

# Badania migracji gazu ziemnego w kontekście oddziaływania na środowisko

## Natural gas migration studies in the context of environmental impact

Dorota Kluk

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Zaostrzenie w ostatnich latach wymogów ochrony środowiska powoduje potrzebę działań zmierzających do minimalizacji niekorzystnego wpływu zjawisk towarzyszących pozyskiwaniu węglowodorów. Jednym z takich zjawisk są ekshalacje gazu ziemnego, które mogą zachodzić zarówno naturalnie, jak i być skutkiem antropopresji wynikającej z eksploatacji węglowodorów. W artykule zaprezentowano badania składu gleby oraz powietrza glebowego z obszarów prowadzenia działalności wydobywania węglowodorów. Na obszarach tych wytypowano lokalizacje, w których zamontowano sondy do poboru powietrza glebowego celem prowadzenia badań monitoringowych jego składu. Podczas montażu sond pobrano próbki gleby z różnych interwałów głębokościowych. Glebę analizowano pod kątem zawartości substancji określonych w obowiązujących przepisach prawnych (Dz.U. z 2016 r. poz. 1395). Ponadto, dla pełnego obrazu wpływu na środowisko gruntowo-wodne, w okolicach złóż węglowodorów przeprowadzono badania toksykologiczne. Do testów toksykologicznych gleb wytypowano organizmy żyjące w środowisku gruntowo-wodnym i wodach słodkich, a kryterium wyboru było ich zróżnicowanie wobec zależności troficznych poszczególnych poziomów – producentów, konsumentów i reducentów. Wybrane do badań toksykologicznych bioindykatory wykorzystane są w komercyjnie dostępnych mikrobiotestach typu ToxKit: Ostracodtoxkit F (konsumenty), Phytotoxkit (producenty) oraz Solid Phase Microtox®SPT (reducenty). Dla właściwej interpretacji uzyskanych wyników równoległe z prowadzonymi badaniami na obszarze potencjalnie zagrożonym wyciekami gazu wykonywano tożsame badania okolicznego terenu (bez wpływu wydobywania) w celu ustalenia lokalnego tła geochemicznego. Wieloaspektowy monitoring, tj. badanie składu powietrza glebowego, parametrów fizycznych i chemicznych gleby oraz jej oddziaływania na organizmy żywe (bioindykatory) w okolicach potencjalnych źródeł migrującego gazu w odniesieniu do wyników lokalnego tła, umożliwia rejestrację mikrowycieków gazu. Uzyskane rezultaty badań w połączeniu z rozpoznaniem skali ekshalacji gazu ziemnego przyczynią się do podejmowania skutecznych działań na rzecz ograniczenia tego zjawiska do dopuszczalnych standardów stężeń emitowanych zanieczyszczeń.

**Słowa kluczowe:** ekshalacja gazu ziemnego, gleba, powietrze glebowe, testy toksykologiczne.

**ABSTRACT:** The tightening of environmental protection requirements in recent years has necessitated actions aimed at minimizing the adverse impacts of phenomena associated with the extraction of hydrocarbons. One such phenomenon is the exhalation of natural gas, which may occur both naturally and as a result of anthropopressure resulting from the exploitation of hydrocarbon deposits. The article presents research on the composition of soil and soil gas from hydrocarbon extraction areas. In these areas, locations were selected where soil air sampling probes were installed in order to conduct monitoring studies of its composition. During the installation of the probes, soil samples were taken from various depth intervals. The soil was analysed for the content of substances specified in applicable legal regulations (Polish Journal of Laws 2016, item 1395). Moreover, toxicological tests were carried out to provide a complete picture of the impact on the soil and water environment near hydrocarbon deposits. Organisms living in the soil-water environment and freshwater were selected to carry out soil toxicological tests, and the selection criterion was their diversity in relation to the trophic relationships of individual levels – producers, consumers, and decomposers. Bioassays were performed using commercially available microbioassays such as ToxKit Ostracodtoxkit F (consumers), Phytotoxkit (producers) and Solid Phase Microtox®SPT (reducers). For the proper interpretation of the obtained results, in parallel with the research carried out in the area potentially at risk of gas seepage, identical research was carried out on the surrounding area to determine the regional geochemical background. Multi-aspect monitoring, i.e., examination of the composition of soil air, physical and chemical parameters of soil, and soil impact on living organisms (bioindicators) in the vicinity of potential migrating gas outlets to the local background enables the identification of gas microseepage. The connection of the obtained research results with the recognition of the scale of natural gas exhalation will contribute to the implementation of effective actions aimed at limiting this phenomenon to permissible standards of concentrations of emitted pollutants.

**Key words:** natural gas exhalation, soil, soil gas, toxicological tests.

---

Autor do korespondencji: D. Kluk, e-mail: [dorota.kluk@inig.pl](mailto:dorota.kluk@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.12.2023 r. Zatwierdzono do druku: 28.03.2024 r.

## Wprowadzenie

Ekshalacje gazu ziemnego są zjawiskiem powszechnie występującym na całym świecie w rejonach złóż. Mogą one zachodzić zarówno naturalnie, jak i być skutkiem antropopresji, między innymi eksploatacji złóż węglowodorów. Wydobywanie się gazu na powierzchnię wynika z jego przemieszczania się na duże odległości w skorupie ziemskiej (Saunders et al., 1999; Brown, 2000; Gascoyne i Wuschke, 2001; Hovland et al., 2012; Etiope, 2015; Etiope et al., 2023) w wyniku procesów:

- dyfuzji, podczas której gaz przemieszcza się zgodnie z gradientami stężeń według prawa Ficka oraz
- adwekcji, zgodnie z prawem Darcy'ego, gdzie kierunek i prędkość ruchu są wyznaczone przez gradienty ciśnienia.

Problemy środowiskowe często występują obecnie tam, gdzie w przeszłości było ich niewiele. Związane jest to niejednokrotnie z zagospodarowywaniem obszarów leżących nad złożami ropy naftowej i gazu ziemnego. Powodem może być zarówno naruszenie struktury skał zbiornikowych węglowodorów podczas udostępniania złóż (Herman i Migdał, 1998; Dudek et al., 2004; Król i Kuśniarz, 2019), jak i brak strukturalnej integralności cementu lub obudowy odwiertu. Podczas udostępniania złóż ropy naftowej i gazu ważny jest właściwy dobór technik i technologii cementowania w aspekcie minimalizacji zjawiska migracji gazu w zacementowanej przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego (Radecki i Witek, 2000; Herman, 2008; Kremieniewski i Rzepka, 2016; Kremieniewski et al., 2021; Tao et al., 2021). Istnieje wiele przykładów migracji gazów na powierzchnię z formacji ropo- i gazonośnych, które spowodowały poważne zagrożenie dla środowiska, tj. eksplozje, pożary, szkodliwe zapachy i potencjalną emisję rakotwórczych związków (Gamache i Frost, 2003; Robertson et al., 2012; Koboжек, 2019). Ważne jest zatem prowadzenie badań zarówno składu powietrza glebowego w okolicach potencjalnych źródeł migrującego gazu, jak i składu gleby. Wykonanie testów bioindykacyjnych gleb występujących w okolicach złóż węglowodorów dopełni obraz wpływu migrującego gazu na środowisko gruntowo-wodne.

