andezytowych. Wschodnie o rozciągłości WNW-ESE znajduje się pomiędzy Krościenkiem a Szczawnicą (Birkenmajer 1979).

W profilu geologicznym tego obszaru reprezentowane są utwory od jury dolnej po oligocen i od pliocenu po czwartorzęd. Piętro starsze obejmuje sfałdowane osady morskie geosynkliny karpackiej, piętro młodsze – pokrywowe osady słodkowodne pliocenских kotlin śródgórskich oraz osady czwartorzędowe różnej genezy (Kulka i in. 1991). Schemat podziału utworów jurajskich i kredowych na serie skałkowe, szczegółową stratygrafię osadów skałkowych wraz z formalnymi jednostkami stratygraficznymi przedstawił Birkenmajer (1979, 1986 red.).

Na północ od PPS, na bezpośrednim obszarze badań, występują osady fliszu wieku paleocen-eocen serii magurskiej jednostki krynickiej. Są to (Kulka i in. 1991):

- łupki, piaskowce cienko- i średnioławicowe z wkładkami piaskowców gruboławicowych (warstwy szczawnickie (ropianieckie), paleocen-eocen),
- piaskowce cienko- i średnioławicowe, łupki ilaste, mułowce i łupki margliste (warstwy podmagurskie, eocen),



Rys. 1. Przekrój geologiczny S-N przez okolice Szczawnicy
 Objasnienia: 1 – utwory pieniniego pasa skalnego, 2 – utwory fliszu karpackiego (płaszczowina magurska),
 3 – intruzje andezytu, 4 – rejon prezentowanych badań
 Na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz 1050 Szczawnica-Krośnice
 (uproszczone)

Fig. 1. Geological cross-section S-N in the Szczawnica region

- piaskowce gruboławicowe, łupki, wkładki zlepieńców, lokalnie wkładki margli (warstwy z Frydmana – piaskowce z Piwnicznej, eocen),
- łupki i piaskowce średnio- i cienkoławicowe z wkładkami piaskowców gruboławicowych (warstwy z Kowańca, eocen),
- piaskowce gruboławicowe i łupki z wkładkami łupków pstrych (warstwy magurskie, eocen).

Utwory czwartorzędowe reprezentują: gliny, gliny z rumoszem skalnym, gruz skalny, utwory koluwalne.

Wody mineralne oraz endogeniczny CO₂

Występujące na tym obszarze wody mineralne zawierają dwutlenek węgla (szczawy i wody kwasowęglowe), co jest związane są z budową geologiczną silnie zdeformowanej strefy płaszczowiny magurskiej. Ich chemizm jest kształtowany przez charakter litologiczny skał, głównie obecność intruzji andezytowych (sille i dajki wieku neogeńskiego) (Birkenmajer 1965, 1992, 1996; Birkenmajer red. 1986; Rajchel 2012). Historia odkrycia i eksploatacji wód mineralnych została opisana przez Birkenmajera (1963) oraz Rajchel (2012).

Lecznicze wody mineralne typu szczawy w Szczawnicy-Zdroju udostępnione są przez cztery źródła i sześć odwiertów o głębokości 7,4 do 32,8 m. Na obszarze uzdrowiska szczawy i wody kwasowęglowe wyprowadzają źródła: Magdalena, Szymon, Wanda, Wójcikówka, a także udostępniają je płytkie odwierty: Stefan, Józefina, Józef (B-4), Jan, Pitoniakówka BCDG i Pitoniakówka F. Wody ujęto w warstwach szczawnickich lub na kontakcie warstw szczawnickich z andezytem. Mineralizacja wód wynosi 1,2 g/dm³ do 21,9 g/dm³, a składnikiem swoistym wszystkich wód jest CO₂ – 550–2 259 mg/dm³. Typ hydrochemiczny wód

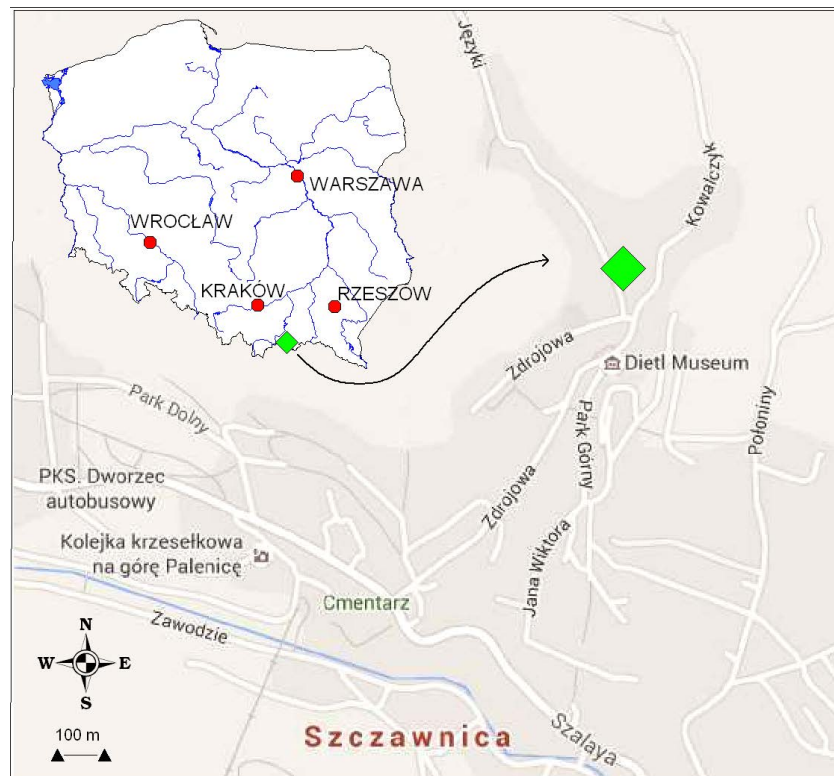
jest $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na+CO}_2\text{+(I)}$. Zakres zawartości głównych jonów i CO_2 oraz mineralizacja w szczawach i wodach kwasowęglowych z Krościenka i Szczawnicy przedstawia się następująco: HCO_3^- – 717–9167 mg/dm³; Cl^- – 145–2606 mg/dm³; SO_4^{2-} – 2,0–132 mg/dm³; Ca^{2+} – 54,1–355 mg/dm³; Na^+ – 247,7–6152 mg/dm³; Mg^{2+} – 23,1–223,3 mg/dm³; CO_2 – 550–2259 mg/dm³ (Rajchel 2012). Wiek szczaw i wód kwasowęglowych karpackich szczaw fliszowych jest zróżnicowany. Są to wody infiltracyjne (meteoryczne), natomiast te ujęte otworami są przeważnie holoceni. Wody mineralne są wykorzystywane w balneoterapii w sanatoriach uzdrowiskowych oraz są dostępne w pijalni, a także w punktach czerpalnych przy źródłach (Rajchel i in. 2003).

Geneza gazowego dwutlenku węgla występującego w szczawach i wodach kwasowęglowych Szczawnicy (również i Karpat) jest dyskusyjna i nie jest do końca jednoznaczna. Wypowiadali się na ten temat licznie autorzy: L. Zejszner, H. Świdziński, H. Ostrowicka, J. Chrzastowski, K. Bogacz, S. Węclawik, J. Dowgiałło, J. Lis, S. Hałas, P.M. Leśniak, W. Ciężkowski i inni (por. Rajchel 2012). Rajchel (2012) proponuje przyjąć uniwersalną subdukcyjną kwalifikację genezy CO_2 . Najpierw przemieszcza się on w strefie subdukcji pionowo ku powierzchni, a następnie jest rozprowadzany poziomo siecią tektoniki nieciągłej. W obecnie formułowanych hipotezach dotyczących genezy CO_2 , na obszarach występowania szczaw w orogene Karpat, podkreślany jest jego związek z procesami wulkanicznymi lub dopływem z głębi Ziemi z wykorzystaniem głębokich rozłamów (Rajchel 2012).

4. Aparatura pomiarowa oraz metodyka prowadzenia pomiarów

4.1. Aparatura pomiarowa i jej lokalizacja

Instalacja do ciągłego pomiaru i rejestracji stężenia CO_2 w powietrzu glebowym została zainstalowana na terenie miasta Szczawnica-Zdrój, blisko centrum uzdrowiska (rys. 2).

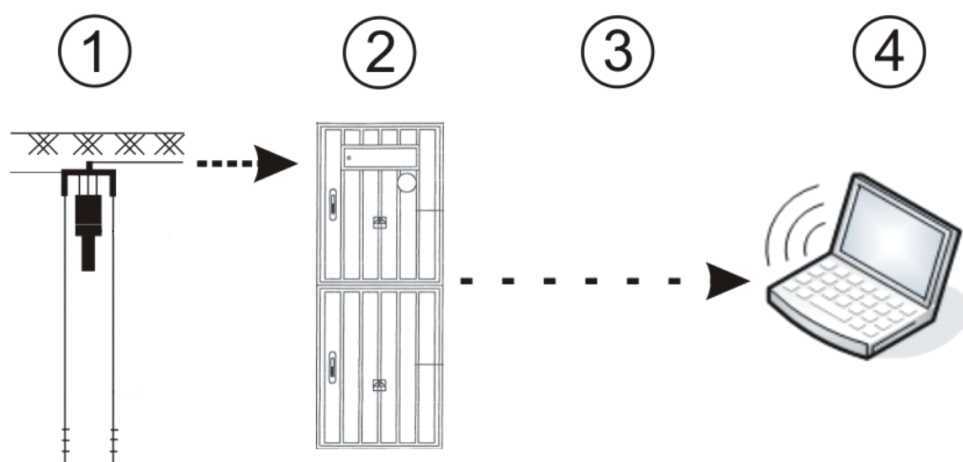


◆ ◆ teren badań

Rys. 2. Lokalizacja instalacji do ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu glebowym.
Opracowanie własne

Fig. 2. Location of the installation for continuous measurement of CO_2 concentration in soil air

Aparatura do ciągłego pomiaru i rejestracji stężenia CO_2 w powietrzu glebowym zainstalowana na terenie Uzdrowiska Szczawnica-Zdrój składa się z trzech podstawowych elementów: układu pomiarowego umieszczonego płytko pod powierzchnią ziemi, rejestratora wyników pomiarów stężenia CO_2 (na terenie badań) oraz oprogramowania komputerowego mieszczącego się w centrum pomiarowym w IGSMiE PAN w Krakowie (rys. 3). Rejestrator wyników posiada łącze telemetryczne umożliwiające bezpośrednią transmisję danych z rejestratora do komputera znajdującego się w odległym centrum pomiarowym (IGSMiE PAN w Krakowie). Pomiar stężenia CO_2 dokonywany był w sposób ciągły, natomiast rejestracja odbywała się z zaprogramowaną częstotliwością co 2 minuty.



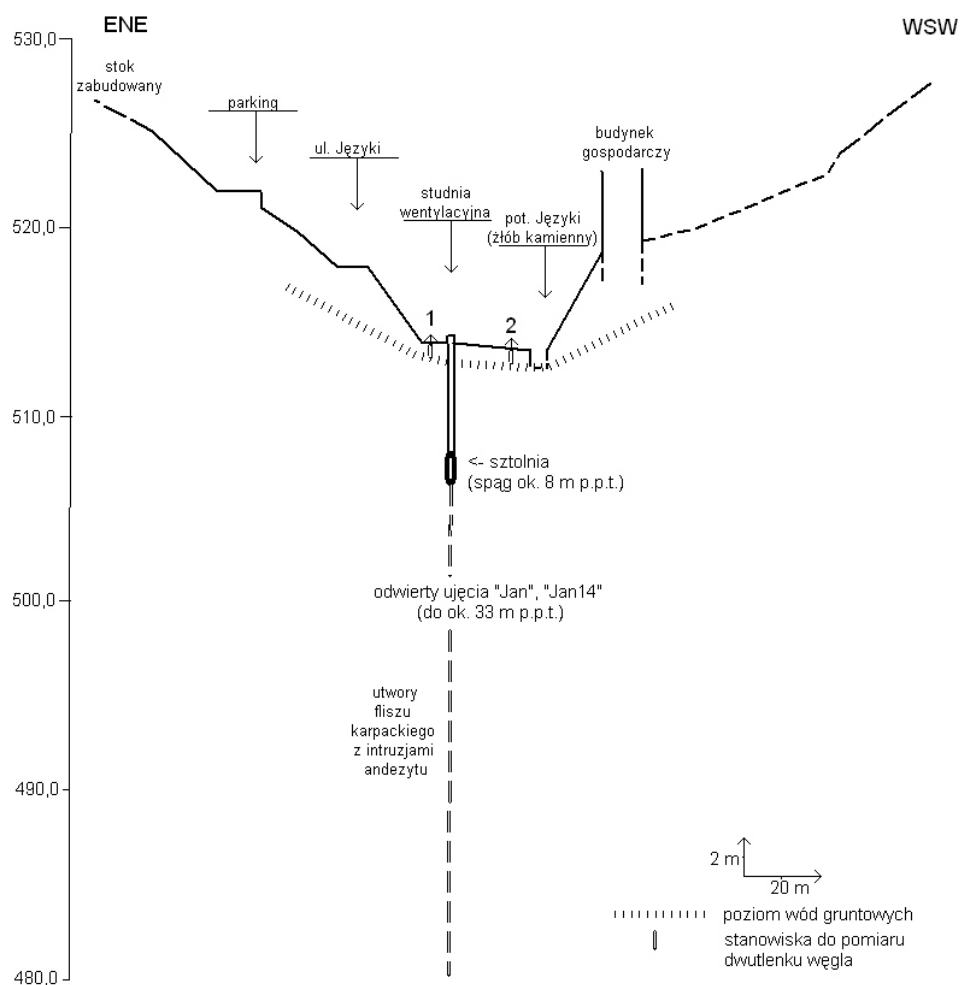
Rys. 3. Schemat aparatury badawczej do ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu glebowym
 1 – sonda pomiarowa zabudowana pod powierzchnią ziemi, 2 – skrzynka pomiarowa z wbudowanym rejestratorem pomiarów oraz modemem do przesyłu danych, 3 – łącze telemetryczne GPRS, 4 – komputer z modemem, do którego na bieżąco przesyłane są wyniki pomiarów.
 Opracowanie własne

Fig. 3. Schematic diagram of the research equipment for continuous measurement of CO_2 concentration in soil air

Stacja pomiarowa CO_2 położona jest na wysokości ok. 514 m n.p.m., w dnie lokalnej dolinki potoku Języki, o południowej ekspozycji. W płytkim podłożu – do ok. 1–2 m p.p.t. zalegają grunty nasypowe, przemieszczone, pochodzenia miejscowego, a w podłożu utwory fliszu karpackiego. 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. (506,22 m 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, została wykonana tutaj sztolnia o długości około 200 m, w celu ujęcia wody mineralnej, a przy jej końcu znajduje się studnia wentylacyjna. Sama sztolnia ma murowaną szczelną obudowę, dlatego nie powinno dochodzić do uwalniania z niej dwutlenku węgla do gruntu.

1 – studzienka wentylacyjna nad ujęciem wody mineralnej Jan, 2 – budynek gospodarczy PUS Szczawnica, gdzie zainstalowano rejestrator pomiarów, PP1-PP4 – sondy pomiarowe.

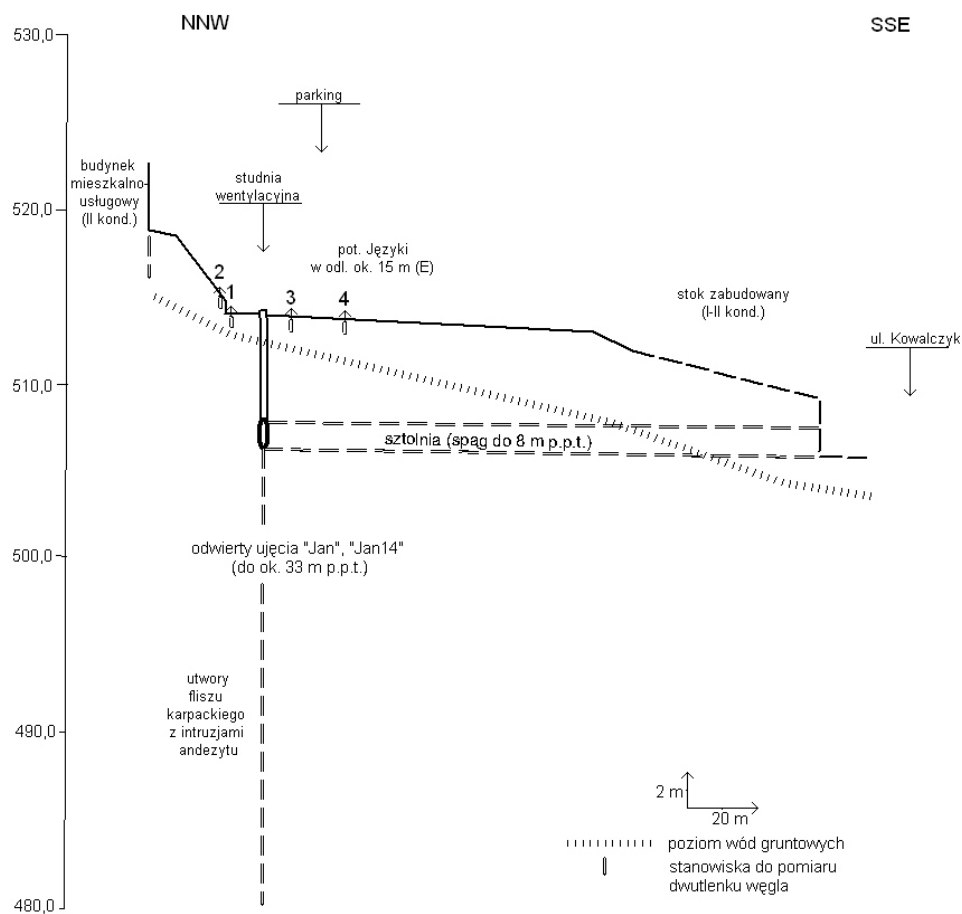
Fig. 4. Location of the measuring probes



Rys. 5. Schematyczny przekrój poprzeczny przez dolinę potoku Języki w Szczawnicy, w rejonie ujęcia wody mineralnej Jan (przewyższenie 5x).
Opracowanie własne

Fig. 5. Schematic cross-section across the Języki stream valley in Szczawnica near the Jan mineral water intake (vertical exaggeration 5x)

Występowanie endogenicznego dwutlenku węgla jest tutaj ściśle związane z wystąpieniami szczaw. CO_2 pochodzi niewątpliwie z głębi ziemi, natomiast geneza wód mineralnych jest złożona (por. Rajchel 2012). Na podstawie przesłanek geologicznych trudno jednoznacznie rozstrzygnąć, czy endogeniczny CO_2 może docierać do powierzchni, i w jakiej ilości. 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. 6. Schematyczny przekrój podłużny przez dolinę potoku Języki w Szczawnicy, w rejonie ujęcia wody mineralnej Jan (przewyższenie 5x).
Opracowanie własne

Fig. 6. Schematic cross-section across the Języki stream valley in Szczawnica near the Jan mineral water intake (vertical exaggeration 5x)

Układ mierzący stężenie CO_2 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.

4.2. Konstrukcja sond pomiarowych

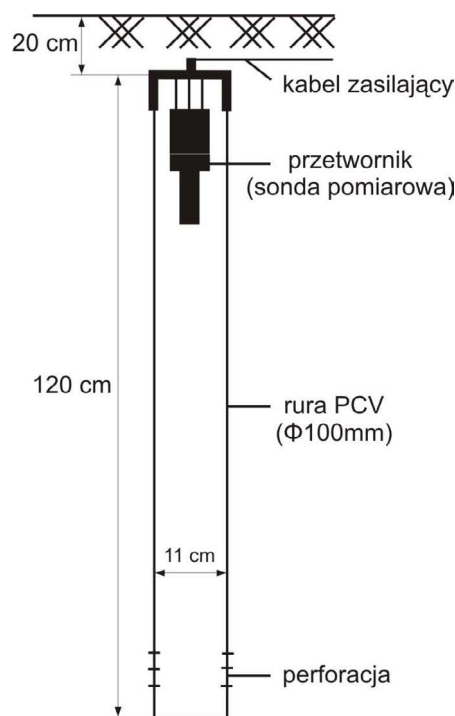
W latach 2008–2009 firma METRONIC SYSTEMS na zamówienie IGSMiE PAN opracowała i wykonała układ do ciągłego pomiaru i rejestracji koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym. Instalacja ta najpierw została zamontowana na terenie złoża ropy naftowej Jastrząbka Stara, na okres 3 miesięcy od maja do sierpnia 2009 roku, a następnie przeniesiona na nowe miejsce, na obszarze Przedsiębiorstwa „Uzdrowisko Szczawnica” w Szczawnicy (rys. 7).



