

Małgorzata Wysocka*, Stanisław Chałupnik*, Elżbieta Molenda**, Justin Brown***,
Rajdeep Sidhu****

OBSERWACJE ZMIAN EKSHALACJI RADONU W REKULTYWOWANYM OSADNIKU KOPALNIANYCH WÓD DOŁOWYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ekshalacji ^{222}Rn z osadów dennych likwidowanego osadnika wód dołowych. Badania prowadzono podczas wszystkich etapów likwidacji, tj. od osuszania, poprzez przykrywanie warstwami uszczelniającymi, aż po działania agrotechniczne i nasadzeniowe.

Wyniki badań wykazały, że wykonana rekultywacja osadnika zaowocowała obniżeniem ekshalacji radonu do wartości typowych dla terenów naturalnych. Stwierdzono jednocześnie, iż w przypadkach uszkodzenia lub rozszczelnienia warstw przykrywających osady denne, dojdzie do wzmożonej ekshalacji radonu.

Observations of radon exhalation changes in the reclaimed sedimentation basin of underground mine wastes

Abstract

In this paper, results from an investigation concerning the exhalation of the radioactive gas radon ^{222}Rn from bottom deposits in a reclaimed settling pond are presented. The measurements were performed at different stages of reclamation, starting from an initial step when bottom sediments were left to dry, then during the process of covering deposits with isolation layers and soil, and finally when agro-technical measures were applied.

The obtained results have shown that due to reclamation, the radon risk caused by radon exhalation from bottom sediments has been reduced significantly. Levels have decreased to those typical for undisturbed and unpolluted areas. However, on a cautionary note, any damage of the isolation layers may lead to a significant increase of radon emission from confined sediments.

1. WPROWADZENIE

Promieniotwórczy gaz – radon to drugi, po paleniu tytoniu, czynnik powodujący wzrost prawdopodobieństwa zachorowania na raka płuc (WHO 2009). Stężenie radonu w domach zależy przede wszystkim od budowy geologicznej podłoża, która nieustannie ulega modyfikacji w wyniku działalności człowieka. W obszarze Górnego Śląska najistotniejsza forma działalności jest związana z eksploatacją węgla kamiennego. Przyczyną potencjalnych zagrożeń ryzykiem radonowym są deformacje górotworu wywołane eksploatacją górnictwem i ich skutki na powierzchni, a wśród nich: de-

* Główny Instytut Górnictwa

** Kompania Węglowa SA, Oddział Kopalnia Węgla Kamiennego „Piast” w Bieruniu

*** Norwegian Radiation Protection Authority, Østerås, Norwegia

**** Institute for Energy Technology, Kjeller, Norwegia

zintegracja skał w strefie przypowierzchniowej, powstawanie zapadlisk oraz innych deformacji nieciągłych na powierzchni.

Wyżej wymienione zjawiska powodują, że powierzchnia, z której może następować emanacja radonu jest znacznie większa niż z niespękanej, litej skały. Ma to związek z otwieraniem się nowych dróg migracji fluidów. Pustki poeksploatacyjne, będące przyczyną powstawania zniszczeń struktury górotworu oraz powodujące deformacje nieciągłe na powierzchni, ułatwiają kumulację gazów. W konsekwencji także wzmacnia się migracja w glebie i wnikanie do budynków radonu oraz innych gazów (Wysocka 2002).

