

## Zawartości radonu i wodoru w powietrzu glebowym potencjalnych struktur typu *fairy circle* z rejonu Lubelszczyzny

### Radon and hydrogen concentrations in soil gas of potential fairy circle structures in the Lublin region

Kamil Hebda, Marek Janiga, Małgorzata Wendorff-Belon

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Charakterystyczne eliptyczne zagłębienia terenu o specyficznej strefowej roślinności, tzw. *fairy circle*, łączone są z powierzchniowymi emisjami wodoru. Dwie takie struktury zlokalizowane na terenie województwa lubelskiego (około 30 km na wschód od Lublina, Polska) wytypowano do wykonania badań obejmujących zawartość radonu i skład molekularny powietrza glebowego. Jest to obszar, w obrębie którego ze względu na wysoką zawartość silnie przeobrażonej termicznie materii organicznej (np. w utworach dolnosylurskich) potencjalnie może następować generacja wodoru. Co więcej, rejon ten znajduje się w okolicach strefy Teisseyre’a-Tornquista – obszaru silnie pociętego uskokiemi, które mogą stanowić potencjalne drogi migracji wodoru na powierzchnię. Pomiary zawartości radonu zostały wykonane za pomocą urządzenia RAD7 firmy DurrIDGE, a próbki powietrza glebowego poddano analizie składu molekularnego z wykorzystaniem chromatografów gazowych Agilent 7890A wyposażonych w detektory płomieniowo-jonizacyjny (FID), ciepłno-przewodnościowy (TCD) i płomieniowo-fotometryczny (FPD). Na większej z wytypowanych struktur, oznaczonej literą W, wykonano pomiary dla 24 punktów. Zawartości radonu wahały się od 0 do 10 873,6 Bq/m<sup>3</sup>. Na drugiej z wytypowanych struktur, oznaczonej literą F, wykonano pomiary dla 9 punktów. Zawartości radonu wahały się od 271,6 Bq/m<sup>3</sup> do 1169,5 Bq/m<sup>3</sup>. Badania zawartości radonu pokazały, że potencjalne drogi migracji gazów na powierzchnię występują nie w samej strukturze *fairy circle*, ale na jej granicy oraz w niewielkiej odległości od granicy. Analizy składu molekularnego powietrza glebowego wykazały podwyższone zawartości metanu i ditlenku węgla. Zawartości wodoru wyraźnie różnicowały dwie struktury. W przypadku struktury W wodór wystąpił tylko w dwóch próbkach w niskich stężeniach. W przypadku struktury F był obecny w czterech próbkach w stężeniach wyraźnie wyższych (od 108 ppm do 314 ppm).

**Słowa kluczowe:** wodór naturalny, zawartości radonu, powietrze glebowe, struktury *fairy circle*.

**ABSTRACT:** Characteristic land forms, so-called fairy circles, are associated with surface hydrogen emissions. Two such structures located in the Lublin Voivodship (approximately 30 km east of Lublin, Poland) were selected for soil gas studies (radon content and molecular composition). This is an area where hydrogen generation could potentially occur due to the high content of highly thermally transformed organic matter (e.g., in the Lower Silurian formations). Moreover, the area is located near the Teisseyre-Tornquist zone, which is strongly cut by faults that could represent potential routes for hydrogen migration to the surface. The radon content was measured using a RAD7 from DurrIDGE. Soil air samples were analyzed for molecular composition using Agilent 7890A gas chromatographs equipped with flame ionization (FID), thermal conductivity (TCD), and flame photometric (FPD) detectors. Measurements were taken at 24 points for the larger of the selected structures, marked with the letter W. Radon concentrations ranged from 0 to 10,873.6 Bq/m<sup>3</sup>. Measurements for 9 points were taken for the second of the selected structures, marked with the letter F. Radon contents ranged from 271.6 to 1169.5 Bq/m<sup>3</sup>. Analyses of radon contents show that potential pathways of gas migration to the surface occur not in the fairy circle structure itself but at the boundary and nearby. Molecular composition analyses of the soil gas reveal elevated methane and carbon dioxide contents. Hydrogen contents differentiate the two formations. For the W structure, hydrogen occurs in only two samples at low concentrations, while for the F formation, it was identified in four samples at markedly higher concentrations (from 108 to 314 ppm).

**Keywords:** natural hydrogen, radon concentrations, soil gas, fairy circle structures.

Wstęp

Obecny stan wiedzy na temat złóż naturalnego wodoru jest ograniczony, ponieważ do niedawna sądzono, że gaz ten powstaje na Ziemi w niewielkich ilościach lub zbyt szybko się rozprasza, a systemy detekcji nie były przystosowane do jego wykrywania (Zgonnik, 2020; Blay-Roger i in., 2024). Ostatnie odkrycia nagromadzeń wodoru w formacjach geologicznych w Mali (np. Maiga i in., 2023), w Hiszpanii czy Australii (Blay-Roger i in., 2024) zwiększyły zainteresowanie tym surowcem jako czystym źródłem energii.

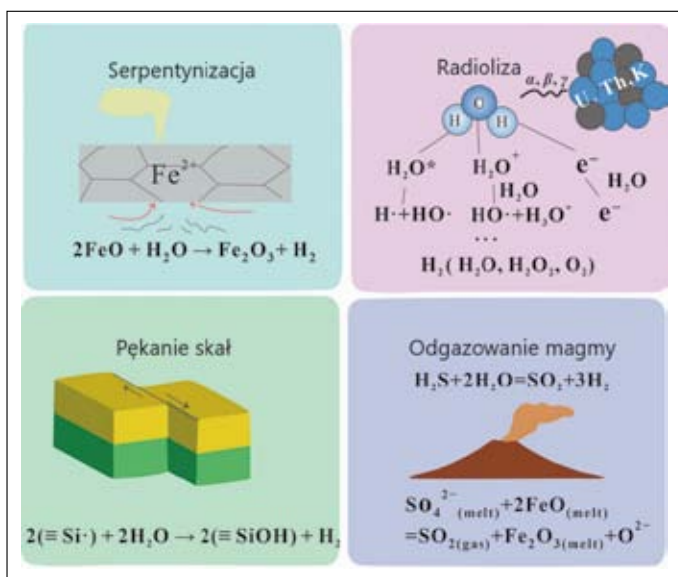
Wodór cząsteczkowy (dalej H<sub>2</sub> lub wodór) może być generowany przez procesy biogeniczne i abiotyczne. Wśród biogenicznych źródeł wodoru wyróżnia się aktywność fermentujących bakterii beztlenowych i sinic, które przekształcają materię organiczną w wodór. W procesach abiotycznych największy potencjał generacyjny wodoru wykazuje serpentyzacja, podczas której ultramaficzne skały reagują z wodą, tworząc nowe minerały i wodór. Inne procesy to radioliza wody – w wyniku promieniowania α, β lub γ generowanego z pierwiastków promieniotwórczych. Wodór może występować także w głębszych warstwach Ziemi, takich jak płaszcz i jądro, a jego migracja ku powierzchni może zachodzić przez głęboko ukorzone uskoki. Dodatkowo wodór pojawia się w gazach wulkanicznych i w efekcie mechanicznego pęknięcia skał (rysunek 1). Może być też generowany w wyniku wietrzenia skał czy wysokotemperaturowej przemiany bazaltu.