Rys. 7. Ogólny widok stanowiska do pomiarów stężenia CO_2 w powietrzu glebowym nad ujęciem wody mineralnej Jan w Szczawnicy-Zdroju.
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN

Fig. 7. General view of a measuring site for CO_2 concentration measurement in soil air located upslope from the Jan mineral water intake in Szczawnica-Zdrój

Układ pomiarowy w terenie składa się z czterech przetworników (sond pomiarowych) (rys. 8, rys. 9) do pomiaru koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym, w zakresie 0–20%, gdzie ich część zasilająca umieszczona jest w hermetycznej obudowie. Przetworniki umieszczono w odwiertach o głębokości ok. 1,4 m, zabezpieczonych rurami PCV, perforowanymi od dołu na długości 30 cm. Część górna otworu została uszczelniona i przysypana 20-centymetrową warstwą gleby, w celu odizolowania otworu od kontaktu z powietrzem



Rys. 8. Schemat sondy pomiarowej i zabudowy sondy.
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN

Fig. 8. Schematic diagram of the measuring probe and its casing

atmosferycznym i zabezpieczenia przed zniszczeniem. Cztery takie zestawy pomiarowe zostały rozmieszczone wokół studni Jan na terenie górniczym Przedsiębiorstwa Uzdrawiska Szczawnica w Szczawnicy.

Zamontowane przetworniki zasilane są niskim napięciem 24V, bezpośrednio ze skanera pomiarowego i pracują w systemie linii dwuprzewodowej 4–20 mA. Przetworniki CO₂ zostały połączone kablami sygnałowymi z rejestratorem wyników i modemem. Te ostatnie elementy zostały zainstalowane pod zadaszeniem, w oddzielnej skrzynce pomiarowej przytwierdzonej do ściany pobliskiego budynku (rys. 10, rys. 11). Rejestrator znajdujący się w skrzynce pomiarowej pozwala na bieżące wyświetlanie wyników pomiarów koncentracji CO₂ oraz archiwizowanie danych na karcie pamięci, umieszczonej w mechanizmie rejestratora.

Oprócz tego, 31 maja 2010 r. zostały zamontowane w instalacji dodatkowe czujniki umożliwiające pomiar stężenia CO₂, temperatury, ciśnienia oraz wilgotności w powietrzu atmosferycznym na tym terenie. Znajdują się one wewnątrz tej samej skrzynki pomiarowej.

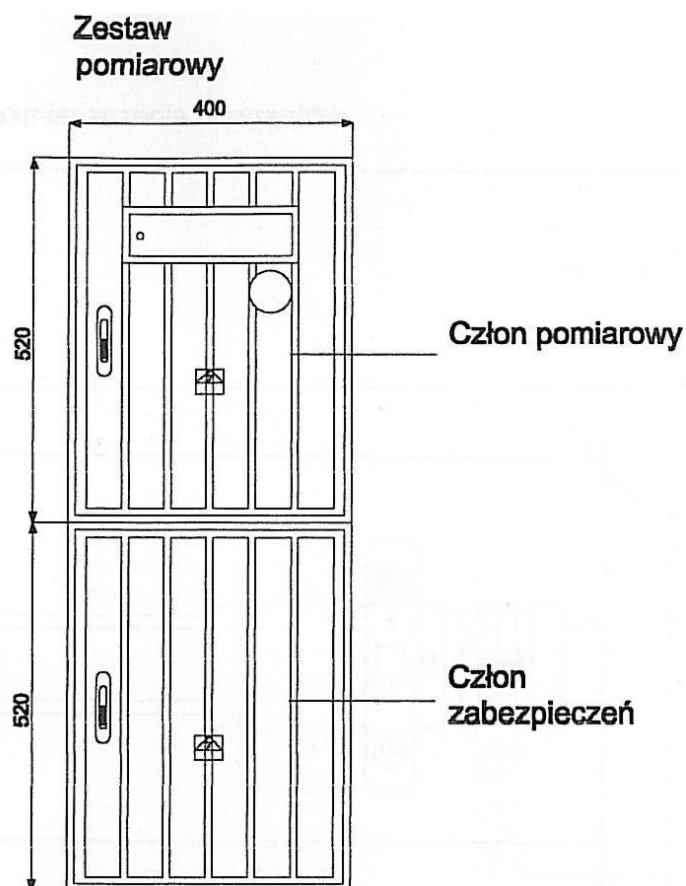


Rys. 9. Fotografia sondy pomiarowej i zabudowy sondy.
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN

Fig. 9. Photo of the measuring probe and its casing

4.3. Warunki klimatyczne i pogodowe

Jednocześnie z wykonywaniem pomiarów CO_2 prowadzone były pomiary meteorologiczne. Pomiary własne, bezpośrednio na stacji pomiarowej (od 31 maja 2010 r.), obejmowały: temperaturę, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza oraz stężenie CO_2 w powietrzu atmosferycznym. Dysponowano także danymi meteorologicznymi udostępnionymi przez PUS w Szczawnicy, w zakresie obejmującym: temperaturę, ciśnienie, opad oraz informacje o zaleganiu pokrywy śnieżnej.



Rys. 10. Schemat zestawu pomiarowego zabudowanego w skrzynce pomiarowej.
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN

Fig. 10. Schematic diagram of the measuring set encased in a measuring box

Według Atlasu klimatu Polski (IMGW 2005) dla rejonu Szczawnicy średnia roczna temperatura zawiera się w przedziale $6,5\text{--}7^{\circ}\text{C}$, a opady – w przedziale 800–900 mm (wielkości wyliczone dla wielolecia 1971–2000). Ostatnia dekada XX w. (1991–2000) była zauważalnie cieplejsza, ze średnią roczną temperaturą w przedziale $7\text{--}7,5^{\circ}\text{C}$.

Do oceny sezonowej zmienności termicznej i opadowej posłużono się danymi IMGW publikowanymi w Biuletynach monitoringu klimatu Polski (2010, 2011, 2012, 2013, 2014). Klasyfikacja warunków termicznych jest tam dokonywana na podstawie metody zaproponowanej w pracy Miętusa, Owczarka i Filipiaka (2002).

Na podstawie przebiegu średniej dobowej temperatury powietrza wyznaczono dla Szczawnicy termiczne (klimatyczne) pory roku. Wyodrębniono 6 pór (sezonów) termicznych, którym odpowiadają następujące progi przedziałów temperatury:



Rys. 11. Zestaw pomiarowy zabudowany w skrzynce pomiarowej: ujęcie z boku (u góry) oraz z przodu (u dołu), z dodatkowymi czujnikami (u dołu po prawej).
Pracownia Geotechnologii IGSMiE PAN

Fig. 11. The measuring set encased in a measuring box: side view (upper) and front view (lower), with additional sensors (lower right)

- przedzimie – temperatura 5,0–0,0°,
- zima – temperatura <0,0°C,
- przedwiośnie – temperatura 0,0–5,0°,
- wiosna – temperatura 5,1–15,0°C,
- lato – temperatura >15,0°C,
- jesień – temperatura 15,0–5,1°C.

Do wyznaczenia termicznych pór roku wykorzystano metodykę stosowaną w ramach zintegrowanego monitoringu środowiska przyrodniczego w Polsce (Bochenek 2014), wzorowaną na metodyce Makowca (1983). W tym zakresie korzystano z pomocy pracowników Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Szymbarku (stacja bazowa 10ZM, kierownik dr Witold Bochenek).

Podział analizowanego okresu pomiarowego na termiczne pory roku (sezony klimatyczne) podano w tabeli 1. W okresie jesienno-zimowo-wiosennym 2013–2014 r. nie wyodrębniono termicznej zimy. Pora przedzimia przechodziła bezpośrednio w porę przedwiośnia.

Ogólna charakterystyka termiczno-opadowa pięciolecia 2010–2014

Z uwagi na średnią temperaturę oraz wielkość opadów pięcioletni okres pomiarów stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na stanowisku w Szczawnicy można najbardziej ogólnie scharakteryzować następująco:

- rok 2010 – chłodny, o wyraźnie zwiększonej rocznej sumie opadów,
- rok 2011 – bardzo ciepły, o nieznacznie zmniejszonej rocznej sumie opadów,
- rok 2012 – ciepły, o nieznacznie zmniejszonej rocznej sumie opadów,
- rok 2013 – ciepły, o nieznacznie zmniejszonej rocznej sumie opadów,
- rok 2014 – ekstremalnie ciepły, z opadami nieznacznie większymi od przeciętnych.

W powyższej ocenie w odniesieniu do temperatur posłużono się klasyfikacją termiczną na podstawie średniej obszarowej temperatury powietrza dla regionu 7 – Karpaty, w 11-stopniowej skali względnej (Miętus, Owczarek, Filipiak 2002); w odniesieniu do opadów – oszacowaniem anomalii sumy opadu w porównaniu do wielolecia 1971–2000, dla okolic Szczawnicy (Biuletyn monitoringu klimatu Polski za lata 2010–2014).

Rok pomiarowy 2010

Pomiary rozpoczęto 1 listopada 2009 r, tak aby objąć nimi cały rok hydrologiczny 2010 i cały sezon zimowy. Listopad 2009 r. był anormalnie ciepły, grudzień – normalny.

Rok kalendarzowy 2010 odznaczał się średnią temperaturą roczną niższą od przeciętnej – 7,5°C (wg danych PUS Szczawnica). Według danych IMGW (Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2010) rok ten został zakwalifikowany jako chłodny, odznaczający się na obszarze karpackim średnią temperaturą niższą od przeciętnej o blisko 0,5°C. Poszczególne miesiące roku pomiarowego zostały zakwalifikowane następująco: styczeń był anormalnie chłodny, luty i marzec normalne, kwiecień ciepły, maj – normalny, czerwiec – bardzo ciepły, lipiec i sierpień ekstremalnie ciepłe, wrzesień chłodny, październik ekstremalnie chłodny, listopad ekstremalnie ciepły, grudzień ekstremalnie chłodny.

Tabela 1

Wyróżnienie termicznych pór roku dla analizowanego okresu pomiarowego

Table 1

Thermal seasons of the year during the measurement period analysed

Od	Do	Termiczna pora roku	Liczba dni
1 listopada 2009	12 grudnia 2009	przedzimyie	42
13 grudnia 2009	2 marca 2010	zima	80
3 marca 2010	30 marca 2010	przedwiośnie	28
31 marca 2010	31 maja 2010	wiosna	62
1 czerwca 2010	30 sierpnia 2010	lato	91
31 sierpnia 2010	16 listopada 2010	jesień	78
17 listopada 2010	3 grudnia 2010	przedzimyie	17
4 grudnia 2010	25 lutego 2011	zima	84
26 lutego 2011	24 marca 2011	przedwiośnie	27
25 marca 2011	28 maja 2011	wiosna	65
29 maja 2011	15 września 2011	lato	110
16 września 2011	27 października 2011	jesień	42
28 października 2011	20 listopada 2011	przedzimyie	24
21 listopada 2011	4 marca 2012	zima	105
5 marca 2012	23 marca 2012	przedwiośnie	19
24 marca 2012	24 maja 2012	wiosna	62
25 maja 2012	6 września 2012	lato	105
7 września 2012	15 listopada 2012	jesień	70
16 listopada 2012	4 grudnia 2012	przedzimyie	19
5 grudnia 2012	17 marca 2013	zima	103
18 marca 2013	3 kwietnia 2013	przedwiośnie	17
4 kwietnia 2013	30 maja 2013	wiosna	57
31 maja 2013	28 sierpnia 2013	lato	90
29 sierpnia 2013	12 listopada 2013	jesień	76
13 listopada 2013	6 stycznia 2014	przedzimyie	55
–	–	zima	0
7 stycznia 2014	2 marca 2014	przedwiośnie	55
3 marca 2014	31 maja 2014	wiosna	90
1 czerwca 2014	15 września 2014	lato	107
16 września 2014	31 października 2014	jesień	46

Pod względem wilgotności rok 2010 był „mokry”, z sumą opadów 1291 mm (dane PUS Szczawnica). Odnotowano 160 dni z opadem. W przekroju rocznym, nasilenie opadów wystąpiło w maju i czerwcu, kiedy to zdarzały się epizody powodziwe. Stosunkowo suche były natomiast końcowe miesiące roku – październik i listopad.

Rok pomiarowy 2011

Rok pomiarowy 2011 (kalendarzowy) odznaczał się średnią temperaturą roczną wyższą od przeciętnej – 8,3°C (wg danych PUS Szczawnica). Według danych IMGW (Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2011) rok ten został zakwalifikowany jako bardzo ciepły, odznaczający się na obszarze karpackim średnią temperaturą wyższą od przeciętnej o blisko 1°C. Poszczególne miesiące roku pomiarowego zostały zakwalifikowane następująco: styczeń był normalny, luty bardzo chłodny, marzec normalny, kwiecień bardzo ciepły, maj normalny, czerwiec ekstremalnie ciepły, lipiec normalny, sierpień ekstremalnie ciepły, wrzesień bardzo ciepły, październik lekko chłodny, listopad normalny, grudzień bardzo ciepły.

Pod względem wilgotności rok 2011 był przeciętny, z sumą opadów 848 mm (dane PUS Szczawnica). Odnotowano 131 dni z opadem. W przekroju rocznym zwiększone opady wystąpiły w czerwcu i lipcu. Prawie bezdeszczowy był listopad. Pozostałe miesiące roku nie obfitowały w opady, ale też nie były szczególnie suche.

Rok pomiarowy 2012

Rok pomiarowy 2012 (kalendarzowy) odznaczał się średnią temperaturą roczną nieznacznie wyższą od przeciętnej – 7,95°C (wg danych PUS Szczawnica). Według danych IMGW (Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2012) rok ten został zakwalifikowany jako ciepły, odznaczający się na obszarze karpackim średnią temperaturą wyższą od przeciętnej o około 0,5–1°C. Poszczególne miesiące roku pomiarowego zostały zakwalifikowane następująco: styczeń był normalny, luty ekstremalnie chłodny, marzec normalny, kwiecień bardzo ciepły, maj bardzo ciepły, czerwiec, lipiec i sierpień ekstremalnie ciepłe, wrzesień bardzo ciepły, październik lekko ciepły, listopad ekstremalnie ciepły, grudzień bardzo chłodny.

Pod względem wilgotności rok 2012 był lekko suchy, z sumą opadów 640 mm (dane PUS Szczawnica). Odnotowano 130 dni z opadem. W przekroju rocznym opady były rozłożone równomiernie, z podwyższonymi sumami opadu w czerwcu i lipcu.

Rok pomiarowy 2013

Rok pomiarowy 2013 (kalendarzowy) odznaczał się średnią temperaturą roczną nieznacznie wyższą od przeciętnej – 8,01°C (wg danych PUS Szczawnica). Według danych IMGW (Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2013) rok ten został zakwalifikowany jako ciepły, odznaczający się na obszarze karpackim średnią temperaturą wyższą od przeciętnej o około 0,5–1°C. Poszczególne miesiące roku pomiarowego zostały zakwalifikowane następująco: styczeń był lekko chłodny, luty normalny, marzec anormalnie chłodny, kwiecień i maj bardzo ciepłe, czerwiec ekstremalnie ciepły, lipiec bardzo ciepły, sierpień ekstremalnie ciepły, wrzesień bardzo zimny, październik ekstremalnie ciepły, listopad anormalnie ciepły, grudzień ciepły.

Pod względem wilgotności rok 2013 był lekko suchy, z sumą opadów 740 mm (dane PUS Szczawnica). Odnotowano 124 dni z opadem. W przekroju rocznym opady były rozłożone równomiernie, ze zwiększonymi sumami w sezonie ciepłym od czerwca do września.

Rok pomiarowy 2014

Rok pomiarowy 2014 (kalendarzowy) odznaczał się średnią temperaturą roczną zdecydowanie wyższą od przeciętnej – 10,91°C (wg danych PUS Szczawnica). Według danych IMGW (Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2014) rok ten został zakwalifikowany jako ekstremalnie ciepły, odznaczający się na obszarze karpackim średnią temperaturą wyższą od przeciętnej o około 1–2°C. Poszczególne miesiące roku pomiarowego zostały zakwalifikowane następująco: styczeń był bardzo ciepły, luty i marzec ekstremalnie ciepłe, kwiecień bardzo ciepły, maj i czerwiec normalne, lipiec anormalnie ciepły, sierpień lekko ciepły, wrzesień bardzo ciepły, październik anormalnie ciepły, listopad ekstremalnie ciepły, grudzień ciepły

Pod względem wilgotności rok 2014 był umiarkowanie wilgotny, z sumą opadów 1144 mm (dane PUS Szczawnica). W przekroju rocznym, zwiększone opady występowały w całym sezonie ciepłym, z nasileniami w maju i lipcu. Pozostałe miesiące roku nie obfitywały w opady, ale też nie były szczególnie suche. Do końca października odnotowano 109 dni z opadem.

Pomiary zakończono 31 października 2014 r., zaś na początku listopada aparatura na stanowisku w Szczawnicy została zdemontowana.

4.4. Cel oraz metodyka prowadzenia pomiarów

Dwutlenek węgla występujący pod ziemią może pochodzić z trzech podstawowych źródeł: (1) organogeniczny CO₂ – wydzielany w procesach życiowych organizmów bytujących lub zakorzenionych w ziemi, (2) geogeniczny CO₂ – migrujący ku powierzchni z głębszych warstw litosfery, bez udziału człowieka, (3) antropogeniczny CO₂ – pochodzący z nieszczelności w instalacjach. Na stanowisku pomiarowym w Szczawnicy nie można było z góry wykluczyć żadnego z wymienionych źródeł.

Podjęte badania miały na celu przetestowanie działania aparatury, określenie tła stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na badanym obszarze, ustalenie istotnych czynników wpływających na stężenie tego gazu w powietrzu glebowym, a także stwierdzenie bądź wykluczenie obecności endogenicznego CO₂ (w tym również CO₂ migrującego poprzez ewentualne nieszczelności z instalacji do poboru i transportu szczawy).

Pomiary stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na terenie górniczym PUS w Szczawnicy były realizowane od jesieni 2009 r. i w pierwszej kolejności objęły cały rok hydrologiczny 2010 (od 1 listopada 2009 r. do 31 października 2010 r.), a następnie kontynuowane przez kolejne lata aż do 31 października 2014 r. Rejestracja odbywała się co dwie minuty, w sposób ciągły, z wyłączeniem kilku okresów awarii instalacji. Te przerwy techniczne były stosunkowo krótkie, z wyjątkiem jednej w 2012 r., trwającej blisko 6 miesięcy.

Obok stężenia CO₂ w powietrzu glebowym (na 4 stanowiskach), od 31 maja 2010 r. rejestracja obejmowała: stężenie CO₂ w powietrzu atmosferycznym, temperaturę i wilgotność powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne. Jak już wspomniano, autorzy dysponowali także

danymi pogodowymi udostępnionymi przez PUS w Szczawnicy, w zakresie obejmującym: temperaturę powietrza, ciśnienie, opad oraz informacje o zaleganiu pokrywy śnieżnej.

Ze względu na bardzo dużą ilość wyników pomiarów uproszczono je do średnich godzinowych i dobowych. Ta operacja była realizowana poprzez wewnętrzne procedury oprogramowania urządzenia pomiarowego. Przy zestawianiu i wizualizacji wyników w ramach niniejszego opracowania korzystano z danych wyjściowych uśrednionych w interwałach dobowych.

5. Wyniki pomiarów stężenia CO₂

Wyniki pomiarów (średniodobowe) zostały następnie uśrednione w przedziałach rocznych oraz w podziale na pory roku. Posłużono się podziałem na 6 termicznych pór roku (omówionym dokładniej w rozdz. 4.3), obejmującym przedzimą, zimę, przedwiosnie, wiosnę, lato oraz jesień.

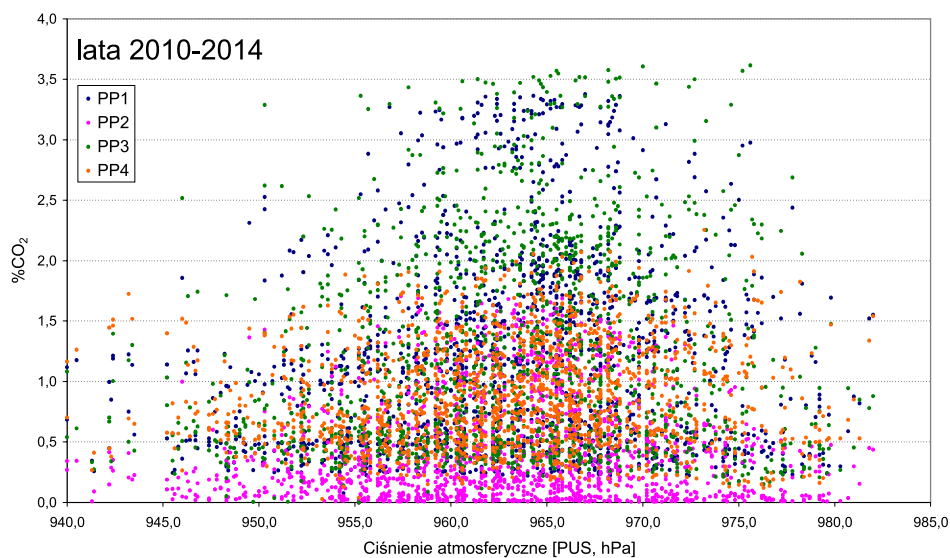
Dla wymienionych przedziałów czasowych i wszystkich mierzonych parametrów wyliczono podstawowe wskaźniki statystyczne: liczebność, średnią, przedziały zmienności, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. W przypadku przerw w pomiarach nie wyliczano wskaźników sezonowych dla interwałów, które obejmowały mniej niż 5 cykli dobowych.