Restrukturyzacja polskiego górnictwa, ograniczanie wydobycia i zamykanie kopalń sprawiają, że tereny pogórnice są stopniowo przekazywane gminom. Przed oddaniem gruntów społecznościom lokalnym, przeprowadzane są działania związane z ich rekultywacją, prowadzoną w taki sposób, by mogły być one użytkowane zgodnie z planami gmin. Wiedząc, że wieloletnia eksploatacja węgla i innych surowców mineralnych powodowała dezintegrację górotworu ułatwiającą migrację gazów oraz skażenie promieniotwórcze środowiska, można postawić pytanie: czy na terenach pogórnich będzie można budować domy, bez obawy narażania mieszkańców na otrzymywanie podwyższonych dawek radonu i produktów jego rozpadu. Udzielenie właściwej odpowiedzi wymaga zbadania poziomu emisji radonu w obszarach pogórnich. Do tego celu najodpowiedniejszy jest pomiar współczynnika ekshalacji radonu. Współczynnik ten jest wielkością opisującą zdolność wydostawania się radonu ze skał, gruntów i materiałów budowlanych do powietrza, szczególnie powietrza atmosferycznego. Można go zdefiniować jako aktywność radonu przechodzącego do powietrza z jednostki powierzchni (gruntu, gleby) w jednostce czasu. Jednostką tak zdefiniowanego współczynnika ekshalacji jest $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Zazwyczaj używa się jednak podjednostki, czyli $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Zgodnie z doniesieniami, które można znaleźć w literaturze, wartość współczynnika ekshalacji w tzw. warunkach normalnych zmienia się w zakresie od 17 do 50 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Wilkening, Clements, Stanley 1972; Colle i in. 1981; NCRP 1988; Porstendörfer 1991). W obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wartości współczynnika ekshalacji mierzone w obszarach o odmiennej budowie geologicznej, różniących się litologią, zaangażowaniem tektonicznym oraz stopniem skażeń promieniotwórczych (efekt działalności górniczej), wahają się od poniżej 1,1 do ponad 80 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Chałupnik, Wysocka 2003; Wysocka 2009). Przykładowo Mazur (2008), prowadząc pomiary na poligonie badawczym w Krakowie, zmierzyła wartości przekraczające 300 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Podwyższone, sięgające 400 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wartości współczynnika ekshalacji, zmierzono m.in. wokół zamkniętej kopalni węgla kamiennego w Słowenii (Jovanovic 2001). W obszarze rekultywowanym wokół nieczynnej kopalni uranu w północnej Australii, zaobserwowano znaczne wahania ekshalacji radonu, od około 100 do 6500 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Bollhöfer i in. 2006). W Niemczech natomiast pomiary emisji radonu na terenach górniczych i pogórnich prowadzone są od ponad 20 lat (Dushe, Kummel, Schulz 2003). W ostatnim czasie zrealizowano wiele prac poświęconych problemowi podwyższonej emisji radonu w obszarach przemysłowych i poprzemysłowych. Zwrócono szczególną uwagę na tereny obecnej lub historycznej

eksploatacji surowców mineralnych, w tym węgla kamiennego, a także na tereny poddawane innym oddziaływaniom antropogenicznym (Sengupta i in. 2001; Ferry i in. 2002; Sun, Guo, Zhuo 2004; Sasaki, Gunji, Okuda 2007; Muhlar i in. 2008).

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ekshalacji radonu, prowadzonych w rejonie likwidowanego powierzchniowego osadnika wód kopalnianych.

2. POMIARY EKSHALACJI RADONU Z OSADÓW DENNYCH LIKWIDOWANEGO OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH

Pewne ilości naturalnych substancji promieniotwórczych były lub są nadal odprowadzane do osadników wraz z wodami dołowymi (Lebecka i in. 1994; Wysocka i in. 1988; Michalik i in. 2002). Likwidowanie osadników, a następnie rekultywacja ich terenów, może wiązać się z problemem podwyższonej emisji radonu z osadów dennych osuszanych osadników. Dotyczy to zwłaszcza tych kopalń, które odprowadzały na powierzchnię znaczne ładunki izotopów ^{226}Ra i ^{228}Ra . Ocena poziomu emisji radonu z osadów dennych jest istotnym elementem, definiującym sposób prowadzenia rekultywacji terenu dawnego osadnika. W przypadku podwyższonej ekshalacji radonu należy bowiem zaplanować takie uszczelnienie osadów, by zapobiec migracji i wnikiemu gazu do budynków zbudowanych (w przyszłości) na miejscu osadnika.

Pomiary wykonywano w granicach likwidowanego, a następnie zrehabilitowanego osadnika wód dołowych „Bojszowy”, należącego do kopalni węgla kamiennego „Piast”.