## Materiały i metodyka badawcza

Materiał badawczy stanowią gleby/grunty pobrane z warstwy powierzchniowej (0–0,25 m p.p.t.) oraz z głębokości 1 m i 2,0 m p.p.t., a także powietrze glebowe pozyskane z uprzednio zamontowanych czterech sond (sonda-1, sonda-2, sonda-3, sonda-4) w wytypowanych czterech lokalizacjach obszaru prowadzenia działalności wydobywania węglowodorów. Sonda do poboru próbek powietrza glebowego stanowi perforowaną rurę o długości 2–3 m wykonaną z polietylenu. W celu jej

zamontowania w glebie/gruncie wiercony jest otwór, w którym następnie jest umieszczana. Zamontowana w wywierconym otworze sonda obsypana jest żwirem o granulacji 0,5–1 cm, zaś w górnej części glebą dociśniętą tak, aby mocno przylegała do posadowionej w niej sondy. Powietrze glebowe wpływa do sondy na zasadzie naturalnej dyfuzji. Górna część sondy zamykana jest zaślepką, w której umieszczono króciec umożliwiający pobór próbek powietrza glebowego do szklanych pipet firmy SUPELCO przy użyciu pompki typu Air Sampler firmy SUPELCO. Pobór powietrza glebowego odbywa się poprzez jego zassanie za pomocą pompki z sondy i przetłoczenie do pipet.

Próbki gleby pobrane podczas montażu sond do poboru powietrza glebowego po przewiezieniu do laboratorium doprowadzono do stanu powietrznie suchego, po czym rozdrobiono w moździerzu porcelanowym i przesiano przez sito, w wyniku czego uzyskano frakcje gleby o średnicy ziaren poniżej 0,25 mm. Tak przygotowane próbki gleby poddano analizie na zawartość składników (metali ciężkich i substancji ropopochodnych) określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. z 2016 r. poz. 1395). Próbki gleby zmineralizowano w stężonym roztworze kwasu azotowego(V) w mikrofalowym mineralizatorze Magnum II. Wyizolowane składniki gleby badano pod kątem zawartości metali ciężkich z wykorzystaniem metod spektrofotometrycznych (spektrometr UV/VIS Lambda 35 firmy PerkinElmer i fotometr DR3900 firmy Hach Lange) oraz chromatografii jonowej (chromatograf jonowy firmy Sycam) (Kluk, 2014).

Izolację węglowodorów z gleby prowadzono na drodze ekstrakcji ciągłej Soxhleta z wykorzystaniem: dichlorometanu (wydzielenie węglowodorów z zakresu  $C_6-C_{12}$  oraz  $C_{12}-C_{35}$ ), toluenu (ekstrakcja wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych WWA). Anality zawierające  $C_6-C_{12}$ ,  $C_{12}-C_{35}$  oraz WWA poddano oczyszczeniu techniką ekstrakcji do fazy stałej (ang. *solid phase extraction*, SPE) w systemie próżniowym BAKER SPE poprzez zastosowanie sekwencji rozpuszczalników organicznych i kolumnienek SPE z wypełnieniami: florisil (oczyszczenie analitu ze związków polarnych) oraz CN/SiOH (selektywne wydzielenie WWA). Oczyszczone ekstrakty zatężano na próżniowej wyparce obrotowej i wykonywano ich analizy chromatograficzne (Kluk i Steliga, 2017).

Analizę wyekstrahowanych węglowodorów z zakresu  $C_6-C_{12}$  oraz  $C_{12}-C_{35}$  wykonano na chromatografie Clarus 500 GC firmy PerkinElmer z detekcją płomieniowo-jonizacyjną FID, natomiast WWA – metodą wysokociśnieniowej chromatografii cieczowej z detekcją UV-VIS i fluorymetryczną FLD.

Monoaromatyczne węglowodory BTEX (benzen, toluen, etylobenzen, p-ksylen, m-ksylen, o-ksylen) w glebie oznaczano bezpośrednio metodą *Head Space* z wykorzystaniem chromatografu gazowego Clarus 500 z detektorem

plamieniowo-jonizacyjnym FID, połączonego z przystawką Head Space Turbo Matrix 16 (Wojtowitz, 2018).

Do oceny oddziaływania badanej gleby na elementy środowiska przyrodniczego wykorzystano testy toksykologiczne: Microtox®SPT – oparty na pomiarze fluorescencji bakterii *Vibrio fischeri*, Ostracodtoxkit F – pomiar wzrostu i śmiertelności skorupiaków *Heterocypris incongruens* oraz Phytotoxkit – pomiar kiełkowania i zahamowania wzrostu trzech roślin: *Lepidium sativum*, *Sinapis alba* i *Sorghum saccharatum*.

W celu określenia występowania gazu ziemnego w powierzchniowych warstwach gleby wykonano trzy serie badań składu powietrza glebowego pobranego z sond do szklanych pipet gazowych z głębokości 1,0–1,5 m p.p.t. Pobrane próbki gazu glebowego analizowano metodą chromatografii gazowej z wykorzystaniem detekcji plamieniowo-jonizacyjnej i ciepłno-przewodnościowej. Zakres oznaczeń dotyczył gazowych węglowodorów (metan, etan, propan) oraz gazowych składników towarzyszących, takich jak: dwutlenek węgla, azot, tlen. Dla właściwej interpretacji uzyskanych wyników równoległe z prowadzonymi badaniami terenu potencjalnie

zagrożonego ekshalacją gazu ziemnego prowadzono tożsame badania okolicznego terenu (sonda-1 tło, sonda-2 tło, sonda-3 tło, sonda-4 tło) w celu ustalenia regionalnego tła geochemicznego.

### Charakterystyka gleby pobranej podczas montażu sond

W tabeli 1 zestawiono wyniki badań zawartości metali ciężkich w materiale badawczym, tj. w próbkach gleby/gruntu pobranych podczas montażu sond (sonda-1 tło, sonda-2 tło, sonda-3 tło, sonda-4 tło) na obszarze prowadzenia działalności wydobywania węglowodorów.

Dane zawarte w tabeli 1 wskazują na zróżnicowaną zawartość zidentyfikowanych metali ciężkich w próbkach gleby, zarówno w zależności od miejsca poboru (lokalizacja na obszarach prowadzenia wydobywania węglowodorów i pobliskich im terenach), jak i głębokości. Generalnie wyższe zawartości metali ciężkich oznaczono w próbkach gleby pobranych

**Tabela 1.** Zawartość metali w próbkach gleby pobranych z różnych głębokości podczas montażu sond do poboru powietrza glebowego  
**Table 1.** Metals content in soil samples collected from various depths during the installation of soil gas probes

Punkt poboru	Oznaczone składniki [mg/kg s.m.]							
	Ba	Cr	Zn	Cd	Cu	Ni	Pb	Hg
<b>Próbki gleby z głębokości 0,00–0,25 m p.p.t.</b>								
Sonda-1	28,9	16,7	27,4	1,70	13,8	18,1	12,8	11,2
Sonda-1 tło	17,6	11,5	25,7	n.s.	8,3	7,9	6,9	3,2
Sonda-2	28,8	4,4	28,4	<0,05	4,1	3,7	9,6	n.s.
Sonda-2 tło	17,1	3,2	16,6	<0,05	3,3	2,3	4,1	n.s.
Sonda-3	30,1	18,1	25,8	2,10	12,8	15,6	21,8	1,8
Sonda-3 tło	19,1	13,8	12,3	n.s.	9,2	8,1	9,7	n.s.
Sonda-4	26,8	19,7	17,8	1,10	11,8	14,5	17,8	1,3
Sonda-4 tło	15,8	12,8	11,8	n.s.	8,6	7,2	8,4	n.s.
Dopuszczalne zawartości substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395	1500	500	2000	15	600	500	600	30
<b>Próbki gleby z głębokości poniżej 0,25 m p.p.t.</b>								
Sonda-1	21,8	13,2	22,8	1,1	10,8	11,8	10,8	3,9
Sonda-1 tło	11,8	9,8	13,8	n.s.	7,3	5,9	5,8	0,9
Sonda-2	17,6	2,8	19,8	n.s.	3,2	2,8	6,8	n.s.
Sonda-2 tło	11,3	1,9	14,2	n.s.	1,6	1,6	3,6	n.s.
Sonda-3	15,3	11,8	21,6	0,2	10,9	12,3	15,9	0,3
Sonda-3 tło	11,6	7,8	16,3	n.s.	9,2	8,2	8,3	n.s.
Sonda-4	17,3	11,8	10,2	n.s.	9,5	10,9	10,7	0,8
Sonda-4 tło	9,6	7,8	6,2	n.s.	6,2	5,9	6,4	n.s.
Dopuszczalne zawartość substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395	300	300	300	6	200	100	200	4
n.s. – nie stwierdzono								

z warstw powierzchniowych (0,00–0,25 m p.p.t.) w lokalizacjach na obszarach prowadzenia wydobycia węglowodorów anizeli w próbkach pobranych z okolicznych w stosunku do nich terenów (tło).