Uważa się, że emanacje wodoru na powierzchni Ziemi mają podobną genezę jak wycieki węglowodorów w przypadku systemu naftowego. Węglowodory poprzez nieszczelności

w skale uszczelniającej migrują przez system spękań i uskoków w kierunku powierzchni. Wycieki te są geochemicznymi wskaźnikami dla poszukiwań ropy i gazu ziemnego na danym obszarze. Geochemia powierzchniowa wykorzystywana jest przez branżę naftową jako stosunkowo niedroga metoda obniżania ryzyka związanego z poszukiwaniami węglowodorów (np. Prinzhofer i in., 2019; Moretti i in., 2021). W przypadku poszukiwań złóż wodoru geochemia powierzchniowa może analogicznie posłużyć jako wskaźnik obecności tego pierwiastka w strefie przypowierzchniowej, co może sugerować występowanie akumulacji w głębszych warstwach (Prinzhofer i in., 2019; Moretti i in., 2021). W świetle braku wypracowanej strategii poszukiwawczej, która z pewnością powinna objąć kompleksową analizę danych geologicznych, geofizycznych i geochemicznych, monitorowanie emanacji wodoru na powierzchni wydaje się obecnie bezpośrednią i efektywną metodą (Lefeuvre i in., 2021).

Badania w Brazylii, Rosji i Australii potwierdziły obecność powierzchniowych emisji wodoru w obrębie charakterystycznych, najczęściej eliptycznych zagłębień terenu, tzw. *fairy circles* (Prinzhofer i in., 2019; Myagkiy i in., 2020; Moretti i in., 2021; Mainson i in., 2022). Struktury te są dobrze widoczne na zdjęciach satelitarnych, a ich głębokość w stosunku do średnicy (zwłaszcza w przypadku struktur o średnicy <1 km) wynosi zwykle około 1% i nigdy nie przekracza 3% (Moretti i in., 2021). Ponadto maksymalne stężenia emanacji wodoru w tych strukturach prawie nigdy nie są obserwowane w ich centrum (Myagkiy i in., 2020). Choć nie określono dotychczas jednoznacznie mechanizmów prowadzących do powstania takich struktur, są one dobrymi wskaźnikami w prospekcji złóż wodoru naturalnego. W Minas Gerais w Brazylii długoterminowe monitorowanie takich struktur wykazało zmienność stężenia wodoru, z dziennym przepływem 0,03–0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, co odpowiada 3 g H<sub>2</sub>/dobę/m<sup>2</sup>. W Rosji zidentyfikowano podobne struktury o promieniach od 9 m do ponad 1 km i całkowitej powierzchni 77 km<sup>2</sup>. Dzienny wyciek wodoru ze zidentyfikowanych struktur oszacowano na około 70 t (Moretti i in., 2021). W Australii na Wyspie Kangura i półwyspie Yorke zaobserwowano *fairy circles* z gęstością struktur rosnącą wokół odwiertów, w których odnotowano wysokie stężenia wodoru (Moretti i in., 2021).

Biorąc pod uwagę mnogość procesów prowadzących do generacji wodoru oraz analizując powyższe przykłady i uwarunkowania geologiczne obszaru Polski, prawdopodobne wydaje się, że emanacje wodoru i związane z nimi struktury typu *fairy circle* mogą występować na terenie Polski (Jasielski i in., 2024; Matyasik i Ciechanowska; 2024; Sechman i Twaróg, 2024; Twaróg i in., 2024). Analiza map rzeźby terenu powstałych z wykorzystaniem technologii LiDAR w poszczególnych rejonach Polski oraz danych literaturowych wykazała



Rysunek 1. Główne procesy abiotyczne generujące wodór (Wang i in., 2023; zmodyfikowane)

Figure 1. Main abiotic processes generating hydrogen (after Wang et al., 2023, modified)