W latach 1980–2001 do osadnika „Bojszowy” były odprowadzane wody o podwyższonej promieniotwórczości naturalnej, odpompowywane z wyrobisk górniczych z dwóch kopalń „Piast” oraz „Czeczott”. Powierzchnia osadnika „Bojszowy” wynosiła 16 hektarów, a zgromadzone osady sięgały jednego metra grubości. Ładunek radu zrzuconego wraz z wodami do osadnika wynosił okresowo 120 MBq na dobę. Maksymalne zmierzone stężenie ^{226}Ra w zalegających na dnie osadach wynosiło $2000 \pm 60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, a ^{228}Ra – $4000 \pm 110 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Pomiary współczynnika ekshalacji radonu wykonywano w latach 2002–2004, w różnych warunkach atmosferycznych (Wysocka 2002, 2009). Wiosną 2002 r. rozpoczęto spuszczenie wody z osadnika do rzeki Gostynia, dopływu Wisły. Przez około półtora roku od spuszczenia wody z osadnika, osady denne pozostały nasiąknięte wodą. W związku z tym, nie można było prowadzić pomiarów stężeń radonu w powietrzu gruntowym w osadach. Ich nasycenie wodą uniemożliwiało bowiem pobranie próbki powietrza z odpowiedniej głębokości. Pomiar współczynnika ekshalacji jest, w przypadku terenów podmokłych, jedynym narzędziem pozwalającym na oszacowanie ryzyka wystąpienia wzmożonej emisji radonu.

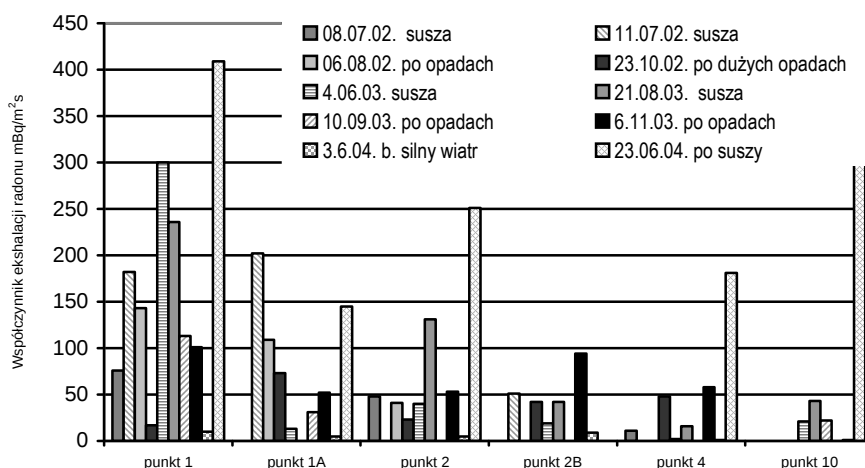
Pomiary rozpoczęto dopiero w lipcu 2002 r., po kilkutygodniowym okresie bezdeszczowym. Pierwszą serię pomiarową wykonano na niewielkim osuszonym obszarze blisko brzegu. Zmierzone wartości współczynnika ekshalacji wahały się od około 2,0 do ponad $70 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Kolejne pomiary, wykonane po tygodniu słonecznej, bezdeszczowej pogody pokazały znaczny wzrost ekshalacji radonu. Maksymalna zmierzona wartość wynosiła $160 \pm 28 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Pomiary powtarzano co dwa tygo-

dnie do ostatnich dni października 2002 r. W miarę upływu czasu obszar osuszonego dna ulegał poszerzeniu, co umożliwiło zwiększenie liczby punktów pomiarowych. Najwyższa wartość współczynnika ekshalacji zmierzona w pierwszym roku badań wynosiła $202 \pm 34 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Była zatem znacznie wyższa od wcześniej mierzonych wartości. Dla porównania, jego wartości mierzone na wychodniach różnych utworów geologicznych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, nie przekraczają $80 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Chałupnik, Wysocka 2003). Dodatkowo należy podkreślić, iż w trakcie prowadzenia pomiarów, osady z dna osadnika „Bojszowy” były bardzo wilgotne, a ekshalacja zachodziła wyłącznie z cienkiej warstwy przypowierzchniowej. Można było przypuszczać, że stopniowe wysychanie osadów doprowadzi do wzrostu ekshalacji radonu z osadnika. Mając to na uwadze, pomiary kontynuowano w sezonie wiosna – lato – jesień w roku następnym.