W odniesieniu do najwyższych dopuszczalnych zawartości substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu, zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395, oznaczone w warstwach powierzchniowych gleby pobranej z lokalizacji na złożu węglowodorów zawartości metali ciężkich w ujęciu procentowym stanowią: bar: od 1,8% (sonda-4) do 2,0% (sonda-3), chrom: od 0,9% (sonda-2) do 3,9% (sonda-4), cynk: od 0,9% (sonda-4) do 1,4% (sonda-1, sonda-2), kadm: od śladowych zawartości (sonda-2) do 14,0% (sonda-3), miedź: od 0,7% (sonda-2) do 2,3% (sonda-1), nikiel: od 0,7% (sonda-2) do 3,6% (sonda-1), ołów: od 1,6% (sonda-2) do 3,6% (sonda-3), rtęć: od braku obecności (sonda-2) do 37,3% (sonda-1). Z kolei procentowe zawartości metali ciężkich w glebach z głębszych warstw obszarów, na których prowadzona jest działalność wydobycia węglowodorów (poniżej 0,25 m p.p.t.), wynoszą: bar: od 5,1% (sonda-3) do 7,3% (sonda-1), chrom: od 0,9% (sonda-2) do

4,4% (sonda-1), cynk: od 3,4% (sonda-4) do 7,6% (sonda-1), kadm: od braku obecności (sonda-2, sonda-4) do 18,3% (sonda-1), miedź: od 1,6% (sonda-2) do 5,5% (sonda-3), nikiel: od 2,8% (sonda-2) do 12,3% (sonda-3), ołów: od 3,4% (sonda-2) do 8,0% (sonda-3), rtęć: od braku obecności (sonda-2) do 97,5% (sonda-1).

Przedstawione wyniki pokazują, że stężenia metali w glebie nie przekraczają dopuszczalnych dla IV grupy gruntu (tereny przemysłowe i komunikacyjne oraz użytki kopalne, wydzielone w oparciu o sposób ich użytkowania na danym terenie zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395) ani w warstwie powierzchniowej, ani na głębokości poniżej 0,25 m p.p.t., przy wodoprzepuszczalności gruntu  $> 1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Wyniki badań prowadzonych pod kątem obecności zanieczyszczeń węglowodorowych w próbkach gleby z miejsc montażu sond pobranych z różnych interwałów głębokościowych przedstawiono w tabeli 2. Interpretacja wyników analiz chromatograficznych, obejmujących oznaczenie sumarycznych zawartości węglowodorów grup  $C_6-C_{12}$  oraz  $C_{12}-C_{35}$ , pozwoliła stwierdzić, że:

**Tabela 2.** Zawartości węglowodorów (składników frakcji benzyn i olejów oraz WWA i BTEX) w glebach pobranych z różnych głębokości podczas montażu sond do monitorowania składu powietrza glebowego

**Table 2.** Hydrocarbons (components of gasoline and oil fractions as well as PAHs and BTEX) content in soil samples collected from various depths during the installation of probes for soil gas monitoring

Punkt poboru	Zanieczyszczenia węglowodorowe			
	benzyna $\Sigma C_6-C_{12}$	olej mineralny $\Sigma C_{12}-C_{35}$	BTEX	WWA
	[mg/kg s.m.]			
<b>Gleba z głębokości 0,00–0,25 m p.p.t.</b>				
Sonda-1	17,5	84,3	<0,10	<0,02
Sonda-1 tło	10,5	45,8	<0,10	<0,02
Sonda-2	12,1	38,3	<0,03	<0,02
Sonda-2 tło	8,2	15,8	<0,10	<0,02
Sonda-3	33,4	199,7	0,36	0,19
Sonda-3 tło	10,2	65,4	<0,10	<0,02
Sonda-4	18,9	71,8	<0,10	<0,02
Sonda-4 tło	11,5	32,8	<0,10	<0,02
Dopuszczalne zawartości substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395	500	3000	100	20
<b>Gleba z głębokości poniżej 0,25 m p.p.t.</b>				
Sonda-1	11,5	32,4	<0,20	<0,02
Sonda-1 tło	8,3	23,8	<0,10	<0,02
Sonda-2	10,8	39,4	<0,20	<0,02
Sonda-2 tło	8,9	21,8	<0,20	<0,02
Sonda-3	19,8	168,7	0,28	0,14
Sonda-3 tło	8,1	45,7	<0,10	<0,02
Sonda-4	12,8	51,6	<0,10	<0,02
Sonda-4 tło	7,3	26,7	<0,10	<0,02
Dopuszczalne zawartości substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395	50	1000	5	10

- wyższe zawartości węglowodorów oznaczono w glebie z obszarów prowadzenia działalności wydobywania węglowodorów w porównaniu z glebą pobraną w okolicznym terenie, tzw. tle;
- wraz z głębokością poboru zmniejsza się zawartość węglowodorów w próbkach gleb.

Zawartość węglowodorów z grupy  $C_6-C_{12}$  (składników frakcji benzyn) w próbkach gleb pobranych z warstwy powierzchniowej zawiera się w zakresie 12,1–33,4 mg/kg s.m. (sondy 1–4) i 8,2–11,5 mg/kg s.m. (sondy 1–4 tła), natomiast z głębszych warstw (<0,25 m p.p.t.) mieści się w granicach 10,8–19,8 mg/kg s.m. (sondy 1–4) i 7,3–8,9 mg/kg s.m. (sondy 1–4 tła).

Najwyższą zawartość frakcji benzyn (węglowodory z grupy  $C_6-C_{12}$ ) odnotowano w glebie z okolicy sondy-3. Wartość ta nie przekraczała jednak 500 mg/kg s.m. dopuszczalnego stężenia substancji powodującej ryzyko dla IV grupy gruntu (Dz.U. z 2016 r. poz. 1395) (tabela 2).

Badane gleby charakteryzują się wyższymi zawartościami węglowodorów grupy  $C_{12}-C_{35}$ , odpowiadającymi frakcji olejowej. W próbkach pobranych z warstwy powierzchniowej (0,00–0,25 m p.p.t.) ich zawartość kształtuje się w zakresach od 38,3 mg/dm<sup>3</sup> (sonda-2) do 199,7 mg/dm<sup>3</sup> (sonda-3) w glebach pobranych ze stref przyodwiertowych oraz od 15,8 mg/dm<sup>3</sup> (sonda-2 tło) do 65,4 mg/dm<sup>3</sup> (sonda-3 tło) w glebach pobranych z terenu okolicy odwiertów eksploatujących węglowodory, stanowiących tło. Gleby pobrane poniżej 0,25 m p.p.t. zawierają niższe stężenia węglowodorów grupy  $C_{12}-C_{35}$ , w granicach od 32,4–168,8 mg/kg s.m. (strefa prowadzenia działalności wydobywania węglowodorów) i 21,8–45,7 mg/kg s.m. (tło).