Wszystkie zarejestrowane wskaźniki zostały wstępnie przeanalizowane pod kątem możliwego współoddziaływania. Wskaźniki pozostające bez wyraźnego związku ze stężeniem CO₂ mierzonym w powietrzu glebowym to stężenie CO₂ w powietrzu atmosferycznym oraz ciśnienie i wilgotność powietrza (rys. 12, rys. 13). Istotne powiązania dotyczyły następujących parametrów: stężenie CO₂ w powietrzu glebowym (na 4 stanowiskach – PP1, PP2, PP2, PP4), temperatura powietrza oraz opady atmosferyczne (rys. 14, rys. 15). Te zależności zostały obszerniej omówione w kolejnych rozdziałach.

Nie odnotowano wyraźnych powiązań między stężeniem CO₂ w powietrzu glebowym a zaleganiem pokrywy śniegowej. Należy jednak zaznaczyć, że w omawianym tu okresie zimy były stosunkowo łagodne i mało śnieżne. Ponadto stacja pomiarowa znajdowała się na stoku o wystawie południowej. Co za tym idzie, pokrywa śnieżna rzadko kiedy była solidna, najczęściej śnieg zalegał cienką kilkucentymetrową warstwą i/lub w płatach.

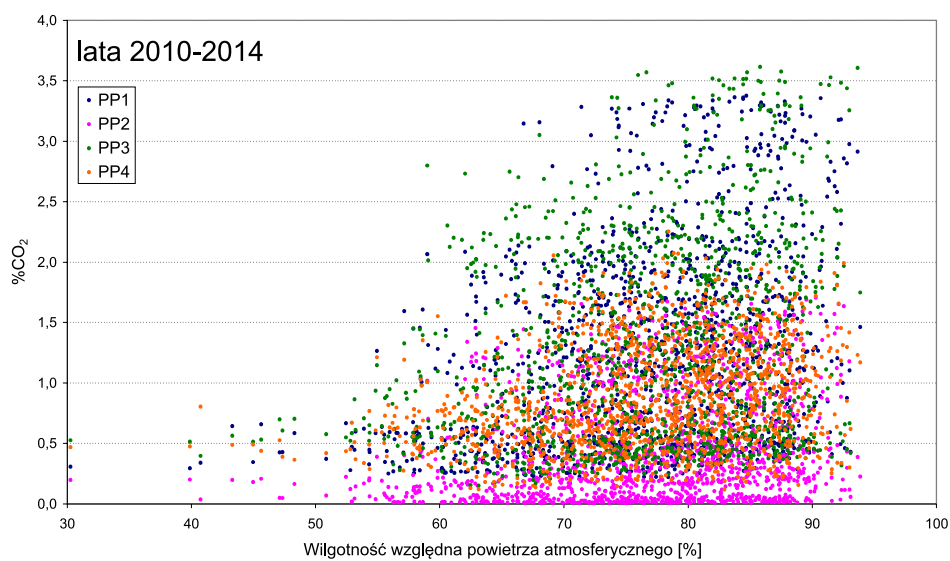
Uśrednione wielkości wskaźników dobowych stężenia CO₂ w powietrzu glebowym podano w tabelach poniżej (tab. 2–6).

Z kolei na załączonych wykresach (rys. 16–20) zobrazowano przebiegi czasowe zmienności stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na poszczególnych stanowiskach (PP1, PP2, PP2, PP4), z pokazaniem na tle zmienności pogodowej i klimatycznej (temperatura średniodobowa, opady, przedziały termicznych pór roku).



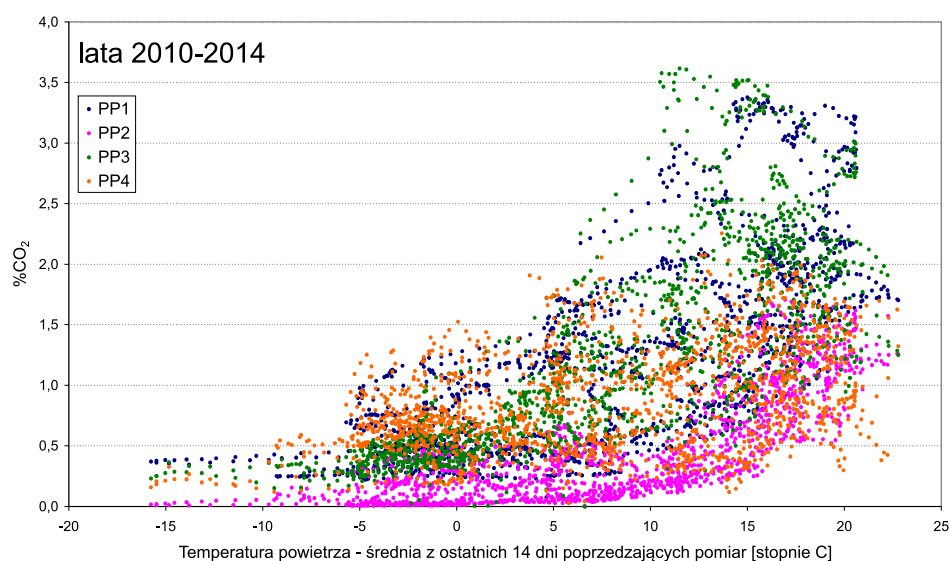
Rys. 12. Zależność średniodobowych stężeń CO_2 od zmian ciśnienia atmosferycznego.
Dane obejmują cały okres pomiarów (XI 2009–X 2014, 4 sondy); ciśnienie średniodobowe wg danych PUS
Szczawnica (hPa).
Opracowanie własne

Fig. 12. Relationship between average diurnal CO_2 concentrations and air pressure variations



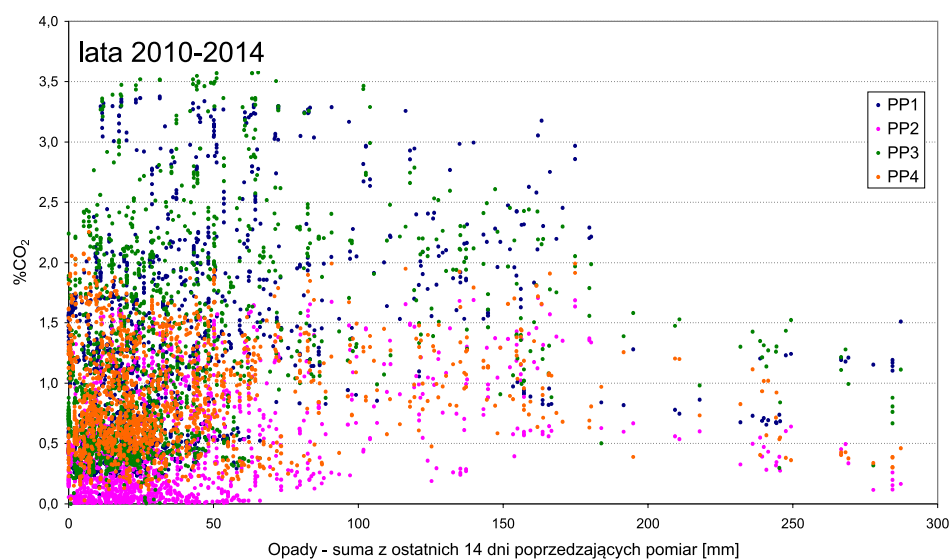
Rys. 13. Zależność średniodobowych stężeń CO_2 od wilgotności względnej powietrza atmosferycznego.
Dane obejmują cały okres pomiarów (XI 2009–X 2014, 4 sondy); wilgotność względna średniodobowa mierzona
bezpośrednio na stacji pomiarowej (%).
Opracowanie własne

Fig. 13. Relationship between average diurnal CO_2 concentrations and relative air humidity



Rys. 14. Zależność średniodobowych stężeń CO₂ od temperatury powietrza.
Dane obejmują cały okres pomiarów (XI 2009–X 2014, 4 sondy); temperatura uśredniona w interwałach dwutygodniowych (średnia arytmetyczna z ostatnich 14 dni liczonych do określonego dnia).
Opracowanie własne

Fig. 14. Relationship between average diurnal CO₂ concentrations and air temperature



Rys. 15. Zależność średniodobowych stężeń CO₂ od opadów.
Dane obejmują cały okres pomiarów (XI 2009–X 2014, 4 sondy); opady skumulowane w interwałach dwutygodniowych (z ostatnich 14 dni liczonych do określonego dnia).
Opracowanie własne

Fig. 15. Relationship between average diurnal CO₂ concentrations and precipitation

Tabela 2

Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO₂ w punktach pomiarowych (PP1-PP4) w 2010 r.

Table 2

Averaged results of CO₂ concentration measurements at the measuring points (PP1-PP4) in 2010

Termiczna pora roku	Dni pomiarowe*	Stężenie CO ₂ w powietrzu glebowym [%]				
		średnie	od	do	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
punkt pomiarowy PP1						
Przedzimie	17	1,15	1,11	1,21	0,03	0,03
Zima	86	0,55	0,25	1,18	0,31	0,57
Przedwiośnie	16	0,21	0,00	0,27	0,08	0,39
Wiosna	18	0,75	0,66	0,86	0,07	0,10
Lato	91	1,62	0,82	2,29	0,43	0,27
Jesień	66	1,64	1,06	2,12	0,34	0,21
Rok**	294	1,15	0,00	2,29	0,63	0,55
punkt pomiarowy PP2						
Przedzimie	17	0,26	0,17	0,41	0,09	0,36
Zima	86	0,19	0,02	0,43	0,13	0,65
Przedwiośnie	16	0,13	0,00	0,26	0,06	0,45
Wiosna	18	0,47	0,28	0,67	0,13	0,28
Lato	91	1,02	0,56	1,57	0,25	0,24
Jesień	66	0,37	0,09	0,87	0,16	0,43
Rok**	294	0,51	0,00	1,57	0,40	0,78
punkt pomiarowy PP3						
Przedzimie	17	0,91	0,40	1,43	0,39	0,43
Zima	86	0,34	0,00	0,58	0,13	0,38
Przedwiośnie	16	0,32	0,00	0,49	0,15	0,46
Wiosna	18	1,18	0,30	1,53	0,29	0,25
Lato	91	1,50	0,50	2,36	0,34	0,23
Jesień	66	1,44	0,83	2,53	0,44	0,31
Rok**	294	1,03	0,00	2,53	0,61	0,60
punkt pomiarowy PP4						
Przedzimie	17	1,43	1,04	1,88	0,27	0,19
Zima	86	0,66	0,40	1,29	0,19	0,28
Przedwiośnie	16	0,43	0,04	0,65	0,18	0,42
Wiosna	18	0,94	0,54	1,26	0,24	0,26
Lato	91	1,28	0,78	1,70	0,24	0,19
Jesień	66	1,33	0,85	1,88	0,25	0,19
Rok**	294	1,05	0,04	1,88	0,40	0,38

* Liczba dni pomiarowych efektywnie wykorzystanych w danym okresie pomiarowym.

** Rok kalendarzowy 2010, przerwy techniczne: 10.01.2010, 24.02.2010–01.03.2010, 07.03.2010–18.03.2010, 30.03.2010–13.05.2010, 11.09.2010–22.09.2010.

Tabela 3

Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO₂ w punktach pomiarowych (PP1-PP4) w 2011 r.

Table 3

Averaged results of CO₂ concentration measurements at the measuring points (PP1-PP4) in 2011

Termiczna pora roku	Dni pomiarowe*	Stężenie CO ₂ w powietrzu glebowym [%]				
		średnie	od	do	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
punkt pomiarowy PP1						
Przedzimie	24	1,54	1,28	1,69	0,13	0,09
Zima	97	0,66	0,23	1,26	0,33	0,50
Przedwiośnie	27	0,29	0,22	0,34	0,04	0,14
Wiosna	65	0,48	0,25	1,13	0,24	0,49
Lato	110	2,36	1,24	3,29	0,57	0,24
Jesień	42	1,59	1,22	1,94	0,18	0,12
Rok**	365	1,28	0,22	3,29	0,89	0,70
punkt pomiarowy PP2						
Przedzimie	24	0,46	0,35	0,65	0,08	0,16
Zima	97	0,16	0,01	0,48	0,17	1,10
Przedwiośnie	27	0,04	0,01	0,11	0,04	0,89
Wiosna	65	0,17	0,04	0,46	0,10	0,59
Lato	110	1,10	0,52	1,71	0,31	0,28
Jesień	42	0,56	0,23	0,96	0,17	0,31
Rok**	365	0,50	0,01	1,71	0,47	0,93
punkt pomiarowy PP3						
Przedzimie	24	1,08	0,67	1,46	0,29	0,27
Zima	97	0,47	0,26	0,68	0,11	0,24
Przedwiośnie	27	0,34	0,24	0,48	0,07	0,22
Wiosna	65	0,80	0,42	1,21	0,21	0,26
Lato	110	1,72	0,91	2,53	0,42	0,24
Jesień	42	1,81	1,01	2,42	0,46	0,25
Rok**	365	1,09	0,24	2,53	0,66	0,60
punkt pomiarowy PP4						
Przedzimie	24	1,50	1,19	2,06	0,23	0,16
Zima	97	0,91	0,53	1,53	0,28	0,31
Przedwiośnie	27	0,63	0,49	0,81	0,11	0,18
Wiosna	65	0,76	0,45	1,05	0,15	0,20
Lato	110	1,45	0,78	1,99	0,31	0,21
Jesień	42	1,59	0,98	2,26	0,36	0,23
Rok**	365	1,14	0,45	2,26	0,44	0,38

* Liczba dni pomiarowych efektywnie wykorzystanych w danym okresie pomiarowym.

** Rok kalendarzowy 2011.

Tabela 4

Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO₂ w punktach pomiarowych (PP1-PP4) w 2012 r.

Table 4

Averaged results of CO₂ concentration measurements at the measuring points (PP1-PP4) in 2012

Termiczna pora roku	Dni pomiarowe*	Stężenie CO ₂ w powietrzu glebowym [%]				
		średnie	od	do	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
punkt pomiarowy PP1						
Przedzimie	8	1,19	1,09	1,28	0,07	0,06
Zima	91	0,57	0,35	1,06	0,17	0,29
Przedwiośnie	19	0,41	0,38	0,45	0,02	0,04
Wiosna	61	0,59	0,36	0,88	0,18	0,31
Lato	0	–	–	–	–	–
Jesień	0	–	–	–	–	–
Rok**	179	0,59	0,35	1,28	0,21	0,36
punkt pomiarowy PP2						
Przedzimie	8	0,19	0,05	0,41	0,14	0,70
Zima	91	0,13	0,01	0,42	0,15	1,14
Przedwiośnie	19	0,02	0,01	0,06	0,01	0,57
Wiosna	61	0,15	0,04	0,34	0,09	0,60
Lato	0	–	–	–	–	–
Jesień	0	–	–	–	–	–
Rok**	179	0,13	0,01	0,42	0,13	0,98
punkt pomiarowy PP3						
Przedzimie	8	0,89	0,58	1,18	0,22	0,25
Zima	91	0,38	0,15	0,59	0,10	0,26
Przedwiośnie	19	0,42	0,33	0,52	0,06	0,14
Wiosna	61	0,75	0,44	1,44	0,23	0,31
Lato	0	–	–	–	–	–
Jesień	0	–	–	–	–	–
Rok**	179	0,53	0,15	1,44	0,25	0,46
punkt pomiarowy PP4						
Przedzimie	8	1,45	1,01	1,91	0,35	0,24
Zima	91	0,53	0,12	1,25	0,38	0,72
Przedwiośnie	19	0,27	0,18	0,41	0,07	0,28
Wiosna	61	0,48	0,20	0,74	0,11	0,23
Lato	0	–	–	–	–	–
Jesień	0	–	–	–	–	–
Rok**	179	0,53	0,12	1,91	0,36	0,68

* Liczba dni pomiarowych efektywnie wykorzystanych w danym okresie pomiarowym.

** Rok kalendarzowy 2012, statystyk nie liczono z uwagi na długą przerwę techniczną: 24.05–26.11.2014 r.

Tabela 5

Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO₂ w punktach pomiarowych (PP1-PP4) w 2013 r.

Table 5

Averaged results of CO₂ concentration measurements at the measuring points (PP1-PP4) in 2013

Termiczna pora roku	Dni pomiarowe*	Stężenie CO ₂ w powietrzu glebowym [%]				
		średnie	od	do	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
punkt pomiarowy PP1						
Przedzime	49	0,97	0,44	1,43	0,32	0,33
Zima	76	0,51	0,39	0,66	0,06	0,12
Przedwiośnie	17	0,50	0,45	0,54	0,02	0,05
Wiosna	57	0,79	0,54	1,13	0,22	0,28
Lato	90	1,79	0,96	2,14	0,27	0,15
Jesień	76	1,57	1,26	2,05	0,25	0,16
Rok	365	1,15	0,39	2,14	0,57	0,49
punkt pomiarowy PP2						
Przedzime	49	0,25	0,06	0,45	0,12	0,48
Zima	76	0,09	0,01	0,39	0,11	1,18
Przedwiośnie	17	0,01	0,01	0,02	0,00	0,29
Wiosna	57	0,20	0,02	0,38	0,12	0,58
Lato	90	0,91	0,34	1,54	0,26	0,29
Jesień	76	0,47	0,10	1,30	0,34	0,72
Rok	365	0,41	0,01	1,54	0,39	0,94
punkt pomiarowy PP3						
Przedzime	49	1,10	0,60	1,74	0,37	0,34
Zima	76	0,52	0,40	0,63	0,08	0,15
Przedwiośnie	17	0,48	0,41	0,57	0,05	0,11
Wiosna	57	0,97	0,53	1,81	0,43	0,44
Lato	90	2,19	1,68	2,81	0,28	0,13
Jesień	76	2,06	1,66	2,62	0,30	0,14
Rok	365	1,40	0,40	2,81	0,76	0,54
punkt pomiarowy PP4						
Przedzime	49	0,67	0,37	1,06	0,20	0,30
Zima	76	0,74	0,56	1,04	0,09	0,12
Przedwiośnie	17	0,65	0,54	0,74	0,05	0,08
Wiosna	57	0,42	0,12	0,69	0,15	0,37
Lato	90	0,69	0,29	1,45	0,26	0,38
Jesień	76	1,18	0,86	1,58	0,18	0,15
Rok	365	0,76	0,12	1,58	0,30	0,40

* Liczba dni pomiarowych efektywnie wykorzystanych w danym okresie pomiarowym.

** Rok kalendarzowy 2013.

Tabela 6

Uśrednione wyniki pomiarów stężenia CO₂ w punktach pomiarowych (PP1-PP4) w 2014 r.