Pierwszy pomiar drugiej kampanii wykonano na początku czerwca 2003 r. Poza niewielkimi zagłębieniami, dno osadnika było wystarczająco osuszone, aby znacznie zwiększyć obszar pomiarów w porównaniu z rokiem poprzednim. Poziom wody w osadach uległ widocznemu obniżeniu, a emisja radonu zachodziła ze znacznie grubszej warstwy. Wyniki badań wykonanych po dłuższym okresie bezdeszczowym wykazały, że ekshalacja radonu w najbardziej wysuszonych miejscach osadnika przekracza wartości mierzone wcześniej. Dla przykładu można podać, iż w punkcie pomiarowym numer 1 współczynnik ekshalacji wynosił $302,0 \pm 49,6 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. W miejscach, w których dotychczas nie prowadzono pomiarów, również zaobserwowano wysokie wartości współczynnika ekshalacji, tj. $200,0 \pm 34 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ blisko wlotu wód dołowych; $50,0 \pm 9 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w punkcie numer 4, odległym od zrzutu wód o około 390 m. Kolejne pomiary pokazywały, że wysoka emisja radonu utrzymywała się nawet po okresach opadów, a mierzone współczynniki ekshalacji osiągały wartość $100 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Należy przypuszczać, że radon migrował ze stosunkowo grubej (20–30 cm) warstwy osuszonych osadów dennych i z łatwością przenikał do powietrza atmosferycznego. W rezultacie zaobserwowano wysokie wartości współczynnika ekshalacji zmierzone w trakcie okresów bezdeszczowych.

Przedostatni etap obserwacji zmian współczynnika ekshalacji osuszanego osadnika przypadł na wiosnę 2004 r. Pomiary prowadzono po opadach. Warstwa powierzchniowa osadu była wilgotna, a mimo to, we wszystkich punktach pomiarowych współczynniki ekshalacji radonu były wyższe, niż w latach ubiegłych. Warstwa osadu uległa osuszeniu, radon łatwo przemieszczał się między ziarnami mineralnymi, a następnie przenikał do powietrza atmosferycznego. Maksymalna wartość zmierzona w punkcie numer 1 wynosiła $409,0 \pm 68 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dla porównania, wartości współczynnika ekshalacji mierzone w sąsiedztwie osadnika, nie przekraczały $3,0 \pm 1 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dotychczas w żadnym innym poligonie badawczym nie stwierdzono tak intensywnej emisji radonu, jak w granicach likwidowanego osadnika „Bojszowy”.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów współczynników ekshalacji radonu z osadów dennych osadnika, w trakcie poszczególnych kampanii pomiarowych.



Rys. 1. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy”

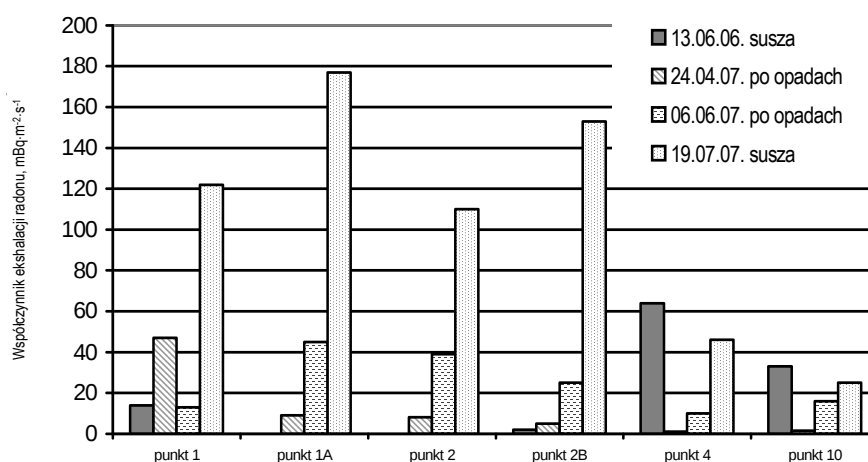
Fig. 1. Results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond

3. POMIARY EKSHALACJI RADONU W REJONIE OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH W TRAKCIE REKULTYWACJI

W 2006 r. osadnik „Bojszowy” został przygotowany do rekultywacji. Część jego powierzchni została zasypana pierwszą warstwą odpadów wydobywczych (wydobywcą masą skalną). W tym okresie rozpoczęto kolejną serię pomiarów emisji radonu. Zmierzone wartości współczynnika ekshalacji były niższe, niż mierzone podczas poprzednich kampanii pomiarowych (rys. 1). Najwyższa zanotowana w tym czasie wartość wynosiła $64,0 \pm 12 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. W roku następnym trzykrotnie powtarzano pomiary współczynnika ekshalacji. Jego wartości mierzone w trakcie kolejnych pomiarów wahały się w szerokim zakresie, od odpowiadających dolnemu limitowi detekcji, wynoszącemu $1,6 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ do $177 \pm 32 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Zmienność ekshalacji radonu należy wiązać z właściwościami fizycznymi warstwy przykrywającej osady denne osadnika: stopniem kompaktacji i uszczelnienia, wysychaniem, pojawianiem się spękań w schnącej warstwie osadów, a w rezultacie ponownym jego rozszczelnieniem. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów z lat 2006–2007. Jak zauważono, współczynnik ekshalacji nie osiągnął wtedy wartości maksymalnej, zmierzonej przed rozpoczęciem rekultywacji, tj. $409,0 \pm 68,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Niemniej widać, że proces izolowania osadów dennych, w taki sposób, by ograniczyć emisję radonu, był czasochłonny i wymagał dużej staranności od wykonawców. Stabilizowanie się warstw izolujących trwało kilka lat, a zmiany ekshalacji radonu jednoznacznie wskazywały, czy kolejny etap prac rekultywacyjnych był wystarczający dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego terenu.

Rekultywacja została przeprowadzona zgodnie z opracowanymi na zlecenie kopalni wytycznymi. Osady denne przykryto odpadami wydobywczymi z kopalni „Piast” z bieżącej produkcji (łupek i piaskowiec) w celu ich zagęszczenia i ustabilizowania całej powierzchni. Następnie wykonano warstwę podsypki z piasku gruboziarnistego i ułożo-

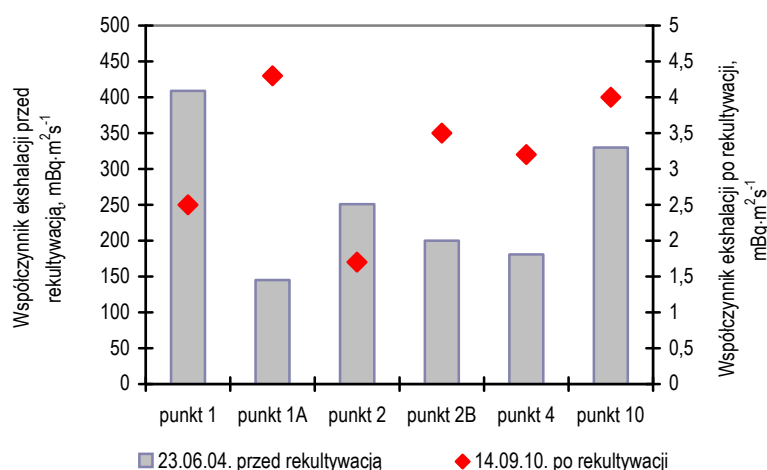
no sieć drenarską do odbioru wód opadowych, która jednocześnie pełniła rolę systemu kontrolno-wentylacyjnego dla zgromadzonych osadów. Kolejno wzmocniono uszczelnienie powierzchni następną warstwą ochronną odpowiednio zagęszczoną, wykonaną z kopalnianych odpadów wydobywczych o grubości jednego metra. Całość została następnie przykryta glebą, obsiana trawą i obsadzona specjalnie dobraną roślinnością. Po całkowitym zakończeniu rekultywacji wykonano повторно pomiary ekshalacji radonu w wybranych punktach pomiarowych. W celu sprawdzenia skuteczności wykonanych prac przeprowadzono pomiary współczynnika ekshalacji w punktach monitorowanych w trakcie osuszania osadnika. Wszystkie zmierzone wartości były bardzo niskie, wahały się w granicach od $1,7 \pm 1,1$ do $4,3 \pm 1,2$ $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Były porównywalne z wartościami mierzonymi na łące w sąsiedztwie osadnika. Na rysunku 3 porównano współczynniki ekshalacji z ostatniej kampanii pomiarowej przed zasypywaniem osadów dennymi warstwami odpadów i gleby, z wynikami badań z uszczelnionego osadnika. Zastosowano dwie skale, ponieważ współczynniki różnią się o dwa rzędy wielkości. Wyniki pomiarów potwierdziły zatem, że osad denny został skutecznie uszczelniony, a ekshalacja radonu ograniczona.