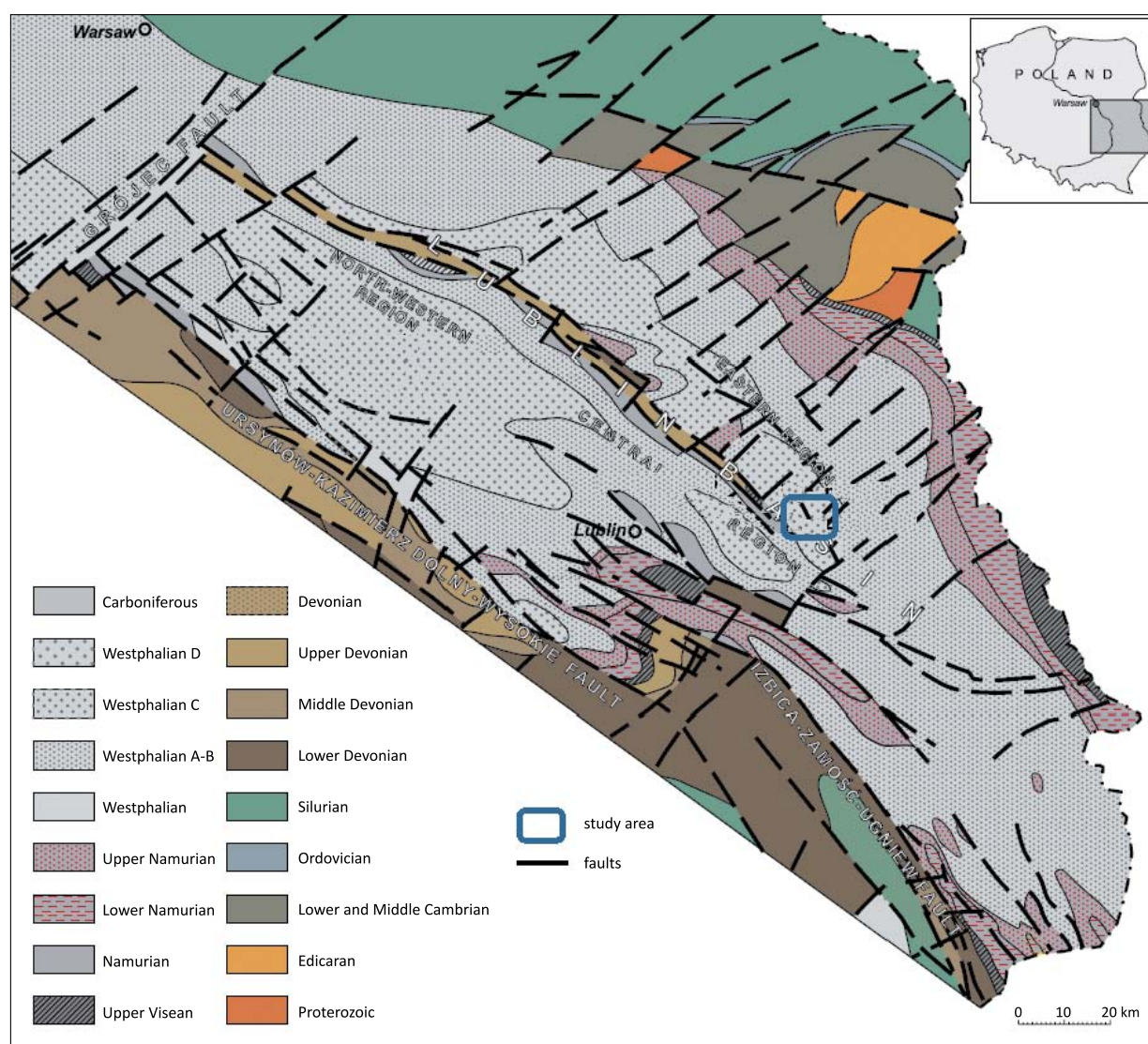
obecność nagromadzeń eliptycznych zagłębień terenu w rejonie Lubelszczyzny.

Wytypowany obszar badań znajduje się około 30 km na wschód od Lublina (rysunek 2). W tym rejonie ze względu na wysoką zawartość silnie przeobrażonej termicznie materii organicznej, o refleksyjności wityrynytu szacowanej nawet na 2,7–3,4% w utworach dolnosylurskich (Poprawa, 2010; Prugar, 2013), potencjalnie może następować generacja wodoru. Co więcej, rejon ten znajduje się w okolicach strefy Teisseyre’a-Tornquista – obszaru silnie pociętego uskokami, które mogą stanowić potencjalne drogi migracji wodoru na powierzchnię. W najbliższej okolicy znajduje się również kopalnia węgla kamiennego Bogdanka – węgiel również może posiadać właściwości generacyjne wodoru.

W ramach niniejszej pracy wybrano na podstawie danych satelitarnych (źródło: Google Earth) oraz numerycznego

modelu terenu (źródło: Geoportal2) dwie struktury w rejonie Lubelszczyzny, gdzie postanowiono zweryfikować doniesienia o obecności wodoru w powietrzu glebowym oraz wykorzystać metodę pomiaru radonu dla wyjaśnienia pochodzenia gazów z obszarów struktur typu *fairy circle*.

W strefach na powierzchni, zlokalizowanych bezpośrednio nad strefami uskokowymi, obserwowany jest wyraźny wzrost stężenia radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ), co pozwala na ściśle określenie przebiegu stref tektonicznych (Zdrojewicz i Belowska-Bień, 2004; Richon i in., 2010; Skupio i in., 2018; Rupak i in. 2021; Riudavets i in., 2022; Skupio i Hebda, 2024). W pracy założono, że współwystępowanie podwyższonych koncentracji wodoru oraz radonu w danym punkcie pomiarowym będzie wskazywało na genezę wodoru z głębszych warstw Ziemi oraz pozwoli wskazać potencjalne drogi jego migracji na powierzchnię.



**Rysunek 2.** Mapa zasięgu utworów dewonu i karbonu w regionie lubelskim, na niebiesko oznaczony rejon badań (zmodyfikowane za Żelichowski i Porzycki, 1983)

**Figure 2.** Schematic map of the Devonian and Carboniferous in the Lublin region, the study area marked with a blue rectangle (Żelichowski and Porzycki, 1983; modified)

### Obszar badań

Wytypowane do badań struktury typu *fairy circle* zlokalizowane są w województwie lubelskim, około 30 km na wschód od Lublina. Geologicznie rejon znajduje się w regionie lubelskim, rozciągającym się od Hrubieszowa po Warszawę, wyznaczanym zasięgiem utworów karbonu na powierzchni podpermsko-mezozoicznej. Obszar występowania utworów karbońskich w regionie lubelskim zwany jest karbońskim basenem lubelskim, rowem lubelskim lub Lubelskim Zagłębieniem Węglowym. Region ten leży w obrębie południowo-zachodniego obrzeżenia prekambryjskiej platformy wschodnioeuropejskiej, wzdłuż strefy Teisseyre’a-Tornquista (Narkiewicz, 2003). Tektonicznie rejon badań zlokalizowany jest w obrębie struktury synkinalnej Radzyń–Bogdanka–Chełm. Najstarsze skały przewiercone w rejonie (otwór Busówno IG-1) obejmują granitoidy lub migmatyty mezoproterozoiku, na których zalegają skały kambru, ordowiku i syluru. Devon nawiercony został w rejonie badań pod miąższymi utworami karbonu (około 800 m), reprezentowanego przez wszystkie ogniwa stratygraficzne. Główne zasoby węgla kamiennego związane są z jeziornymi osadami warstw lubelskich (moskow). Nadkład karbonu stanowią głównie kreda, wykształcona jako skały węglanowo-ilasto-krzemionkowe (do 600 m miąższości), mioceńskie piaski kwarcowe i czwartorzędowe osady związane z działalnością lodowcową (gliny, piaski, mułki) (Harasimiuk i in., 2015).