Podsumowując wyniki oznaczania zawartości węglowodorów grupy  $C_{12}-C_{35}$  w badanych glebach, należy stwierdzić, że w żadnej próbce nie odnotowano przekroczenia wartości dopuszczalnego stężenia (1000 mg/kg s.m.) dla IV grupy gruntów poniżej głębokości 0,25 m p.p.t., przy wartości wodoprzepuszczalności wyższej lub równej  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s, zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395 (tabela 2).

We wszystkich badanych próbkach gleby jednopierścieniowe węglowodory aromatyczne (BTEX) oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) występują w śladowych ilościach, nieprzekraczających dopuszczalnych stężeń substancji powodujących ryzyko dla IV grupy gruntów, zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395 (tabela 2).

### Testy toksykologiczne gleby

**Testy fitotoksyczności** badanych gleb przeprowadzono z wykorzystaniem testu Phytotoxkit, w którym oceniano parametry wzrostu nasion rekomendowanych przez producenta

testu, takich jak: *Lepidium sativum*, *Sinapis alba*, *Sorghum saccharatum*. W teście obliczano ilości wykiełkowanych ziaren oraz długości korzeni poszczególnych roślin po 72 godzinach trwania testu. Test przeprowadzono na glebie kontrolnej, dostarczonej przez producenta, oraz na ujednoczonych próbkach gleby pobranych podczas montażu sond z interwałów głębokościowych (0,00–0,25 m p.p.t., 0,25–1,00 m p.p.t. oraz 1,00–2,00 m p.p.t.). W wyniku przeprowadzonego testu wyznaczono procentową wartość zahamowania wzrostu na badanych glebach korzeni testowanych roślin (inhibicja wzrostu) w odniesieniu do wyników testu wykonanego z użyciem gleby kontrolnej (tabela 3).

Test fitotoksyczności przeprowadzony dla gleby kontrolnej wykazał 100-proc. skuteczność testowanych nasion. Po 72 godzinach trwania testu średnia długość korzeni *Lepidium sativum* wynosiła 67,1 mm, *Sinapis alba* – 53,1 mm, a *Sorghum saccharatum* – 46,3 mm. Wartości te były podstawą obliczeń zahamowania wzrostu korzeni roślin na kolejno testowanych glebach, pozyskanych podczas montażu sond do poboru powietrza glebowego.

Przeprowadzone testy fitotoksyczności dla próbek gleb z poszczególnych lokalizacji w obszarze, na którym prowadzony jest proces wydobywania węglowodorów, wykazały znaczne różnice wzrostu roślin, zależnie od rodzaju gleby oraz gatunku testowanego nasiona. Spośród badanych najwyższymi odpornościami na warunki wzrostu charakteryzowały się *Lepidium sativum* i *Sinapis alba*, które wykiełkowały w 90–100% w glebie z miejsc montażu sond nr 1, 2 i 4 dla wszystkich interwałów głębokościowych. W glebie pobranej z miejsca montażu sondy nr 3 nasiona *Sinapis alba* wykiełkowały w 70–90%. Najwyższe zahamowanie wzrostu korzeni odnotowano w przypadku:

- *Sorghum saccharatum*: 19,7–51,4% w glebie z miejsca montażu sondy-1, 20,3–38,7% w glebie z miejsca montażu sondy-2, 32,8–43,2% w glebie z miejsca montażu sondy-3;
- *Lepidium sativum*: 14,6–56,3% w glebie z miejsca montażu sondy-4.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych testów fitotoksyczności z wykorzystaniem roślin *Lepidium sativum*, *Sorghum saccharatum* oraz *Sinapis alba*, generalnie można zauważyć gorsze warunki ich wegetacji na glebach pochodzących z obszarów, na których prowadzone jest wydobywanie węglowodorów, w porównaniu z glebami pobranymi w terenie stanowiącym tło. Ponadto wyniki wykonanych testów wykazały lepsze warunki wzrostu roślin na glebach pozyskanych z głębszych warstw. Wyjątek stanowiła gleba pobrana w terenie z miejsca montażu sondy-4 tło, której ujednoczone próbki z coraz to głębszych interwałów głębokościowych stosowane w testach fitotoksyczności wpłynęły na zmniejszenie średniej długości korzenia testowanych roślin:

- z 46,4 mm do 20,2 mm dla *Lepidium sativum*;
- z 50,7 mm do 22,7 mm dla *Sinapis alba*;
- z 60,3 mm do 25,1 mm dla *Sorghum saccharatum*.

Na podstawie przeprowadzonych testów fitotoksyczności Phytotoxkit można stwierdzić, że najbardziej odpornym bioindykatorem spośród stosowanych gatunków roślin była *Lepidium sativum*, natomiast *Sorghum saccharatum* było najbardziej wrażliwe na warunki wegetacji stwarzane przez testowane gleby.

**Test Ostracodtoxkit F**, służący do oceny toksyczności chronicznej, w charakterze biowskaźników wykorzystuje skorupiaki *Heterocypris incongruens* jako przedstawicieli poziomu troficznego konsumentów. Reakcją testową jest śmiertelność i hamowanie wzrostu organizmów po 6-dniowym kontakcie z czynnikiem środowiskowym. W tabeli 3 przedstawiono wyniki testów Ostracodtoxkit F przeprowadzonych w celu określenia wpływu na bioindykatory gleb z obszarów, na których

prowadzone jest wydobywanie węglowodorów, oraz z okolicznych w stosunku do nich terenów (w celu określenia tła).

Wstępne badania wpływu gleby kontrolnej (niezanieczyszczonej) na testowane skorupiaki wykazały brak jej właściwości toksycznych. Średnia długość skorupiaków po 6 dniach trwania testu wynosiła 940  $\mu\text{m}$ . Ponadto w kontakcie gleby kontrolnej z testowanymi skorupiakami odnotowano jedynie 2 przypadki śmiertelne spośród 60 testowanych, co stanowi 3,3%.

W wyniku przeprowadzonego testu Ostracodtoxkit F z użyciem gleby pobranej z miejsca montażu sondy-1 odnotowano śmiertelność *Heterocypris incongruens* na poziomie 16,7–26,7%, przy średniej ich długości w zakresie 640–710  $\mu\text{m}$ , co odpowiada średniej hamowania wzrostu skorupiaków w zakresie 29,0–37,9%.

Spośród badanych gleb najmniejszą toksycznością dla skorupiaków charakteryzuje się gleba pobrana z miejsca montażu sondy-2. Efekt przeżyciowy testowanych organizmów

**Tabela 3.** Wyniki testu Phytotoxkit przeprowadzonego na ujednoliconych próbkach gleb

**Table 3.** Results of the Phytotoxkit test performed on standardized soil samples

Parametr	Gleba kontrolna	Głębokość poboru gleby [m p.p.t.]					
		0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00	0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-1</b>			<b>Sonda-1 tło</b>		
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Lepidium sativum</i>					
Kielkowanie [%]	100	90	100	100	100	100	100
Średnia długość korzenia [mm]	67,1	50,2	55,9	58,4	52,0	53,2	57,5
Zahamowanie wzrostu [%]	–	25,3	16,7	13,0	22,5	20,7	14,4
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Sinapis alba</i>					
Kielkowanie [%]	100	90	100	100	90	100	100
Średnia długość korzenia [mm]	53,1	45,5	47,5	51,4	49,6	50,2	52,9
Zahamowanie wzrostu [%]	–	14,4	10,5	3,2	6,5	5,5	0,5
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Sorghum saccharatum</i>					
Kielkowanie [%]	100	70	80	80	70	70	80
Średnia długość korzenia [mm]	46,3	22,5	23,4	24,3	23,1	30,1	37,2
Zahamowanie wzrostu [%]	–	51,4	49,4	47,4	50,2	34,9	19,7
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-2</b>			<b>Sonda-2 tło</b>		
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Lepidium sativum</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	100	100	100
Średnia długość korzenia [mm]	67,1	52,3	55,4	61,1	53,4	57,3	58,5
Zahamowanie wzrostu [%]	–	22,1	17,5	8,9	20,5	14,6	12,9
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Sinapis alba</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	100	90	100
Średnia długość korzenia [mm]	53,1	45,8	46,4	47,0	42,1	44,8	46,9
Zahamowanie wzrostu [%]	–	13,8	12,6	11,4	20,8	15,7	11,6
<b>Testowane ziarno</b>		<i>Sorghum saccharatum</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	90	90	90	90
Średnia długość korzenia [mm]	46,3	34,8	34,8	36,9	28,4	32,9	33,7
Zahamowanie wzrostu [%]	–	24,9	24,7	20,3	38,7	29,0	27,1