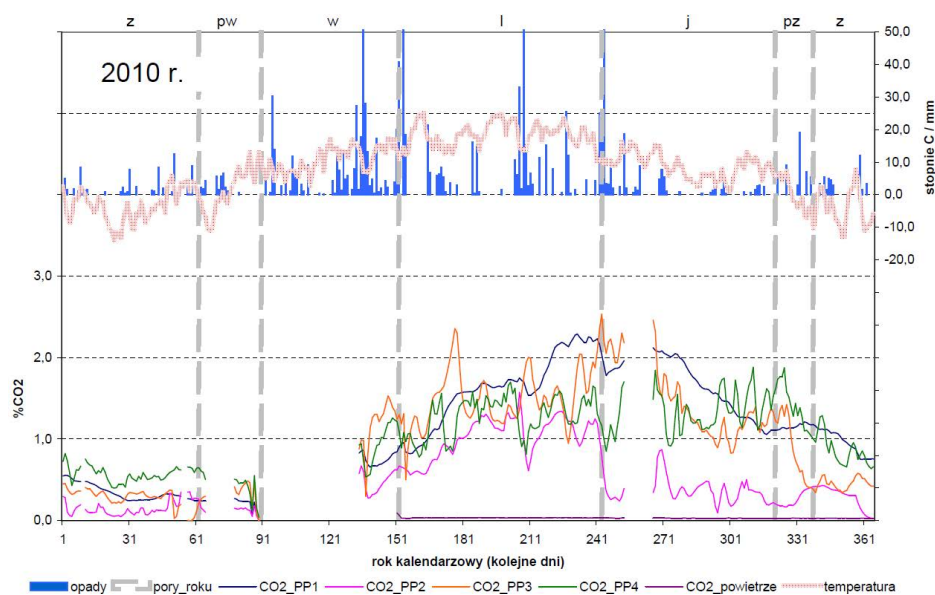
Table 6

Averaged results of CO₂ concentration measurements at the measuring points (PP1-PP4) in 2014

Termiczna pora roku	Dni pomiarowe*	Stężenie CO ₂ w powietrzu glebowym [%]				
		średnie	od	do	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
punkt pomiarowy PP1						
Przedzimie	6	0,43	0,41	0,44	0,01	0,02
Zima	0	–	–	–	–	–
Przedwiośnie	55	0,43	0,29	0,52	0,07	0,17
Wiosna	90	0,93	0,44	1,56	0,37	0,40
Lato	107	2,36	1,08	3,38	0,89	0,38
Jesień	46	2,68	2,17	3,27	0,26	0,10
Rok	304	1,60	0,29	3,38	1,06	0,66
punkt pomiarowy PP2						
Przedzimie	6	0,18	0,14	0,22	0,03	0,15
Zima	0	–	–	–	–	–
Przedwiośnie	55	0,14	0,04	0,22	0,06	0,43
Wiosna	90	0,17	0,03	0,70	0,17	1,00
Lato	107	1,09	0,45	1,65	0,39	0,36
Jesień	46	0,64	0,15	1,50	0,37	0,58
Rok	304	0,56	0,03	1,65	0,51	0,92
punkt pomiarowy PP3						
Przedzimie	6	0,75	0,73	0,78	0,02	0,03
Zima	0	–	–	–	–	–
Przedwiośnie	55	0,72	0,43	0,96	0,15	0,22
Wiosna	90	1,08	0,32	1,72	0,25	0,23
Lato	107	2,63	1,56	3,52	0,56	0,21
Jesień	46	3,15	2,25	3,62	0,36	0,11
Rok	304	1,87	0,32	3,62	1,03	0,55
punkt pomiarowy PP4						
Przedzimie	6	0,45	0,43	0,48	0,02	0,04
Zima	0	–	–	–	–	–
Przedwiośnie	55	0,57	0,44	0,78	0,10	0,17
Wiosna	90	0,45	0,22	0,68	0,11	0,24
Lato	107	0,96	0,41	1,84	0,33	0,34
Jesień	46	1,23	0,97	1,51	0,15	0,12
Rok	304	0,77	0,22	1,84	0,36	0,47

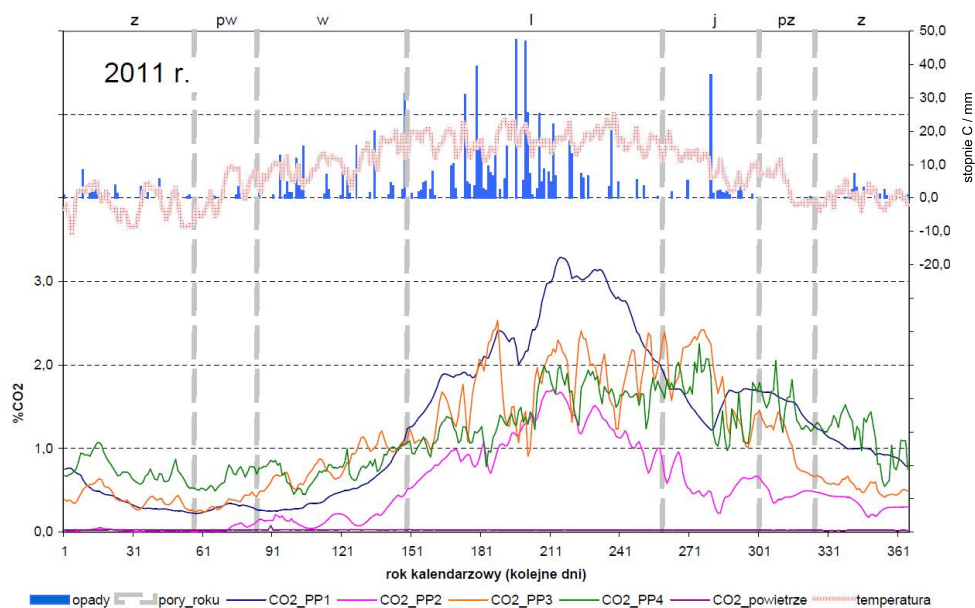
* Liczba dni pomiarowych efektywnie wykorzystanych w danym okresie pomiarowym.

** Rok kalendarzowy 2014, pomiary zakończono 31 listopada.



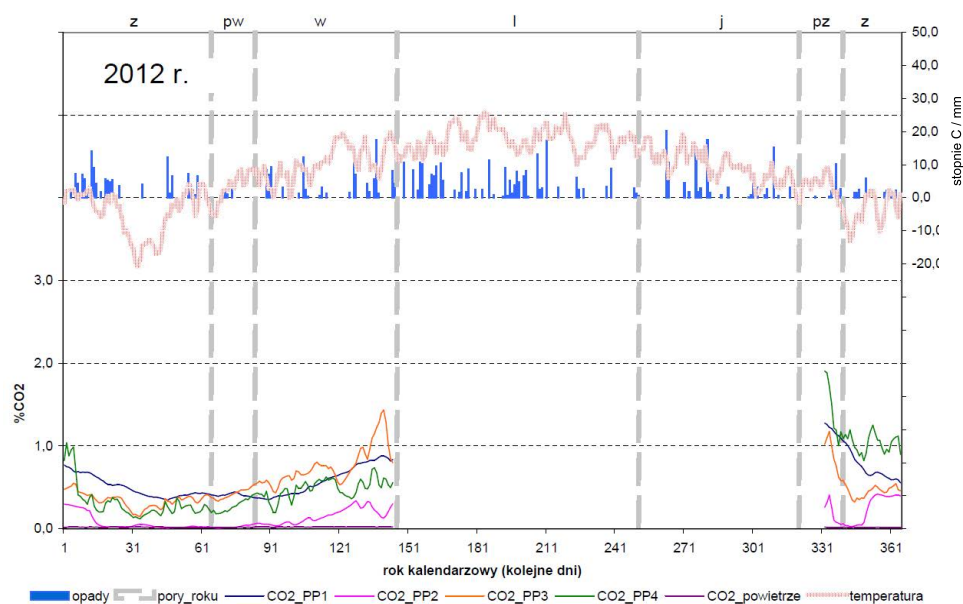
Rys. 16. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez poszczególne sondy w 2010 r.
Opracowanie własne

Fig. 16. Comparison of CO_2 concentrations recorded by the individual measuring probes in 2010



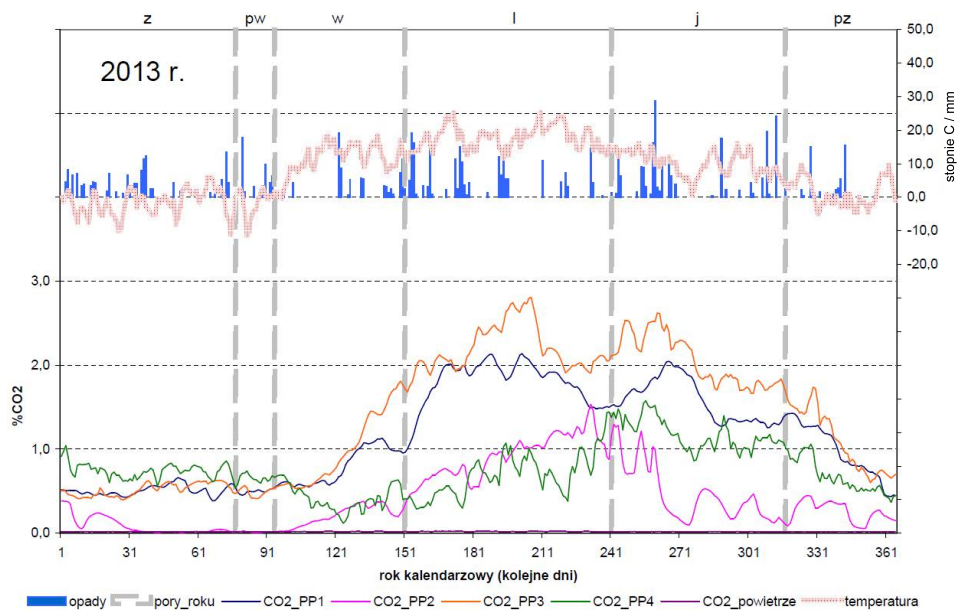
Rys. 17. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez poszczególne sondy w 2011 r.
Opracowanie własne

Fig. 17. Comparison of CO_2 concentrations recorded by the individual measuring probes in 2011



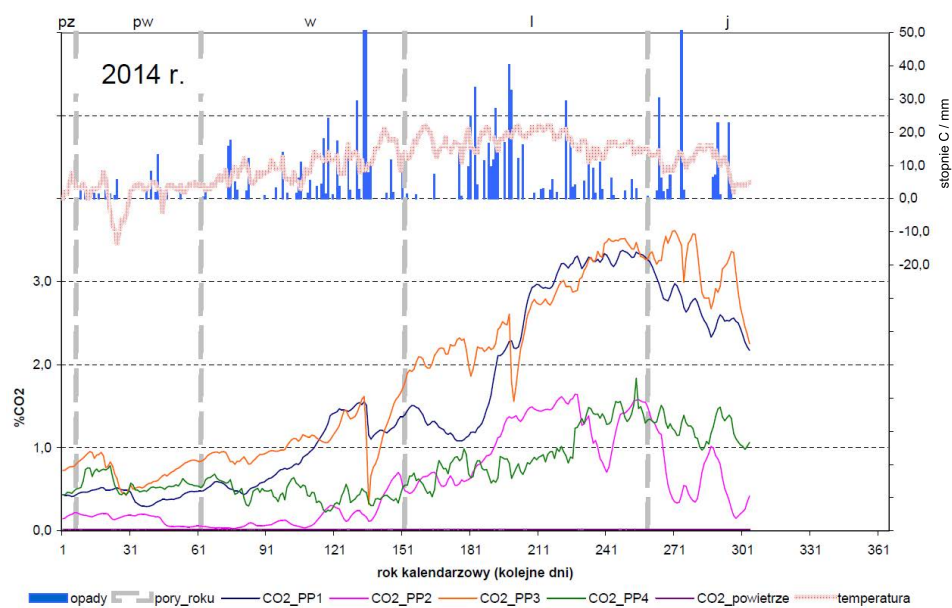
Rys. 18. Porównanie stężeń CO₂ rejestrowanych przez poszczególne sondy w 2012 r.
Opracowanie własne

Fig. 18. Comparison of CO₂ concentrations recorded by the individual measuring probes in 2012



Rys. 19. Porównanie stężeń CO₂ rejestrowanych przez poszczególne sondy w 2013 r.
Opracowanie własne

Fig. 19. Comparison of CO₂ concentrations recorded by the individual measuring probes in 2013



Rys. 20. Porównanie stężeń CO₂ rejestrowanych przez poszczególne sondy w 2014 r.
Opracowanie własne

Fig. 20. Comparison of CO₂ concentrations recorded by the individual measuring probes in 2014

6. Analiza wyników pomiarów stężenia CO₂

Pomimo bliskiego sąsiedztwa i takiej samej konstrukcji czujników odnotowano duże różnice stężeń CO₂ pomiędzy poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi.

Na poszczególnych stanowiskach odnotowano w omawianym okresie sprawozdawczym (od 1 listopada 2009 r. do 31 października 2014 r.):

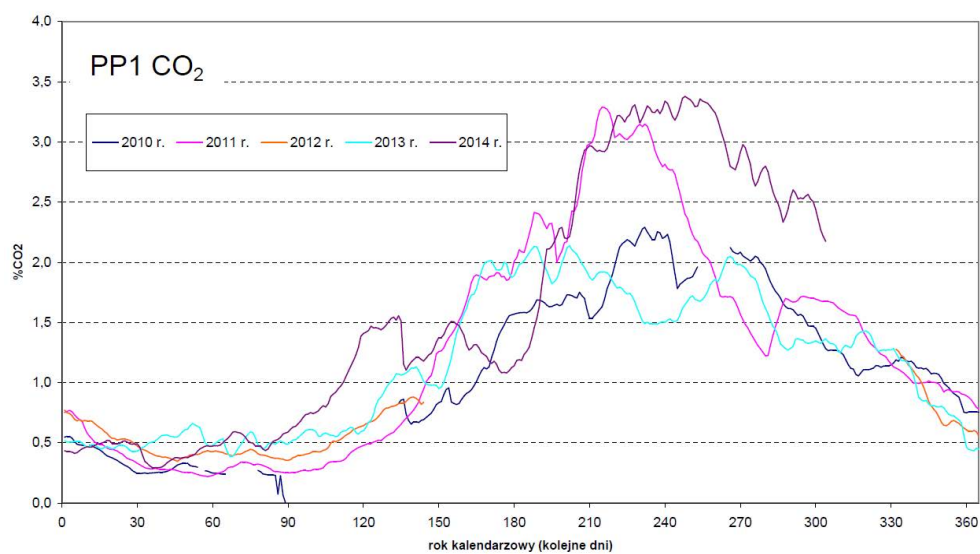
- sezonową zmienność stężeń CO₂ (w profilu całorocznym),
- nieregularną zmienność w okresach kilkudniowych (tylko na niektórych stanowiskach),
- zmienność w cyklu dobowym (j.w.),
- pomiary odbiegające.

6.1. Różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami

Różnice stężeń CO₂ pomiędzy poszczególnymi stanowiskami dochodziły w ciepłych porach roku do około 3% CO₂ (październik 2014 r., PP2 i PP3; rys. 20). Zasadniczo każdym czasie występowały co najmniej kilkukrotne różnice stężeń pomiędzy stanowiskiem w danym czasie najbardziej bogatym w CO₂, a stanowiskiem najbardziej w ten gaz ubogim (rys. 16–20). Wzajemne relacje zmieniały się w czasie – dla każdego ze stanowisk można wskazać takie dni, że stężenie CO₂ są tam w danym czasie najmniejsze bądź największe (rys. 21–24).

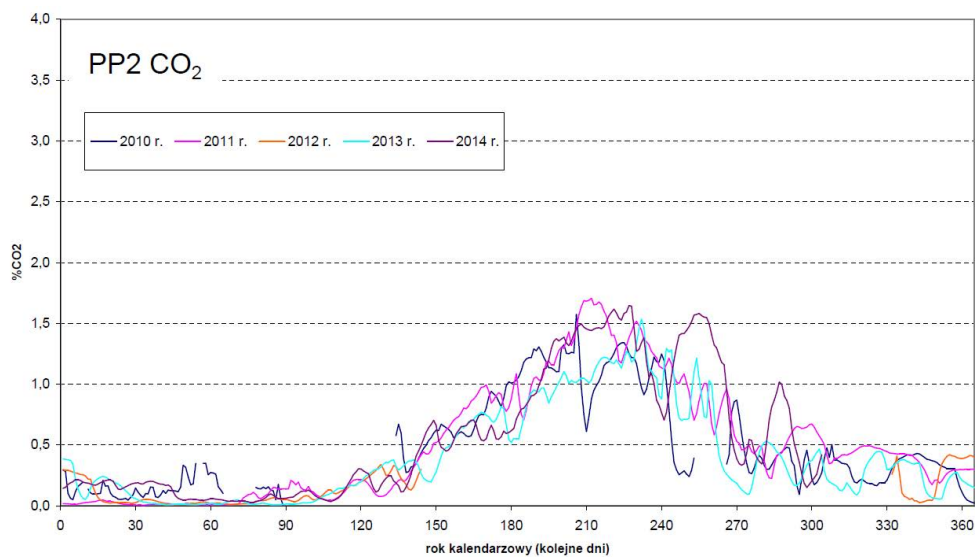
W całym pięcioletnim okresie pomiarowym stosunkowo najniższe poziomy stężenie notowano przez większość czasu na stanowisku PP2 (rys. 22). W okresach zimowych na tym stanowisku stężenia CO₂ spadały nawet poniżej 0,1%. Relatywnie najwyższe stężenia CO₂ występowały na stanowiskach PP1 i PP3 (rys. 21, rys. 23), zwłaszcza w ciepłych porach roku. Z kolei stanowisko PP4 (rys. 24) odznaczało się mniejszą amplitudą sezonowych wahań stężeń CO₂, które w okresach ciepłych były niższe, a w okresach chłodnych wyższe niż w przypadku PP2 i PP3.

Różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami przejawiały się także w dynamice zmian stężeń CO₂. Przykłady skrajne to stanowiska PP1 i PP4 (rys. 21–24). W tym pierwszym przypadku reakcje na bodźce zewnętrzne były powolne, liczone raczej w tygodniach niż w pojedynczych dniach. Krótkoterminowa zmienność prawie się nie zaznaczała. Może



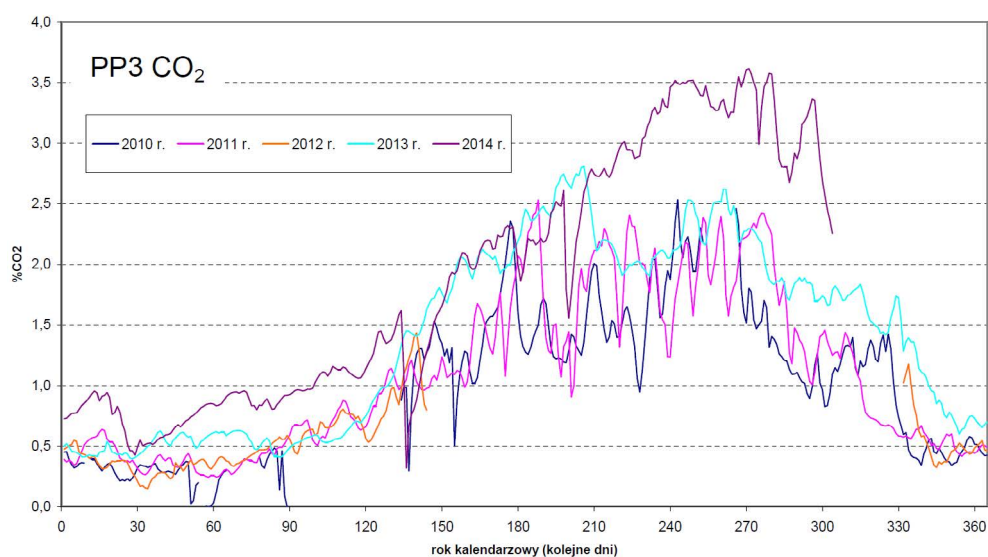
Rys. 21. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez sondę PP1 w poszczególnych latach.
Opracowanie własne

Fig. 21. Comparison of CO_2 concentrations recorded by measuring probe PP1 for particular years



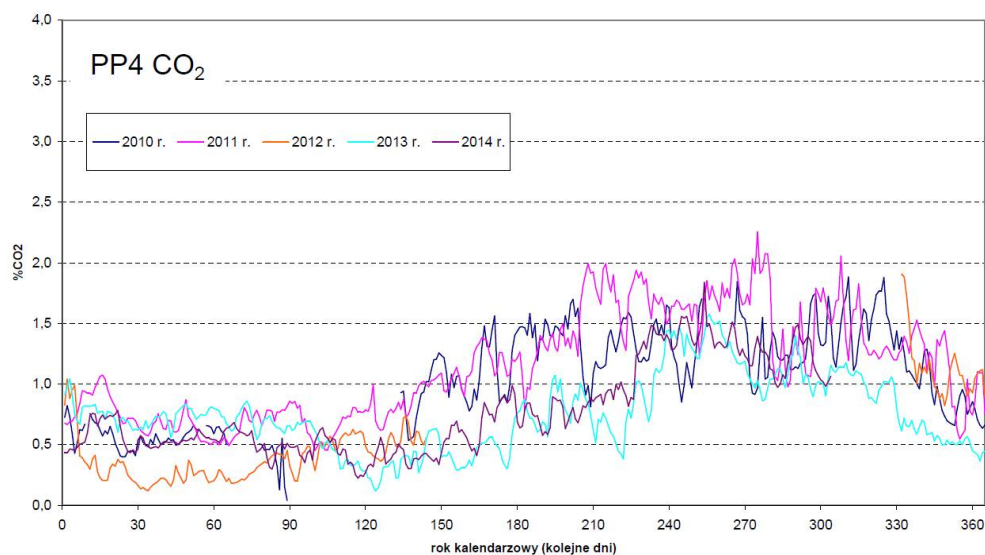
Rys. 22. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez sondę PP2 w poszczególnych latach.
Opracowanie własne

Fig. 22. Comparison of CO_2 concentrations recorded by measuring probe PP2 for particular years



Rys. 23. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez sondę PP3 w poszczególnych latach.
Opracowanie własne

Fig. 23. Comparison of CO_2 concentrations recorded by measuring probe PP3 for particular years



Rys. 24. Porównanie stężeń CO_2 rejestrowanych przez sondę PP4 w poszczególnych latach.
Opracowanie własne

Fig. 24. Comparison of CO_2 concentrations recorded by measuring probe PP4 for particular years

to wskazywać na słabą wymianę gazową między komorą pomiarową a środowiskiem zewnętrznym (spowodowaną np. gorszą przepuszczalnością zasypu albo podtopieniem filtra). Stanowisko PP1 było usytuowane w miejscu osłoniętym, w cieniu, co dodatkowo ograniczało bodźce zewnętrzne. Z kolei na stanowisku PP4 dynamika krótkoterminowych zmian stężeń CO_2 była wyraźnie większa (co nie jest równoznaczne z występowaniem najwyższych stężeń). Przez znaczną część roku zaznaczały się cykle kilkudniowe i dobowe. To stanowisko było położone w terenie otwartym, z dala od drzew, w miejscu eksponowanym na bezpośrednie promienie słońca. W stosunku do wyżej opisanych, stanowiska PP2 i PP3 wykazywały cechy pośrednie.