Pierwsza struktura (zwana dalej strukturą W) jest kształtu eliptycznego o rozciągłości SW–NE wzdłuż dłuższej osi (rysunek 3). Średnica transversalna struktury wynosi około 560 m, średnica sprzężona – około 360 m, cała struktura zajmuje obszar około 0,16 km<sup>2</sup>.

Druga z wytypowanych struktur (zwana dalej strukturą F), również kształtu eliptycznego o rozciągłości SW–NE wzdłuż dłuższej osi, jest znacznie mniejsza od struktury W. Jej średnica transversalna wynosi około 214 m, średnica sprzężona – około 146 m, a jej powierzchnia – około 0,02 km<sup>2</sup>. Na podstawie analizy obrazów LiDAR (rysunki 3 i 4) określono, że obiekty wyróżniają się na tle otaczającego je krajobrazu. Ponadto można zauważyć, że położone są w obniżeniu terenu i nie posiadają stromych zboczy, co wpisuje się w charakterystykę struktur typu *fairy circle* (Moretti i in., 2021). Oba obiekty charakteryzują się zróżnicowaniem roślinności, tworzącej odmienne strefy, tj. pierścień zewnętrzny złożony głównie z gęsto rosnących drzew i krzewów, miejscami lekko podmokły, oraz obszar wewnętrzny złożony z roślinności torfowej i – w zależności od morfologii terenu i stanu wód – silnie podmokły (struktura W) lub całkowicie zalany (struktura F).

### Metodyka

Pomiary zawartości radonu w powietrzu glebowym zostały wykonane za pomocą urządzenia RAD7 firmy DurrIDGE. Urządzenie to wykorzystuje detektor  $\alpha$  w postaci stałej, który przekształca promieniowanie  $\alpha$  emitowane podczas rozpadu jądra izotopu <sup>222</sup>Rn na sygnał elektryczny. Badanie zawartości radonu w powietrzu glebowym polegało na umieszczeniu sondy pomiarowej na głębokości około 70 cm oraz uruchomieniu urządzenia RAD7, które przez 10 minut pobierało powietrze glebowe do komory detektora, analizując zawartość radonu (rysunek 5). Pobór powietrza glebowego pod kątem analiz składu chemicznego wykonano następująco: w otworze o głębokości około 1,2 m, wykonanym za pomocą



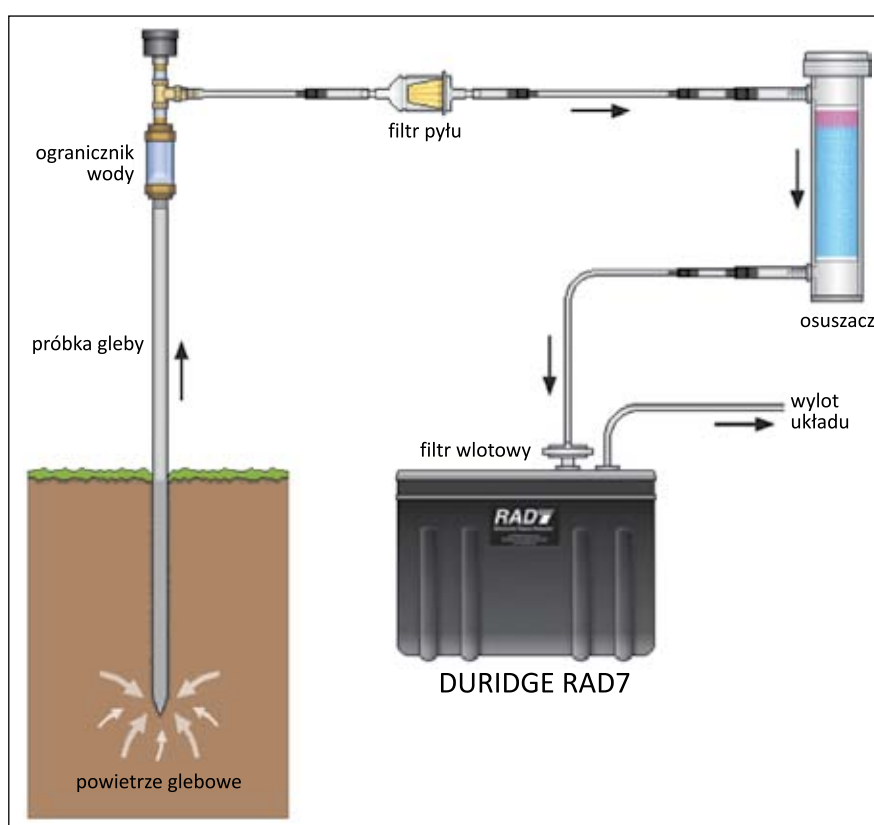
**Rysunek 3.** Obraz satelitalny (Google Earth) oraz numeryczny model terenu (Geoportal2) pokazujące morfologię oraz relief struktury W  
**Figure 3.** Satellite image (Google Earth) and Terrain Numerical Model (Geoportal2) of the structure W



**Rysunek 4.** Obraz satelitarny (Google Earth) oraz numeryczny model terenu (Geoportal2) pokazujące morfologię oraz relief struktury F  
**Figure 4.** Satellite image (Google Earth) and Terrain Numerical Model (Geoportal2) of the structure F

metalowego wbijaka, umieszczono sondę do poboru gazu. Po upływie pięciu minut powietrze glebowe pobrano strzykawką gazoszczelną z zaworem odcinającym i wtłoczono do fiolek uprzednio wypełnionych solanką.