cd. Tabela 2/cont. Table 2

Parametr	Gleba kontrolna	Głębokość poboru gleby [m p.p.t.]					
		0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00	0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-3</b>			<b>Sonda-3 tło</b>		
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Lepidium sativum</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	100	100	100
Średnia długość korzenia [mm]	67,1	54,7	56,3	66,4	58,6	59,5	64,5
Zahamowanie wzrostu [%]	–	18,5	16,1	1,0	12,7	11,4	3,9
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Sinapis alba</i>					
Kielkowanie [%]	100	70	80	90	90	90	90
Średnia długość korzenia [mm]	53,1	38,7	41,5	49,5	45,1	47,0	49,0
Zahamowanie wzrostu [%]	–	27,2	21,9	6,7	15,0	11,4	7,8
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Sorghum saccharatum</i>					
Kielkowanie [%]	100	90	90	80	80	80	90
Średnia długość korzenia [mm]	46,3	26,3	26,9	31,1	27,7	28,2	28,5
Zahamowanie wzrostu [%]	–	43,2	41,8	32,8	40,2	39,0	38,4
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-4</b>			<b>Sonda-4 tło</b>		
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Lepidium sativum</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	100	100	90
Średnia długość korzenia [mm]	67,1	52,5	57,3	64,0	46,4	39,4	20,2
Zahamowanie wzrostu [%]	–	21,8	14,6	14,7	30,8	25,9	56,3
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Sinapis alba</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	100	100	100
Średnia długość korzenia [mm]	53,1	42,2	44,1	46,9	50,7	43,1	22,7
Zahamowanie wzrostu [%]	–	20,6	16,9	11,7	24,4	18,8	51,0
<i>Testowane ziarno</i>		<i>Sorghum saccharatum</i>					
Kielkowanie [%]	100	100	100	100	90	100	90
Średnia długość korzenia [mm]	46,3	33,3	36,2	37,8	60,3	49,3	25,1
Zahamowanie wzrostu [%]	–	28,0	21,9	18,5	10,1	7,1	45,9

po 6 dniach trwania testu wynosi 8,3–23,3%, przy średniej długości *Heterocypris incongruens* w granicach 655–726 µm, co odpowiada średniej hamowania ich wzrostu na poziomie 27,0–36,0%. Należy zaznaczyć, że współczynnik zmienności średniej śmiertelności dla gleby kontrolnej wynosił 17,1%, natomiast dla pozostałych gleb zawierał się w granicach 17,2–38,1%.

Efekt przeżyciowy organizmów testowych w przypadku próbek gleb pobranych z miejsc montażu sondy-3 i sondy-4 zawierał się w zakresie 10,0–30,0%, a średnia długość testowanych organizmów po zakończonym teście wynosiła:

- 614–722 µm, co stanowi 27,5–41,2% zahamowania wzrostu – test wykonany na glebie z miejsca montażu sondy-3;
- 638–731 µm, co stanowi 26,4–38,1% zahamowania wzrostu – test wykonany na glebie z miejsca montażu sondy-4. Przeprowadzone badania dowodzą, że:
- gleby pochodzące z obszarów, na których prowadzone jest wydobywanie węglowodorów, wykazują bardziej szkodliwe

działanie na testowane organizmy w porównaniu z glebami pobranymi w terenie (sonda-1 tło, sonda-2 tło, sonda-3 tło, sonda-4 tło);

- wraz ze wzrostem głębokości zmniejsza się toksyczność badanych gleb dla skorupiaków *Heterocypris incongruens*. Do badań toksyczności gleby na poziomie troficznym reducentów zastosowano mikrobiologiczny test fazy stałej *Microtox*<sup>®</sup> *SPT*, wykorzystujący bakterie luminescencyjne *Vibrio fischeri*. Umożliwia on bezpośredni kontakt bakterii luminescencyjnych z badaną próbką gleby, w wyniku czego następuje obniżenie luminescencji na skutek zmniejszenia metabolizmu bakterii.

Test wykonano według standardowej procedury producenta z użyciem analizatora Delta TOX i liofilizowanych bakterii. Wartości uzyskanych luminescencji *Vibrio fischeri* w kontakcie z badaną glebą służą do obliczenia wskaźnika EC50 (ang. *50% effective concentration*), czyli stężenia badanej próbki powodującego powstanie 50-proc. reakcji

**Tabela 4.** Wyniki testu Ostracodtoxkit F przeprowadzonego dla próbek gleby pobranych z różnych interwałów głębokościowych w miejscach montażu sond

**Table 4.** Results of the Ostracodtoxkit F test conducted for soil samples taken from various depth intervals at the locations where the probes were installed

Parametr	Gleba kontrolna	Głębokość poboru gleby [m p.p.t.]					
		0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00	0,00–0,25	1,00–1,50	1,50–2,00
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-1</b>			<b>Sonda-1 tło</b>		
Średnia śmiertelność [%]	3,3	26,7	25,0	21,7	25,0	16,7	16,7
Współczynnik zmienności średniej śmiertelności [%]	17,1	31,6	27,2	23,5	25,1	23,3	28,3
<i>Wzrost organizmów testowych</i>							
Średnia długość organizmów [µm]	940	640	671	691	649	689	710
Średni przyrost organizmów [%]	791	491	522	542	500	540	561
Średnia hamowania wzrostu [%]	–	37,9	34,0	31,4	36,8	31,7	29,0
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-2</b>			<b>Sonda-2 tło</b>		
Średnia śmiertelność [%]	3,3	13,3	10,0	8,3	23,3	20,0	13,3
Współczynnik zmienności średniej śmiertelności [%]	17,1	25,0	18,4	17,2	29,5	22,5	22,2
<i>Wzrost organizmów testowych</i>							
Średnia długość organizmów [µm]	940	707	714	717	655	702	726
Średni przyrost organizmów [%]	791	558	565	568	506	553	577
Średnia hamowania wzrostu [%]	–	29,4	28,5	28,1	36,0	30,1	27,0
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-3</b>			<b>Sonda-3 tło</b>		
Średnia śmiertelność [%]	3,3	30,0	23,3	16,7	20,0	20,0	16,7
Współczynnik zmienności średniej śmiertelności [%]	17,1	38,1	33,6	21,9	29,5	20,6	21,5
<i>Wzrost organizmów testowych</i>							
Średnia długość organizmów [µm]	940	614	678	699	664	697	722
Średni przyrost organizmów [%]	791	465	529	550	515	548	573
Średnia hamowania wzrostu [%]	–	41,2	33,1	30,4	34,9	30,7	27,5
<b>Miejsce poboru gleby</b>		<b>Sonda-4</b>			<b>Sonda-4 tło</b>		
Średnia śmiertelność [%]	3,3	21,7	18,3	10,0	20,0	16,7	26,7
Współczynnik zmienności średniej śmiertelności [%]	17,1	36,8	22,7	20,1	21,0	27,9	29,4
<i>Wzrost organizmów testowych</i>							
Średnia długość organizmów [µm]	940	678	706	731	682,0	707	638
Średni przyrost organizmów [%]	791	529	557	582	533	558	489
Średnia hamowania wzrostu [%]	–	33,1	29,5	26,4	32,6	29,4	38,1

testowej. Wartość toksyczności wyrażana jest w stopniach toksyczności TU.