6.2. Zmienność wieloletnia (wielosezonowa)

W omawianym pięcioleciu 2010–2014 kolejne lata kalendarzowe były coraz bardziej ciepłe (rozdz. 4.3). Rok 2010 był najchłodniejszy, rok 2014 – ekstremalnie ciepły. Odpowiadał temu wzrost temperatur średniorocznych od $7,5^\circ\text{C}$ do $10,9^\circ\text{C}$ (dane PUS Szczawnica). Jak na warunki klimatyczne ten wzrost temperatur był bardzo duży, bo o blisko $3,5^\circ\text{C}$.

Porównywanie średnich stężeń na poszczególnych stanowiskach jest o tyle trudne, że występowały przerwy w pomiarach w latach 2010 i 2012 (blisko półroczna przerwa od końca maja do połowy listopada), a rok pomiarowy 2014 został skrócony do października (nie obejmuje zatem dwóch chłodniejszych miesięcy). Pomijając rok 2012, na stanowiskach PP1, PP2, PP3 odnotowano wzrosty średniorocznych stężeń CO_2 w granicach jednego procenta CO_2 . Jednak w tym samym przedziale czasu na stanowisku PP4 odnotowano spadek, stosunkowo nieduży – o około $0,3\%$ CO_2 (tab. 2–6).

Prawidłowością jest większa produktywność organogenicznego CO_2 w cieplejszych cyklach rocznych, jednakże na podstawie wykonanych badań nie można tej zależności scharakteryzować w kategoriach ilościowych.

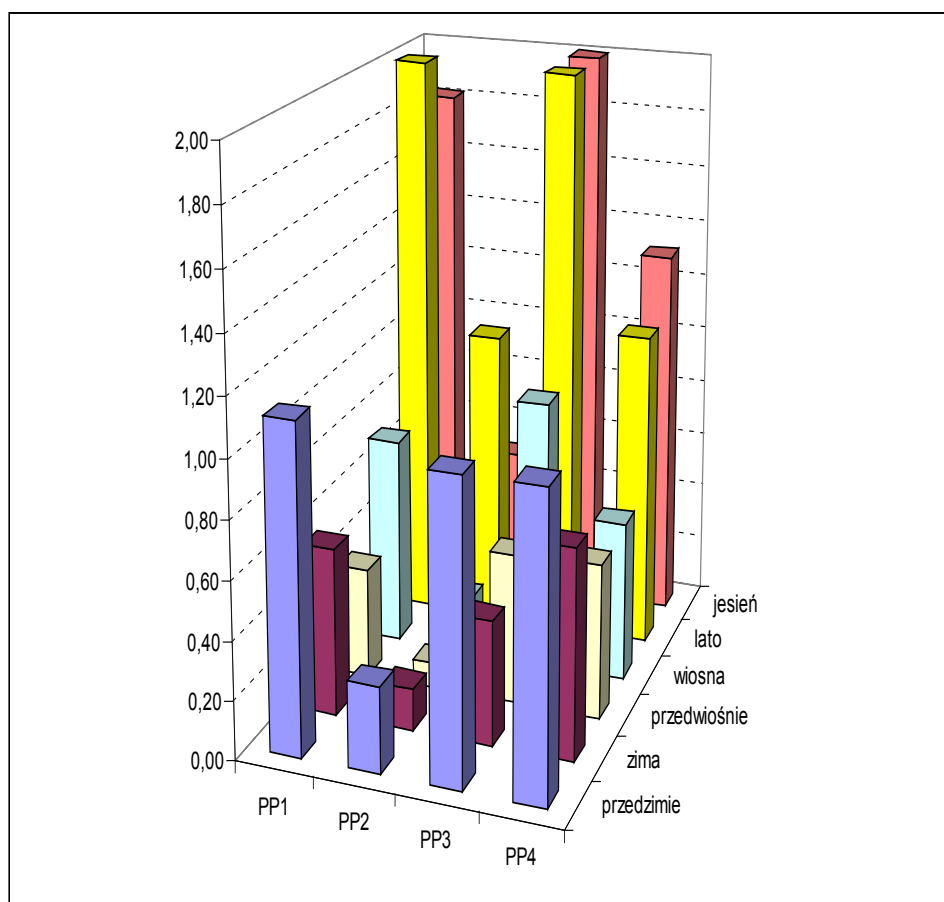
W porównywalnych całorocznych cyklach pomiarowych, bez dłuższych przerw rzutuujących na wyniki, średnioroczne stężenia CO_2 na tych samych stanowiskach mało się od siebie różniły o niecałe pół procenta ($0,88$ – $1,24\%$ CO_2). Są to różnice mało znaczące wobec blisko 3% amplitudy zmian sezonowych.

6.3. Zmiany sezonowe

Na poszczególnych stanowiskach stężenia CO_2 odniesione do przedziałów czasu odpowiadających termicznemu porom roku, były podobne – zarówno w zakresie wielkości średnich, jak i przebiegów zmienności (tab. 2–6, rys. 16–20).

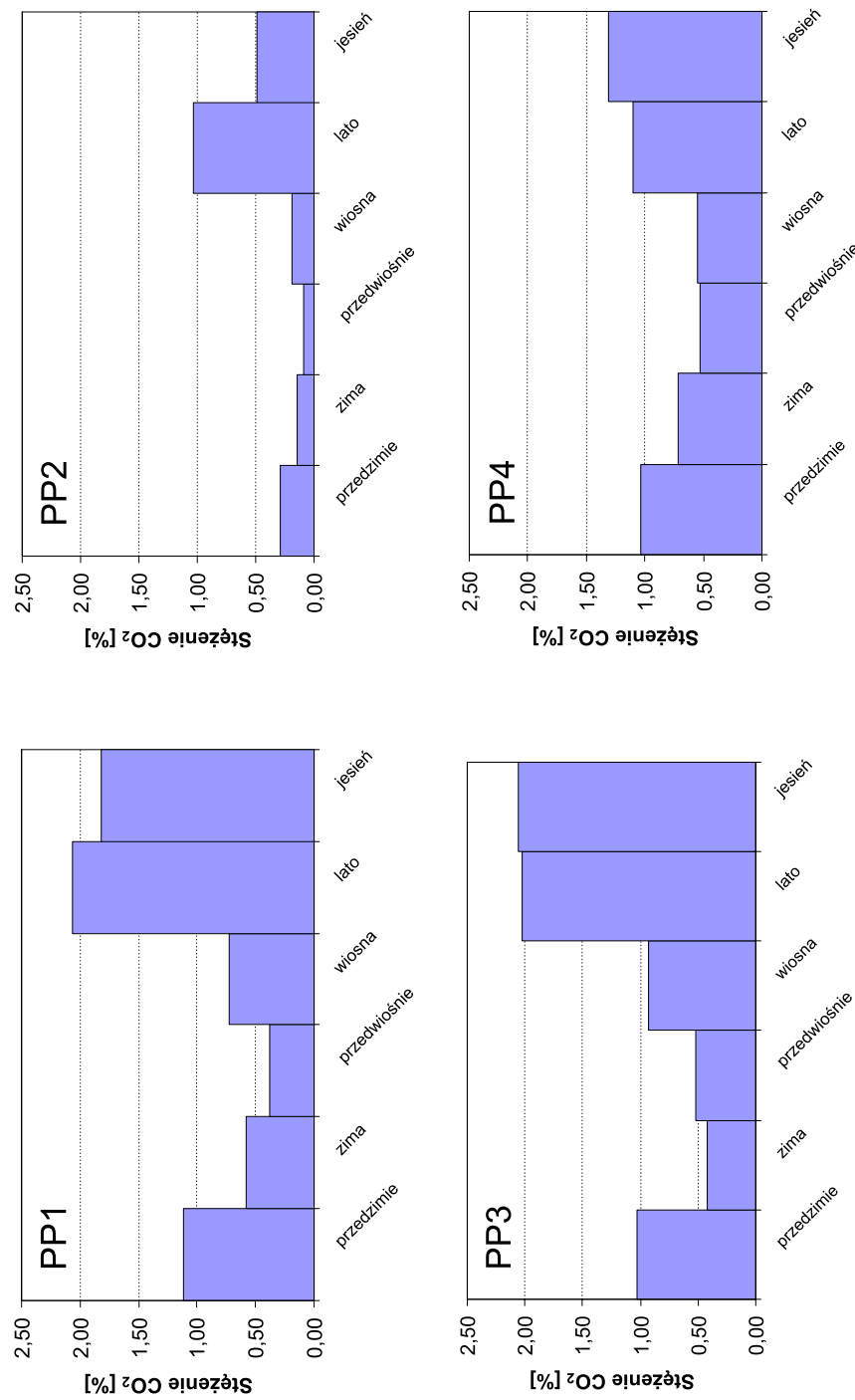
W rocznym cyklu pomiarowym dla wszystkich punktów pomiarowych można zauważyć cykliczność wzrostu oraz spadku wartości stężenia CO_2 w powietrzu glebowym. Począwszy od klimatycznego przedzimia obserwuje się spadek stężenia CO_2 poprzez zimę do przed-

wiośnia, kiedy występują najmniejsze stężenia tego gazu. Poczynając od wiosny stężenie CO_2 w powietrzu glebowym wzrasta aż do końca lata, kiedy osiąga maksymalne wielkości we wszystkich punktach pomiarowych. Stężenie pod koniec lata jest kilkakrotnie większe aniżeli w zimie. Następnie poprzez jesień i przedzime do zimy stężenie znów opada, zmierzając do kolejnego minimum. Zimowe spadki stężeń następowały zwykle w pierwszej dekadzie grudnia, wiosenne wzrosty – na początku maja. Minima odnotowano w miesiącach zimowych i przedwiosennych – od stycznia do marca, a maksima w miesiącach letnich i wczesnojesiennych – od lipca do września. Odnosząc zmiany sezonowe do termicznych pór roku, minima występowały w porze przedwiośnia, maksima pod koniec termicznego lata (rys. 25, rys. 26).



Rys. 25. Porównanie średnich stężeń sezonowych CO_2 zarejestrowanych przez sondy pomiarowe w całym okresie pomiarowym (1507 dni).
Opracowanie własne

Fig. 25. Comparison of average seasonal CO_2 concentrations recorded by the measuring probes during the whole period of measurements (1507 days)



Rys. 26. Porównanie średnich stężeń sezonowych CO₂ zarejestrowanych przez sondy pomiarowe w całym okresie pomiarowym (1507 dni).

Opracowanie własne

Fig. 26. Comparison of average seasonal CO₂ concentrations recorded by the measuring probes during the whole period of measurements (1507 days)

Szukając dowodów świadczących o napływie endogenicznego CO₂, nie odnotowano zwiększenia stężeń dwutlenku węgla podczas mrozów i przy zalegającej pokrywie śniegowej.

6.4. Zmiany kilkudniowe

Zmienność w okresach kilkudniowych daje się zauważyć w porach cieplejszych, od późnej wiosny do przedzima, najczęściej w powiązaniu z opadami. Typowa sekwencja to wzrost stężeń CO₂ następujący kilka dni po opadzie. Po obfitych i krótkotrwałych deszczach w sezonie wegetacyjnym obserwuje się najpierw skokowy spadek, a następnie wzrost stężeń. W 2011 r. charakterystyczne „piłokształtne” zaburzenia wystąpiły na stanowiskach PP3 i PP4 w drugiej i trzeciej dekadzie lipca.

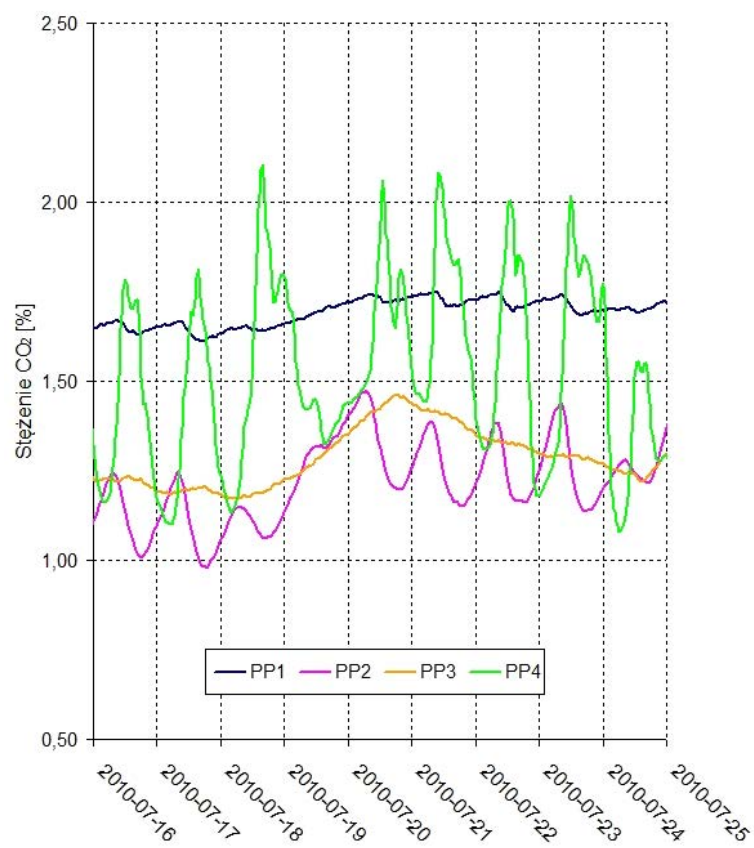
6.5. Zmiany dobowe

Analizując stężenia CO₂ godzinowe i dwuminutowe (dane źródłowe są zawarte w niepublikowanych materiałach archiwalnych) daje się zauważyć, że mogą one ulegać zmianom także w zależności od pory dnia. Taka zmienność występowała prawie wyłącznie w okresach „ciepłych” (lato, jesień) i tylko na niektórych stanowiskach (rys. 27). Najwyraźniej można to było zaobserwować na stanowisku PP4, przez większą część sezonu wegetacyjnego. Na stanowiskach PP2 i PP3 wahania dobowe były mniejsze i obejmowały krótsze okresy. Na stanowisku PP1 zmienność dobową prawie się nie zaznaczała.

Występowanie zmian dobowych nie jest wyraźnie skorelowane ze zarejestrowanymi wskaźnikami pogodowymi. Są one zapewne powiązane z nasłonecznieniem. Największe wahania powinny występować w dniach słonecznych, w miejscach niezacienionych (PP4). Taką lokalizację należałoby uznać za nieodpowiednią do monitorowania zmian endogenicznych stężeń CO₂.

6.6. Pomiary odbiegające

Odnotowano nieliczne skokowe fluktuacje (zwykle spadki) stężenia CO₂ w powietrzu glebowym, co było zapewne spowodowane problemami w pracy rejestratora (drobiny pyłu, kondensacja wody itp.). Nie mają one innego wytłumaczenia. Ponadto w okresach chłodnych (głównie przedwiośnia) zdarzało się rejestrowanie wielkości zerowych lub zbliżonych do zera (niższych od przeciętnego stężenia CO₂ w atmosferze). Z uwagi na bardzo dużą ilość pozyskiwanych danych (liczebność serii), w wymiarze statystycznym te wartości odstające nie wpływają znacząco na jakość pomiarów.



Rys. 27. Przykład dobowej zmienności stężeń CO₂ – sezon letni 2010 r., dane uśrednione w interwałach godzinowych.
Opracowanie własne

7. Omówienie wyników

Wyniki pomiarów zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (płytkim powietrzu gruntowym) rodzą pytania, na które nie zawsze można znaleźć jednoznacznej odpowiedzi. Najważniejsze z nich (ujęte jako hipotezy badawcze) są następujące:

1. Jakie czynniki i w jakim stopniu decydują o zmienności przestrzenno-czasowej (krótko- i długoterminowej) stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym na stacji pomiarowej w Szczawnicy?

2. Czy w poszczególnych punktach pomiarowych w Szczawnicy został zarejestrowany dwutlenek węgla pochodzenia endogenicznego?

Zmienność sezonowa zmian stężenia CO₂ na stanowiskach pomiarowych jest wyraźnie zaznaczona. Wyniki badań obejmujące pięcioletni cykl pomiarowy (2010-2014), w cyklu rocznym pokazują na wyraźne sinusoidalne wahania zmian stężenia dwutlenku węgla, z maksimum w miesiącach letnich i minimum w zimie oraz okresie przedwiośnia. W ciepłych porach roku stężenia CO₂ są wyższe aniżeli w chłodnych, nawet kilkakrotnie. Zaobserwowana zmienność sezonowa zawartości CO₂ w powietrzu glebowym jest zjawiskiem zrozumiałym i naturalnym dla stref klimatu umiarkowanego. Ta zmienność dotyczy organogenicznego CO₂ i jest szeroko opisywana w literaturze (por.: Brydie i in. 2013; Dobrzański i Zawadzki red. 1995; Gal i in. 2014; Hashimoto i Komatsu 2006; Klusman 1993; Schlömer i in. 2014; Yonemura i in. 2013). Gleba jest środowiskiem nieustannego wiązania tlenu i tworzenia dwutlenku węgla. Korzenie roślinne zużywają znaczne ilości tlenu w procesie oddychania, podobnie działalność drobnoustrojów powoduje zużywanie tlenu na procesy rozkładu substancji organicznej, a produktem jest zwykle dwutlenek węgla. Rozkład materii organicznej w glebie przyspiesza wyższa temperatura, co skutkuje zwiększoną emisją CO₂ do atmosfery (Bednarek i in. 2011; Hillel 2012; Kowalik 2001).

W rocznym cyklu pomiarowym stwierdzono cykliczność wzrostu oraz spadku stężeń CO₂ w powietrzu glebowym. Zasadniczo, razem ze wzrostem temperatur średniorocznych odnotowano wzrost średniorocznych stężeń CO₂. Poczynając od wiosny, stężenie CO₂ w powietrzu glebowym wzrasta aż do końca lata, kiedy osiąga maksymalne wielkości (kilkakrotnie wyższe aniżeli w zimie). Przez jesień i przedzimie do zimy spada zmierzając do kolejnego minimum w porze przedwiośnia (por. Gal i in. 2014). Opóźnienie reakcji jest zapewne spowodowane tym, że ziemia nagrzewa się i stygnie powoli (głębokość przemarzania w rejonie Szczawnicy wynosi ok. 1–1,2 m p.p.t.). Pewien wpływ na wyniki pomiarów

może mieć także „bezwładność” układu pomiarowego. Największe wahania stężenia CO₂ zanotowane na stanowisku w Szczawnicy w miesiącach ciepłych potwierdzają spostrzeżenia Klusmana (1993) o obserwowanych największych waniach stężenia CO₂ w miesiącach letnich oraz znacznie mniejszych i stałych jego poziomach w miesiącach zimowych. Nie stwierdzono ujemnej korelacji stężenia CO₂ i temperatury, która jest wiązana z właściwościami gleby w danym miejscu (por. Gal i in. 2014; Lewicki i in. 2010). 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.

Otrzymane kilkuletnie wyniki pomiarów potwierdzają obserwacje Schloemera i in. (2014) wskazujące, że stężenie CO₂ jest stabilne w dłuższym okresie czasu (więcej niż 1 rok), kiedy mierzone jest poniżej aktywnej biologicznie strefy gleby (ok. 0,5 m) i powyżej zwierciadła wody. Otrzymane wyniki potwierdzają również wcześniejsze spostrzeżenia (Schloemer i in. 2013) i wskazują, że wiarygodne określenie stężenia CO₂ w glebie powinno być dokonywane za pomocą ciągłych i długoterminowych pomiarów stężenia tego gazu. Podkreśla to również Bryidie i in. (2013) wskazując, że pełny zakres zmian strumienia CO₂ może nie zostać uchwycony w ciągu jednego lub kilku cykli rocznych (pomiarowych) z powodu zależności od warunków środowiska. Obserwacje w Szczawnicy wskazują, że pięcioletni okres pomiarowy jest niewystarczający do oceny zmian zachodzących w klimacie.

Jak podkreślają Bryidie i in. (2013) oraz Schloemer i in. (2014), istotny jest również prawidłowy dobór miejsca i głębokości pomiarów oraz uwzględnienie standardowych parametrów gleby i warunków pogodowych. Wyniki badań w Szczawnicy wskazują, że należy unikać miejsc nasłonecznionych, narażonych na duże wahania temperatury, wybierać natomiast miejsca charakteryzujące się stabilnymi warunkami.