Po przetransportowaniu do laboratorium próbki powietrza glebowego poddano analizie składu molekularnego z wykorzystaniem dwóch chromatografów gazowych. Analizy obejmowały oznaczenie zawartości następujących związków:  $H_2$ , He,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , CO,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , i- $C_4$ , n- $C_4$ , neo- $C_5$ , i- $C_5$ ,



**Rysunek 5.** Schemat układu pomiarowego zawartości radonu z powietrza glebowego

**Figure 5.** Measurement system scheme for determining radon content in soil air

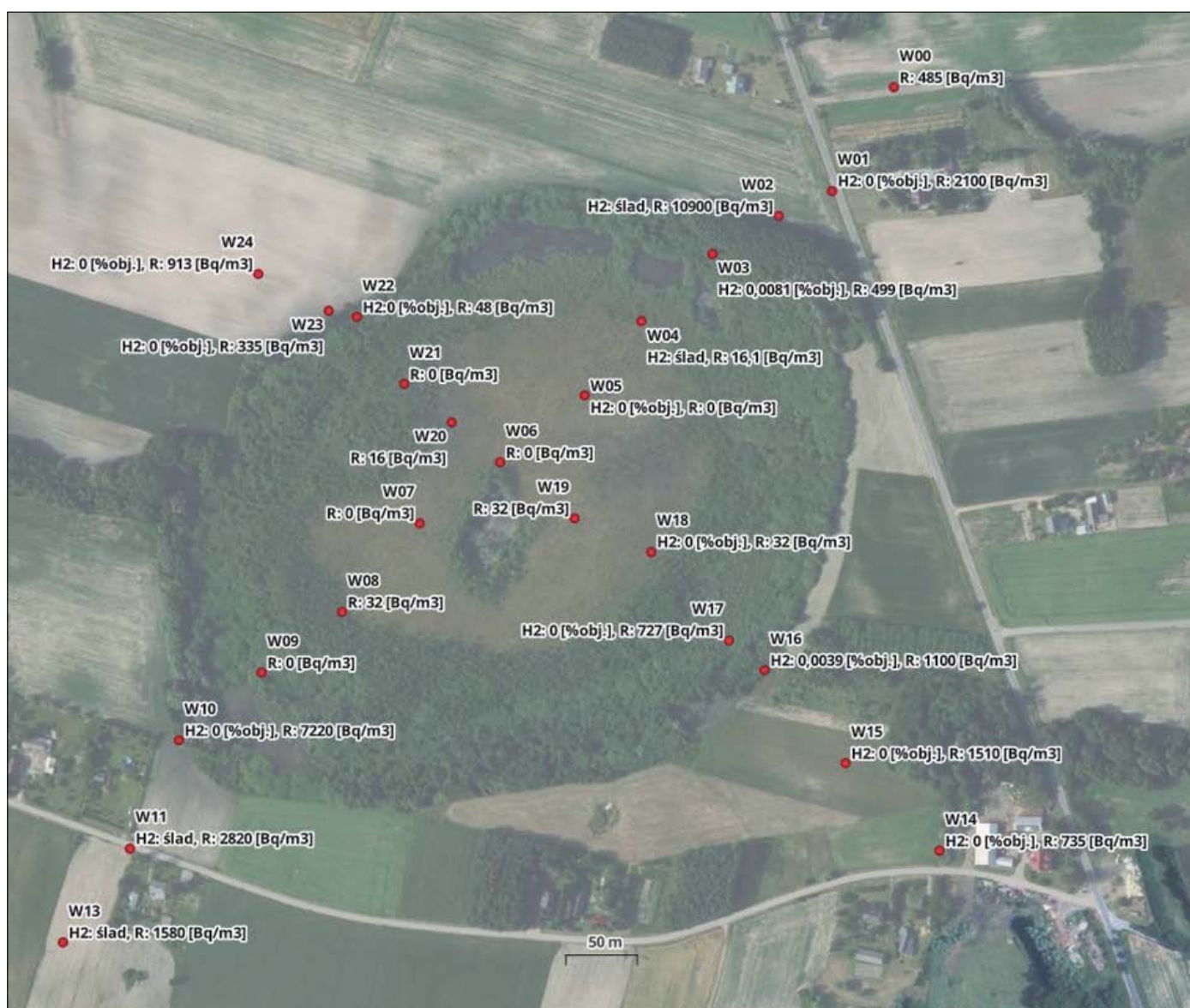
n-C<sub>3</sub> oraz sumy węglowodorów C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, C<sub>8</sub>, C<sub>9</sub> i C<sub>10</sub>. Zaworowe chromatografy gazowe AGILENT 7890A wyposażone były w detektory płomieniowo-jonizacyjne (ang. *flame ionization detector*, FID) i ciepłno-przewodnościowe (ang. *thermal conductivity detector*, TCD), metanizer oraz kolumny HP-PLOT/Q, HP-MOLESIEVE 5A i Molecular Sieve 5A Ultimet (Supelco Analytical). Szczegółowe warunki pracy chromatografów oraz elementy walidacji zostały przedstawione w artykule Kani i Janigi (2011).

### Wyniki i dyskusja

Na większej z wytypowanych struktur (W) wykonano pomiar dla 24 punktów w siatce punktów na planie krzyża