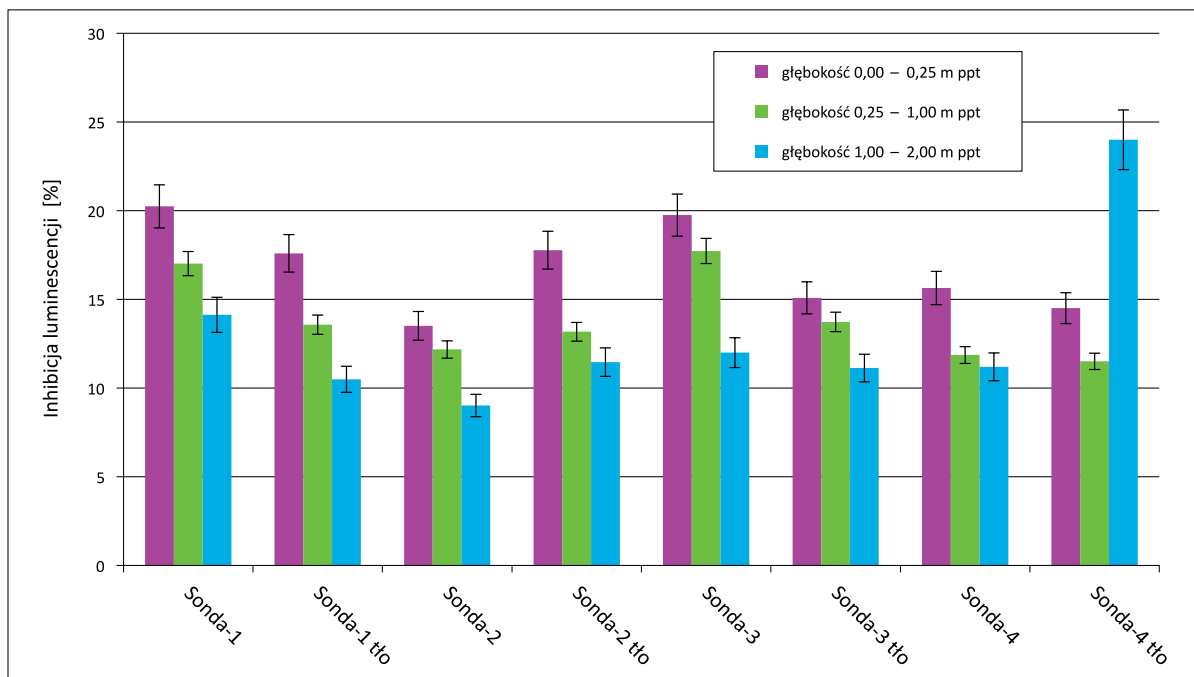
Wyniki testu toksyczności Microtox®SPT z wykorzystaniem jako bio wskaźników bakterii *Vibrio fischeri* zobrazowano na rysunku 1. Dla każdego rodzaju gleby test Microtox®SPT przeprowadzono w trzech powtórzeniach. Wyniki badań opisują ekstrakty badanych gleb sporządzone według procedury producenta.

Inhibicję luminescencji bakterii *Vibrio fischeri* w wodnych ekstraktach poszczególnych gleb pobranych podczas montażu sond 1–4 oznaczono w zakresie 9,0–24,0%. Z wyników przedstawionych na rysunku 1 wynika, że wraz z głębokością poboru próbek gleby maleje ich szkodliwość dla bioindykatorów,

czego objawem jest zmniejszenie ich inhibicji luminescencji w warunkach prowadzonego testu. Wyjątek stanowi gleba pochodząca z głębokości 1,00–2,00 m p.p.t. pobrana podczas montażu sondy-4 tło, która w większym stopniu negatywnie oddziaływała na bakterie *Vibrio fischeri* (inhibicja luminescencji: 24,9%) w porównaniu z próbkami gleb z płytszych warstw (inhibicja luminescencji: 11,5% i 14,5%).

Wyniki przeprowadzonego testu Microtox®SPT wykazały, że wszystkie badane gleby charakteryzują się małą szkodliwością dla bakterii *Vibrio fischeri*, gdyż ich poziom inhibicji luminescencji w poszczególnych ekstraktach badanych gleb nie przekracza 50%. Fakt ten uniemożliwia obliczenie wartości EC50, a więc wskazuje na brak toksyczności badanych gleb.





**Rysunek 1.** Efekt inhibicji luminescencji *Vibrio fischeri* w kontakcie z glebami pobranymi z różnych interwałów głębokościowych podczas montażu sond

**Figure 1.** The effect of inhibiting the luminescence of *Vibrio fischeri* in contact with soils collected from different depth intervals during the installation of probes

### Charakterystyka powietrza glebowego na obszarach prowadzenia wydobywania węglowodorów

W celu określenia migracji gazu ziemnego prowadzono monitoring składu powietrza glebowego pobieranego z sond zamontowanych na obszarach wydobywania węglowodorów. Próbkę powietrza glebowego z poszczególnych sond pobrano trzykrotnie w dwumiesięcznych odstępach w 2023 r. (I, II i III seria pomiarowa). Wyniki badań powietrza glebowego przeprowadzonych pod kątem oznaczenia zawartości: metanu, etanu, propanu oraz dwutlenku węgla, azotu, tlenu i siarkowodoru przedstawiono w tabeli 5.

Analizy chromatograficzne powietrza glebowego wykonane pod kątem oznaczenia zawartości węglowodorów wykazały ich obecność we wszystkich badanych próbkach. Wyższe zawartości metanu oznaczono w powietrzu glebowym pobranym z sond zamontowanych na terenie obszarów, na których prowadzone jest wydobywanie węglowodorów, aniżeli w terenie w niewielkim od nich oddaleniu. Spośród analizowanych w trzech seriach pomiarowych próbek powietrza glebowego najwyższe zawartości metanu oznaczono w powietrzu glebowym z sondy-1 (1,2871–1,5870% mol) i sondy-4 (1,3678–1,4158% mol). Znacznie niższe wartości metanu oznaczono w próbkach pobranych z terenu okolic tych odwiertów, a mianowicie z sondy-1 tło (0,0874–0,0901% mol) i sondy-4 tło (0,0512–0,0617% mol). Należy zauważyć wzrost zawartości metanu w powietrzu glebowym pobieranym z sondy-1 w miarę

kolejnych serii pomiarowych. Odwrotną zależność odnotowano w powietrzu glebowym z sondy-4, tj. w kolejnych seriach pomiarowych zawartość metanu sukcesywnie się zmniejszała. Zawartość metanu w powietrzu glebowym pobranym z sondy-2 i sondy-2 tło była niewielka, w kolejnych seriach pomiarowych sukcesywnie malała:

- od 0,3458% mol do 0,2987% mol – sonda-2;
- od 0,2028% mol do 0,1785% mol – sonda-2 tło.

Zawartość metanu w powietrzu glebowym pobranym z sondy-3 podczas trzech serii pomiarowych była zbliżona (0,3684–0,3894% mol). Niższe wartości oznaczono w powietrzu glebowym z sondy-3 tło (0,1981–0,2247% mol).