Rys. 2. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy” w trakcie prowadzenia prac rekultywacyjnych

Fig. 2. Results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond during ground reclamation

Pomiar współczynnika ekshalacji radonu jest dobrym narzędziem kontroli efektów wykonania rekultywacji. Prawidłowe przykrycie osadów, będących źródłem radonu, warstwą o niskiej przepuszczalności, ogranicza możliwości migracji gazu. Tym samym zlikwidowane lub co najmniej ograniczone zostało potencjalne zagrożenie radiologiczne, którego źródłem jest osad denny o podwyższonej promieniotwórczości, zalegający w rekultywowanym osadniku wód kopalnianych.



Rys. 3. Porównanie wyników pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy” przed i po rekultywacji; wartości współczynników ekshalacji po rekultywacji są około 100 razy mniejsze niż zmierzone wcześniej

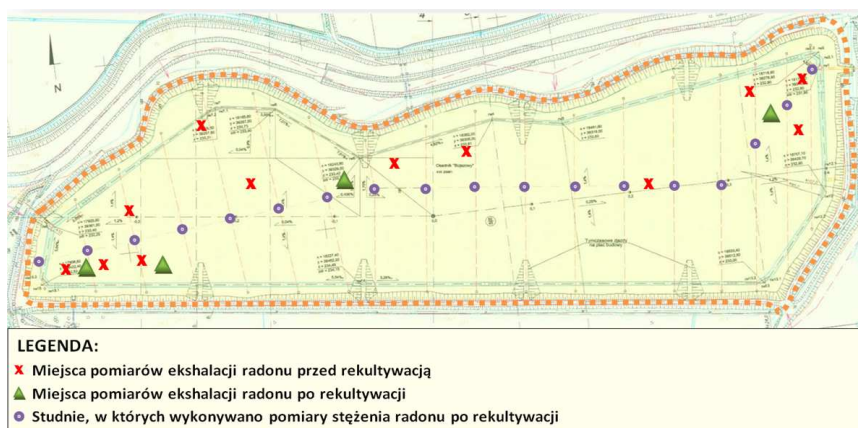
Fig. 3. Comparison of results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond before and after reclamation. The ratio of values measured before and after reclamation is higher than 100:1

4. POMIARY STĘŻENIA RADONU W POWIETRZU W STUDZIENKACH DRENAŻOWYCH ZREKULTYWOWANEGO OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH

W celu sprawdzenia, jakie efekty może spowodować naruszenie lub zniszczenie warstwy uszczelniającej osady denne, wykonano serię pomiarów stężenia radonu w powietrzu w studzienkach drenażowych, których lokalizację przedstawiono na rysunku 4. Detektory śladowe umieszczano w studzienkach kilka centymetrów nad poziomem gruntu. Czas ekspozycji detektorów wynosił ponad dwa miesiące, a integrujący charakter pomiaru pokazał stężenie radonu uśrednione za czas ekspozycji. Zmierzone stężenie radonu wielokrotnie przekraczało średnią wartość pomiarów na otwartym powietrzu, która według Nazaroffa wynosi około $8 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (Nazaroff, Nero eds. 1988). Przekraczało także wartość referencyjną dla budynków mieszkalnych, wynoszącą $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (ICRP 2008). Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Najwyższe stężenie radonu w studzience drenażowej wynosiło ponad $4100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Dzieje się tak, gdyż wymiana powietrza w studzienkach jest bardzo ograniczona, wskutek czego mierzone stężenie radonu jest podwyższone w stosunku do wartości obserwowanych na otwartym powietrzu.

Wyżej przedstawione zjawisko powoduje, że plany wykorzystania zrekultywowanych terenów pogórnich muszą uwzględniać potencjalne zagrożenia radiacyjne dla użytkowników i środowiska. W granicach omawianego zlikwidowanego osadnika wód kopalnianych nigdy nie powinny być budowane budynki mieszkalne. Wszelkie nieszczelności w podłogach, fundamentach, wokół instalacji, mogłyby spowodować

wnikanie do wnętrza radonu o stężeniu promieniotwórczym, porównywalnym do mierzonego w studzienkach drenazowych. Skutkiem wnikania gazu mogą być podwyższone stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych, co narażałoby mieszkańców na otrzymywanie większej dawki radonu i produktów jego rozpadu. Nie wskazane jest także zakładanie na tym terenie placów zabaw, nie można bowiem założyć, że uszczelnienie osadów dennych zawsze będzie w dobrym stanie technicznym. Migracja radonu przez pęknięcia i rozszczelnienia, następnie jego ekshalacja z powierzchni, może być źródłem zagrożenia radiacyjnego dla bawiących się w piaskownicy dzieci. Jednak na większych wysokościach radon rozcieńczy się w powietrzu atmosferycznym i nie będzie stanowił zagrożenia.



Rys. 4. Teren po osadniku „Bojszowy” – lokalizacja pomiarów ekshalacji radonu z osadów dennych przed rekultywacją i po rekultywacji oraz stężenia radonu mierzonego w studniach po rekultywacji

Fig. 4. The sketch plan of the “Bojszowy” settling pond with location of sampling points

Tabela 1. Wyniki pomiarów radonu w studzienkach zrekultywowanego osadnika wód dołowych „Bojszowy”

Punkt pomiarowy	Czas ekspozycji	Stężenie radonu w studniach drenazowych po rekultywacji, Bq·m ⁻³
1	16.11.2010–19.01.2011	
2		170 ± 60
3		1170 ± 60
4		1540 ± 240
5		3180 ± 320
6		3270 ± 330
7		2150 ± 260
8		4170 ± 530
9		1660 ± 240
11		brak detektora
12		brak detektora
13		4860 ± 560
14		4620 ± 550
15		3080 ± 300
Średnia wartość mierzona na otwartym powietrzu (Nazaroff, Nero eds. 1988), zalecana wartość referencyjna dla domów mieszkalnych (ICRP 2008)		8 200

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podczas rekultywacji nieczynnych terenów kopalnianych może pojawić się wiele problemów; jednym z nich jest możliwość wzmożonej ekshalacji radonu. Sytuację niezwykle utrudniają przypadki, gdy do osadników wód dołowych odprowadzano wody o podwyższonej promieniotwórczości. Jeżeli wytrącone i zdeponowane tam osady charakteryzują się podwyższonymi stężeniami radu, wówczas ekshalacja radonu może mieć znaczący wpływ na sposób i możliwości wykorzystania takiego terenu. Mimo że właściwie przeprowadzona rekultywacja ogranicza ekshalację radonu z powierzchniowej warstwy gruntu do wartości tła naturalnego, to jednak w powietrzu glebowym stężenie radonu może osiągać wartości tysięcy $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Opracowując plany zagospodarowania terenów pogórnich należy uwzględnić możliwość wzrostu ryzyka radonowego badanych obszarów.

Badania wykonane w rejonie likwidowanego osadnika „Bojszowy” pokazały, że pomiar współczynnika ekshalacji radonu jest dobrym wskaźnikiem oceny efektywności wykonywania rekultywacji terenów, na których były gromadzone osady o podwyższonej zawartości izotopów radu. Potwierdzono, że rekultywacja była wykonana poprawnie, mimo to teren nigdy nie powinien być wykorzystany jako budowlany.

Podziękowania

Praca była częściowo finansowana przez Norwegię w ramach grantu Norweskiego Mechanizmu Finansowego i stanowi etap projektu PORANO (Survey of the impact of enhanced natural radioactivity on human and natural environments), nr kontraktu PNRF-192-AI-1/07.

Acknowledgments

This work was partly supported by a grant from Norway through the Norwegian Financial Mechanism and forms part of PORANO project (Survey of the impact of enhanced natural radioactivity on human and natural environments), contract no. PNRF-192-AI-1/07.

Literatura

1. Bollhöfer A., Storm J., Martin P., Tims S. (2006): Geographic Variability in Radon Exhalation at a Rehabilitated Uranium Mine in the Northern Territory. *Environmental Monitoring Assessment* Vol. 114, s. 313–317.
2. Chałupnik S., Wysocka M. (2003): Measurements of radon exhalation from soil – development of the method and preliminary results. *Journal of Mining Science* Vol. 39(2), s. 199–206.
3. Colle R., Rubin R.J., Knab L.I., Hutchins T.M.R. (1981): Radon transport through and exhalation from building materials. National Bureau of Standards Technical Note 1139. Springfield, Virginia, National Technical Information Service.
4. Dushe C., Kummel M., Schulz H. (2003): Investigations of enhanced outdoor radon concentration in Johanngeorgenstadt (Saxony). *Health Physics* Vol. 84(5), s. 655–659.
5. Ferry C., Richon P., Beneito P., Robe M.-C. (2002): Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium tailings: transient radon flux analysis. *Journal of Environmental Radioactivity* Vol. 63, s. 49–64.
6. ICRP (2008): International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. ICRP Publ. 103. Elsevier.

7. Jovanovic P. (2001): Radon exhalation rate measurements on and around the premises of a former coal mine. *Science of the Total Environment* Vol. 272(1-3), s. 147–151.
8. Lebecka J., Chałupnik S., Michalik B., Wysocka M., Skubacz K., Mielnikow A. (1994): Radioactivity of Mine Waters in Upper Silesian Coal Basin and its influence on natural environment. *Proc. of 5th Int. Mine Water Congress*, Quorn Repro Ltd., Loughborough, England.
9. Mazur J. (2008): Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu, a parametry meteorologiczne i własności gleby. Raport nr 2014/AP Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk. Kraków (praca doktorska).
10. Michalik B., Chałupnik S., Wysocka M., Skubacz K. (2002): Ecological problems of the coal industry and the ways to solve them. *Journal of Mining Science* Vol. 38, No. 6, s. 601–607.
11. Muhlar A.K., Kumar R., Mishra M., Sengupta D., Prasad R. (2008): An investigation of radon exhalation doses in coal and fly ashes samples. *Applied Radiation and Isotopes* Vol. 66, s. 401–406.
12. Nazaroff W.W., Nero A.V., eds. (1988): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc.
13. NCRP (1988): Report No. 97 National Council on Radiation Protection Measurements, Bethesda, USA.
14. Porstendörfer J. (1991): Radon and toron and their decay products. *Proceedings of the 5th International Conference on Natural Radiation Environment*, Salzburg, Austria.
15. Sasaki T., Gunji Y., Okuda T. (2007): Suppression methods of radon emanation from phosphorous fertiliser and diatomaceous earth. *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 124, No. 2, s. 75–84.
16. Sengupta D., Kumar R., Singh A.K., Prasad R. (2001): Radon exhalation and radiometric prospecting on rocks associated with Cu-U mineralization in Singhbhum sher zone, Bihar. *Applied Radiation and Isotopes* Vol. 55, s. 889–894.
17. Sun K., Guo Q., Zhuo W. (2004): Feasibility for mapping radon exhalation rate from soil in China. *Journal of Nuclear Science and Technology* Vol. 41, No. 1, s. 86–90.
18. Wilkening M.H., Clements W.E., Stanley D. (1972): Radon-222 flux measurements in widely separated regions. W: *The natural radiation environment II*, Ed. John A.S. Adams. Houston, Texas, Rice University, s. 717–730.
19. WHO (2009): World Health Organization, Handbook on Indoor Radon.
20. Wysocka M. (2002): Zależność poziomu stężeń radonu od warunków geologiczno-górnictwowych na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 3.
21. Wysocka M. (2009): Emisja radonu w obszarze Górnego Śląska. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* nr 2, s. 37–46.
22. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S., Skubacz K., Lebecka J. (1988): Zachowanie się w środowisku naturalnym radu odprowadzonego z kopalń węgla z wodami i osadami. *Krajowa Konferencja Radiochemii i Chemii Jądrowej „W Stulecie Odkrycia Polonu i Radu”*. Warszawa, ICHTJ.