Zmienność w okresach kilkudniowych jest zauważalna w porach cieplejszych, od późnej wiosny do przedzimia, najczęściej w powiązaniu z opadami, a typowa sekwencja to wzrost stężeń CO₂ następujący w kilka dni po opadzie. Po obfitych i krótkotrwałych deszczach obserwuje się najpierw skokowy spadek, a następnie wzrost stężeń CO₂. Potwierdza to obserwacje Maier i in. (2010), którzy odnotowali krótkoterminowe spadki stężenia CO₂ w glebie podczas intensywnych opadów deszczu. 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 CO₂, a wytrącające układ z optymalnego stanu – spadek. Deficyt wilgoci w gruncie może być podobnie niekorzystny dla organizmów żywych jak jej nadmiar (por.: Locke i in. 2011; Schacht i Jenkins 2014; Yonemura i in. 2013). Inną, prawdopodobną przyczyną zmian stężenia CO₂ w powietrzu glebowym po opadach może być wypełnienie przestrzeni porowych wodą, co skutkuje „doszczelnieniem” wierzchniej warstwy gruntu. Lewicki i in. (2010) zauważają, że wzrost wilgotności gleby związany z okresowymi opadami może doprowadzić do zwiększenia zawartości CO₂ w glebie z powodu intensyfikacji oddychania i/lub spadku porowatości i przepuszczalności gleby wypełnionej powietrzem.

Zanotowana na stanowisku w Szczawnicy zmienność dobową stężenia CO_2 występuje w okresach ciepłych, kiedy ziemia jest nagrzana (lato, jesień) i tylko na niektórych stanowiskach (odsłoniętych, nasłonecznionych). Niepotwierdzoną, lecz przekonującą tezę może być powiązanie wahań stężeń CO_2 w cyklu dobowym z nasłonecznieniem. Co oczywiste, największe wahania powinny występować w dniach słonecznych, w miejscach niezacienionych. Takie lokalizacje należałoby uznać za nieodpowiednie do monitorowania zmian endogenicznych stężeń CO_2 .

Pomimo bliskiego sąsiedztwa odnotowano duże różnice stężeń CO_2 pomiędzy poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi. Przejawiają się one nie tyle w ogólnym przebiegu cyklu, co różnic w amplitudzie stężeń pomiędzy stanowiskami oraz w dynamice krótkookresowych zmian stężeń CO_2 . 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. Świadczy to o słabej wymianie gazowej między komorą pomiarową a środowiskiem zewnętrznym. Z kolei na stanowisku położonym w terenie otwartym, z dala od drzew, w miejscu eksponowanym na bezpośrednie promienie dynamika zmian stężeń CO_2 jest nieporównanie większa (co nie jest równoznaczne z występowaniem najwyższych stężeń), a przez znaczną część roku zauważalne są cykle dobowe.

Zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiary stężeń CO_2 odznaczają się charakterystyczną „bezwładnością” – 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. (por. Barron-Gafford i in. 2011; Lewicki i in. 2010; Nickerson i Risk 2007). Nie można także wykluczyć, że jakaś część biogenicznego CO_2 jest wytwarzana 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_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 (efekt $<0,5\%$ CO_2). Nie zauważono wzrostu stężenia dwutlenku węgla podczas mrozów i przy zalegającej pokrywie śniegowej (co mogłoby świadczyć o napływie endogenicznego CO_2). W przeciwieństwie do organogenicznego, ewentualny strumień endogenicznego dwutlenku węgla powinien być mało zróżnicowany w cyklu rocznym. Co prawda, w omawianym przypadku pewien wpływ może mieć eksploatacja wód mineralnych, ale według posiadanej wiedzy w okresie badawczym nie były prowadzone działania mogące zaburzyć funkcjonowanie ujęć. Akceptując powyższe założenia, wypada przyjąć, że udział endogenicznego CO_2 nie powinien odbiegać od najniższych odnotowanych wielkości, które zawierały się w przedziale od zera do niespełna $0,5\%$.

Wnioski

Nie ma przekonujących przesłanek, że do wierzchniej warstwy gruntu na omawianym terenie dociera endogeniczny dwutlenek węgla związany z występowaniem szczaw (a jeżeli tak, to śladowych ilościach). Zarejestrowana na stanowisku w Szczawnicy zmienność stężeń odzwierciedla zmiany zawartości organogenicznego CO₂ w powietrzu glebowym.

Czynnikiem decydującym o poziomie stężenia organogenicznego CO₂ w powietrzu glebowym jest temperatura gruntu. W warunkach klimatu Polski zmienność warunków termicznych rzadko kiedy pokrywa się z kalendarzowymi porami roku. Trudno porównywalne są zwłaszcza okresy przejściowe pomiędzy jesienią i zimą oraz zimą i wiosną, które w kolejnych latach przypadają na różne miesiące i mogą się znacznie od siebie różnić. Dlatego przy analizie zmienności stężeń tego gazu lepiej jest posługiwać się termicznymi porami roku, wyznaczanymi według kryteriów klimatologicznych.

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

Literatura

- Amonette J.E., Barr J.L., Erikson R.L., Dobeck L.M. i Shaw J.A., 2013 – Measurement of advective soil gas flux: results of field and laboratory experiments with CO₂. *Environmental Earth Sciences* 70(4), s. 1717–1726; doi: 10.1007/s12665-013-2259-5.
- Badania in-situ podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla w złożu węglowodorów, przy wykorzystaniu wytworzonej, prototypowej instalacji – etap I. Określenie możliwości zatłaczania CO₂ w wybranym złożu węglowodorów. 2006, Archiwum IGSMiE PAN, Kraków, 316 s.
- Barrio M., Bakk A., Grimstad A.A., Querendez E., Jones D.G., Kuras O., Gal F., Girard J.F., Pezard P., Depraz L., Baudin E., Børresen M.H. i Sønneland L., 2014 – CO₂ Migration Monitoring Methodology in the Shallow Subsurface: Lessons Learned From the CO2FIELDLAB Project. *Energy Procedia* 51, s. 65–74; doi:10.1016/j.egypro.2014.07.008.
- Barron-Gafford G.A., Scott R.L., Jenerette G.D., 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.
- 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* 116 (G01023); doi: 10.1029/2010JG001442.
- Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojńska U., Prusinkiewicz Z., 2011 – Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Benson S.M., Hepple R., Apps J., Tsang C.F., Lippmann M., 2002 – Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geologic Formations. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51170.
- Benson S.M., Myer L., 2002 – 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, Wyd. ECN, s. 137–151.
- Benson S.M., Apps J., Hepple R., Lippmann M., Tsang C.F., Lewis C., 2003 – Health, Safety, and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues. [W:] *Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6)*, J. Gale and Y. Kaya (eds.), Oxford: Elsevier Science Limited, s. 243–246.
- Birkenmajer K. red., 1986 – Przewodnik LVII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Piecinach. Kraków, s. 1–181.
- Birkenmajer K., 1956 – Występowanie wód mineralnych na tle budowy geologicznej Szczawnicy. *Prz. Geol.* 4, 11, s. 499–502.

- Birkenmajer K., 1963 – Z historii odkryć wód mineralnych Szczawnicy i Krościenka. *Przegląd Geologiczny*, 11/7, s. 311–313.
- Birkenmajer K., 1965 – Zarys budowy geologicznej pienińskiego pasa skałkowego. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 35, s. 327–356.
- Birkenmajer K., 1992 – System mioceńskich intruzji andezytowych w płaszczowinie magurskiej. [W:] Zuchiewicz W. red. i Oszczytko N. red. *Przewodnik LXIII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Koninkach*. Kraków, s. 36–42.
- Biuletyn monitoringu klimatu Polski 2010–2014. Opracowanie: Miętus M. i in. (2010); Ustrnul Z. i in. (2011–2014). IMGW PIB Warszawa.
- 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 J., Faught B., Olson M., Underwood A., 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.
- Chowaniec J., Witek K., 1997 – Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 Arkusz Szczawnica-Krościenko (1050) Objaśnienia. Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa.
- Ciężkowski W. red., 2002 – Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce. Wrocław, 221 s.
- Dobrzański B., Zawadzki S. red., 1995 – Gleboznawstwo. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Dowgiałło J., Kleczkowski A.S., Macioszczyk T. i Rózkowski A., 2002 – Słownik Hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol. Warszawa, s. 1–461.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywy Rady 85/337/EWG, 96/61/WE, dyrektywy 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.
- Dzieniewicz M., Sechman H., Kotarba M. J., Korus A., 2002a – 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. [W:] 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, s. 107–135.
- Dzieniewicz M., Sechman H., Kotarba M.J., Korus A., 2002b – Surface geochemical surveying of methane and carbon dioxide in the selected areas of the Wałbrzych Coal District. [W:] 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, s. 95–106.
- Elio J., Ortega M.F., Nisi B., Mazadiego L.F., Vaselli O., Caballero J. i Grandia F., 2015 – CO₂ and Rn degassing from the natural analog of Campo de Calatrava (Spain): Implications for monitoring of CO₂ storage sites. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 32, s. 1–14; doi: 10.1016/j.ijggc.2014.10.014.
- Gal F., Michel K., Pokryszka Z., Lafortune S., Garcia B., Rouchon V., de Donato P., Pironon J., Barres O., Taquet N., Radilla G., Prinnet 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.
- Gal F., Proust E., Humez P., Braibant G., Brach M., Koch F., Widory D. i Girard J.F., 2013 – Inducing a CO₂ leak into a shallow aquifer (CO2FieldLab EUROGIA+ project): Monitoring the CO₂ plume in groundwaters. *Energy Procedia* 37, s. 3583–3593; doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.251.
- Hashimoto S., 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.
- Hillel D., 2012 – *Gleba w środowisku*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- 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.
- <http://www.weatheronline.pl/weather/maps>
- Klusman R.W., 1993 – *Soil gas and related methods for natural resource exploration*. Wiley&Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Kondracki J., 2014 – *Geografia regionalna Polski*. Wydanie trzecie uzupełnione, PWN Warszawa, 440 s.
- Kotarba M.J., 2002 – Post-mining gas hazards: the purpose of near-surface geochemical surveys in the Wałbrzych Coal District. [W:] *Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls*. Maciej J. Kotarba red. Society of Research on Environmental Changes GEOSFERA. Kraków, s. 1–10.
- Kotarba M.J., Dzieńiewicz M., Sechman H., Kominowski K., Gogolewska A., Grzybek J., 2002 – Mechanism of coalbed gas flux and prediction of gas hazards in the near-surface zone of the Wałbrzych coal sub-basin. [W:] *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, s. 189–212.
- Kowalik P., 2001 – *Ochrona środowiska glebowego*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kulka A., Rączkowski W., Żytko K., Paul Z., 1991 – *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, skala 1:50 000. Arkusz Szczawnica-Krościenko (1050)*. Wydawnictwa Geologiczne Warszawa.
- Lewicki J. L., Hilley G. E., Dobeck L., 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 R.A., Krapac I.G., Lewicki J.L., 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.
- Magnier C., Rouchon V., Bandeira C., Gonçalves R., Miller D., Dino. R., 2012 – Surface and Sub-surface Geochemical Monitoring of an EOR- CO₂ Field: Buracica, Brazil. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles* 67(2), s. 355–372; doi.org/10.2516/ogst/2011155.
- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrandt E.E., Holstb J., 2010 – Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science*, 61, s. 877–887.

- Maier M., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., 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.
- Makowiec M., 1983 – Wyznaczanie termicznych pór roku. *Przegląd Geofizyczny*, rocznik 28, z. 2, s. 209–220.
- Metcalf A., Granados A. i Delgado Huertas A. 2014 – Determining seasonal natural effects over isotopic baselines for CO₂ storage monitoring. *Energy Procedia* 51, s. 48–55; doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.
- Miętus M., Owczarek M., Filipiak J., 2002 – Warunki termiczne na obszarze Wybrzeża i Pomorza w świetle wybranych klasyfikacji. *Materiały Badawcze IMGW, S. Meteorologia* 36.
- Mocek A. red., 2015 – Gleboznawstwo. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Moni C., Rasse. D.P. 2014 – Detection of simulated leaks from geologically stored CO₂ with ¹³C monitoring. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 26, s. 61–68; doi: 10.1016/j.ijggc.2014.04.
- Monitoring technologies for the Geological Storage of CO₂. Report TSR025 DTI/Pub URN 05/1032: 28, March 2005.
- Nickerson N., Risk D., 2007 – Soil CO₂ Emissions: Changes in effective diffusivity due to sustained winds. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, Suppl. Volume 1–288. 52.
- Nickerson N. i Risk D., 2013 – Soil CO₂ Emissions: Changes in effective diffusivity due to sustained winds. American Geophysical Union, Suppl. 1–288(52), Fall Meeting 2007, abstract #B41C-0644.
- Ortega M.F., Rincones M., Elío J., Gutiérrez del Olmo J., Nisi B., Mazadiego L.F., Iglesias L., Vaselli O., Grandia F., García R., de la Vega R., Llamas, B., – 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.
- Pearce J., Chadwick A., Bentham M., Holloway S., Kirby G., 2005 – Technology status review – Monitoring Technologies for the Geological Storage of CO₂. Report No. COAL R285 DTI/Pub URN 05/1033: 97, March 2005.
- Peter A., Hornbruch G., Dahmke A., 2011 – CO₂ leakage test in a shallow aquifer for investigating the geochemical impact of CO₂ on groundwater and for developing monitoring methods and concepts. *Energy Procedia* 4, s. 4148–4153; doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.359.
- Rajchel L., 2012 – Szczawy i wody kwasowęglowe. Wyd. AGH, Kraków.
- Rajchel L., Józefko I., Motyka J., Rajchel J., 2003 – Zasoby i wykorzystanie wód mineralnych Szczawy, Krościenka i Szczawnicy. [W:] Kozerski B. i Jaworska-Szulc B. red., *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, 11, 2, Politechnika Gdańska. Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska, Gdańska, s. 43–50.
- 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 U., Watanabe N., Singh A., Dietrich P., Kolditz O., 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., 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 S., Furche M., Dumke I., Poggenburg J., Bahr A., Seeger C., Vidal A., 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.
- Schlömer S., Möller 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.
- Schulz A., Vogt C., Lamert H., Peter A., Heinrich B., Dahmke A., Richnow H.H., 2012 – Monitoring of a Simulated CO₂ Leakage in a Shallow Aquifer Using Stable Carbon Isotopes. *Environmental Science & Technology* 46(20), s. 11243–11250; doi: 10.1021/es3026837.
- 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., 2002 – Soil Gas as a Monitoring Tool of Deep Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Preliminary Results from the Encana. EOR Project in Weyburn, Saskatchewan (Canada). [W:] *Greenhouse Gas Control Technologies, Volume L*, ed. J. Gale, Y. Kaya. Oxford: Elsevier Science Limited, s. 391–396.
- Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000 (z objaśnieniami). Arkusz Szczawnica-Krościenko (1050), 1985. Państwowy Instytut Geologiczny, Kulka A., Rączkowski W., Żyto K., Paul Z. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Tarkowski R., Królik W., Uliasz-Misiak B., Wdowin M., 2008 – CO₂ contents in soil air for needs of carbon dioxide monitoring. *Slovak Geological Magazine*, s. 15–18.
- Tarkowski R., 2005 – Geologiczna sekwestracja CO₂. *Studia, Rozprawy i Monografie* nr 132, Kraków.
- Tarkowski R., Barabasz W., Królik W., Uliasz-Misiak B., 2008 – Preliminary results of the microbiological research on CO₂ natural exhalations executed for geobiomonitoring needs. *Slovak Geological Magazine*, s. 23–28.
- Tarkowski R., Batkiewicz K., 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 R., Królik W., 2005 – Monitoring wycieków CO₂ z podziemnych składowisk przy wykorzystaniu biosensora. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 21 (3), s. 93–101.
- Tarkowski R., Królik W., Uliasz-Misiak B., Barabasz W., 2009 – Indicative microorganisms as a tool for testing the underground storage of carbon dioxide. [W:] 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., Sroczyński W., Luboń K., 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 R., Uliasz-Misiak B., Szarawska E., 2005 – Monitoring podziemnego składowania CO₂. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 21 (2), s. 35–48.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., Wdowin M., 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 R., 2007 – Badania podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla do złoża węglowodorów z wykorzystaniem prototypowej instalacji. *Przegląd Geologiczny* 55/8, s. 660–662.
- Uggla H., 1977 – *Gleboznawstwo rolnicze*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Uliasz-Misiak B. red., 2006 – Badania mikrobiologiczne wycieków CO₂ w rejonie Muszyny w celu opracowania metod biomonitoringu. Studia, Rozprawy i Monografie nr 136, Kraków.
- Vandeweyer V., van Bergen F., Winthagen P., Benedictus T., Kronimus A., Krzystolik P., Jura B., Skiba J., 2009 – Monitoring of CO₂ stored in the Enhanced Coalbed Methane pilot site in Kaniów (Poland). *Energy Procedia*, 1/1, s. 3407–3414.
- Wei Y., Caramanna G., Maroto-Valer M., Nathanail P., Steven M., 2013 – An experimental study of the effects of potential CO₂ seepage in sediment. *Energy Procedia* 37; s. 3513–3520; doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.244.
- Yasuda Y., Ohtani Y., Mizoguchi Y., Nakamura T., Miyahara H., 2008 – Development of a CO₂ gas analyzer for monitoring soil CO₂ concentrations. *Journal of Forest Research* 13, s. 320–325.
- Yasuda Y., Ohtani Y., Mizoguchi Y., Nakamura T., 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 S., Yokozawa M., Sakurai G., Kishimoto-Mo A. W., Lee N., Murayama S., Ishijima K., Shirato Y., Koizumi H., 2013 – Vertical soil–air CO₂ dynamics at the Takayama deciduous broad-leaved forest AsiaFlux site. *Journal of Forest Research*, 18: 49–59.
- Yonemura S., Yokozawa M., Sakurai G., Kishimoto-Mo A.W., Lee N., Murayama S., Ishijima K., Shirato Y., Koizumi H., 2013 – Vertical soil–air CO₂ dynamics at the Takayama deciduous broad-leaved forest AsiaFlux site. *Journal of Forest Research* 18, s. 49–59; doi: 10.1007/s10310-012-0385-7.
- Zawadzki S., 1999 – Gleboznawstwo. Podręcznik dla studentów. Praca zbiorowa pod red. nauk. S. Zawadzkiego. Wyd. IV poprawione i uzupełnione. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 556 s.
- Zhou X., Apple M.E., Dobeck L.M., Cunningham A.B., Spangler L.H., 2013 – Observed response of soil O₂ concentration to leaked CO₂ from an engineered CO₂ leakage experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 7, s. 20–29; doi: 10.1016/j.ijggc.2013.03.005.
- Zuchiewicz W. red., Oszczypko N. red. – Przewodnik LXIII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Koninkach. Kraków, s. 36–42.
- Żak S., Przylibski T.A., Ciężkowski W., 2008 – Określenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w Sudetach w rejonach występowania szczaw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

Zmienność sezonowa stężenia CO₂ w powietrzu glebowym w warunkach klimatu południowej Polski

Streszczenie

W monografii zaprezentowano wyniki pięcioletnich badań stężenia CO₂ w powietrzu glebowym, w celu określenia wpływu czynników egzo- i endogenicznych na rejestrowany pomiar. Badania wykonano w Uzdrowisku Szczawnica-Zdrój (SE Polska), eksploatującym wody typu szczaw. Miały one na celu określenie, jakie czynniki i w jakim stopniu decydują o zmienności przestrzenno-czasowej (krótko- i długoterminowej) stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym oraz czy został zarejestrowany dwutlenek węgla pochodzenia endogenicznego. Wyniki pomiarów stężenia CO₂ odniesiono do termicznych pór roku (przedzima, zima, przedwiosnie, wiosna, lato, jesień).

Przedstawiono przegląd dotychczasowych wyników badań dotyczących zmian stężenia CO₂ w powietrzu glebowym na świecie oraz w Polsce. Omówiono rolę gleby w bilansie dwutlenku węgla. Scharakteryzowano położenie geograficzne obszaru badań, klimat, budowę geologiczną oraz wody mineralne i możliwość występowania endogenicznego dwutlenku węgla. W części dotyczącej aparatury oraz metodyki prowadzenia pomiarów opisano: aparaturę pomiarową oraz jej lokalizację, konstrukcję sond pomiarowych, warunki klimatyczne i pogodowe w okresie prowadzenia pomiarów oraz cel i metodykę prowadzenia pomiarów.

Uzyskane wyniki pozwoliły na interpretację sezonowej zmienności CO₂ (w profilu całorocznym), nieregularnej zmienności w okresach kilkudniowych, zmienności w cyklu dobowym. Wyniki wyraźnie wskazują na zależność stężenia CO₂ od pory roku, jak również warunków atmosferycznych (w szczególności temperatury i opadów). Pomimo bliskiego sąsiedztwa i takiej samej konstrukcji czujników odnotowano duże różnice stężeń CO₂ pomiędzy poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi (do ok. 3% CO₂). Zasadniczo w każdym czasie występowały co najmniej kilkukrotne różnice stężeń pomiędzy stanowiskiem w danym czasie najbardziej bogatym w CO₂ a stanowiskiem najbardziej w ten gaz ubogim. Różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami przejawiały się także w dynamice zmian stężeń CO₂. W porównywalnych całorocznych cyklach pomiarowych, średnioroczne stężenia CO₂ na tych samych stanowiskach mało się od siebie różnią, o niecałe pół procenta (0,88–1,24% CO₂); są to różnice mało znaczące wobec blisko trzyprocentowej amplitudy

zmian sezonowych. Na poszczególnych stanowiskach stężenia CO_2 odniesione do przedziałów czasu odpowiadających termicznemu porom roku, były podobne – zarówno w zakresie wielkości średnich, jak i przebiegów zmienności. Analizując stężenia CO_2 godzinowe i dwuminutowe zauważono, że mogą one ulegać zmianom także w zależności od pory dnia; taka zmienność występowała prawie wyłącznie w okresach ciepłych i tylko na niektórych stanowiskach.

W rocznym cyklu pomiarowym dla wszystkich punktów pomiarowych wykazano cykliczność wzrostu oraz spadku wartości stężenia CO_2 w powietrzu glebowym, w powiązaniu z warunkami termicznymi. Wyraźne zaznaczają się sinusoidalne wahania zmian stężenia dwutlenku węgla, z maksimum w miesiącach letnich i minimum w zimie oraz okresie przedwiośnia. W ciepłych porach roku stężenia CO_2 są wyższe aniżeli w chłodnych, nawet kilkakrotnie. W porównywalnych całorocznych cyklach pomiarowych (termiczne pory roku), średnioroczne stężenia CO_2 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 stężeń CO_2 następujący w kilka dni po opadzie (po obfitych i krótkotrwałych deszczach obserwuje się najpierw skokowy spadek, a następnie wzrost stężeń CO_2). Największe wahania stężeń CO_2 występują w dniach słonecznych, w miejscach niezacienionych. Różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi przejawiają się w amplitudzie stężeń CO_2 oraz w dynamice krótkookresowych zmian stężeń CO_2 , co związane jest lokalizacją punktów pomiarowych.

Nie ma przekonujących przesłanek, że do wierzchniej warstwy gruntu na omawianym terenie dociera endogeniczny dwutlenek węgla związany z występowaniem szczaw (a jeżeli tak, to śladowych ilościach). Zarejestrowana na stanowisku w Szczawnicy-Zdrój zmienność stężeń odzwierciedla zmiany zawartości organogenicznego CO_2 w powietrzu glebowym. Czynnikiem decydującym o poziomie stężenia organogenicznego CO_2 w powietrzu glebowym jest temperatura gruntu. Pojedynczy roczny cykl pomiarowy jest zdecydowanie niewystarczający do miarodajnego ustalenia wzorca tła dla stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym. Również pięcioletni okres pomiarowy jest niewystarczający do oceny powiązań ze zmianami zachodzącymi w klimacie.

Seasonal variations in CO₂ concentration in soil air under climatic conditions of southern Poland

Abstract

The monograph presents the results of a 5-year study of CO₂ concentration in soil air to determine the impact of exogenous and endogenous factors on the recorded measurement. The research was conducted in the health resort of Szczawnica-Zdrój (SE Poland) where carbonated water is extracted. Its aim was to determine which factors and to what extent determine the spatio-temporal (short- and long-term) variability in the concentration of carbon dioxide in soil air, and whether endogenous carbon dioxide is present. Meteorological measurements were carried out simultaneously, and the results of measurements of CO₂ concentrations were linked with thermal seasons (early winter, winter, early spring, spring, summer, autumn).

The following issues are presented: overview of previous studies on changes in CO₂ concentration in soil air throughout the world and in Poland, discussion of the role of soil in the CO₂ balance, and characteristics of the geographical position of the study area, climate, geological structure, mineral waters, and the possibility of endogenous CO₂ occurrence. The chapter on the equipment and research methods describes measuring instruments and their location sites, schemes of measuring probes, climate and weather conditions during the measurement period, as well as the aim and methods of measurements.

The study results allow for the interpretation of seasonal variations in the CO₂ concentrations (in a year-round profile), irregular variations within several-day periods, and variations in the daily cycle. The results clearly show that CO₂ concentration depends on both the season and weather conditions (particularly temperature and precipitation). Despite the same structure and small distances between the sensors, considerable differences in CO₂ concentrations between individual measuring sites (up to approx. 3% CO₂). In general, at any time the values differed at least by several times between the site which was most abundant in CO₂ at a given time, and the site where the CO₂ concentration was the lowest. The differences between the individual measuring sites are manifested also by the dynamics of CO₂ concentration variations. During the comparable year-round measurement cycles, the average annual CO₂ concentrations differed at the same sites insignificantly by less than half a per

cent (0.88–1.24% CO₂), as compared to nearly 3% of the seasonal change amplitude. At the individual measuring sites, the CO₂ concentrations assigned to time intervals corresponding to thermal seasons were similar – in terms of both average values and variation trends. While analysing the CO₂ concentrations measured on the hourly and two-minute basis, it was found that they can vary also depending on the time of the day; such variability was observed almost exclusively during warm periods and only at certain sites.

Considering the annual measurement cycle, it was demonstrated that the cyclical increase and decrease of CO₂ concentration in soil air is dependent on thermal conditions at all measuring points. Sinusoidal fluctuations in the concentration of carbon dioxide are clearly marked, with a maximum in summer and a minimum in winter and early spring. In warm seasons the CO₂ concentrations are greater than in cold periods, even several times. In the comparable year-round cycles of measurements (thermal seasons) the average annual CO₂ concentrations at the same measuring points only slightly differ from each other (in terms of average values and variability). The variability observed for the several-day periods is noticeable in warmer seasons, from late spring to early winter, most often in conjunction with heavy rains. The typical sequence is an increase in CO₂ concentrations a few days following precipitation (after heavy and short rains, first a rapid decrease and then an increase in the CO₂ concentration is observed). The greatest fluctuations in CO₂ concentrations are recorded on sunny days, in non-shaded areas. Differences between individual measuring points manifest themselves in the amplitude of CO₂ concentrations and in the dynamics of short-term variations in CO₂ concentrations, which is associated with the location of the points.

There is no compelling evidence that endogenous carbon dioxide associated with the occurrence of carbonated water is supplied to the topsoil in the study area (but if so, only in trace amounts). The variations in the concentration levels, recorded in Szczawnica-Zdrój, reflect the changes in the concentration of organogenic CO₂ in soil air. Ground temperature is a decisive factor for the concentration of organogenic CO₂ in soil air. A single annual measurement cycle is definitely insufficient to establish a meaningful background pattern for carbon dioxide concentration in the soil air. A five-year measuring period is also insufficient to assess the connections with climate change.

STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE

- 1** J. Dziewański (red.):
Oddziaływanie przemysłu siarkowego na środowisko przyrodnicze województwa tarnobrzecznego
- 2** M. Księżyk:
Racjonalne gospodarowanie pierwotnymi nośnikami energii w Polsce
- 3** E. Mokrzycki:
Metoda obliczania kosztów pozyskania sortymentów handlowych węgla kamiennego
- 4** I. Soliński:
Metoda wyznaczania kosztów przyrostu pozyskania nośników energii w aspekcie zapotrzebowania gospodarki
- 5** Z. Maciejewski i in.:
Określenie potrzeb energetycznych kraju na podstawie zmieniającego się w latach prognozy wskaźnika elastyczności zużycia energii względem dochodu narodowego wytworzonego

Z. Maciejewski i in.:
Koncepcja komputerowego systemu wspomagania decyzji w zakresie kompleksu paliwowo-energetycznego
- 6** K. Wanielista, J. Kicki:
Sterowanie wykorzystaniem zasobów naturalnych kopalin w systemie nakazowym i w warunkach gospodarki rynkowej
- 7** I. Soliński i in.:
Opracowanie metodyki ustalania kompleksowych kosztów pozyskiwania i przetwarzania krajowych surowców mineralnych
- 8** J. Dziewański (red.):
Opracowanie kompleksowej metodyki badania oddziaływania górnictwa i przetwórstwa na środowisko oraz zasad i metod rekultywacji obszarów zdegradowanych (Synteza)
- 9** J. Dziewański, U. Józefko:
Budowa geologiczna doliny środkowego Sanu między Niewistką a Dynowem
- 10** J. Sokołowska:
Metodyka poszukiwania złóż kopalin płynnych
- 11** S. Węclawik:
Kompleksowa metodyka badań ochrony surowców balneologicznych przed oddziaływaniem przemysłu
- 12** R. Ney (red.) i in.:
Zwiększenie efektywności pozyskiwania i wykorzystania surowców mineralnych
- 13** W. Suwała i in.:
Pakiet modeli gospodarki surowcami mineralnymi
- 14** W. Blaschke i in.:
Metodyka optymalizacji wykorzystania surowców mineralnych w procesach przeróbki i przetwórstwa
- 15** K. Wanielista i in.:
Zasady racjonalnej gospodarki zasobami naturalnymi złóż kopalin stałych
- 16** E. Mokrzycki, S.A. Blaschke:
Metodyka liczenia kosztów wzbogacania węgla kamiennego

E. Mokrzycki, Z. Grudziński:
Metodyka liczenia kosztów przeróbki rud cynkowo-ołowiowych
- 17** J. Dziewański (red.):
Zasady badań środowiska przyrodniczego w aspekcie jego ochrony

- 18 S. Szukalski i in.:
Przegląd metod określania wpływu czynników ogólnogospodarczych na gospodarkę paliwowo-energetyczną kraju
- 19 M. Nieć, Z. Kokesz:
Metody geostatystyczne w rozpoznawaniu i dokumentowaniu złóż oraz w ochronie środowiska
- 20 E. Mokrzycki i in.:
Skutki oddziaływania zanieczyszczeń na środowisko przyrodnicze i metody szacowania strat
- 21 Z. Pilecki:
Statystyczna analiza emisji sejsmoakustycznej dla kontroli zagrożenia tąpniętami
- 22 Praca zbiorowa pod red. E. Mokrzyckiego
Problemy kompleksowego wykorzystania surowców mineralnych
- 23 K. Wanielista:
Wartość i metoda wyceny zasobów złóż kopalin stałych
- 24 J. Waclawski, J. Kicki:
Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1981–1990, cz. I
- 25 J. Dziewański:
Budowa geologiczna terenów i problemy geologiczno-inżynierskie zbudowanych i projektowanych stopni wodnych w dolinie Sanu
- 26 H. Gaj i in.
Model makroekonomiczny energia–ekologia–ekonomia. Podejście metodyczne
- 27 E. Pietrzyk-Sokulska:
Petrogeneza utworów skalnych okolicy Młotów w Górach Bystrzyckich
- 28 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Opłacalność pozyskiwania i wykorzystania wód geotermalnych w wybranych regionach Polski
- 29 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Metodyka oceny walorów środowiska przyrodniczego na przykładzie województwa tarnobrzeskiego
- 30 J. Kicki, J. Waclawski:
Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1981–1990, cz. II
- 31 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke:
Koncepcja systemu cen na węgiel kamienny w warunkach przejściowych do gospodarki rynkowej
- 32 Praca zbiorowa pod red. R. Neya:
Energia odnawialna
- 33 W. Sroczyński:
Karpackie grunty pokrywowe (nieskaliste) i ich rola w budownictwie wodnym
- 34 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Prognozy kosztów oraz konkurencyjność odnawialnych i nieodnawialnych nośników energii w Polsce
- 35 Praca zbiorowa pod red. E. Mokrzyckiego:
Technologie czystego węgla na etapie przeróbki i przygotowania węgla do procesu użytkowania
- 36 M. Kudelko:
*Koszty ekologiczne w strukturze kosztów polskiego przemysłu węglowego
Projekt badawczy nr 0789/P1/93/05*
- 37 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke i E. Mokrzyckiego:
Węgiel koksowy na rynkach światowym i krajowym
- 38 W. Suwała:
Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego w Polsce

- 39 E. Pietrzyk-Sokulska:
Wpływ podziemnej eksploatacji i przeróbki węgla kamiennego na środowisko przyrodnicze w Polsce
- E. Panek:
Wpływ eksploatacji i spalania węgla brunatnego na środowisko przyrodnicze w Polsce
- 40 Praca zbiorowa pod red. J.J. Hycnara i E. Mokrzyckiego:
Technologie czystego węgla – odsiarczanie i demineralizacja za pomocą silnych zasad
- 41 J. Dziewański, Z. Olszamowski:
Likwidacja filtracji wody przez masyw skalny prawego przyczółka zapory Wisła-Czarne
- 42 J. Dziewański, E. Gąsiorowska, A. Mirosławska:
Zagadnienia geologiczno-inżynierskie rejonu stopnia wodnego Sromowce Wyżne na Dunajcu
- 43 Praca zbiorowa pod red. K. Ślizowskiego:
Występowanie i rozkład jodu w biosferze rzeki Wisły
- 44 S. Siewierski
Strategiczne i operacyjne modele optymalizacji, eksploatacji i przeróbki rud metali nieżelaznych
- 45 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Wybrane zagadnienia metodyki badań efektywności górnictwa węgla kamiennego
- 46 J. Jarosz:
Sposób wyznaczania zasięgu strefy spękań i lokalizacji odspojień w stropie wyrobisk górniczych za pomocą metody sejsmicznej
- 47 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Denudacja stoków w górnych odcinkach zlewni rzek karpackich
- 48 B. Kępińska:
Model geologiczno-geotermalny niecki podhalańskiej
- 49 K. Wanielista, S. Siewierski, J. Kicki, J. Butra:
Ekonomiczne aspekty eksploatacji zasobów złóż rud miedzi
- 50 E. Pietrzyk-Sokulska:
Zagadnienia zoologiczne eksploatacji surowców skalnych (na przykładzie województwa nowosądeckiego)
- 51 W. Suwała, M. Kudęko:
Analiza rynku paliw w Polsce w aspekcie wprowadzania instrumentów rynkowych w dziedzinie ochrony środowiska
- 52 G. Gawrońska:
Metoda szacowania strat w rolnictwie i leśnictwie spowodowanych zanieczyszczeniem atmosfery
- 53 W. Sroczyński:
Karpackie pokrywy czwartorzędowe w świetle wyników standardowych badań laboratoryjnych dla budownictwa wodnego (obiekty: Dobczyce, Krempna, Niewistka)
- 54 J. Kicki, E. J. Sobczyk:
Zasoby przemysłowe węgla kamiennego kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w latach 1981–1994
Analiza i trend zmian
- 55 J. Binder, J. Dziewański:
Budownictwo wodne a ochrona środowiska przyrodniczego
System wodny Gabczikowo na Dunaju
- 56 W. Dziurzyński:
Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego
- 57 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke i R. Neya:
Formuły sprzedażne węgla kamiennego zmodyfikowane do wymogów sprawozdawczości Unii Europejskiej
- 58 A. Sroka:
Dynamika eksploatacji górniczej w punktu widzenia szkód górniczych

- 59 Z. Pilecki:
Modelowanie zachowania się masywu skalnego na podstawie badań empirycznych in-situ
- 60 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Warunki geologiczno-inżynierskie podłoża Zespołu Zbiorników Wodnych Czorsztyn-Niedzica i Sromowce Wyżne im. Gabriela Narutowicza na Dunajcu
- 61 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Określenie podatności stoków i brzegów potoków na erozję na przykładzie zlewni Ropy
- 62 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Sozologiczne problemy w budownictwie wodnym
- 63 Z. Grudziński:
System cenowy w górnictwie węgla brunatnego
- 64 U. Lorenz:
Metoda oceny wartości węgla kamiennego energetycznego uwzględniająca skutki jego spalania dla środowiska przyrodniczego
- 65 P. Dobak:
Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów
- 66 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Prognoza oddziaływania projektowanego zbiornika wodnego Krempna na środowisko przyrodnicze
- 67 J. Topolnicki:
Wyrzuty skalno-gazowe w świetle badań laboratoryjnych i modelowych
- 68 B. Uliasz-Misiak:
Technologia opróbowania poziomów wodonośnych rurowym próbnikiem złoża
- 69 M. Kudelko, W. Suwała:
Analiza wpływu wprowadzenia w Polsce opłat produktowych i depozytów na koszty funkcjonowania podmiotów gospodarczych i gospodarstw domowych oraz poziom inflacji
- 70 K. Czajka:
Geochemiczna i petrologiczna charakterystyka kontaktów złoża siarczkowego rud Zn–Pb ze skałami otaczającymi, w rejonie bytomskim
- 71 S. Stryczek, A. Gonet:
Geoinżynieria
- 72 M. Kudelko:
Model oceny funkcjonowania instrumentów zarządzania procesami redukcji emisji dwutlenku siarki w elektroenergetyce
- 73 J. Dziewański, D. Grodecki:
Przesłona przeciwfiltracyjna pod lewym skrzydłem zapory w Myczkowcach na Sanie
- 74 Praca zbiorowa pod red. R. Neya:
Energia odnawialna w ochronie środowiska
- 75 Praca zbiorowa pod red. S. Rychlickiego:
Metody wykrywania zanieczyszczeń ropopochodnych w środowisku gruntowo-wodnym
- 76 Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego:
Wybrane problemy wykorzystania geotermii – I
- 77 W. Blaschke:
System cen energetycznego węgla kamiennego
- 78 E.J. Sobczyk:
Wpływ zmian modelu gospodarczego na gospodarkę zasobami złóż węgla kamiennego w górnośląskim zagłębiu węglowym
- 79 E. Panek:
Metale śladowe w glebach i wybranych gatunkach roślin obszaru polskiej części Karpat

- 80 A. Uliasz-Bocheńczyk:
Wpływ wybranych dodatków mineralnych na właściwości mieszanin uszczelniających i wypełniających stosowanych w górnictwie podziemnym
- 81 E. Pietrzyk-Sokulska, E. Panek:
Podstawy strategii ekorozwoju w aspekcie zmian administracyjnych kraju – wybrane elementy
- 82 U. Lorenz:
Parytet importowy węgla kamiennego energetycznego
- 83 J. Dziewański, J. Dudek, Z. Olszamowski:
Nowa przesłona przeciwfiltracyjna w podłożu lewego skrzydła i przyczółka zapory Wisła–Czarne
- 84 Z. Pilecki, E. Popiołek:
Wpływ eksploatacji rud na zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi i jego badanie za pomocą metod geofizycznych
- 85 J. Darski, J. Kicki, E.J. Sobczyk:
Raport o stanie gospodarki zasobami złóż węgla kamiennego
- 86 J. Kwaśniewski:
Zastosowanie wybranych metod analizy sygnałów niestacjonarnych w diagnozowaniu lin i rur stalowych
- 87 E. Mokrzycki:
Ceny węgla energetycznego oferowanego w latach 1990–1999 w portach głównych eksporterów
- 88 L. Pająk:
Model numeryczny rozwoju strefy przemarzania gruntu w warunkach eksploatacji energii cieplnej
- 89 J. Butra:
Metoda doboru systemu eksploatacji złóż rud miedzi w polach o jednorodnej charakterystyce geologicznej
- 90 Praca zbiorowa pod red. S. Plewy:
Rozpoznanie pola cieplnego ziemi w obszarze Górnoląskiego Zagłębia Węglowego dla potrzeb górnictwa i ciepłownictwa
- 91 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Tematyka prac naukowo-badawczych realizowanych w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w XV-letnim okresie
- 92 Praca zbiorowa pod red. W. Neya:
Wybrane problemy wykorzystania geotermii – II
- 93 B. Kępińska:
Warunki hydrotermalne i termiczne podhalańskiego systemu geotermalnego w rejonie otworu Biały Dunajec PAN-1
- 94 E. Mokrzycki:
Ceny węgla koksowego oferowanego w latach 1990–1999 w portach głównych eksporterów
- 95 W. Suwała, M. Kudęko, J. Kamiński:
Rynek węgla kamiennego w Polsce
- 96 J. Dziewański, Z. Pilecki, W. Sroczyński:
Zagadnienia badań geologiczno-inżynierskich w projektowaniu tuneli komunikacyjnych w utworach fliszu karpackiego – na przykładzie tunelu w Lalikach
- 97 W. Dziurzyński, T. Pałka:
Komputerowy system monitoringu zagrożenia pożarowego i wyznaczania dróg ucieczkowych w warunkach pożaru w kopalni podziemnej
- 98 E. Pietrzyk-Sokulska:
Waloryzacja obszarów występowania i eksploatacji złóż zwięzłych surowców skalnych na przykładzie Beskidów Zachodnich
- 99 W. Sroczyński, A.K. Wota:
Prognozowanie oddziaływania karpackich zbiorników wodnych na środowisko geologiczne i powierzchnię ziemi