Zawartości etanu i propanu w powietrzu glebowym pobieranym z sondy-4 podczas trzech serii pomiarowych kształtowały się na podwyższonych poziomach (etan: 0,0238–0,0578% mol, propan: 0,0015–0,0020% mol), znacznie wyższych aniżeli w próbce powietrza glebowego z sondy-4 tło (etan: 0,0019–0,0021% mol, propan: 0,0003–0,0004% mol). Nieznacznie wyższe zawartości etanu i propanu (etan: 0,0128–0,0223% mol, propan: 0,0009–0,0027% mol) zanotowano również w powietrzu glebowym z sondy-2, pobranym podczas trzech serii pomiarowych. Zawartość oznaczonych węglowodorów w powietrzu glebowym była zbliżona do zawartości etanu i propanu w powietrzu glebowym tła (etan: 0,0159–0,0278% mol, propan: 0,0012–0,0030% mol). W powietrzu glebowym z pozostałych lokalizacji (sonda-1 i sonda-3) w trzech kolejnych seriach pomiarowych zawartość etanu odnotowano na porównywalnie

niskim poziomie, przy nieznacznie niższych zawartościach etanu w gazie z sond zamontowanych w terenie stanowiącym tło.

Spośród trzech serii pomiarowych najwyższą zawartość ditlenku węgla zaobserwowano w powietrzu glebowym pobranym z sondy-2 (0,7497–0,9247% mol). Na podwyższonej jego zawartość wpływ mogły mieć warunki atmosferyczne, w tym duże nasłonecznienie, sprzyjające zachodzeniu procesów beztlenowych w glebie/gruncie. W pozostałych analizowanych próbkach powietrza glebowego zawartość ditlenku węgla kształtowała się na zbliżonym poziomie (w zakresie 0,0644–0,1028% mol), przy czym najniższą wartość odnotowano w powietrzu glebowym pobranym z sondy-4 tło.

Zawartość tlenu w analizowanych próbkach powietrza glebowego mieściła się w zakresie od 20,6873% mol (III seria pomiarowa, odwiert sonda-2) do 23,2459% mol (III seria

pomiarowa, sonda-3 tło). Podczas całego cyklu badawczego śladową obecność siarkowodoru (0,0001% mol) stwierdzono jedynie w II i III serii pomiarowej w powietrzu glebowym z sondy-4 (tabela 5).

Podsumowując wyniki przeprowadzonych analiz powietrza glebowego, należy stwierdzić, że powietrze glebowe pobrane z sond sonda-1 i sonda-4, zamontowanych na obszarach, na których prowadzone jest wydobywanie węglowodorów, charakteryzuje się podwyższoną zawartością węglowodorów, zwłaszcza metanu, co wskazuje na możliwość migracji gazu z okolicznych złóż. Pozostałe badane próbki powietrza glebowego, pobrane z sondy-2 i sondy-3, są porównywalne składem z powietrzem glebowym pobranym z sond zamontowanych w okolicznych terenach (sonda-2 tło i sonda-3 tło). Można więc je uznać za tożsame z regionalnym tłem geochemicznym.

**Tabela 5.** Wyniki analiz powietrza glebowego pobranego z sond

**Table 5.** Results of analyses of soil air collected from probes

Miejsce poboru	Oznaczone składniki [% mol]						
	Tlen	Azot	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
<i>I seria pomiarowa</i>							
Sonda-1	21,1311	77,3503	0,2274	n.s.	1,2871	0,0029	0,0012
Sonda-1 tło	21,5361	78,0543	0,3202	n.s.	0,0874	0,0017	0,0003
Sonda-2	21,5337	77,3453	0,7597	n.s.	0,3458	0,0128	0,0027
Sonda-2 tło	22,6722	76,9874	0,1187	n.s.	0,2028	0,0159	0,0030
Sonda-3	21,0968	78,2168	0,2945	n.s.	0,3894	0,0021	0,0004
Sonda-3 tło	21,6201	78,0702	0,1098	n.s.	0,1981	0,0016	0,0002
Sonda-4	20,9194	77,2563	0,3808	n.s.	1,4158	0,0257	0,0020
Sonda-4 tło	21,8405	78,0214	0,077	n.s.	0,0589	0,0019	0,0003
<i>II seria pomiarowa</i>							
Sonda-1	20,9699	77,4362	0,1915	n.s.	1,3978	0,0032	0,0014
Sonda-1 tło	22,0086	77,6815	0,2178	n.s.	0,0901	0,0016	0,0004
Sonda-2	21,5337	77,3453	0,7597	n.s.	0,3458	0,0128	0,0027
Sonda-2 tło	22,6722	76,9874	0,1187	n.s.	0,2028	0,0159	0,0030
Sonda-3	22,0312	77,2464	0,3514	n.s.	0,3684	0,0023	0,0003
Sonda-3 tło	22,3407	77,3057	0,1273	n.s.	0,2247	0,0015	0,0001
Sonda-4	21,5308	76,7997	0,2107	0,0001	1,3974	0,0578	0,0015
Sonda-4 tło	22,6812	77,1903	0,0644	n.s.	0,0617	0,002	0,0004
<i>III seria pomiarowa</i>							
Sonda-1	20,9699	77,4362	0,1915	n.s.	1,3978	0,0032	0,0014
Sonda-1 tło	22,0086	77,6815	0,2178	n.s.	0,0901	0,0016	0,0004
Sonda-2	21,5337	77,3453	0,7597	n.s.	0,3458	0,0128	0,0027
Sonda-2 tło	22,6722	76,9874	0,1187	n.s.	0,2028	0,0159	0,0030
Sonda-3	22,0312	77,2464	0,3514	n.s.	0,3684	0,0023	0,0003
Sonda-3 tło	22,3407	77,3057	0,1273	n.s.	0,2247	0,0015	0,0001
Sonda-4	21,5308	76,7997	0,2107	0,0001	1,3974	0,0578	0,0015
Sonda-4 tło	22,6812	77,1903	0,0644	n.s.	0,0617	0,002	0,0004
n.s. – nie stwierdzono							

## Podsumowanie

Badania dotyczące występowania migracji i ekshalacji gazów prowadzono w czterech lokalizacjach obszaru, na którym przebiega proces wydobywania. Równoległe z badaniami obszaru potencjalnie zagrożonego ekshalacją gazu ziemnego wykonywano tożsame badania okolicznego terenu w celu ustalenia lokalnego tła.

1. Przeprowadzone analizy fizyczne i chemiczne próbek gleby pobranych z różnych interwałów głębokościowych podczas montażu sond do monitoringu składu powietrza glebowego wykazały, że zawartości metali ciężkich i zanieczyszczeń węglowodorowych (składników frakcji benzyn  $C_6$ – $C_{12}$  i olejów  $C_{12}$ – $C_{35}$  oraz WWA i BTEX) nie przekraczają dopuszczalnych stężeń dla IV grupy gruntu ani w warstwie powierzchniowej, ani na głębokości poniżej 0,25 m p.p.t., zgodnie z Dz.U. z 2016 r. poz. 1395.
2. Badania toksykologiczne przeprowadzone dla gleb pobranych z głębokości: 0,00–0,25 m p.p.t., 0,25–1,00 m p.p.t. oraz 1,00–2,00 m p.p.t. charakteryzowały się małą szkodliwością (brak toksyczności) dla bioindykatorów zawartych w mikrobiotestach typu ToxKit Ostracodtoxkit F (*Heterocypris incongruens*), Phytotoxkit (ziarna roślin *Lepidium Sativum*, *Sinapis alba*, *Sorghum saccharatum*) oraz Solid Phase Microtox (*Vibrio fischeri*).
3. Przeprowadzone w trzech seriach badania powietrza glebowego wykazały podwyższoną zawartość metanu w próbkach pobranych z sondy-1 (1,2871–1,5870% mol) i sondy-4 (1,3678–1,4158% mol). Uzyskane wyniki wskazują na możliwość migracji gazu z okolicznych złóż. Pozostałe badane próbki powietrza glebowego, pobrane z sondy-2 i sondy-3, są porównywalne składem z powietrzem glebowym pobranym z sond zamontowanych w okolicznych terenach. Można więc uznać, że nie zanotowano tam przekroczeń wartości tła dla metanu w powietrzu glebowym.
4. Wieloaspektowy monitoring, tj. badanie składu powietrza glebowego, parametrów fizycznych i chemicznych gleby oraz jej oddziaływania na organizmy żywe (bioindykatory) w okolicach potencjalnych źródeł migrującego gazu w odniesieniu do wyników otrzymanych na skutek prowadzenia tożsamych działań w niedalekiej okolicy, stanowiących tło, umożliwi rejestrację mikrowycieków gazu. Wczesne rozpoznanie ekshalacji gazu umożliwia szybkie reagowanie w celu wyeliminowania potencjalnych zagrożeń.