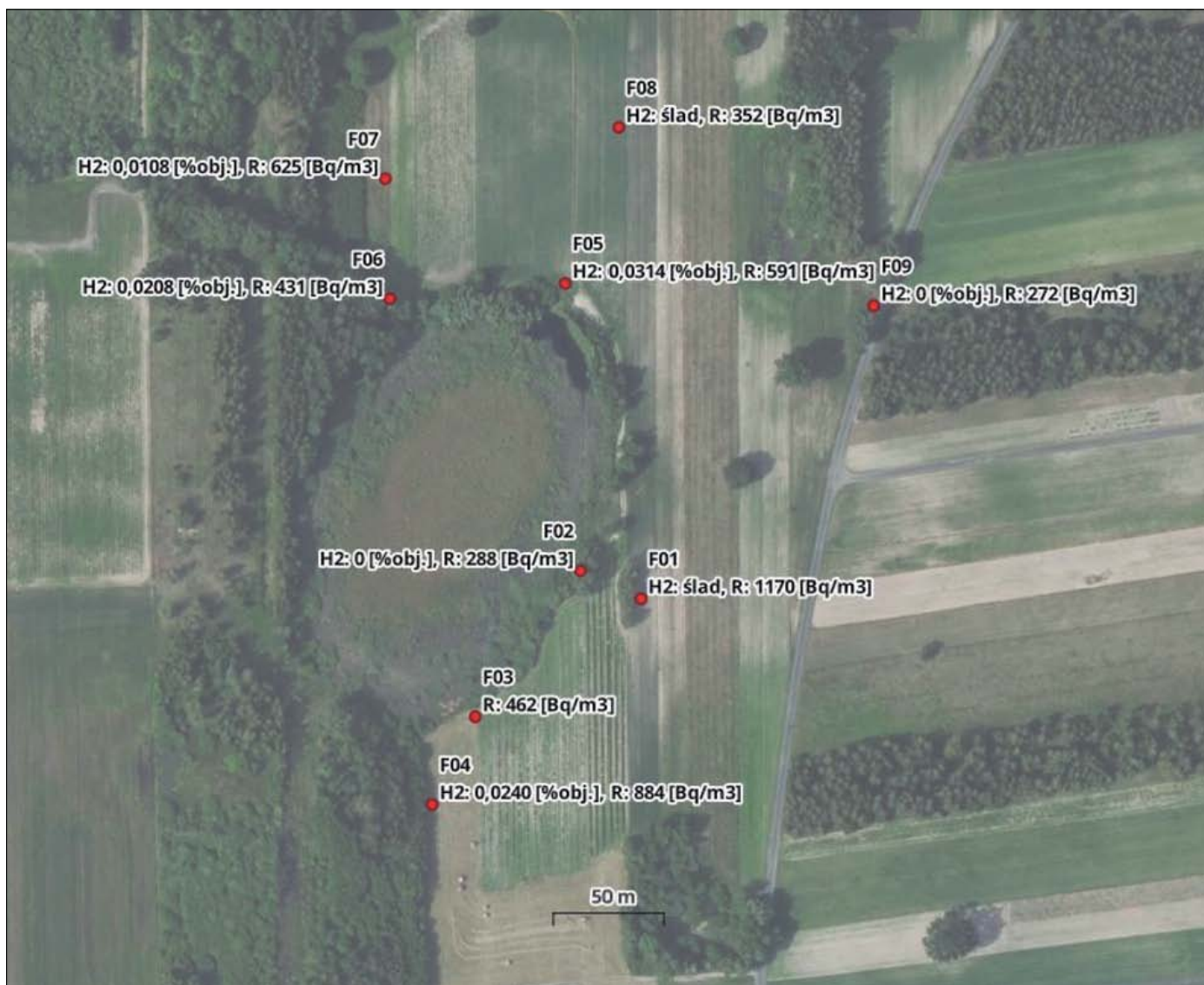
– 13 punktów na linii o rozciągłości SW–NE oraz 11 punktów na linii o rozciągłości SE–NW (rysunek 6). Odległość pomiędzy poszczególnymi punktami wynosiła około 60 m.

Zawartości radonu wahały się od 0 do 10 873,6 Bq/m<sup>3</sup> (tabela 1). Podwyższone wartości wystąpiły na granicy *fairy circle* i malały wraz ze wzrostem odległości od struktury. W obrębie samej struktury zawartość radonu w powietrzu glebowym wynosi 0 lub jest bliska tej wartości. Powietrze glebowe zostało pobrane w 16 punktach. Wnętrze struktury *fairy circle* było mocno podmokłe, co uniemożliwiło pobór gazu (punkty W00, W06, W07, W08, W09, W19, W20 i W21). W pobranych próbkach powietrza glebowego wodór wystąpił w dwóch próbkach w stężeniach 39 ppm i 81 ppm, a w czterech w ilościach śladowych (poniżej 30 ppm) (tabela 1). Głównymi składnikami gazów były azot i tlen.



**Rysunek 6.** Mapa struktury W z siatką punktów poboru próbek wraz z wynikami pomiarów radonu [Bq/m<sup>3</sup>] i zawartości wodoru [ppm] w powietrzu glebowym

**Figure 6.** Map of the W structure with sampling grid and radon emission measurement [Bq/m<sup>3</sup>] and hydrogen concentration [ppm] results



**Rysunek 7.** Mapa struktury F z siatką punktów poboru próbek wraz z wynikami pomiarów radonu [Bq/m<sup>3</sup>] i zawartości wodoru [ppm] w powietrzu glebowym

**Figure 7.** Map of the F structure with sampling grid and radon emission measurement [Bq/m<sup>3</sup>] and hydrogen concentration [ppm] results

We wszystkich próbkach wystąpił metan (w stężeniach od 2 ppm do 18621 ppm) oraz ditlenek węgla (od około 700 ppm do 12230 ppm). Obecność etanu stwierdzono w trzech próbkach gazów na poziomie 1 ppm, a wyższe węglowodory nie wystąpiły. Podwyższone zawartości metanu i ditlenku węgla, przy braku wyższych węglowodorów, wskazują na biogeniczne procesy powstawania metanu. Dodatkowo przy migracji gazów z głębszych poziomów najprawdopodobniej byłby obecny hel, którego brak. Trudno zauważyć jakiegokolwiek korelacje pomiędzy składem powietrza glebowego a zawartościami radonu.

W przypadku struktury F przeprowadzono pomiary zawartości radonu oraz pobrano próbki powietrza glebowego w 9 punktach pomiarowych. Pomiary wykonano z różnych stron struktury, na jej granicy oraz dalej od niej, w odległości do 100 m (rysunek 7). Odległość między punktami wynosiła około 50 m. Badania pokazały wzrost zawartości radonu w powietrzu

glebowym na granicy struktury. Zawartości radonu w punktach oddalonych dalej od granicy *fairy circle* są jeszcze wyższe. Zawartości radonu wahały się od 271,6 Bq/m<sup>3</sup> do 1169,5 Bq/m<sup>3</sup>. Powietrze glebowe zostało pobrane w 8 punktach (brak gazu z punktu F03). Obecność wodoru nie została stwierdzona w dwóch próbkach, a w kolejnych dwóch odnotowano śladowe jego ilości. W pozostałych czterech próbkach stężenia wodoru wahały się od 108 ppm do 314 ppm (tabela 2). Wartości zerowe były związane z próbkami o najniższych zawartościach radonu. Głównymi składnikami gazów były azot i tlen oraz ditlenek węgla (od około 7700 ppm do 31 100 ppm). W próbkach wystąpił metan (w stężeniach od 3 ppm do 157 ppm) i etan (trzy próbki o zawartościach 1 ppm). Obecności wyższych węglowodorów ani helu nie stwierdzono. Tak jak w przypadku struktury W raczej nie występuje migracja gazów, a metan został wygenerowany w wyniku procesów mikrobiologicznych.

**Tabela 1.** Skład molekularny powietrza glebowego ze struktury W [% (v/v)]  
**Table 1.** Molecular composition of the soil gases of the W structure [% (v/v)]

	W00	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10	W11	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24
C <sub>1</sub>	-	0,0004	0,0002	0,0010	0,0948	1,8621	-	-	-	-	0,0041	0,0003	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0004	0,0023	-	-	-	0,0374	0,0120	0,0034
C <sub>2</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
C <sub>3</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
i-C <sub>4</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
n-C <sub>4</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
neo-C <sub>5</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
i-C <sub>5</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
n-C <sub>5</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>6</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>7</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>8</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>9</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>10</sub>	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
CO <sub>2</sub>	-	0,1584	0,2515	0,5753	0,8540	0,7182	-	-	-	-	0,0783	0,1342	0,7354	0,3891	0,4009	0,1068	0,1476	0,0707	-	-	-	0,3372	1,2164	1,2231
N <sub>2</sub>	-	78,6361	78,6347	79,3154	79,0046	77,5780	-	-	-	-	78,6198	78,6502	79,0808	78,9452	78,9006	78,6733	78,6972	78,6507	-	-	-	78,6793	77,8271	77,8704
O <sub>2</sub>	-	21,2048	21,1132	20,0983	20,0457	19,8415	-	-	-	-	21,2977	21,2150	20,1824	20,6649	20,6980	21,2157	21,1544	21,2762	-	-	-	20,9458	20,9440	20,9018
CO	-	0,0004	0,0004	0,0018	0,0008	0,0002	-	-	-	-	0,0001	0,0002	0,0010	0,0005	0,0003	0,0001	0,0004	0,0002	-	-	-	0,0004	0,0005	0,0014
He	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
H <sub>2</sub>	-	0,0000	ślad	0,0081	ślad	0,0000	-	-	-	-	0,0000	ślad	ślad	0,0000	0,0039	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0000
Radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	484,5	2099,7	10873,6	499,3	16,1	0,0	0,0	0,0	31,9	0,0	7216,2	2822,5	1579,6	734,8	1506,4	1101,3	726,8	32,0	32,0	15,9	0,0	47,9	334,6	913,2

"-" - nie analizowano ze względu na niemożność poboru próbki (zawodnienie terenu).

**Tabela 2.** Skład molekularny powietrza glebowego ze struktury F [% (v/v)]**Table 2.** Molecular composition of the soil gases of the F structure [% (v/v)]

	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09
C <sub>1</sub>	0,0022	0,0011	–	0,0157	0,0097	0,0036	0,0020	0,0008	0,0003
C <sub>2</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
C <sub>3</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
i-C <sub>4</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
n-C <sub>4</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
neo-C <sub>5</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
i-C <sub>5</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
n-C <sub>5</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>6</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>7</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>8</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>9</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ΣC <sub>10</sub>	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CO <sub>2</sub>	0,7701	1,4694	–	1,0312	1,3222	1,8862	3,1171	1,4089	1,3186
N <sub>2</sub>	78,1787	77,7743	–	78,2269	78,4934	78,4020	77,3920	78,1302	77,9250
O <sub>2</sub>	21,0488	20,7550	–	20,7016	20,1425	19,6862	19,4771	20,4597	20,7559
CO	0,0002	0,0003	–	0,0007	0,0007	0,0011	0,0009	0,0004	0,0003
He	0,0000	0,0000	–	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
H <sub>2</sub>	śląd	0,0000	–	0,0240	0,0314	0,0208	0,0108	śląd	0,0000
Radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	1169,5	287,6	462,1	883,5	591,2	431,4	624,8	351,5	271,6

"–" – nie analizowano ze względu na niemożność poboru próbki (zawodnienie terenu).

### Podsumowanie

Badania zawartości radonu w obrębie dwóch struktur typu *fairy circle* i w ich bliskiej odległości pokazały, że potencjalne drogi migracji gazów z głębszych warstw na powierzchnię występują nie w samej strukturze *fairy circle*, która jest dobrze uszczelniona, ale na granicy struktury oraz w niewielkiej odległości od tej granicy. Zerowe wartości radonu w obrębie silnie podmokłych stref wewnętrznych obu struktur *fairy circle* mogą być również związane z rozpuszczaniem radonu w wodzie. W celu określenia zawartości radonu w tej sytuacji należałoby zastosować inną metodykę badawczą, przeznaczoną do pomiaru radonu w wodzie. Analizy składu molekularnego powietrza glebowego wykazały podwyższone zawartości metanu i ditlenku węgla o pochodzeniu najprawdopodobniej biogenicznym.

Zawartości wodoru wyraźnie różnicują dwie struktury. W przypadku struktury W wodór wystąpił tylko w dwóch próbkach, w niskich stężeniach. W przypadku struktury F jego obecność stwierdzono w czterech próbkach, w stężeniach wyraźnie wyższych. Skład powietrza glebowego, tj. brak wyższych węglowodorów oraz podwyższone zawartości metanu wraz z ditlenkiem węgla, nie wskazuje na migracyjne pochodzenia gazów.

Pod uwagę należy wziąć również inne wytłumaczenie obecności charakterystycznych struktur. Mogą to być zarastające jeziora, których struktura roślinności (torfowisko wewnątrz) wydaje się charakterystyczna dla form o genezie polodowcowej (oczka wytopiskowe).

Kontynuacja prac, uwzględniających sezonowe zmiany w składzie powietrza glebowego oraz obejmujących szerszy obszar wokół podobnych struktur, jest konieczna dla wyciągnięcia wiarygodnych wniosków o genezie tych struktur.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Rozpoznanie procesów powstawania wodoru i helu w kontekście możliwości ich akumulacji w warunkach geologicznych obszaru Polski*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0039/SG/2024, nr archiwalny: DK-4100-0025/2024.

### Literatura

- Blay-Roger R., Bach W., Bombadilla L.F., Ramirez Reina T., Odrizola J.A., Amilis R., Blay V., 2024. Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 11388. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113888.
- Harasimiuk M., Szwałgier W., Jezierski W., 2015. Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000. Arkusz Siedliszcze (751). *Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa*.

- Jasielski J., Lis G., Wojtulek P., 2024. Ocena możliwości występowania złóż geologicznego wodoru w bloku dolnośląskim. *Przegląd Geologiczny*, 9: 427–438. DOI: 10.7306/2024.24.
- Kania M., Janiga M., 2011. Elementy walidacji metody analitycznej oznaczania w mieszaninie gazowej związków węglowodorowych oraz N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO i CO<sub>2</sub> za pomocą dwukanałowego, zaworowego chromatografu gazowego AGILENT 7890A. *Nafta-Gaz*, 67(11): 812–824.
- Lefevre N., Truche L., Donze F.V., Docoux M., Barre G., Fakoury R.-A., Calassou S., Gaucher E., 2021. Native H<sub>2</sub> exploration in the western Pyrenean foothills. *ESS Open Archive*. DOI: 10.1002/essoar.10507102.1.
- Maiga O., Deville E., Laval J., 2023. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Scientific Reports*, 13, 11876. DOI: 10.1038/s41598-023-38977-y.
- Mainson M., Heath Ch., Pejčić B., Frery E., 2022. Sensing Hydrogen Seeps in the Subsurface for Natural Hydrogen Exploration. *Applied Sciences*, 12, 6383. DOI: 10.3390/app12136383.
- Matyasik I., Ciechanowska M., 2024. Możliwości występowania naturalnych złóż wodoru w warunkach polskich. *Nafta-Gaz*, 80(6): 327–334. DOI: 10.18668/NG.2024.06.01.
- Moretti I., Emyrose B., Loiseau K., Prinzhofer A., Deville E., 2021. Hydrogen Emanations in Intracratonic Areas: New Guide Lines for Early Exploration Basin Screening. *Geosciences*, 11(3): 145. DOI: 10.3390/geosciences11030145.
- Myagkiy A., Moretti I., Brunet F., 2020. Space and time distribution of subsurface H<sub>2</sub> concentration in so-called “fairy circles”: Insight from a conceptual 2-D transport model. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 191(1): 13. DOI: 10.1051/bsgf/2020010.
- Narkiewicz, M., 2003. Tectonic controls of the Lublin Graben (Late Devonian–Carboniferous). *Przegląd Geologiczny*, 51: 771–776.
- Poprawa P., 2010. Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim. *Przegląd Geologiczny*, 58(3): 226–249.
- Prinzhofer A., Moretti I., Francolin J., Pacheco C., d’Agostino A., Werly J., Rupin F., 2019. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H<sub>2</sub>-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 12: 5676–5685.
- Prugar W., 2013. Środowisko depozycji a rozwój procesów naftowych w utworach dolnego paleozoiku centralnej i południowej części rowu lubelskiego. Rozprawa doktorska. *Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Kraków*.
- Richon P., Klinger Y., Taponnier P., Xia-Li C., Van Der Woerd J., Perrier F., 2010. Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. *Radiation Measurements*, 45(2): 211–218. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.01.019.
- Riudavets M., Garcia de Herreros M., Besse B., Mezquita L., 2022. Radon and Lung Cancer: Current Trends and Future Perspectives. *Cancers*, 14(13): 3142. DOI: 10.3390/cancers14133142.
- Rupak W.Q., Nabaz A., Karwan W.Q., Saddon T.A., Hewa Y.A., 2021. Relationship between radon concentration and physico-chemical parameters in groundwater of Erbil city, Iraq. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 14(1): 61–69. DOI: 10.1080/16878507.2020.1856588.
- Sechman H., Twaróg A., 2024. Natural hydrogen in soil gas samples of sedimentary basins of Poland – a review. *AAPG Europe Region Conference Energy Transition: is the European Approach Different?* Workshop abstracts: 168.
- Skupio R., Hebda K., 2024. Zastosowanie przenośnego detektora RAD7 do badania koncentracji radonu w wodzie. *Nafta-Gaz*, 80(9): 551–559. DOI: 10.18668/NG.2024.09.02.
- Skupio R., Kowalska S., Jankowski L., 2018. Analysis of influence of environmental conditions and natural gamma radiation for radon concentration measurements. *Nafta-Gaz*, 74(8): 584–591. DOI: 10.18668/NG.2018.08.03.
- Twaróg A., Sechman H., Kwiatkowski K., 2024. Distribution of hydrogen and alkane concentrations in the vicinity of a fairy circle structure in Poland – preliminary results. *AAPG Europe Region Conference Energy Transition: is the European Approach Different?* Workshop abstracts: 169.
- Wang L., Jin Z., Chen X., Su Y., Huang X., 2023. The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen. *Energies*, 16(5): 2400. DOI: 10.3390/en16052400.
- Zdrojewicz Z., Belowska-Bień K., 2004. Radon i promieniowanie jonizujące a organizm człowieka. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 58: 150–157.
- Zgonnik V., 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203: 103140. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103140.
- Żelichowski A.M., Porzycki J., 1983. Geological – structural map without post-Carboniferous strata. [W:] Żelichowski A.M., Kozłowski S. (red.). Atlas of Geological Structure and Mineral Deposits in the Lublin Region. *Instytut Geologiczny, Warszawa*.



Mgr inż. Kamil HEBDA  
Asystent w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [kamil.hebda@inig.pl](mailto:kamil.hebda@inig.pl)



Dr inż. Marek JANIGA  
Adiunkt w Zakładzie Geologii i Geochemii  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [marek.janiga@inig.pl](mailto:marek.janiga@inig.pl)



Mgr Małgorzata WENDORFF-BELON  
Starszy specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie  
Geologii i Geochemii  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [wendorff-belon@inig.pl](mailto:wendorff-belon@inig.pl)