- 100** U. Ozga-Blaschke:
Parytet importowy węgla koksowego
- 101** P. Czaja:
Analiza nośności segmentowej obudowy szybów upodatnionej materiałem nieliniowo sprężystym
- 102** J. Dziewański, J. Starowicz:
Zastosowanie kruszywa z miejscowych złóż materiałów budowlanych do betonów hydrotechnicznych (na przykładzie zapory w Solinie)
- 103** A. Wójcik:
Otrzymywanie pochodnych poliwinylkarbazolu o właściwościach elektroluminescencyjnych
- 104** M. Giergiel:
Komputerowe wspomaganie w projektowaniu maszyn wibracyjnych
- 105** P. Batko:
Wpływ właściwości strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania
- 106** L. Gawlik, I. Grzybek
Szacowanie emisji metanu w polskich zagłębach (system węgla kamiennego)
- 107** M. Wójcik
Awaryjne hamowanie górniczych wyciągów szybowych urządzeniami ciernymi – teoria, badania i aplikacje przemysłowe
- 108** J. Mucha
Struktura zmienności zawartości [Zn] i [Pb] w śląsko-krakowskich złożach rud Zn-Pb
- 109** J. Dziewański, Z. Pilecki
Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach
- 110** Praca zbiorowa pod redakcją E. Pietrzyk-Sokulskiej:
Uwarunkowania przyrodniczo-kulturowe funkcjonowania turystyki zrównoważonej w Beskidach Zachodnich
- 111** W. Suwała, M. Kudętko, J. Kamiński:
Rynek węgla kamiennego w Polsce w latach 1991–2001
- 112** U. Lorenz, W. Blaschke, Z. Grudziński:
Propozycja nowej formuły sprzedaży węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej
- 113** B. Kępińska, A. Łowczowska:
Wody geotermalne w lecznictwie, rekreacji i turystyce
- 114** J. Cieślak:
Metody natężeniowe w analizie elementów konstrukcyjnych
- 115** Praca zbiorowa pod redakcją W. Sroczyńskiego:
Uwarunkowania geologiczne realizacji zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny na Odrze
- 116** Z. Blaschke, W. Blaschke:
Ocena celowości wzbogacania węgla na potrzeby energetyki w samodzielnych zakładach przerobczych
- 117** B. Kłozy-Karczmarczyk:
Zastosowanie odpadów energetycznych w ograniczaniu transportu zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górniczych
- 118** J. Dziewański, A.K. Wota, D. Limanówka, E. Cebulak, S. Michalik:
Katastrofalny spływ wodno-gliniasty w Muszynie w lipcu 2002 roku
- 119** U. Ozga-Blaschke:
Metoda powiązania parametrów jakościowych węgla koksowego z jego wartością użytkową
- 120** J. Dziewański, Z. Pilecki:
Problemy rozpoznania geologiczno-inżynierskiego w projektowaniu tuneli drogowych Węgierska Górka i Milówka

- 121** M. Kudelko:
Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym
- 122** Praca zbiorowa pod redakcją W. Blaschke:
Funkcjonowanie górnictwa węgla kamiennego na podstawie uregulowań prawnych Unii Europejskiej w latach 1993–2002
- 123** Praca zbiorowa pod redakcją W. Blaschke:
Możliwości funkcjonowania kopalń węgla kamiennego w Polsce w świetle przepisów UE dotyczących zasad świadczenia pomocy państwa dla górnictwa w latach 2002–2010
- 124** T. Olkusiński:
Straty energii chemicznej w procesach energetycznego wykorzystania węgla kamiennego
- 125** A.P. Barbacki:
Zbiorniki wód geotermalnych niecki miechowskiej i środkowej części zapadliska przedkarpackiego
- 126** J. Sałacki:
Model złoża rud miedzi dla potrzeb projektowania i prowadzenia eksploatacji
- 127** Suwała W., Kudelko M., Kamiński J.:
The primary energy market in Poland in 1993–2002
- 128** Nieć M., Matł K., Wyrwicki R., Wiśniewski J.:
Iły turowskie mit kopalni towarzyszących
- 129** K. Ślizowski, J. Köhsling, L. Lankof:
Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce
- 130** Publikacja zbiorowa pod redakcją E. Panek:
Uwarunkowania przyrodniczo-kulturowe rozwoju turystyki zrównoważonej w Bieszczadach
- 131** E. Pietrzyk-Sokulska:
Kryteria i kierunki adaptacji terenów po eksploatacji surowców skalnych. Studium dla wybranych obszarów Polski
- 132** R. Tarkowski:
Geologiczna sekwestracja CO₂
- 133** D. Grodecki:
Zależność wodo- i cementochłonności od budowy geologicznej podłoża zapory w Myczkowcach
- 134** J. Kicki, E.J. Sobczyk:
Restrukturyzacja górnictwa w Polsce a struktura i wystarczalność zasobów węgla kamiennego
- 135** B. Kępińska:
Warunki termiczne i hydrotermalne podhalańskiego systemu geotermalnego
- 136** Praca zbiorowa pod red. B. Uliasz-Misiak:
Badania mikrobiologiczne wycieków CO₂ w rejonie Muszyny w celu opracowania metod biomonitoringu
- 137** J. Ślizowski:
Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej
- 138** M. Kaliski, D. Staśko:
Bezpieczeństwo energetyczne w gospodarce paliwowej Polski
- 139** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński:
Koszty zewnętrzne w energetyce – zastosowanie w badaniach modelowych
- 140** L. Zawisza:
Hydrodynamiczne modelowanie basenów naftowych dla oceny ich perspektyw złożowych
- 141** U. Ozga-Blaschke:
Międzynarodowy rynek węgla koksowego

- 142** B. Uliasz-Misiak:
Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce
- 143** Praca zbiorowa pod red. M. Kudelko:
Scenariusze rozwoju krajowego sektora węgla kamiennego do 2020 roku – foresight technologiczny
- 144** E. Pilecka:
Indukowane podziemną działalnością górniczą wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu a lineamenty na obrazach satelitarnych
- 145** A.K. Wota:
Optymalizacja wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych z wykorzystaniem metody AHP (Analytic Hierarchy Process)
- 146** M. Filipowicz:
Experimental investigations of m-atomic and m-molecular processes in muon catalysis of nuclear fusion reactions
- 147** A. Szurlej:
Rola gazu ziemnego w bilansie paliwowo-energetycznym kraju ze szczególnym uwzględnieniem energetyki, w aspekcie wymogów ochrony środowiska
- 148** L. Gawlik:
Wpływ poziomu wydobycia węgla kamiennego na koszty jego pozyskania w kopalniach
- 149** H. Woźniak:
Osiadanie gruntów zwałowanych w świetle badań modelowych
- 150** E.J. Sobczyk:
Uciążliwość geologiczno-górnictwowych warunków eksploatacji węgla kamiennego i jej wpływ na gospodarkę złożem
- 151** R. Skrzypczak:
Jednostki przyrodniczo-kulturowe Beskidów w aspekcie turystyki zrównoważonej
- 152** P. Saługa:
Ocena ekonomiczna projektów i analiza ryzyka w górnictwie
- 153** A. Uliasz-Bocheńczyk:
Mineralna sekwestracja CO₂ w wybranych odpadach
- 154** A. Malinowska:
Ocena zagrożenia uszkodzeniami obiektów budowlanych na terenach górniczych z wykorzystaniem wnioskowania rozmytego
- 155** Praca zbiorowa pod red. W. Suwały:
Analiza problemu relokacji źródeł energii elektrycznej dla polskiego systemu elektroenergetycznego i przedsiębiorstw w wyniku polityki klimatycznej UE
- 156** U. Lorenz, Z. Grudziński:
Międzynarodowe rynki węgla kamiennego energetycznego
- 157** Praca zbiorowa pod red. K. Galosa:
Waloryzacja bazy zasobowej piasków szklarskich i ocena perspektyw złożowych w świetle współczesnych wymagań przemysłu szklarskiego
- 158** B. Tomaszewska:
Transformations of soil and aquatic environment under the impact of anthropogenic factors – examples from the selected area in Skawina
- 159** M. Kopacz:
Metoda wyceny projektów inwestycyjnych w polskim górnictwie rud miedzi z wykorzystaniem symulacji stochastycznej
- 160** M. Nieć:
Kryteria geologiczne złoża (kryteria bilansowości)

- 161** K. Galos:
Wpływ składu mineralnego wybranych itów na właściwości tworzyw gresowych
- 162** T. Danek, A. Leśniak, A. Pięta:
Numerical modeling of seismic wave propagation in selected anisotropic media
- 163** E. Lewicka:
Ocena kopaliny skaleniowo-kwarcowej ze Sławniowic (Sudety Wschodnie) jako potencjalnego surowca ceramicznego
- 164** Praca zbiorowa pod redakcją R. Tarkowskiego:
Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO₂ w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (charakterystyka oraz ranking)
- 165** W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński, M. Kudelko:
The primary energy tendencies in Poland
- 166** L. Lankof:
Analiza odkształcalności i utraty masy zubrów brunatnych w aspekcie składowania odpadów promieniotwórczych w środkowopolskich wysadach solnych
- 167** P. Saługa:
Elastyczność decyzyjna w procesach wyceny projektów geologiczno-górnictwowych
- 168** J. Ślizowski, K. Urbańczyk, D. Wiewiórka, M. Kowalski, K. Serbin:
Stateczność wyrobisk w pokładach ewaporatów LGOM w aspekcie budowy podziemnego laboratorium badawczego
- 169** J. Kulczycka:
Ekoefektywność projektów inwestycyjnych z wykorzystaniem koncepcji cyklu życia produktu
- 170** W.M. Bajdur:
Eko-polielektrolity syntetyczne redukujące ładunki zanieczyszczeń w ściekach i wodach przemysłowych
- 171** H. Wirth:
Wieloczynnikowa wycena złóż i ich zasobów na przykładzie przemysłu metali nieżelaznych
- 172** B. Rajpolt, B. Tomaszewska:
Zanieczyszczenie środowiska gruntowo-wodnego fluorem na przykładzie Huty Aluminium w Skawinie
- 173** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński:
Modelowanie rynków energii dla różnych systemów dystrybucji uprawnień do emisji dwutlenku węgla
- 174** T. Olkusi:
Analiza produkcji węgla kamiennego i jego wykorzystanie w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce
- 175** J. Kamiński:
Siła rynkowa w krajowym sektorze wytwarzania energii elektrycznej
- 176** Praca zbiorowa pod redakcją A. Uliasz-Bocheńczyk:
Zaczyny cementowe w technologiach wiertniczych geologicznego składowania CO₂
- 177** Praca zbiorowa pod redakcją E. Lewickiej:
Innowacyjne technologie pozyskiwania najważniejszych surowców ceramicznych i szklarskich
- 178** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński:
Handel uprawnieniami do emisji dwutlenku węgla w Unii Europejskiej
- 179** K. Stala-Szlugaj:
Polish imports of steam coal from the East (CIS) in the year 1990–2011
- 180** Z. Grudziński:
Metody oceny konkurencyjności krajowego węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej
- 181** D. Foszcz:
Zasady określania optymalnych rezultatów wzbogacania wieloskładnikowych rud miedzi

- 182** T. Niedoba:
Wielowymiarowe charakterystyki zmiennych losowych w opisie materiałów uziarnionych i procesów ich rozdziału
- 183** U. Lorenz, U. Ozga-Blaschke, K. Stala-Szlugaj, Z. Grudziński:
Węgiel kamienny w kraju i na świecie w latach 2005–2012
- 184** Z. Pilecki:
Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali
- 185** R. Tarkowski, L. Dziewińska, S. Marek:
The characteristics of selected potential geological structures for CO₂ underground storage in Mesozoic deposits of the Szczecin–Mogilno–Uniejów Trough
- 186** Praca zbiorowa pod redakcją E. Lewickiej:
Market analysis of selected raw materials for the ceramic and glass industries in Poland over the years 1990–2012
- 187** M. Nieć, M. Młynarczyk:
Gospodarowanie zasobami węgla kamiennego w Polsce
- 188** U. Lorenz:
Ocena oddziaływania zmian cen węgla energetycznego na rynkach międzynarodowych na krajowy rynek węgla
- 189** A. Kot-Niewiadomska:
Uwarunkowania geologiczne zagospodarowania terenu przemysłowego Zakładów Metalurgicznych „Trzebinia” w Trzebini
- 190** B. Tomaszewska:
Ocena możliwości efektywnego wykorzystania schłodzonych wód termalnych
- 191** I. Baic:
Analiza wielokierunkowego wykorzystania depozytów mułków węglowych wraz z oceną ich oddziaływania na środowisko
- 192** M. Kudelko, J. Kamiński, P. Kaszyński, M. Malec:
Analiza wrażliwości sektora wytwarzania energii elektrycznej i ciepła
- 193** W. Bujakowski:
Geologiczne, środowiskowe i techniczne uwarunkowania projektowania i funkcjonowania zakładów geotermalnych w Polsce
- 194** T. Ratajczak, E. Hyncar, P. Bożęcki:
Kryterium mineralogiczne jako element oceny przydatności niektórych polskich surowców ilastych do budowy przesłon hydroizolacyjnych
- 195** D. Kryzia:
Wybór technologii wytwarzania energii elektrycznej w warunkach ryzyka
- 196** J. Pszonka:
Studium sedymentologiczne warstw cergowskich w jednostce dukielskiej i przeddukielskiej Karpat fliszowych
- 197** K. Krawiec:
Analiza wrażliwości numerycznego modelu procesu zapadliskowego na zmianę wartości parametrów fizyczno-mechanicznych metodą zbiorów losowych w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE OPRACOWANIA I PRZYGOTOWANIA DO DRUKU PUBLIKACJI W DZIALE WYDAWNICZYM: STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE

1. Treść merytoryczna publikacji i sposób ich ujęcia powinny odpowiadać poziomowi działu i powinny odnosić się do tytułu działu: Studia, Rozprawy, Monografie.
2. Układ publikacji powinien być przejrzysty, zwarty, a jego treść podzielona na rozdziały tworzące zamkniętą całość. Objętość publikacji nie powinna być mniejsza od 5 arkuszy wydawniczych i nie powinna przekraczać 10 arkuszy wydawniczych (ok. 120 stron).
3. Każda publikacja powinna zawierać streszczenie w języku angielskim w objętości 1,5–2 strony maszynopisu. Tabele i rysunki zawarte w publikacji powinny również zawierać podpisy w języku angielskim.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE PRZYGOTOWANIA TEKSTU NA DYSKIECIE

Wskazówki techniczne (przygotowanie elektronicznej wersji artykułu)

Kompletny materiał do druku powinien zawierać (wersja elektroniczna):

- tekst zasadniczy,
- tytuł w języku polskim i angielskim,
- tytuły naukowe Autorów, miejsca pracy oraz adres e-mail do korespondencji,
- tabele i rysunki,
- podpisy pod tabele i rysunki w języku polskim oraz angielskim,
- streszczenia i słowa kluczowe w obu językach,
- podziękowania, jeśli występują,
- oświadczenie o źródłach finansowania (jeśli inne niż domyślne).

Autorzy spoza Polski, zgłaszający artykuł do druku w języku angielskim nie muszą przedstawiać polskiej wersji językowej – zostanie ona uzupełniona w Redakcji.

Dostarczenie elektronicznej wersji artykułu jest obowiązkowe.

Tekst powinien być zapisany w programie WORD FOR WINDOWS.

Zaleca się zastosowanie czcionki Times Roman 12 lub Arial 12.

Całkowita objętość artykułu nie powinna przekraczać 15 stron.

W trakcie wpisywania tekstu prosimy o przestrzeganie następujących zasad:

- nie dzielić ręcznie wyrazów,
- nie justować poszczególnych linii akapitu za pomocą klawisza spacji,
- nie spacjaować wyrazów (np. t y t u ł),
- nie podkreślać wyrazów, zdań (np. podkreślony).

Streszczenia w obu językach powinny zawierać co najmniej 1900 znaków ze spacjami i powinny odzwierciedlać merytoryczną zawartość artykułu.

Tytuły i podtytuły należy oddzielić od tekstu odstępem górnym i dolnym. Przy podziale tekstu na rozdziały i podrozdziały należy stosować numerację cyfrową wielorzędową:

- rozdziały – 1, 2, ...
- podrozdziały pierwszego stopnia – 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2, ...
- podrozdziały drugiego stopnia – 1.1.1, 1.1.2, ..., 1.2.1, 1.2.2, ...
- podrozdziały trzeciego stopnia i ewentualnie inne tytuły pozostawia się zazwyczaj nienumerowane.

Tabele i rysunki należy umieścić w tekście po powołaniach. Zaleca się numerować je od 1 do *n* w obrębie całej publikacji.

Rysunki prosimy dostarczać również w wersji elektronicznej w osobnych plikach w formatach obsługiwanych przez program Corel DRAW 16 (np. *.CDR, *.CGM, *.TIF, *.JPG, *.PCX, *.IMG, *.XLS).

Wzory matematyczne numeruje się podając numer ujęty w nawiasy okrągłe na prawym marginesie (jeśli jest ich mało, nie wymagają numeracji). **Wszelkie symbole we wzorach** i powołaniach na nie w tekście prosimy pisać pismem pochylonym. Ważne jest, by 0 (zero) wpisane było przez klawisz cyfrowy, w celu odróżnienia go od litery O(o).

Powołania na cytowaną literaturę w tekście artykułu są obowiązkowe. W powołaniach na literaturę podajemy w nawiasie okrągłym nazwisko autora i rok wydania, np. (Rysiowa 1969) – jeden autor; (Nowakowski, Kapinos 1992) – dwóch autorów; (Kluz i in. 1972) – więcej niż dwóch autorów.

W przypadku prac zbiorowych posiadających redaktorów w nawiasie okrągłym podajemy nazwisko redaktora z adnotacją red. i rok wydania, np. (Zdun, red. 2004) – jeden redaktor; (Nowak, Kopa, red. 2003) – dwóch redaktorów; (Krus i in., red. 2000) – więcej niż dwóch redaktorów.

W przypadku prac zbiorowych nie posiadających redaktorów w nawiasie okrągłym podajemy początek tytułu i rok wydania, np. (Poradnik... 1971).

Literatura powinna być umieszczona na końcu pracy z oznaczeniem „LITERATURA”. Autor sporządza jeden wykaz literatury dla całej pracy, w której znajdują się tylko te pozycje, na które powołano się w tekście artykułu. Kolejność pozycji cytowanej literatury powinna być alfabetyczna (wg tekstów powołań).

Prawidłowy zapis bibliograficzny powinien zawierać:

- Książki jednego lub dwóch autorów:
Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania (Wyd. 1, 2, ...).
Miejsce wyd., nazwa wydawcy, np.:
Rysiowa H., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
Rysiowa H., Nowakowski J., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
- Książki kilku autorów (powyżej dwóch):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliografii:
Rysiowa i in. 1969 – Rysiowa H., Nowakowski J., Kapinos J., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
- Artykuły z czasopism i innych wydawnictw ciągłych (jeden lub dwóch autorów):
Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł artykułu. Pełny tytuł czasopisma (nie skrót), numer rocznika (tomu), numer zeszytu, strony, np.:
Nowakowski J., Kapinos J., 1992 – Przemysł aluminiowy – stan obecny i tendencje zmian. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 23, z. 1, s. 17–28.
- Artykuły z czasopism i innych wydawnictw ciągłych (powyżej dwóch autorów):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliograficzny:
Rysiowa i in. 1992 – Rysiowa H., Nowakowski J., Kapinos J., 1992 – Przemysł aluminiowy – stan obecny i tendencje zmian. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 23, z. 1, s. 17–28.
- Prace zbiorowe (pod redakcją jednego lub dwóch redaktorów):
Nazwisko i inicjały imion redaktora naukowego (z zaznaczonym skrótem red.), rok wydania: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania. Numer tomu (części, jeżeli jest). Wydawca, miejsce wydania, liczba stron, np.:
Paszowski B., red., 1971 – Poradnik inżyniera. Elektronika. Wyd. 2, t. 1. WNT, Warszawa, s. 256.
Pasikowski T., Gdowski A., red., 1994 – Zarys krystalografii. Wyd. 1, Wydawnictwo Praca i Płaca, Wrocław, s. 145.
- Prace zbiorowe (pod redakcją więcej niż dwóch redaktorów):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliografii:
Jackowski i in., red. 2007 – Jackowski T., Kryza O., Pasikow R., red., 2007 – Analiza gospodarki wodnej. Wyd. 1, WNT, Warszawa, s. 55.
- Prace zbiorowe nie posiadające redaktorów:
Powołanie plus pełny zapis bibliografii: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania, Numer tomu (jeśli bibliografia wielotomowa). Wydawca, miejsce wydania, strony lub liczba stron, specyficzne oznaczenia, np.
Decyzja... 2003 – Decyzja nr 1230/2003/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 czerwca 2003 r. przyjmująca wieloletni program działania w dziedzinie energii: Inteligentna Energia – Europa (2003–2006). Dziennik Urzędowy L 176, 15/07/2003 s. 0029–0036; 32003D1230.
Program... 2007 – Program rozwoju elektroenergetyki w latach 2007–2010. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, s. 68.