Artykuł zrealizowany na podstawie pracy statutowej pt. *Badania migracji gazu ziemnego w kontekście oddziaływania na środowisko*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0034/KE/2023, nr archiwalny: DK-4100-0017/2023.

## Literatura

- Brown A., 2000. Evaluation of possible gas microseepage mechanisms. *AAPG Bulletin*, 84(11): 1775–1789. DOI: 10.1306/8626C389-173B-11D7-8645000102C1865D.
- Dudek J., Dudek L., Klimek P., 2004. Badania ekshalacji gazu w rejonie złoża Przeworsk. *Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa*, nr 130: 931–935.
- Etiopie G., 2015. Natural Gas Seepage. The Earth's Hydrocarbon Degassing. *Springer*. DOI 10.1007/978-3-319-14601-0.
- Etiopie G., Beckett P., Blank J., Chen P., Klusman R., Oehler D., Shen L. Gas seepage. <[https://kiss.caltech.edu/workshops/methane/methane\\_presentations/etiopie2.pdf](https://kiss.caltech.edu/workshops/methane/methane_presentations/etiopie2.pdf)> (dostęp: 21.08.2023).
- Gamache M.T., Frost P.L., 2003. Urban development of oil fields in the LA Basin Area: 1983–2001. *SPE 83482*. DOI: 10.2118/83482-MS.
- Gascoyne M., Wuschke D.M., 2001. Gas flow in saturated fractured rock: results of a field test and comparison with model predictions. [W:] *Gas Generation and Release from Rad. Waste Rep. Proceedings of the NEA Workshop – Aix en Provence, 23–26 September*.
- Herman Z., 2008. Migracje i ekshalacje gazu ziemnego z przestrzeni międzyrurowych i pozarurowych odwiertów eksploatacyjnych na obszarze przedgórze Karpat. *Materiały konferencyjne, Warsztaty Górnicze. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*: 63–71.
- Herman Z., Migdał M., 1998. Problemy cementowania rur okładzinowych na Niżu Polskim. *Nafta-Gaz*, 12: 542–553.
- Hovland M., Jensen S., Fichler C., 2012. Methane and minor oil macro-seep systems – their complexity and environmental significance. *Marine Geology*, 332–334: 163–173. DOI: 10.1016/j.margeo.2012.02.014.
- Kluk D., 2014. Zastosowanie chromatografii jonowej do analizowania próbek środowiskowych. *Nafta-Gaz*, 70(1): 46–56.
- Kluk D., Steliga T., 2017. Efektywna metoda identyfikacji zanieczyszczeń ropopochodnych (TPH) i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w glebach. *Nafta-Gaz*, 73(7): 488–495. DOI: 10.18668/NG.2017.07.06 .
- Kobjek E., 2019. Procesy geodynamiczne w przestrzeni zurbanizowanej. Uwarunkowania – zagrożenia – zapobieganie. *Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego*. DOI: 10.18778/8142-684-8.
- Kremieniewski M., Kędziński M., Błaż S., 2021. Increasing the Efficiency of Sealing the Borehole in Terms of Spacer Pumping Time. *Energies*, 14(20): 6702. DOI: 10.3390/en14206702.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2016. Przyczyny i skutki przepływu gazu w zacementowanej przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego oraz metody zapobiegania temu zjawisku. *Nafta-Gaz*, 72(9): 722–728. DOI: 10.18668/NG.2016.09.06 .
- Król K., Kuśniarz B., 2019. Bezzbiornikowe magazynowanie substancji w górotworze – techniczne i prawne aspekty działalności organów nadzoru górniczego. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 36(1): 5–17. DOI: 10.7494/drill.2019.36.1.5.
- Radecki S., Witek W., 2000. Dobór technik i technologii cementowania w aspekcie występowania zjawiska migracji gazu. *Nafta-Gaz*, 56(9): 487–497.
- Robertson J.O., Chilingar G.V., Khilyuk L.F., Endres B., 2012. Migration of Gas from Oil/Gas Fields. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(15): 1436–1447. DOI: 10.1080/15567030903077899.
- Saunders D., Burson K.R., Thompson C.K., 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bulletin*, 83: 170–185. DOI: 10.1306/00AA9A34-1730-11D7-8645000102C1865D.
- Tao Ch., Rosenbaum E., Kutcho B.G., Massoudi M., 2021. A Brief Review of Gas Migration in Oilwell Cement Slurries. *Energies*, 14(9), 2369. DOI:10.3390/en14092369.

Wojtowicz K., 2018. Opracowanie metodyki oznaczania BTEX w próbkach gleb z wykorzystaniem chromatografii gazowej z przystawką headspace. *Nafta-Gaz*, 74(3): 201–207. DOI: 10.18668/NG.2018.03.03.

### Akty prawne i dokumenty normatywne

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. z 2016 r., poz. 1395).



Dr inż. Dorota KLUK  
Adiunkt w Zakładzie Technologii Eksploatacji  
Płynów Złożowych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [dorota.kluk@inig.pl](mailto:dorota.kluk@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU TECHNOLOGII EKSPLOATACJI PŁYNÓW ZŁOŻOWYCH

Zakład oferuje:

- opracowanie kompleksowej technologii bioremediacji in-situ gruntu zanieczyszczonego substancjami ropopochodnymi;
- rekultywację terenów skażonych substancjami ropopochodnymi;
- opracowanie technologii oczyszczania i utylizacji wód złożowych i odpadów po zabiegach stymulacyjnych z zastosowaniem nowoczesnych rozwiązań technicznych i technologicznych oraz metod biologicznych;
- optymalizacja procesów wydobywania i przygotowania do transportu ropy i gazu;
- monitorowanie zmian zawartości związków siarki w podziemnych magazynach gazu;
- badania i dobór inhibitorów parafinowo-hydratowych oraz deemulgatorów stosowanych w procesach eksploatacji złóż węglowodorów.

Badania i analizy laboratoryjne:

- analizy chromatograficzne:
  - » składu gazu ziemnego ( $C_1 - C_8$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , He,  $H_2$ ),
  - » związków siarki w gazie ziemnym,
  - » węglowodorów ciężkich ( $C_3 - C_{36}$ , BTEX),
- analizy toksykologiczne z wykorzystaniem nowoczesnych testów: Microtox, zestawów testów typu „toxkit” i testu MARA;
- analizy zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w próbkach środowiskowych z wykorzystaniem HPLC;
- analiza płynów złożowych, zanieczyszczeń gleby i ścieków, odpadów eksploatacyjnych i wiertniczych z wykorzystaniem chromatografii jonowej;
- nieniszczące badania grubości materiałów konstrukcyjnych (certyfikat UT2).



Kierownik: dr hab. inż. Teresa Steliga, prof. INiG – PIB Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno  
Telefon: 13 436 60 29, 13 436 89 41 w. 5222 Faks: 13 436 79 71 E-mail: [teresa.steliga@inig.pl](mailto:teresa.steliga@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy