



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCYPLINA: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**ZMIANY STĘŻENIA AKTYWNOŚCI ^{222}Rn
W RADONOWEJ WODZIE LECZNICZEJ
NA POSZCZEGÓLNYCH ETAPACH:
OD WYDOBYCIA KOPALINY ZE ZŁOŻA
DO WYKORZYSTANIA TWORZYWA RADONOWEGO
W ZABIEGACH RADONOTERAPII**

Mgr inż. Piotr Maciejewski

Promotor:

prof. dr hab. Tadeusz Andrzej Przylibski

Promotor pomocniczy:

dr inż. Agata Kowalska

Słowa kluczowe: Radon, woda lecznicza, woda radonowa, Łądek-Zdrój, Świeradów-Zdrój, zabiegi radonoterapeutyczne, dawka efektywna promieniowania jonizującego

WROCLAW, lipiec 2023 r.

*Przede wszystkim dziękuję mojemu Promotorowi,
prof. dr. hab. Tadeuszowi A. Przylibskiemu za wiedzę, którą mi przekazał,
ale także za poświęcony czas, zarówno ten bezpośrednio związany
z realizacją doktoratu, ale także ten, który nieubłaganie mijał podczas wielu
delegacji, spotkań, jak i rozmów. To również dzięki nim miałem możliwość za
każdym razem nauczyć się czegoś nowego.*

*Serdecznie dziękuję mojej opiekunce pracy magisterskiej,
a następnie promotorce pomocniczej dr Agacie Kowalskiej.
Przede wszystkim za pokazanie mi pierwszych kroków do kariery naukowej,
wzbudzenie ciekawości i okazanie zrozumienia na każdym etapie.*

*Pragnę także osobno wyrazić wdzięczność mojej rodzinie i najbliższym,
na których mogłem zawsze liczyć, o każdej porze dnia i nocy.
To oni pokazywali mi, że brak sił to tylko pozory, ponieważ gdy są obok,
to nie ma rzeczy niemożliwych.*

*Składam także podziękowania Zarządom i pracownikom
Uzdrowisk w Łądku-Zdroju oraz Świeradowie-Zdroju
za umożliwienie przeprowadzenia badań.*

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Radon	11
2.1. Rys historyczny	11
2.2. Charakterystyka pierwiastka	13
2.3. Uwalnianie radonu ze skorupy ziemskiej	15
2.4. Składnik wód leczniczych	17
2.5. Wpływ radonu na zdrowie ludzi	20
2.6. Teoria hormezy radiacyjnej	22
2.7. Dopuszczalne dawki promieniowania jonizującego od ^{222}Rn i jego pochodnych	25
3. Podstawowe właściwości wód podziemnych.....	27
3.1. Właściwości fizyczne.....	27
3.1.1. Przewodność elektrolityczna właściwa i suma rozpuszczonych składników mineralnych.....	27
3.1.2. Temperatura.....	29
3.1.3. Radoczynność.....	30
3.2. Właściwości chemiczne	32
3.2.1. Potencjał utleniająco-redukcyjny	32
3.2.2. Odczyn wody (pH)	34
4. Cele pracy i główne tezy.....	36
5. Charakterystyka obszaru badań	37
5.1. Łądek-Zdrój.....	37
5.2. Świeradów-Zdrój.....	41
6. Zakres i metodyka prac	46
6.1. Pomiary podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody.....	47
6.2. Oznaczanie stężenia aktywności ^{222}Rn w próbkach wód.....	48

6.3.	Pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu	51
6.4.	Pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn w powietrzu	53
6.5.	Obliczanie dawek od radonu i jego pochodnych. Wartość współczynnika równowagi promieniotwórczej pomiędzy ^{222}Rn a jego pochodnymi	54
7.	Wyniki badań i ich analiza	59
7.1.	Lądek Zdrój	59
7.1.1.	Kąpiel radonowo-siarczkowa.....	60
7.1.2.	Emanatorium (inhalatorium).....	72
7.1.3.	Analiza zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej.....	87
7.2.	Świeradów Zdrój.....	91
7.2.1.	Kąpiel radonowa (indywidualna)	93
7.2.2.	Kąpiel w basenie radonowym	105
7.2.3.	Indywidualne inhalacje radonowe.....	112
7.2.4.	Inhalacje grupowe w tężni radonowo-solankowej.....	127
7.2.5.	Analiza zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej.....	138
7.3.	Oszacowanie dawek efektywnych od promieniowania jonizującego dla kuracjuszy i pracowników.....	145
7.4.	Granica stężenia aktywności ^{222}Rn w tworzywach radonowych ze względu na dopuszczalne dawki efektywne	161
8.	Podsumowanie badań.....	167
9.	Wnioski	174
10.	Literatura	180
11.	Spis tabel	194
12.	Spis rysunków.....	202

1. Wstęp

Radon jest promieniotwórczym gazem powszechnie występującym w Polsce na Dolnym Śląsku. Region dolnośląski jest bogaty w ten pierwiastek ze względu na swoją budowę geologiczną. Na tym obszarze Polski występują skały krystaliczne wzbogacone w uran (^{238}U) i produkt jego rozpadu rad (^{226}Ra) (Przylibski, 2004, 2005, 2015). Główne źródło izotopu ^{222}Rn w środowisku człowieka stanowi powietrze glebowe i wody podziemne (Cothorn i Smith, 1987; Przylibski, 2018). W uzdrowiskach położonych na Dolnym Śląsku wody radonowe (eksploatowane jako kopalina, leczniczy surowiec radonowy i wykorzystywane jako tworzywo radonowe) są powszechnie stosowane w lecznictwie (Przylibski, 1998, 2000, 2018). W oparciu o teorię hormezy radiacyjnej wody te są wykorzystywane w zabiegach, które mają przeciwdziałać wielu chorobom (Erickson, 2007). Niestety w wielu uzdrowiskach, w tym w polskich, nie określono dotychczas wartości stężenia aktywności ^{222}Rn , które powinny być bezpiecznie stosowane w procedurach terapeutycznych. Ponadto brak jest aktualnych informacji na temat stężenia aktywności ^{222}Rn podczas zabiegu w tworzywie terapeutycznym, takim jak woda radonowa oraz powietrze wzbogacone w radon. Brakuje również informacji o zmianach stężenia aktywności ^{222}Rn od momentu wydobycia kopaliny, jaką są wody radonowe, poprzez jej transport i magazynowanie aż do zastosowania jako tworzywo radonowe wody radonowej lub powietrza, do którego z wody uwalniany jest radon. Podstawą prowadzonych przez autora badań jest pomiar poziomów stężenia aktywności radonu w surowcach radonowych (kopalinie, jaką są wody radonowe) i tworzywach radonowych stosowanych w zabiegach terapeutycznych. Prowadzone obecnie zabiegi radonoterapii nie są wystandaryzowane. Brakuje informacji o stężeniu aktywności ^{222}Rn w tworzywach radonowych oraz o dawkach promieniowania jonizującego pochodzącego od tego izotopu, jak i jego promieniotwórczych pochodnych, jakie w czasie zabiegów otrzymują pacjenci, kuracjusze, a także personel medyczny i techniczny. W celu uzupełnienia tych brakujących informacji autor zaplanował i przeprowadził badania, których wyniki mogą być początkiem innowacyjnej optymalizacji rutynowo od ponad stu lat stosowanych zabiegów balneoterapii i radonoterapii w dolnośląskich uzdrowiskach.

W celu przeanalizowania tego problemu autor wystąpił i uzyskał zgodę na prowadzenie badań w uzdrowiskach Łądek-Zdrój oraz Świeradów-Zdrój. Eksploatowane przez zakłady górnicze w tych uzdrowiskach lecznicze wody radonowe są źródłem radonu (^{222}Rn) wykorzystywanego w zabiegach leczniczych (terapia i balneoterapia radonowa – radonoterapia).

Świadome wykorzystanie radonowych wód podziemnych do różnych zabiegów terapeutycznych rozpoczęło się w pierwszej dekadzie XX wieku – kilka lat po odkryciu radonu i zjawiska promieniotwórczości (Miliszkiewicz, 1978; Przylibski, 2005, 2018). Dzięki najdłużej żyjącemu izotopowi radonu – ^{222}Rn , wody podziemne, w których jest rozpuszczony, nabierają właściwości promieniotwórczych. Zgodnie z teorią hormezy radiacyjnej małe dawki promieniowania jonizującego mogą mieć pozytywny wpływ na organizm człowieka (Schöllnberger i in., 2001; Erickson, 2007; Franke i in., 2000; Somlai i in., 2007; Nagy i in., 2008; Moder i in., 2011). W oparciu o tę teorię zabiegi radonoterapii stosowane są w wielu uzdrowiskach i zakładach medycyny naturalnej w Europie, Azji, a także w Ameryce Północnej (USA) i Ameryce Południowej (Chile) (Vogiannis i in., 2004a, 2004b; Erickson, 2007; Nagy i in., 2008; Persianova-Dubrova i in., 2012).

Wody radonowe w świetle obowiązującego w Polsce prawa zaliczane są do wód leczniczych (i jednocześnie są kopalinami), gdy są wodami podziemnymi niezanieczyszczonymi pod względem chemicznym i mikrobiologicznym, charakteryzują się naturalną zmiennością cech fizycznych i chemicznych, a równocześnie zawierają radon (^{222}Rn) w ilości nie mniejszej niż 74 Bq/dm^3 (Ustawa, 2011).

Radon jest stosowany w zabiegach jako gaz występujący w dwóch rodzajach tworzyw radonowych: powietrzu wzbogaconym w ten gaz oraz jako woda z rozpuszczonym w niej radonem. Często jednak zabiegi te stosuje się w oparciu o wieloletnie tradycje, a nie w oparciu o bieżące pomiary. Ponadto w trakcie zabiegów nie mierzy się stężenia aktywności ^{222}Rn w tworzywach radonowych ani nie mierzy się skali akumulacji radonu w pomieszczeniach po zabiegu. Problemem może się wydawać fakt, że stosowane w uzdrowiskach zabiegi radonowe nie są wystandaryzowane. Prowadzenie pomiarów ma zwykle na celu kontrolę zachowania właściwości farmakodynamicznych (leczniczych) w eksploatowanej

wodzie leczniczej i obejmuje zwykle jedynie pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w ujęciu kopaliny (w studni, źródle) (Przylibski, 2005, 2015). Niewiele jest danych na temat akumulacji radonu w pomieszczeniach w uzdrowiskach radonowych, ponadto dostępne dane dotyczą zwykle uzdrowisk z wodami termalnymi (Vogiannis i in., 2004a, 2004b; Walczak i Zmyślony, 2013).

Wykorzystywana podczas zabiegów woda, zanim zostanie użyta jako tworzywo radonowe w zabiegach leczniczych, jest magazynowana w zbiornikach oraz transportowana rurociągami. Upływ czasu powoduje, że radon, zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego, ulega zanikowi, będącemu efektem jego przemiany promieniotwórczej alfa (jego okres półrozpadu wynosi $t_{1/2} \approx 3,82$ doby), a dodatkowo jako gaz ulatnia się z wody do atmosfery, gromadząc się w niepożądanych miejscach (np. w pomieszczeniach, w których znajdują się zbiorniki). To niezwykle istotna kwestia, gdyż radon (^{222}Rn) jest najważniejszym (największym) źródłem promieniowania jonizującego, z którym spotyka się człowiek. Biorąc pod uwagę te fakty, autor zdecydował się na podjęcie badań obejmujących kompleksowe pomiary, które pozwalają uzyskać nową wiedzę na temat skali transferu radonu (zmian jego stężenia) w ciągu technologicznym od ujęcia wody radonowej (kopaliny), aż do tworzyw radonowych stosowanych w terapii radonowej. Badania te, będące badaniami podstawowymi, dostarczą nowej wiedzy o rzeczywistych właściwościach wód obecnie stosowanych jako radonowe wody lecznicze w terapii radonowej. Wyniki tych badań powinny być podstawą standaryzacji różnorodnych zabiegów radonoterapii. Najnowsze z dotychczasowych badań naukowych nad tymi zagadnieniami prowadzone były w polskich uzdrowiskach głównie w latach 60., 70. i 80. XX w. (Kochański, 1978; 2002; Przylibski, 2005). Od tego czasu nastąpił znaczący rozwój metod i przyrządów pomiarowych pozwalających na wykrywanie krótko- i długookresowych zmian stężenia radonu. Badania autora zostały zaplanowane w taki sposób, aby umożliwiły wyciągnięcie wniosków odnośnie do konieczności lub braku konieczności wdrożenia indywidualnego szacowania dawek skutecznych (efektywnych) promieniowania jonizującego dla personelu i pacjentów (kuracjuszy). Z naukowego punktu widzenia wyniki uzyskane w ramach realizowanej przez autora pracy doktorskiej mogą być również użyteczne dla innych dziedzin nauki. Mogą być wykorzystywane przez naukowców – lekarzy,

fizjoterapeutów, biologów, fizyków medycznych i in. zajmujących się wpływem radonu na organizm człowieka, w tym np. zajmujących się rozwojem badań nad hormezą radiacyjną. Wyniki te mogą być także użyteczne dla producentów urządzeń i pomieszczeń przeznaczonych do stosowania zabiegów balneoterapii radonowej i radonoterapii.

2. Radon

2.1. Rys historyczny

Radon jako pierwszy podczas swoich badań zaobserwowali Maria i Pierre Curie w 1898 roku podczas ogrzewania blendy uranowej. Zebrali wówczas wydzielający się gaz, którego promieniotwórczość zanikała po upływie miesiąca. Ze swojej obserwacji nie wyciągnęli jednak istotnych wniosków. Dopiero w 1900 roku dokonał tego chemik Friedrich Ernst Dorn. Prace Ernesta Dorna z 1900 roku i Rutherforda z 1901 roku potwierdziły, że rad emanował radioaktywny gaz. Początkowo, niektórzy historycy nauki uważali Rutherforda za odkrywcę radonu, jednak w swojej książce z 1913 roku on sam przypisał odkrycie radonu Dornowi (Rutherford, 1913).

Nowy pierwiastek (radon) został przyjęty przez Międzynarodową Komisję Mas Atomowych w 1912 roku. Następnie w 1923 roku nazwa radon została zatwierdzona przez Międzynarodowy Komitet Pierwiastków Chemicznych oraz Międzynarodową Unię Chemii Czystej i Stosowanej (McLaughlin, 2012).

Radon do celów leczniczych wykorzystywano nieświadomie na długo przed jego odkryciem. W medycynie ludowej wykorzystywano bowiem źródła, które miały posiadać właściwości lecznicze, a o których obecnie wiadomo, że posiadały zwiększone stężenie aktywności radonu (^{222}Rn). Świadome wykorzystywanie radonu do celów leczniczych rozpoczęło się w pierwszej połowie XX wieku. W 1914 roku John Joly oraz Walter Stevenson zaczęli stosować metodę dublińską, polegającą na wychwytywaniu gazu radonowego w cienkich szklanych rurkach, które następnie umieszczano w stalowych igłach i wprowadzano do guza nowotworowego (Joly, 1914). W latach dwudziestych XX wieku zaczęto natomiast produkować pasty emanujące radon (Merzbacher, 2012). Okres ten wiąże się również z dużą popularnością emanatorów domowego użytku, które później poza leczeniem nowotworów zaczęto wykorzystywać do leczenia innych dolegliwości oraz schorzeń (Hayter, 2003).

Szczyt zainteresowania różnego rodzaju terapiami radonem miał miejsce w latach trzydziestych XX wieku. Również wtedy wprowadzono koncepcję progu, po przekroczeniu, którego dopiero pojawiają się negatywne skutki oddziaływania

promieniowania jonizującego na organizm człowieka. Szczyt ten jednak nie trwał długo, ponieważ z końcem lat trzydziestych i w latach czterdziestych został stwierdzony związek pomiędzy zachorowalnością na nowotwory dróg oddechowych, w tym zwłaszcza płuc, a dużymi dawkami promieniowania jonizującego. Wyniki badań oraz pierwsze wybuchy bomb jądrowych, jak i udział mediów doprowadził do postrzegania radonu jako niebezpieczeństwa, przed którym trzeba się chronić (Przylibski, 2005, 2018).

Eksplozje w Hiroszynie i Nagasaki, a co za tym idzie także obserwacja ich skutków, doprowadziły do przyjęcia wśród radiologów liniowej hipotezy bezprogowej. Zakładała ona występowanie jednakowych skutków popromiennych po otrzymaniu wielkich, jak i małych dawek. Różnica była jedynie w częstotliwości ich występowania, proporcjonalnie do otrzymanej dawki. Strach przed promieniotwórczością nasilił się jeszcze bardziej wśród społeczeństwa, zwłaszcza w Polsce po wybuchu elektrowni jądrowej w Czarnobylu pod koniec XX wieku (Przylibski, 2005, 2018).

Wspomniana bezprogowa hipoteza liniowa była sprzeczna z samym zjawiskiem hormezy radiacyjnej, którą zaczęto brać pod uwagę dopiero pod koniec lat 90. XX wieku (Jaworowski, 1997; Hrynkiewicz, 2001; Calabrese i Baldwin, 2002a, 2003; Lázár i in., 2003). Hormezy radiacyjna mówi o korzystnym wpływie na organizm człowieka małych dawek promieniowania jonizującego, a jednocześnie szkodliwym wpływie w przypadku dużych dawek tego promieniowania (Moskal, 2010).

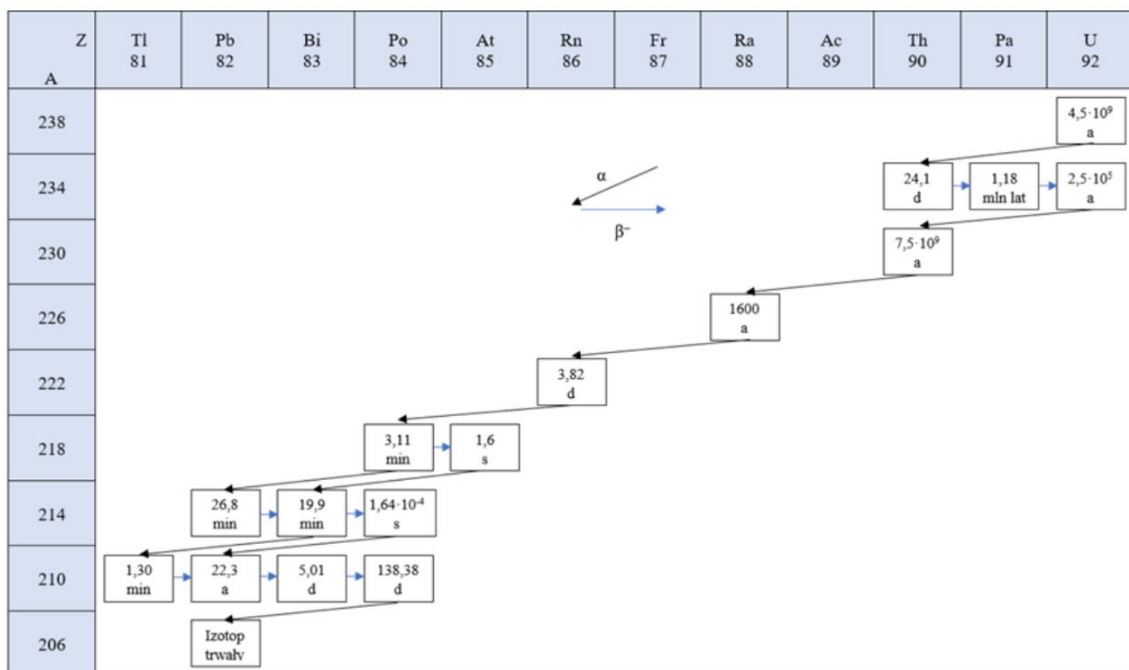
Do tej pory żadnej z hipotez nie udało się ostatecznie udowodnić, więc istnieją zwolennicy każdej z nich. Powstało wiele publikacji (m. in. Cebulska-Wasilewska, 1997; Samet, 1997a; Johansson, 2003), które bazują na bezprogowej hipotezie liniowej, jak i publikacji ukazujących słuszność właśnie tej hipotezy (Darby i in., 2001, Darby i in., 2005). Z drugiej strony pojawiają się liczne publikacje mówiące o słuszności hipotezy hormezy radiacyjnej (Rowe, 1996; Samet, 1997b; Piispanen, 2000; Bogen, 2001; Schöllnberger i in., 2001; Calabrese i Baldwin, 2002a, 2003; Lázár i in., 2003; Johansson, 2003). Teoria hormezy radiacyjnej została szerzej opisana w rozdziale 2.6. pt. „Teoria hormezy radiacyjnej”.

Warty zaznaczenia jest również fakt, że wszystkie istniejące na świecie uzdrowiska, wykorzystujące w swoich zabiegach rozpuszczony w wodach

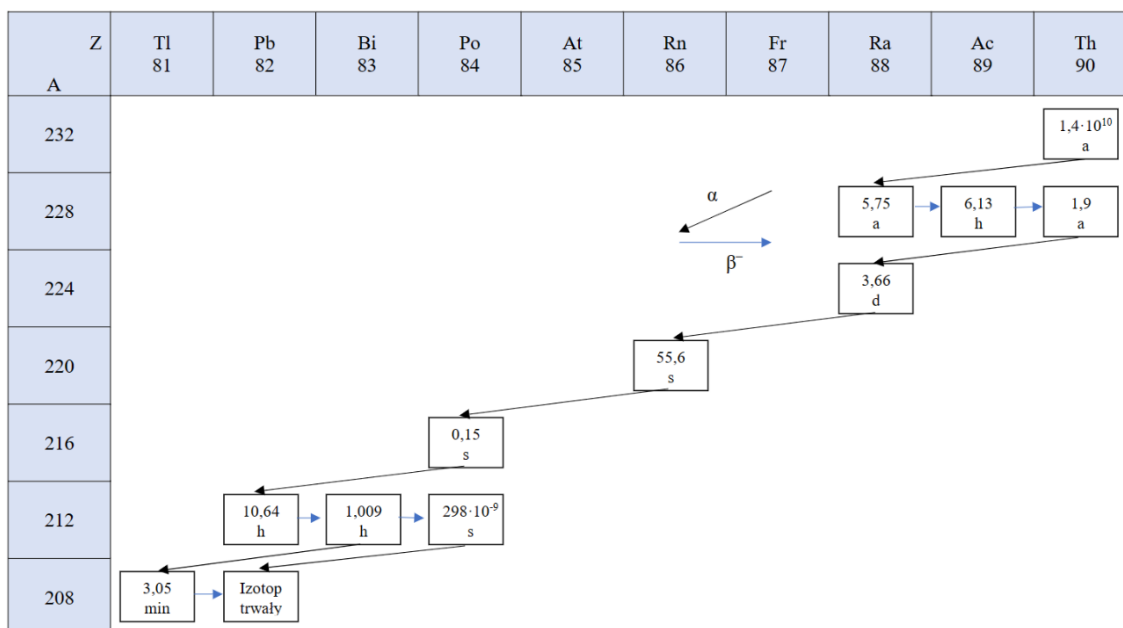
podziemnych radon lub powietrze wzbogacone w radon, działają w oparciu o teorię hormezy radiacyjnej (Kochański, 1978, 2002; Kobal i Renier, 1987; Rudnicki i Wysocki, 1987; Ponikowska i in., 1995; Soto i in., 1995; Szerbin, 1996; Planinić i in., 1996; Huber i Ennemoser, 2001; Zdrojewicz i Belowska-Bień, 2004; Papierkowski, 1969; Skulimowski, 1981; Sas i in., 1998; Štelcl i in., 1998; Peńsko i in. 1998).

2.2. Charakterystyka pierwiastka

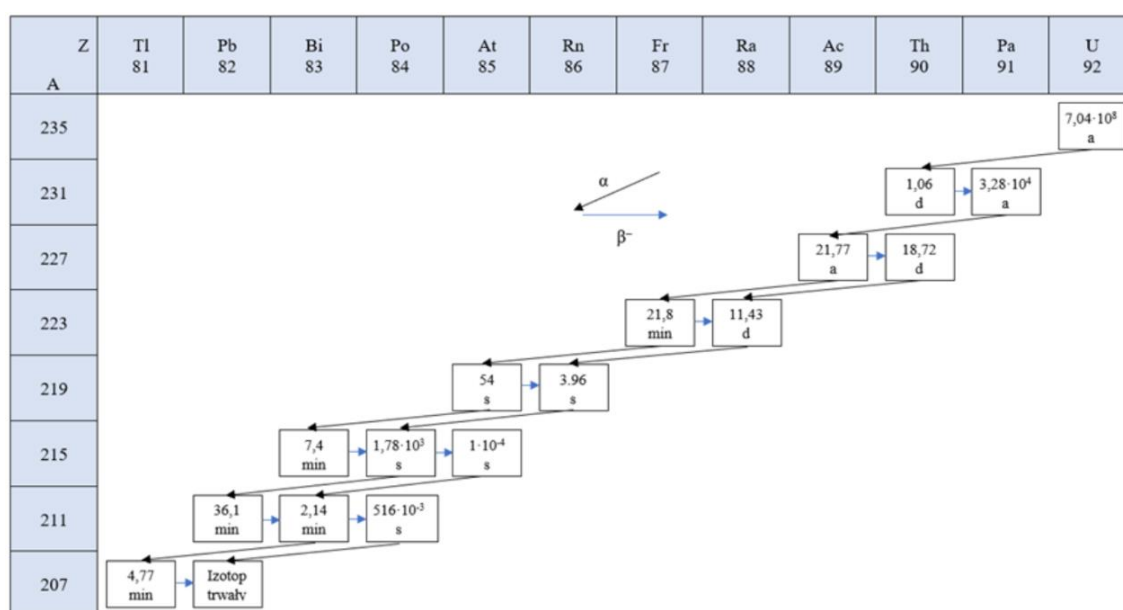
Ze znanych obecnie 37 izotopów radonu wszystkie są promieniotwórcze, a jedynie cztery z nich: radon-222 (^{222}Rn), radon-220 (^{220}Rn), radon-219 (^{219}Rn) i radon-218 (^{218}Rn) występują naturalnie w przyrodzie. Dwa z nich (^{222}Rn i ^{218}Rn) pochodzą z szeregu uranowo-radowego (^{238}U ; Rys. 1), ^{220}Rn (toron) pochodzi z szeregu torowego (Rys. 2), a aktynon (^{219}Rn) z szeregu uranowo-aktynowego, któremu początek daje izotop ^{235}U (Rys. 3).



Rys. 1. Szereg uranowo-radowy; s – sekundy, min – minuty, d – doby, a – lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska – rozpad β (Miliszkiewicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005)



Rys. 2. Szereg torowy; s – sekundy, min – minuty, d – doby, a – lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska – rozpad β (Miliszkievicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005)



Rys. 3. Szereg uranowo-aktynowy; s – sekundy, min – minuty, d – doby, a – lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska – rozpad β (Miliszkievicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005)

Radon, izotop ^{222}Rn ze względu na najdłuższy okres półrozpadu (Tab. 1) ma największe znaczenie dla zdrowia człowieka. Krótki okres półrozpadu ^{218}Rn i ^{219}Rn (odpowiednio 35ms i 3,96s) powoduje, że ich stężenia aktywności w środowisku są niewielkie, a tym samym ich wpływ na zdrowie jest zwykle pomijalny.

Tab. 1. Właściwości wybranych izotopów radonu (Svensson, 1979; Przylibski, 2005; Wieser 2006; Audi i in., 2003; PubChem, 2023; PeriodicTable, 2023)

Izotop	^{218}Rn	^{219}Rn	^{220}Rn	^{222}Rn
Okres półrozpadu	35 ms	3,92s	55,5s	3,82d
Typ rozpadu	α	α	α	α
Produkt rozpadu	$^{214}_{84}\text{Po}$	$^{215}_{84}\text{Po}$	$^{216}_{84}\text{Po}$	$^{218}_{84}\text{Po}$
Izotop macierzysty	$^{218}_{85}\text{At}$	$^{223}_{88}\text{Ra}$	$^{224}_{88}\text{Ra}$	$^{226}_{88}\text{Ra}$
Średnia energia fotonu [keV]	1,22	89,5	0,379	0,357
Energia wiązania [MeV/nukleon]	7,74	7,72	7,72	7,69
Liczba atomowa	86	86	86	86
Masa atomowa	218,01 u	219,01 u	220,01 u	222,02 u

W Polsce w 2020 roku roczna całkowita skuteczna dawka promieniowania jonizującego otrzymana przez statystycznego mieszkańca Polski wynosiła 3,96 mSv. Około 61,9% (2,45 mSv) tej dawki pochodzi ze źródeł naturalnych. Dawka otrzymana przez ekspozycję na radon wynosi 1,2 mSv rocznie, co stanowi 30,3% całej pochłoniętej dawki rocznej (National Atomic Energy Agency, 2021). Na stosunkowo duży wkład radonu do całkowitej dawki efektywnej wpływa obecność jego izotopów w środowisku życia człowieka, w tym przede wszystkim w budynkach mieszkalnych (przeznaczonych na stały pobyt ludzi) i w wielu miejscach pracy, zwłaszcza pod ziemią i w uzdrowiskach.

2.3. Uwalnianie radonu ze skorupy ziemskiej

W procesie wydostawania się radonu ze skorupy ziemskiej można wyróżnić trzy etapy: emanację, transport oraz ekshalację.

Zjawisko emanacji jest procesem polegającym na uwalnianiu atomów radonu do przestrzeni międzyziarnowej z minerałów. ^{222}Rn powstający na skutek przemiany jądrowej alfa izotopu macierzystego, jakim jest ^{226}Ra jest odrzucany z miejsca powstania z energią odrzutu większą od energii typowych wiązań chemicznych. Może więc zostać uwolniony z pierwotnego minerału, w którym powstał (Przylibski, 2005). Wskutek odrzutu radon może przebyć drogę od 20-70 nm (w ziarnach lub kryształach minerałów) do 10^{-5} - 10^{-4} m

(w powietrzu). W wodzie możliwa do przebycia droga wynosi około 10^{-7} m (Cothorn i Smith, 1987; Gundersen i in., 1992; Sun i Semkow, 1998). Ważną rolę w przedostawaniu się radonu do przestrzeni międzyziarnowej odgrywają także nanopory ziaren i kryształów minerałów. To właśnie nimi mogą wędrować atomy radonu na skutek dyfuzji (Tanner 1980; Maraziotis, 1996; Sasaki i in., 2004). Czynniki zewnętrznymi mającymi wpływ na proces emanacji radonu są: rozmiar oraz kształt ziaren, porowatość, wilgotność i gęstość materiału, rozmiar zewnętrznych oraz wewnętrznych porów, jak i zawartość samego izotopu ^{226}Ra i jego rozmieszczenie w ziarnie (Sakoda i in., 2011).

Współczynnik emanacji (K_{em}) wyraża się wzorem (1) (Przylibski, 2005):

$$K_{em} = N_{em}/N_c \quad (1)$$

gdzie:

N_{em} – liczba jąder Rn wyemanowanych ze struktur mineralnych, [-],

N_c – liczba jąder Rn, powstających w strukturach mineralnych, [-].

Procesem, który następuje po emanacji, a który odpowiedzialny jest za uwolnienie izotopów do atmosfery jest transport. Znaczenie mają tu dwa główne mechanizmy: konwekcja i adwekcja (wywołana różnicą odpowiednio temperatury lub ciśnienia) oraz dyfuzja (wywołana gradientem stężenia). Uważa się, że dyfuzja jest odpowiedzialna w głównej mierze za przedostawanie się radonu z różnych materiałów porowatych do powietrza. Konwekcja, ze względu na wpływ gradientu temperatury, ma większe znaczenie, gdy rozpatrujemy transport radonu z gleby do budynku. Szczególnego znaczenia nabiera zimą, gdy mówimy o tak zwanym efekcie kominowym i zasysaniu radonu z gleby do pomieszczeń poprzez pęknięcia posadzek czy ścian piwnic. Adwekcja natomiast ma znaczenie w transporcie radonu w środowisku, w którym na ruch powietrza decydujący wpływ ma gradient ciśnienia (Przylibski, 2005, 2018).

Na transport radonu mają wpływ takie parametry, jak: przepuszczalność, wilgotność, porowatość i temperatura gleby, ale także gęstość sieci spękań, szczelin, ich wzajemne połączenie czy obecność uskoku tektonicznych. Przepuszczalność jest głównym parametrem, który jest jednocześnie zależny od typu gleby. Żwirry, czy też piaski mają znacznie większą przepuszczalność w porównaniu do glin lub ilów. Parametr ten jest również zależny od wilgotności, ponieważ woda, która znajduje

się w przestrzeni międzyziarnowej wpływa na zasięg odrzutu atomów radonu - oczywiście go zmniejszając (Janik, 2005).

Aktywność radonu uwalnianego z jednostki powierzchni w jednostce czasu definiuje się mianem ekshalacji ($Bq\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$), która jest ostatnim z etapów transportu radonu do atmosfery. Zależy ona od emanacji i mechanizmu transportu, ale również od: prędkości wiatru, opadów, temperatury i ciśnienia powietrza, jak również od temperatury i wilgotności materiału, z którego następuje ekshalacja radonu. Ważnym aspektem jest tutaj wilgotność. Gdy wilgotność jest zbyt duża, współczynnik dyfuzji radonu się zmniejsza. Wypełnienie przestrzeni porowej wodą może spowodować zatrzymanie radonu w wodzie, co w konsekwencji może ułatwić jego dalszy transport wraz ze strumieniem wody podziemnej (Sahoo, 2013; Mazur, 2008; Przylibski, 2005, 2018). Po wypłynięciu wody podziemnej w źródle i wypływającej z niego wodzie powierzchniowej stężenie aktywności ^{222}Rn szybko maleje. Radon uwalniany jest do atmosfery na skutek turbulentnego przepływu wody oraz dużej powierzchni kontaktu woda/atmosfera (Przylibski i in., 2022).

2.4. Składnik wód leczniczych

Hydrogeologiczny podział wód podziemnych

Wody podziemne są to wody, które występują w skałach skorupy ziemskiej. Wyróżniamy wody: zaskórne, gruntowe, wgłębne i głębinowe (Pazdro i Kozerski, 1990).

Wody zaskórne są najpłytszymi wodami podziemnymi, o swobodnym zwierciadle, występującymi do głębokości kilkudziesięciu centymetrów. Wody te powstają na skutek infiltracji opadów lub napływu z sąsiednich terenów. Ze względu na fakt, że występują płytko, strefa aeracji praktycznie nie występuje lub ma bardzo małą miąższość. Skutkuje to zanieczyszczeniem takich wód substancjami chemicznymi oraz drobnoustrojami ze strefy glebowej i pochodzącymi z opadów, jak również silnym związkiem temperatury wody z temperaturą powietrza (Wacławski, 1999).

Wody gruntowe nie mają kontaktu ze strefą glebową, posiadają swobodne zwierciadło, powyżej którego znajduje się strefa aeracji. W odróżnieniu od wód zaskórnych nie ulegają one dobowym zmianom temperatury, a jedynie mogą

reagować na zmiany sezonowe bądź roczne. Ich czystość zależy w dużej mierze od infiltracji zanieczyszczeń atmosferycznych oraz powierzchniowych, które z kolei zależą w znacznej mierze od miąższości oraz przepuszczalności strefy aeracji (Wacławski, 1999).

Kolejnym typem wód są wody wglębne występujące w warstwach wodonośnych, które są odizolowane od powierzchni terenu warstwami nieprzepuszczalnymi. Tworzą one układy warstw wodonośnych nazywane piętrami (warstwa lub ich zespół należący do danej formacji stratygraficznej) lub poziomami (warstwa wchodząca w skład piętra) (Dynowska i Tłałka, 1982; Wacławski, 1999).

Wody wglębne posiadają zwykle napięte zwierciadło, jednak w niektórych przypadkach, na przykład w płytko położonych warstwach, czy też niecałkowicie nawodnionych, zwierciadło może być swobodne. Wody tego typu są wodami odnawialnymi, zasilanymi przez infiltrację lub inne warstwy wodonośne. Bezpośrednia infiltracja opadów występuje jedynie na wychodniach, stąd obszar zasilania jest niewielki, w porównaniu do obszaru rozprzestrzenienia. Wody te mogą być również zasilane pośrednio w wyniku przesączania wód gruntowych i wglębnych z innych poziomów przez słabo przepuszczalne utwory (Wacławski, 1999).

Czystość wody wglębnej jest mniej zależna od czynników atmosferycznych i powierzchniowych w porównaniu z wodami zaskórnymi i gruntowymi. Właściwości fizykochemiczne wody są uzależnione od cech i czasu przebywania w danym środowisku geologicznym (Wacławski, 1999).

Ostatnim wyróżnianym typem wód są wody głębinowe. Są one uwięzione najczęściej na dużych głębokościach przez utwory nieprzepuszczalne. Nie posiadają więzi z innymi wodami i nie stanowią zasobów odnawialnych. Są to głównie wody reliktove lub juwenilne, występujące pod dużym ciśnieniem petrostatycznym (Wacławski, 1999; Dynowska i Tłałka, 1982; Dawgiłło i in., 2002).

Radon jako składnik wód leczniczych

Zgodnie z polskim ustawodawstwem (Ustawa, 2011), woda podziemna nie jest kopaliną z wyjątkiem takich wód, które zostały uznane za wody lecznicze, wody termalne lub solanki. Żadna z tych wód nie może pochodzić z odwadniania wyrobisk górniczych.

Wodami termalnymi nazywamy wody podziemne mające temperaturę większą bądź równą 20°C. Temperatura ta powinna być zmierzona na wypływie z ujęcia. Solanki są natomiast wodami podziemnymi, w których suma rozpuszczonych składników mineralnych stałych jest większa, bądź równa 35 g/dm³ (Ustawa, 2011).

Najważniejszymi z punktu widzenia niniejszej rozprawy doktorskiej są wody lecznicze. Zaliczamy do nich wody podziemne, niezanieczyszczone zarówno pod względem chemicznym jak i mikrobiologicznym, które cechują się naturalną zmiennością cech chemicznych i fizycznych i które zawierają w swoim składzie jeden ze składników o zawartości minimum (Ustawa, 2011):

- 1000 mg/dm³ rozpuszczonych składników mineralnych stałych,
- 10 mg/dm³ jonu żelazawego (wody te nazywamy wodami żelazistymi),
- 2 mg/dm³ jonu fluorkowego (wody fluorkowe),
- 1 mg/dm³ jonu jodkowego (wody jodkowe),
- 1 mg/dm³ siarki dwuwartościowej (wody siarczkowe),
- 70 mg/dm³ kwasu metakrzemowego (wody krzemowe),
- 250 mg/dm³ dwutlenku węgla niezwiązanego (250-1000 mg/dm³ wody kwasowęglowe; ≥1000 mg/dm³ szczawy),
- 74 Bq/dm³ radonu (wody radonowe).

Warty zaznaczenia jest fakt, że w Polsce radon jest jedynym składnikiem promieniotwórczym nadającym wodom właściwości lecznicze.

Wody lecznicze na obszarze Polski występują głównie w jej południowej części (Sudety, Karpaty, zapadlisko przedkarpaccie), gdzie liczba uzdrowisk oraz miejscowości z wodami leczniczymi wynosi 70% wszystkich lokalizacji. Pozostałe 30% znajduje się na obszarze Pomorza Zachodniego oraz Nizy Polskiego. Zasoby eksploatacyjne polskich wód leczniczych w roku 2021 osiągnęły 1944,22 m³/h (Sokołowski i Skrzypczak, 2022).

Wody radonowe występują natomiast prawie wyłącznie w Sudetach oraz na obszarze bloku przedsudeckiego (Felter i in., 2018). Znajdują one praktyczne zastosowanie do celów balneoterapeutycznych. Stosowanymi zabiegami są kąpiele lecznicze, inhalacje, kuracja pitna oraz przepłukiwania jam ciała. Zabiegi z wykorzystaniem radonowej wody leczniczej, świadczone są na terenie Polski w 7 uzdrowiskach (Tab. 2).

Tab. 2. Uzdrowiska dysponujące radonowymi wodami leczniczymi wraz z ich poziomami stężenia aktywności ^{222}Rn (Felter i in., 2018)

Nazwa uzdrowiska	Poziom stężenia aktywności ^{222}Rn
Długopole-Zdrój	140 Bq/dm ³
Duszniki-Zdrój	90 Bq/dm ³
Jedlina-Zdrój	200 Bq/dm ³
Lądek-Zdrój	1300 Bq/dm ³
Przerzeczyn-Zdrój	200 Bq/dm ³
Szczawno-Zdrój	250 Bq/dm ³
Świeradów-Zdrój	2000 Bq/dm ³

W praktyce zabiegi radonoterapii w oparciu o eksploatowane wody radonowe wykonywane są w Lądku-Zdroju i Świeradowie-Zdroju. W pozostałych uzdrowiskach stosowana jest głównie kuracja pitna radonowymi wodami leczniczymi. Wówczas jednak radon nie jest istotnym czynnikiem terapeutycznym.

2.5. Wpływ radonu na zdrowie ludzi

Myśląc o wpływie ^{222}Rn na zdrowie należy brać pod uwagę nie tylko sam izotop ^{222}Rn , ale również promieniotwórcze produkty jego rozpadu. Radon wraz z produktami rozpadu wdychany jest w trakcie różnych zabiegów balneoterapeutycznych: kąpeli, inhalacji czy natrysków. W związku z tym najbardziej narażonym na oddziaływanie promieniowania jonizującego emitowanego przez radon i pochodne są drogi oddechowe, a przede wszystkim płuca. Izotop ^{222}Rn jako gaz szlachetny stanowi mniejsze zagrożenie niż produkty jego rozpadu. Nie jest on bowiem deponowany na ścianach komórkowych, jak i nie reaguje z innymi atomami. Jego produkty natomiast jako ciała stałe emitują cząstki α w pęcherzykach płucnych, w których mogą się osadzać. Mogą to zrobić najmniejsze z cząstek, których średnica nie przekracza 0,1 μm i mogą tam pozostać przez miesiące, a nawet i lata. Większe cząstki odkładają się w górnych częściach układu oddechowego. Usuwane są w ciągu kilku godzin. Ważną kwestią jest również to, że cząsteczki aerozoli mogą dostawać się do krwioobiegu. Cząsteczki aerozoli o dużej rozpuszczalności są szybko absorbowane z układu

oddechowego do krwi, podczas gdy cząsteczki nierozpuszczalne są deponowane na ściankach pęcherzyków płucnych. Są one następnie fagocytowane przez leukocyty i dalej przenoszone przez śródbłonek naczyń włosowatych aż do naczyń limfatycznych, skąd są przemieszczane do węzłów chłonnych (Bilska, 2016).

Zderzenia powstających cząstek α i β z elektronami w tkankach i narządach organizmów żywych powodują jonizację ich materii. Dochodzi wówczas do powstania tzw. „pasa zniszczeń” (powstaje wzdłuż przebytej drogi przez cząstki α i β). Efektem tych oddziaływań są również zmiany w DNA. To natomiast prowadzi dalej do rozregulowania funkcji komórek. Niektóre powstałe w organizmie uszkodzenia mogą zostać usunięte w wyniku mechanizmów samonaprawczych. Szkody mogą się jednak pojawić dopiero po latach w postaci nowotworów płuc lub białaczki (Mnich i in., 2004).

Ryzyko wystąpienia raka płuc zwiększa się również w przypadku osób palących tytoń (WHO, 2010). Jest ono nawet 6-10 razy większe niż w przypadku osób niepalących (US Environmental Protection Agency, 2016).

Wskazuje się (Tubiana, 2005), że przy dawkach nie większych niż 100 mSv zachodzące w organizmie mechanizmy usuwają lub naprawiają uszkodzone komórki, a prawdopodobieństwo ich błędnej naprawy jest niewielkie. Wraz z rosnącą dawką rośnie skuteczność pobudzania samych procesów, które nie zawsze przebiegają w sposób korzystny. W zakresie do kilkudziesięciu mSv występuje efekt hormezy. Przy dawkach w zakresie od 100 mSv do 200 mSv procesy mające na celu naprawę DNA mogą już przebiegać z błędami. Powstałe błędy mogą niekiedy doprowadzić do przeżycia komórek, które są uszkodzone, a następnie powstania nowotworu. Dawka 500 mSv lub większa skutkuje coraz szybszym tempem rozmnażania się komórek, jednak samo szybkie tempo przeszkadza w procesach naprawczych. W efekcie rośnie prawdopodobieństwo, że naprawa będzie błędna, a co za tym idzie rośnie również prawdopodobieństwo rozwoju nowotworu (Tubiana, 2005).

Z drugiej jednak strony terapie wykorzystujące radon, pomimo że wśród niektórych budzą kontrowersje, cieszą się dużym zainteresowaniem. Zabiegi, w których wykorzystywana jest woda radonowa, mogą wpływać korzystnie w przypadku: dychawicy oskrzelowej pierwotnej, niewydolności wieńcowej, męskiej niepłodności, u kobiet w zaburzeniach okresu przekwitania

(Dadel i Trościanko-Wilk, 2014). Zabiegi terapii radonowej stosuje się również jako czynnik uzupełniający w leczeniu na przykład: chorób układu krążenia, nadciśnienia samoistnego, układu oddechowego, schorzeń narządów ruchu, alergii, dolegliwości wywołanych cukrzycą, bezpłodności, chorób kobiecych, impotencji. Zabiegi terapii radonowej przywracają także właściwe funkcjonowanie systemu nerwowego i łagodzą kłopoty związane z menopauzą. Wskazaniami do zabiegów z wodami radonowymi są również: choroby zwyrodnieniowe stawów obwodowych, choroby Bechterewa, reumatyzm, jak i choroby zwyrodnieniowe stawów kręgosłupa (Bilska, 2016). Wskazuje się również na pozytywny wpływ radonu w redukcji bólu (Becker, 2004; Deetjen i in., 2014; Santos i in., 2016).

2.6. Teoria hormezy radiacyjnej

Wiele uzdrowisk na świecie, w tym również i w Polsce, wykorzystuje w swoich zabiegach radon. Aktualnie nadal trwa pewnego rodzaju walka, polemika pomiędzy zwolennikami dwóch, a w zasadzie trzech teorii: LNT, liniowej progowej i hormezy radiacyjnej.

Pierwsza z nich, teoria LNT (z ang. Linear No-Threshold), której autorem w roku 1946 był noblista Hermann J. Muller, została wprowadzona w 1959 roku przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej. Zakłada ona, że nawet najmniejsze dawki wywierają negatywne skutki na organizm człowieka. Poprzez ekstrapolację założenie to zostało wyprowadzone z faktu szkodliwości dużych dawek promieniowania jonizującego. Głównym motywem wprowadzenia LNT była minimalizacja ryzyka związana z postępowaniem z substancjami promieniotwórczymi. Z punktu widzenia ochrony radiologicznej, logicznym było więc ograniczenie w najwyższym stopniu ekspozycji na promieniowanie jonizujące.

Jak się później zaczęło okazywać, ekstrapolacja mogła być nieuzasadniona. I tutaj wkracza druga z hipotez – liniowa progowa, według której do pewnej wartości dawki nie są w ogóle obserwowane żadne efekty, a powyżej takiej dawki zależność pomiędzy dawką a efektem (niekorzystnym dla zdrowia) jest liniowa.

W tym miejscu warto podkreślić jest oświadczenie wydane przez Scientists for Accurate Radiation Information (SARI) oraz XLNT Foundation (nazwa oznaczająca przekreślony znakiem „X” skrót LNT - Linear No Threshold)

w dniu 7 kwietnia 2020 roku (NCBJ, 2020). Na wstępie autorzy oświadczenia podkreślają, że wszystko w nadmiarze ma szkodliwe skutki – tak jak aspiryna. Skutki dużych dawek nie przewidują skutków niewielkich dawek. Autorzy podkreślają w oświadczeniu, że skutki narażenia na duże dawki w krótkim czasie są nieistotne w przypadku szacowania ryzyka zachorowalności na nowotwory w narażeniu na małe dawki. SARI i fundacja XLNT w swoim oświadczeniu kwestionują zalecenia ICRP oraz NCRP wzywające do utrzymania tak małych jak to rozsądnie osiągalne dawek, które opiera się na obecnie przyjętej teorii LNT. Kwestionują także roczne limity dawek zarówno dla ogółu ludności, jak i pracowników. Takie podejście do rocznych limitów dawek nazywają „nielogicznym, niemądrym, niezdrowym i nieodpowiedzialnym”. Autorzy oświadczenia zaznaczają również, że wiele badań próbowało wykryć negatywne skutki małych dawek, jednak wykazały one wręcz odwrotny efekt – ich korzystny wpływ na zdrowie.

Takie stanowisko stoi więc po stronie trzeciej z teorii – hormezy radiacyjnej. To właśnie w oparciu o nią uzasadnia się działalność światowych, w tym także polskich uzdrowisk, wykorzystujących w swoich zabiegach radon.

Podkreśla się, że eksperymenty były zwykle projektowane w celu oceny reakcji na wysokie dawki i że konieczne jest opracowanie bardziej kompleksowej oceny hormezy radiacyjnej, która obejmuje molekularne podstawy reakcji adaptacyjnych jak i badania eksperymentalne na modelach zwierzęcych opartych na hipotezie hormezy radiacyjnej (Calabrese i Baldwin, 2002a).

Teoria hormezy radiacyjnej mówi o tym, że otrzymanie dużych dawek od promieniowania jonizującego ma faktycznie szkodliwy wpływ na organizm człowieka, ale z drugiej strony, otrzymanie niewielkich dawek tego promieniowania może nie tyle nie mieć w ogóle wpływu (nie wywoływać efektu), co może mieć wręcz ten wpływ korzystny (Calabrese i Baldwin, 2002b, 2003).

Powstało wiele prac i nadal powstają nowe, które potwierdzają założenia teorii hormezy radiacyjnej (m.in. Luckey, 1986; Cohen, 1995, 2002; Li i in., 2004; Feinendegen, 2005; Polina i in., 2022; Nikolaishvili i in., 2022; Sanders i Scott, 2006; Scott, 2011; Rühle i in., 2017; Jimi i Ghosh, 2005; Falkenbach i in., 2005; Mitsunobu i in., 2003; Iashina i in., 2011).

Jednym z badań było przeprowadzone przez Luckeya (1986), które koncentrowało się na obserwacji reprodukcji pierwotniaków pod wpływem małych dawek promieniowania jonizującego. W przypadku dawek promieniowania jonizującego, które było większe od tła wykazano, że współczynnik reprodukcji był także większy. Odwrotną sytuację zaobserwowano natomiast w sytuacji odwrotnej, gdy dawki promieniowania jonizującego były mniejsze od tła – wówczas współczynnik reprodukcji był mniejszy.

Interesujące były również badania przeprowadzone przez Cohena w roku 1995. Autor badań w połowie lat 90. dokonał analizy śmiertelności w 1601 hrabstwach Stanów Zjednoczonych, których przyczyną był rak płuc. Spodziewanym wynikiem był wzrost śmiertelności wraz ze wzrostem poziomu ekspozycji na promieniowanie jonizujące. Wbrew oczekiwaniom okazało się, że jest zupełnie odwrotnie. Wraz ze wzrostem ekspozycji na małe dawki promieniowania jonizującego, śmiertelność spadała. Cohen (2002) również później dowodził, że przy niskich poziomach promieniowania odpowiedź immunologiczna jest zwiększona, a tym samym pomaga w naprawie pęknięć dwuniciowych DNA.

Wykazano również (Li i in., 2004), że u myszy hematopoetyczne komórki progenitorowe szpiku kostnego mogą być stymulowane za pomocą małych dawek promieniowania jonizującego.

Istnieją również badania potwierdzające (Feinendegen, 2005), że małe dawki wywołują pozytywną odpowiedź komórek i stymulują mechanizmy naprawy DNA. Z tego też powodu liniowy model bezprogowy nie jest modelem opisującym w prawidłowy sposób zachowanie w przypadku ekspozycji na małe dawki promieniowania jonizującego.

Wskazuje się także na wpływ małych dawek promieniowania jonizującego na wiele gatunków roślin (Polina i in., 2022). Wpływ obejmuje poprawę cech wzrostu, gromadzenie ważnych produktów fitochemikaliów, przyspieszenie rozwoju, czy też zwiększoną odporność na patogeny i zwiększoną tolerancję na abiotyczne czynniki stresowe.

Przeprowadzone badania (Nikolaishvili i in., 2022) na genetycznie uwarunkowanych szczurach z napadami padaczkowymi wskazały natomiast, że wdychanie radonu rozwija 24oromezy regulującą procesy oksydacyjne poprzez aktywację antyoksydantów. To przekładało się natomiast na zmniejszenie napadów

padaczkowych i aktywację Na/K adenozyntrifosfatazy. W ostateczności autorzy uznali inhalacje za metodę leczniczą o działaniu przeciwdrgawkowym, która została potwierdzona badaniami eksperymentalnymi.

Istnieją także badania (Sanders i Scott, 2006; Scott, 2011) mówiące o unikaniu raka płuc spowodowanego paleniem tytoniu właśnie dzięki radonowi, który stymuluje także naprawę DNA i apoptozę.

Radonowe terapie uzdrowiskowe mogą także powodować występowanie we krwi obwodowej modulacji immunologicznych, mogących sprzyjać osłabieniu stanu zapalnego (Rühle i in., 2017). Wskazuje się, że niektóre modulacje występowały krótko po terapii, natomiast niektóre wręcz odwrotnie – pojawiały się późno, bądź utrzymywały się długo. Samą terapię traktuje się także jako wysoce prawdopodobną w przypadku pozytywnego wpływu na mechanizmy osteoimmunologiczne (Jimi i Ghosh, 2005).

Powyżej przedstawiono jedynie wybrane rezultaty badań dowodzących istnienia korzystnego wpływu małych dawek promieniowania jonizującego. Przykłady oczywiście można mnożyć, jak chociażby wskazując badania potwierdzające korzystny wpływ na: reumatoidalne zapalenie stawów (Falkenbach i in., 2005), astmę oskrzelową (Mitsunobu i in., 2003), czy dyslipidemię związaną z chorobami układu krążenia (Iashina i in., 2011). Uzasadnia to potrzebę prowadzenia dalszych badań nad udowodnieniem teorii hormezy radiacyjnej, jak i zasadność prowadzonych zabiegów z wykorzystaniem radonu.

2.7. Dopuszczalne dawki promieniowania jonizującego od ^{222}Rn i jego pochodnych

Obowiązującą w Polsce ustawą regulującą kwestie dawek granicznych promieniowania jonizującego jest Prawo atomowe z dnia 29 listopada 2000 roku z obowiązującym na dzień pisania niniejszej pracy tekstem ujednoliconym z dnia 16 września 2021 roku. Prawo atomowe wprowadza również w stan prawny dyrektywy Wspólnot Europejskich (dyrektywy Rady: 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom oraz 2003/122/Euratom).

W załączniku nr 4 do wspomnianej ustawy znajduje się informacja o obowiązujących dawkach granicznych zarówno dla: pracowników, uczniów, studentów i praktykantów, jak i osób z ogółu ludności.

Dawka graniczna dla pracowników w ciągu roku kalendarzowego wynosi 20 mSv z możliwością jej przekroczenia w opisanych w ustawie (Ustawa, 2000) przypadkach do wartości 50 mSv, na podstawie zezwolenia odpowiedniego organu. W takiej sytuacji należy mieć na uwadze, że średnia roczna dawka efektywna z każdych kolejnych 5 lat nie może być większa niż 20 mSv.

Ustawa Prawo Atomowe (2000) określa również dawki równoważne dla soczewki oka (20 mSv), skóry – średnią wartość dla 1 cm² napromieniowanej skóry, niezależnie od powierzchni (500 mSv) oraz kończyn – kostek, stóp, przedramion i dłoni (500 mSv). W przypadku soczewek oka dawka może zostać przekroczona w danym roku kalendarzowym do 50 mSv jednak suma z każdych pięciu następujących po sobie lat nie może przekroczyć 100 mSv.

Dla uczniów, studentów oraz praktykantów powyżej 18 roku życia obowiązują dawki jednakowe z dawkami określonymi dla pracowników. W przypadku osób w wieku 16-18 lat graniczna dawka (dawka efektywna) w danym roku kalendarzowym wynosi 6 mSv. Określone dawki równoważne odnoszą się również do soczewek oka, skóry i kończyn, jednak w tym przypadku wynoszą odpowiednio: 15 mSv, 150 mSv i 150 mSv. Dawki te nie mogą zostać przekroczone.

Dawki graniczne dla uczniów, studentów i praktykantów poniżej 16 roku życia są jednakowe z dawkami ustalonymi dla osób z ogółu ludności.

Dla grupy osoby z ogółu ludności określono dawkę graniczną (dawkę efektywną) w danym roku kalendarzowym na poziomie 1 mSv. Dawki równoważne zostały wyznaczone analogicznie jak dla poprzednich grup, jednak bez wyszczególnienia kończyn. W tym wypadku dla soczewek oka dawka wynosi 15 mSv, a dla skóry 50 mSv i nie mogą one zostać przekroczone.

3. Podstawowe właściwości wód podziemnych

Dzięki znajomości podstawowych parametrów fizyko-chemicznych, możliwe jest opisanie, zdefiniowanie oraz sklasyfikowanie wód podziemnych. Do właściwości fizycznych zaliczamy: temperaturę, przewodność elektrolityczną właściwą, radoczynność, gęstość i lepkość. Do właściwości chemicznych: mineralizację ogólną i suchą pozostałość, odczyn wody (pH), potencjał utleniająco-redukcyjny, zasadowość i kwasowość, twardość, agresywność oraz chemiczne i biochemiczne zapotrzebowanie na tlen. Wyróżniamy również właściwości organoleptyczne: barwę, przezroczystość, mętność i obecność zawiesin, zapach oraz smak. Właściwości wody zależą przede wszystkim od rodzaju, genezy, składu mineralnego i chemicznego skał zbiornikowych oraz od wpływu ewentualnych innych czynników zewnętrznych związanych np. z prędkością przepływu wody przez skały zbiornikowe.

W pracy zostały opisane najważniejsze, wybrane właściwości fizyko-chemiczne wód podziemnych, w tym w szczególności uznanych za lecznicze.

3.1. Właściwości fizyczne

Panujące w środowisku hydrogeologicznym warunki mają wpływ na cechy (właściwości) fizyczne wody podziemnej. Do najważniejszych właściwości fizycznych opisanych w niniejszym rozdziale zaliczono: przewodność elektrolityczną właściwą (i pośrednio sumę rozpuszczonych składników mineralnych), temperaturę oraz radoczynność.

3.1.1. Przewodność elektrolityczna właściwa i suma rozpuszczonych składników mineralnych

Naturalnie występujące w środowisku wody podziemne zawsze przewodzą prąd elektryczny ze względu na obecność w nich jonów. Ze względu na ten fakt w badaniach hydrochemicznych często przewodność elektrolityczna właściwa (PEW; zwana również przewodnością elektryczną) jest wykorzystywana do pośredniej oceny mineralizacji wody – sumy rozpuszczonych składników

stałych. Na podstawie pomiaru wartości PEW, wyrażonej w $\mu\text{S}/\text{cm}$, można oszacować mineralizację ogólną (TDS – z ang. Total Dissolved Solids). Rząd wielkości zmierzonej wartości PEW jest równy rzędowi wielkości wartości TDS w mg/dm^3 .

Wpływ na mierzoną wartość PEW ma temperatura oraz ilość rozpuszczonych w niej zdysocjowanych substancji i ich rodzaj. Z każdym wzrostem temperatury o 1°C , PEW wzrasta średnio o 1,8-2,5%. Porównanie wartości PEW jest możliwe po skompensowaniu jej do temperatury odniesienia, która zwykle wynosi 25°C (Dobrzyński, 2006).

Pomiary PEW są szybką, prostą i tanią metodą umożliwiającą ocenę chemizmu wód. Poza oceną mineralizacji można wykorzystać pomiary na przykład w ramach monitoringów czy lokalizacji ognisk zanieczyszczeń (i ich zasięgu) (Dobrzyński, 2006).

Według obowiązujących w Polsce przepisów w wodach przeznaczonych do spożycia przez ludzi, wartość PEW nie może przekraczać $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Warto zaznaczyć, że w wodach podziemnych wartości przewodności zwykle nie przekraczają $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, w wodach opadowych $50 \mu\text{S}/\text{cm}$, natomiast w wodach oceanicznych wartość PEW wynosi średnio $50\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Dobrzyński, 2006).

Przewodność elektrolityczna właściwa jest jednym z parametrów objętych monitoringiem w wodach przeznaczonych do spożycia przez ludzi (Rozporządzenie, 2017). Zgodnie z Rozporządzeniem (2017) wartość parametryczna wynosi $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ przy niepewności pomiarowej 20% wartości parametrycznej. Parametr ten nie musi być oznaczany w przypadku wykonywania pomiarów ogólnego węgla organicznego (OWO), natomiast powinien zostać uwzględniony podczas oceny wody pod względem agresywnych właściwości korozyjnych.

Parametrem, który jest skorelowany z przewodnością elektrolityczną właściwą (Marandi i in., 2013; Patil i in., 2012; Daniels i in., 2016) jest suma rozpuszczonych składników stałych (TDS, z ang. Total Dissolved Solids). TDS informuje o zawartości ruchomych, naładowanych jonów w badanym roztworze. Ze względu na to, że pomiary TDS są trudniejsze i bardziej kosztowne od pomiarów PEW, który można łatwo i niedrogo zmierzyć w terenie, często wyniki pomiarów PEW przelicza się na wartość TDS. Problem stanowi jednak współczynnik przeliczeniowy,

który w zależności od typu wody może być różny. Inny będzie dla naturalnej wody do nawadniania, gdzie wynosi 0,55-0,75 (Brown i in., 1960), a inny dla naturalnej wody o PEW = 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, gdzie wynosi 0,5 (Hem, 1985; Walton, 1989). Dodatkowo związek pomiędzy TDS a PEW nie zawsze jest liniowy, jednak najsilniejsza korelacja zachodzi w wodzie naturalnej (Rusydi, 2018).

3.1.2. Temperatura

Jedyną właściwością fizyczną wody, która nie jest zależna od jej składu chemicznego jest temperatura. Jej znajomość jest jednak niezbędna do prawidłowej oceny innych właściwości fizyko-chemicznych, jak na przykład: odczynu pH, lepkości czy wyżej opisanej przewodności elektrolitycznej właściwej.

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na temperaturę wody podziemnej jest głębokość jej występowania oraz stopień geotermiczny. Duży wpływ mają także procesy magmowe i metamorficzne.

Płytko występująca woda podziemna jest podatna na zmiany temperatury: dobowe, sezonowe i roczne. W Polsce strefa dobowych wahań temperatury na ogół sięga do 2 metrów, sezonowych do 5-10 metrów, natomiast rocznych do 15-40 metrów poniżej powierzchni gruntu. W przypadku tych ostatnich jest uzależniona od ukształtowania powierzchni terenu, rodzaju skał, warunków tektonicznych, jak również warunków hydrogeologicznych (Dobrzyński, 2006).

Wody podziemne możemy podzielić na wody: chłodne, zwykłe lub ciepłe. Podziału dokonuje się poprzez porównanie temperatury wody ze średnią temperaturą powietrza atmosferycznego w rejonie poboru próbki. W wodach chłodnych temperatura wody jest mniejsza niż temperatura powietrza, w zwykłych jest równa temperaturze powietrza, natomiast wody ciepłe charakteryzują się temperaturą wyższą od temperatury powietrza atmosferycznego. Podział ten może nie być jednak przydatny przy porównywaniu temperatury wody występującej w różnych obszarach. Z tego względu stosuje się również podział balneologiczny. I tak, w polskiej terminologii, mówimy o wodzie: hipotermalnej (temperatura wody pomiędzy 20°C a 34°C), homeotermalnej (gdzie temperatura wynosi 34°C – 38°C) oraz hipertermalnej (temperatura wody powyżej 38°C) (Dobrzyński, 2006).

3.1.3. Radoczynność

Wodzie właściwości promieniotwórczych nadają znajdujące się w niej w formie zawiesiny lub rozpuszczone, izotopy promieniotwórcze. Występowanie ich w wodach podziemnych jest związane z występowaniem w ośrodku skalnym znacznych stężeń pierwiastków o wysokiej aktywności promieniotwórczej. Sytuacja taka ma miejsce niezbyt często, dlatego też w wodach podziemnych cecha ta jest bardzo rzadka. Samo pojęcie radoczynności zawdzięcza nazwę pierwiastkowi, który nadaje wodom właściwości promieniotwórcze – radonowi. Jednak jest ona nadana niezbyt szczęśliwie, bo bardziej kojarzy się z radem. Stosowanie pojęcia radoczynności było już w literaturze naukowej przedmiotem krytyki, tym bardziej, że jest ono rzadko używane poza literaturą polskojęzyczną (Przylibski, 1999).

Początkowo stosowaną jednostką radoczynności był kiur [Ci] i odpowiadał on w przybliżeniu 1 g radu, który z kolei odpowiadał rozpadowi $3,71 \cdot 10^{10}$ atomów w ciągu sekundy. Ze względu na to, że była to bardzo duża jednostka, stosowano jej podjednostki nCi (10^{-9} Ci) i pCi (10^{-12} Ci). Aktualnie obowiązującą jednostką radoczynności w hydrogeologii jest bekerel [Bq], który odpowiada jednemu rozpadowi promieniotwórczemu na sekundę. Zasadniczo jednak i Ci i Bq są jednostkami aktywności promieniotwórczej, a w odniesieniu do zawartości izotopów promieniotwórczych w wodzie powinno stosować się jednostki stężenia aktywności promieniotwórczej, tj. Bq/dm³ i Ci/dm³. Obecnie można także dokładnie oznaczyć jakie izotopy promieniotwórcze odpowiadają za promieniotwórczość wody, co było trudne w czasie wprowadzania pojęcia radoczynność. Nie ma zatem potrzeby używania tego archaicznego pojęcia, a należy je zastąpić pojęciem promieniotwórczości wody związanej z zawartością konkretnych izotopów promieniotwórczych (Przylibski, 1999, 2005).

Wody charakteryzują się radoczynnością, która może mieć charakter czasowy lub stały. Pierwsza z nich związana jest z emanacjami promieniotwórczych gazów, którym zwykle jest radon. W przypadku promieniotwórczości stałej, pochodzi ona najczęściej od pierwiastków, których okres półrozpadu jest długi, takich jak uran, rad czy tor (Dobrzyński, 2006).

Istnieje kilka podziałów radoczynności wód. Jednym z pierwszych była klasyfikacja Alekina (1948):

- słabo radoczynne, do 377 Bq/dm³,
- średnio radoczynne, od 377 do 1077 Bq/dm³:
 - dodatkowo dzielone na takie zawierające tylko radon (radonowe) oraz zawierające rad i radon w równoważnej mu ilości (radowe),
- silnie radoczynne, powyżej 1077 Bq/dm³.

Klasyfikacja ta jest jednak mało precyzyjna. Zgodnie z nią większość wód podziemnych (jeśli nie wszystkie) można byłoby zaklasyfikować jako wody słabo radoczynne.

Przez ostatnie kilkadziesiąt lat powstawały również inne klasyfikacje (Owczynnikow, 1963; Tołstichin i Posochow, 1975; Pazdro, 1983). Aktualnie najczęściej stosowane są klasyfikacje Pazdro i Kozerskiego (1990) oraz Przylibskiego (2005).

Klasyfikacja Kozerskiego (1990) wyróżnia cztery kategorie radoczynności:

- słabą, < 74 Bq/dm³,
- średnią, 74-370 Bq/dm³,
- silną, 370-3700 Bq/dm³,
- bardzo silną, >3700 Bq/dm³.

Klasyfikacja ta nie uwzględnia jednak izotopowego składu wód podziemnych. Odnosi się do ogólnej cechy fizycznej – promieniotwórczości. Klasyfikacja zaproponowana przez Przylibskiego (2005) kategoryzuje wody ze względu na zawarte w nich stężenie aktywności ²²²Rn, jako izotopu, który jest dominujący w składzie izotopowym występującego naturalnie radonu. Klasyfikacja ta obejmuje sześć kategorii wód w zależności od stężenia aktywności ²²²Rn:

- bezradonowe, < 1 Bq/dm³,
- ubogie w radon, 1-9,9(9) Bq/dm³,
- niskoradonowe, 10-99,9(9) Bq/dm³,
- radonowe, 100-999,9(9) Bq/dm³,
- wysokoradonowe, 1000-9999,9(9) Bq/dm³,
- ekstremalnie radonowe, > 10000 Bq/dm³.

Klasyfikacja ta odzwierciedla jednocześnie częstość występowania danych typów wód podziemnych, co jest dodatkową jej zaletą. Dwa skrajne typy: wody

bezradonowe i ekstremalnie radonowe, są spotykane rzadko. Wody wysokoradonowe występują na silnie zaangażowanych tektonicznie obszarach oraz w strefach zbudowanych ze skał wzbogaconych w uran. Najpowszechniej występującymi wodami są wody niskoradonowe i ubogie w radon. Rzadziej od nich występują wody radonowe (Przylibski, 2005).

3.2. Właściwości chemiczne

Do właściwości chemicznych zaliczane są te cechy, które są konsekwencją składu chemicznego wody. Podobnie jak w przypadku właściwości fizycznych, cechy chemiczne kształtują warunki panujące w środowisku hydrogeologicznym. Za najważniejsze z punktu widzenia niniejszej pracy, które zostały opisane, uznano potencjał utleniająco-redukcyjny (Eh) oraz odczyn wody (pH). To głównie od Eh oraz pH zależy bezpośredni skład chemiczny wód, który jest przede wszystkim kształtowany przez oddziaływanie wody podziemnej ze skałami zbiornikowymi (Dobrzyński, 2006).

3.2.1. Potencjał utleniająco-redukcyjny

Potencjał utleniająco-redukcyjny (Eh) zwany jest również potencjałem redoks i wskazuje na zdolności danego układu do utlenienia bądź redukowania. Stanowi miarę ilościową. Wyrażany jest w voltach [V] (w praktyce najczęściej w milivoltach [mV]) w stosunku do wzorcowego potencjału elektrody wodorowej, dla której potencjał jest równy zero. W klasyfikacji Merkela i Sperlinga (1996) wyróżnia się 5 typów wód podziemnych w zależności od warunków Eh:

- silnie utleniające, od 590 do 830 mV,
- słabo utleniające, od 329 do 590 mV,
- przejściowe, od 90 do 325 mV,
- słabo redukcyjne, od -150 do 90mV,
- silnie redukcyjne, od -415 do -150 mV.

Potencjał wyraża się często również w jednostkach redoks (rH), które zostały opracowane przez Clarka (1923).

Pomiędzy wartościami wyrażonymi w voltach a w skali rH zachodzi zależność (2):

$$rH=(Eh+0,06\cdot pH)\cdot 3\cdot 10^{-2} \quad (2)$$

Klasyfikacja Merkela i Sperlinga (1996) w skali rH prezentuje się następująco:

- silnie utleniające, 34-42,
- słabo utleniające, 25-34,
- przejściowe, 17-25,
- słabo redukcyjne, 9-17,
- silnie redukcyjne, 0-9.

Kolejną metodą wyrażania potencjału utleniająco-redukcyjnego jest wyrażenie go jako aktywność teoretycznych elektronów w roztworze (pe , parametr bezwymiarowy), zależnych od Eh (3) (Dobrzyński i in., 2018):

$$pe = F \cdot Eh \cdot (2,303 \cdot R \cdot T)^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

pe – ujemny logarytm aktywności elektronów, [-],

F – stała Faradaya, [C/mol],

R – stała gazowa, [J/molK],

T – temperatura absolutna, [K],

Eh – różnica potencjału redoks, [V].

Potencjał redoks osiąga największą wartość (0,5 V – 0,8 V) w wodach występujących w strefach wietrzenia złóż siarczkowych. Również duże wartości Eh (0,4V – 0,6V) stwierdza się w wodach występujących w utworach piaszczystych, które są zasilane bogatą w tlen wodą z opadów atmosferycznych. Wody z utworów wapiennych zwykle charakteryzują się mniejszym Eh (0,2 - 0,3V). Wartość potencjału utleniająco-redukcyjnego szybko maleje wraz z głębokością. Granica pomiędzy środowiskami redukcyjnym i utleniającym jest zależna od odczynu wody. W kwaśnych wodach wynosi około 0,4V a w zasadowych 0,15V (Dobrzyński, 2006).

Pomiar Eh musi być wykonany w terenie w naczyniach przepływowych, ograniczając kontakt wody podziemnej z powietrzem. Jednocześnie należy zachować stan równowagi gazowej, który jest charakterystyczny dla badanej warstwy wodonośnej (Macioszczyk i Dobrzyński 2002). Możliwe jest również wykonanie pomiaru w terenie za pomocą sond. Należy wówczas rejestrować

temperaturę oraz skorygować wynik uwzględniając potencjał elektrod pomiarowej i wodorowej w zmierzonej temperaturze (Dobrzyński, 2006).

3.2.2. Odczyn wody (pH)

Odczyn wody wyraża się jako ujemny logarytm stężenia jonów wodorowych. Zależy on od obecności tych jonów, których stężenie jest stosunkowo niewielkie. Zależy ono przede wszystkim od dysocjacji elektrolitycznej cząsteczek wody, a także hydrolizy i dysocjacji rozpuszczonych w wodzie związków. Na podstawie zróżnicowania wartości pH można podzielić wody podziemne według istniejących klasyfikacji, z których najpopularniejszą jest klasyfikacja zaproponowana przez Pazdro (1983). Rozróżnia ona 5 typów wód podziemnych:

- kwaśne, $\text{pH} < 5$,
- słabo kwaśne, $5 \leq \text{pH} < 7$,
- obojętne, $\text{pH} = 7$,
- słabo zasadowe, $7 < \text{pH} \leq 9$,
- zasadowe, $9 < \text{pH} \leq 14$.

Wodami najpowszechniej występującymi w przyrodzie są te o pH wynoszącym od 6,0 do 8,5. Wody, których odczyn jest kwaśny (czyli o $\text{pH} < 5$) są zwykle spotykane w środowiskach związanych np. z kopalniami siarczków i strefami utleniania, na obszarach wulkanicznych jako wody termalne, czy też jako wody podziemne płytkiego krążenia, podatne na kwaśne depozycje atmosferyczne. Najpowszechniejszymi wodami kwaśnymi są wody mające kontakt z torfowiskami oraz bagnami. Odczyn w okolicach pH obojętnego mają natomiast zwykle wody występujące płytko. Zasilane infiltracyjnie wody podziemne mają zwykle odczyn od słabo kwaśnego (płytko występujące, wzbogacane przez infiltrację w kwasy organiczne oraz CO_2) do słabo zasadowego (wody: wgłębne, gruntowe, krążące w wapieniach jak i ich zwietrzelinach, głębinowe solanki, bogate w węglan wapnia utwory lodowcowe). Wody zasadowe są wodami rzadko występującymi, głównie w strefach pustynnych i półpustynnych (Dobrzyński, 2006).

Odczyn pH poza wpływem na przebieg procesów biogeochemicznych ma także znaczenie podczas użytkowania wody. Jest on ważny tak ze względów technologicznych (może wpływać na agresywność wody w stosunku do żelaza

i betonu) jak i sanitarnych (Dobrzyński, 2006). Ze względu na możliwe zmiany odczynu podczas przechowywania próbek, pomiarów pH powinno dokonywać się bezpośrednio w terenie.

Odczyn wody jest jednym z parametrów objętych monitoringiem w wodach przeznaczonych do spożycia przez ludzi (Rozporządzenie, 2017). Zgodnie z Rozporządzeniem (2017) wartość parametryczna wynosi 6,5-9,5 przy niepewności pomiarowej 0,2. W przypadku rozlewania wody do butelek lub pojemników, minimalna wartość pH wody niegazowanej może zostać obniżona do 4,5, a dla wody naturalnie bogatej lub sztucznie wzbogaconej w ditlenek węgla wartość minimalna może być mniejsza.

4. Cele pracy i główne tezy

Celami rozprawy doktorskiej są:

- określenie zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w czasie i przestrzeni w procesie eksploatacji, transportu i wykorzystania wód radonowych w zabiegach leczniczych,
- charakterystyka procesu ucieczki radonu z wód podziemnych (radonowych wód leczniczych) do atmosfery,
- oszacowanie dawek promieniowania jonizującego od ^{222}Rn i jego promieniotwórczych pochodnych w czasie zabiegów radonoterapii dla pacjentów i personelu medycznego oraz technicznego,
- celem nadrzędnym jest opracowanie wytycznych prowadzących do wystandaryzowania i zoptymalizowania zabiegów radonoterapeutycznych.

Głównymi tezami rozprawy doktorskiej są:

- zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w czasie i przestrzeni w procesie eksploatacji, transportu i wykorzystania wód radonowych w zabiegach leczniczych mogą sięgać dwóch rzędów wielkości,
- kontakt radonowej wody podziemnej z powietrzem atmosferycznym prowadzi do szybkiego zmniejszenia stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej,
- wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego, którego źródłem jest ^{222}Rn i jego pochodne znajdujące się w powietrzu pomieszczeń służących do zabiegów radonoterapeutycznych nie przekraczają dopuszczalnych norm dla ogółu ludności (kuracjuszy, pacjentów), jak i pracowników pracujących w warunkach narażenia zawodowego.

5. Charakterystyka obszaru badań

5.1. Łądek-Zdrój

Łądek-Zdrój jest miastem uzdrowiskowym położonym w powiecie kłodzkim województwa dolnośląskiego. Geograficznie leży w dolinie rzeki Biała Łądecka w Sudetach Środkowych.

Łądek-Zdrój jest najstarszym uzdrowiskiem w Polsce. Pierwsze zapiski o znajdujących się w nim urządzeniach kąpielowych pochodzą z 1241 roku. Właśnie w Łądku-Zdroju dokonano pierwszych analiz wód leczniczych. Dokonał tego Konrad z Bergu w 1498 roku (Uzdrowisko, 2023).

W Łądku-Zdroju znajduje się jeden odwiert wody termalnej oraz sześć naturalnych źródeł wód leczniczych. Znajdują się tam trzy baseny termalne, dwadzieścia pięć marmurowych wanien służących do leczniczych kąpeli oraz ponad sto hydroterapeutycznych stanowisk (Uzdrowisko, 2023).

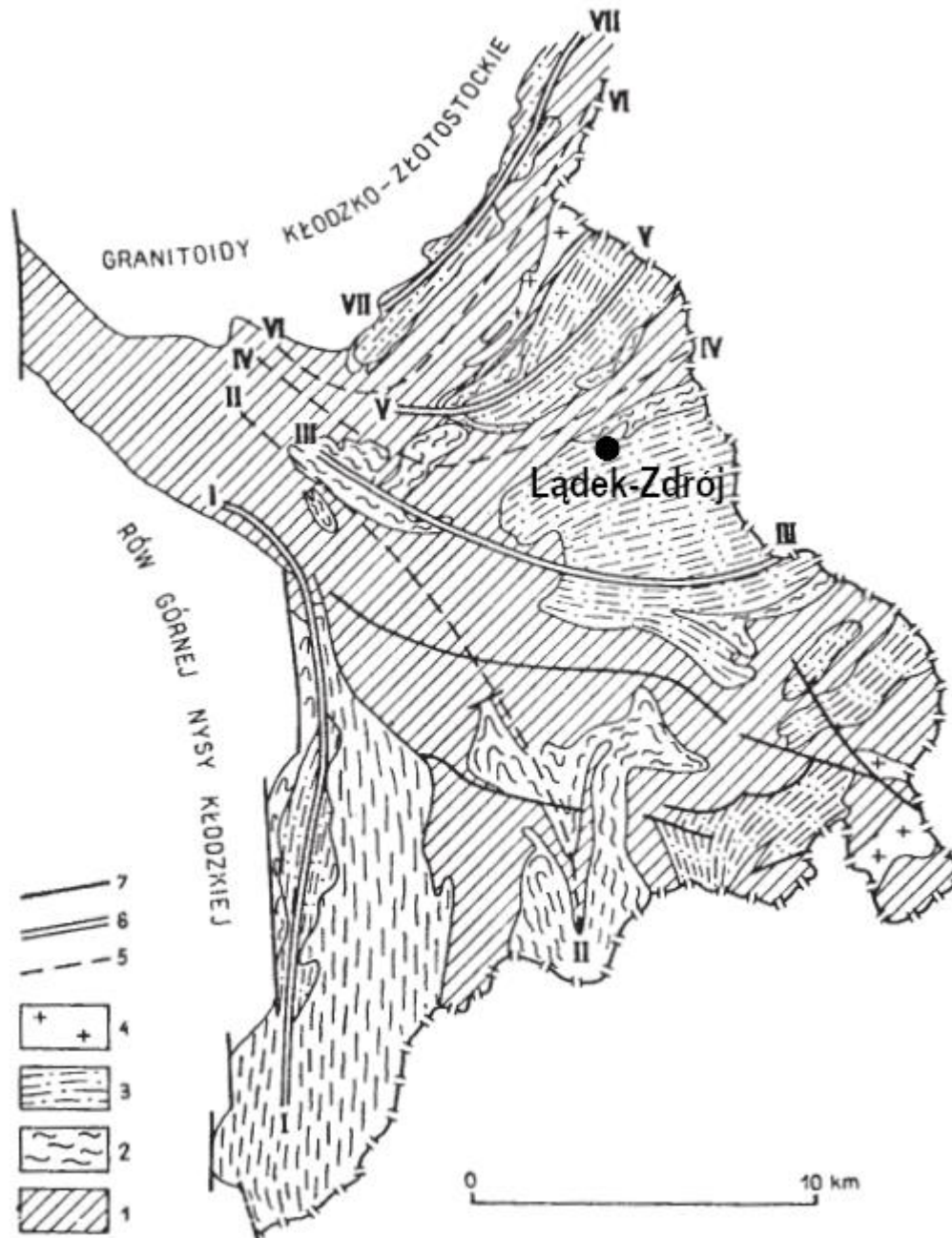
Łądek-Zdrój dysponuje kilkoma obiektami: Zdrój Wojciech, Jubilat, Józef, Adam, Stanisław, Hostel Urszula oraz Jan i Jerzy, które zapewniają kuracjom kompleks zabiegowo-hotelowy (Uzdrowisko, 2023).

Zarys budowy geologicznej

Łądek-Zdrój położony jest na silnie zmetamorfizowanych skałach, w części południowo-wschodniej Sudetów Środkowych – w obszarze krystaliniku Łądka-Śnieżnika. Krystalinik ograniczony jest od wschodu nasunięciem ramzowskim, na zachodzie rowem górnej Nysy Kłodzkiej, a od północy intruzją granitoidową kłodzko-złotostocką (Mazur i in., 2010; Stupnicka, 2013)

W krystaliniku Łądka-Śnieżnika wyróżnia się skalne kompleksy, takie jak (Smulikowski, 1979): granitognejsy śnieżnickie, granitognejsy gierałtowskie oraz mezometamorficzne łupki strońskie. Pierwsze z nich mają zróżnicowaną strukturę i teksturę, są grubokrystaliczne i oczkowe. Granitognejsy gierałtowskie, na których leży Łądek-Zdrój (Rys. 4), są mniej lub bardziej migmatytowe, drobnokrystaliczne i zawierają wkładki granulitów, eklogitów i amfibolitów. Mezometamorficzne łupki strońskie reprezentowane są przez łupki łuszczkowe, które przechodzą w paragnejsy z wkładkami marmurów, kwarcytów oraz erlanów i amfibolitów.

Skąły krystaliczne powstały jako efekt polimetamorficznej i wielocyklicznej ewolucji serii suprakrustalnej. Najsilniej zostały zmienione granitognejsy gierałtowskie, a najslabiej łupki strońskie (Smulikowski, 1979).



Rys. 4. Mapa geologiczna krystaliniku Łądek-Śnieżnika (wg Teisseyre'a, Dona, Gierwiałańca, Kaszy, Oberca: Oberca, 1972, uproszczona); 1: łupki strońskie, 2: granitognejsy Śnieżnika, 3: granitognejsy gierałtowskie, 4: granitoidy waryscyjskie, 5: osie synklinoriów, 6: osie antyklinoriów, 7: uskoki; Antyklinoria: I: Międzygórze, III: Gierałtowa, V: Radochowa, VII: Skrzyżki; synklinoria: II: Śnieżnika, IV: Łądkowa, VI: Orłowca

Skąły Łądek-Śnieżnika zostały silnie sfałdowane (Teisseyre, 1973; Dumicz, 1979, 1986). W obszarze krystaliniku opisuje się liczne fałdy izoklinalne, symilarne

i harmonijne, ale także skomplikowane łuski i nasunięcia o dużych amplitudach (Stupnicka, 2013). Na podstawie analiz mezostruktur wyróżnia się również cztery etapy deformacji tektonicznych (Dumicz, 1986).

Obszar samej gminy Łądek-Zdrój jest równie złożony pod względem budowy geologicznej jak i tektonicznej. Na powierzchni terenu zlokalizowane są wychodnie różnego wieku skał: głównie staropaleozoicznych, jak również karbońskich, trzecio- i czwartorzędowych. W obszarze gminy zbiegają się również granice synklinorium Łądka, antyklinorium Gierałtowa oraz synklinorium Orłowca i antyklinorium Radochowa (Don, 1964; Gierwielanec, 1971). Głównymi skałami występującymi w tym rejonie są łupki łuszczycowe oraz gnejsy śnieżnickie i gierałtowskie. Wiek skał oceniany jest na proterozoik bądź starszy paleozoik (Oberc, 1972). Skały te tworzą na powierzchni liczne wychodnie. Pasem od Łądka-Zdroju do Lutyni występują łupki łuszczycowe z przewagą muskowitu. Odznaczają się barwą od jasnopopielatej do ciemnej, są cienko złupkowane, drobnoziarniste. Wychodnie pasowe pomiędzy Łądkiem-Zdrojem i Lutynią oraz Konradowem i Kątami Bystrzyckimi tworzą również łupki łuszczycowe z granatami. W Łądku-Zdroju występują również mniejsze wychodnie wkładki w łupkach łuszczycowych w formie soczew wapieni krystalicznych oraz amfibolitów i kwarcytów (Fulica-Jankowski, 2002; Awdankiewicz, 2004; Bobiński 2004a,b).

Główną formacją poza łupkami łuszczycowymi są gnejsy gierałtowskie, wykazujące wyraźną laminację. Najpopularniej występującymi są gnejsy oligoklazowo-biotytowe, plagioklazowo-mikroklinowe oraz gnejsy mylonityczne, aplitowe i migmatyczne. Mają one swoje wychodnie głównie na północ oraz wschód od Łądka-Zdroju, a także w rejonie Radochowa, masywie Borówkowej i strefie tektonicznej Skrzyńka-Orłowiec. Na obszarze gminy innymi skałami paleozoicznymi są łupki mylonityczne oraz kataklazyty (Fulica-Jankowski, 2002; Awdankiewicz, 2004; Bobiński 2004a,b).

W gminie Łądek-Zdrój skały karbońskie reprezentowane są przez dolnokarbońskie mylonity i gnejsy kataklastyczne, które występują w większych skupieniach w rejonie Łądka-Zdroju, przełęczy Różaniec i Lutyni. Skały górnokarbońskie reprezentowane są natomiast przez granodioryty jawornickie, żyły i gniazda kwarcowe i niewielkie wystąpienia lamprofirów.

Na obszarze gminy, w jej części północnej, występują również drobnoziarniste granity facji brzeżnej i granodioryty (Fulica-Jankowski, 2002; Awdankiewicz, 2004; Bobiński 2004a,b).

Trzeciorzęd na obszarze gminy Łądek-Zdrój reprezentują neogeńskie osady zwietrzelinowe i rzeczne, a także oligoceńskie wulkanity. Występują tu neogeńskie żwiry i piaski, a formy zwietrzelinowe stanowią głównie te powstałe na gnejsach i łupkach - ility i piaski zwietrzelinowe. Pliocene wulkanity to bazalty nefelinowe, które swoje wychodnie mają na wschodzie i północy Łądka-Zdroju (Fulica-Jankowski, 2002; Awdankiewicz, 2004; Bobiński 2004a,b).

Czwartorzędowe utwory plejstoceńskie na obszarze gminy występują w formie żwirów i piasków, osady stokowe są obecne w postaci glin lessopodobnych i pyłowatych oraz glin deluwialnych ze skalnym rumoszem. Najmłodsze utwory (holoceńskie) reprezentowane są przez osady rzeczne, żwiry i piaski oraz mułki, mady i torfy (Fulica-Jankowski, 2002; Awdankiewicz, 2004; Bobiński 2004a,b).

Wody podziemne

Na obszarze gminy Łądek-Zdrój znajdują się dwa piętra wodonośne. Są to piętra czwartorzędowe oraz paleozoiczno-proterozoiczne (Załącznik, 2017).

Pierwsze z nich jest zasilane wodami z infiltracji opadów i tworzą je utwory piaszczyste (holoceńskie), które wypełniają dna dolin i żwiry tarasów Nysy Kłodzkiej. Wody te charakteryzuje mała wydajność i swobodne zwierciadło (Załącznik, 2017).

Drugie piętro występuje w rumoszowo-zwietrzelinowych pokrywach i szczelinach skał utworów pochodzenia osadowego, metamorficznego i magmowego. W piętrze tym występują dwa systemy krążenia: płytszy oraz głębszy. System płytszy jest związany ze strefą wietrzeniową, a głębszy towarzyszy większym dyslokacjom przecinającym górotwór (Mroczkowska, 2000; Awdankiewicz, 2004; Kłonowski, 2004a,b).

Wody lecznicze występujące w Łądku-Zdroju są pochodzenia infiltracyjnego. Ich źródła zlokalizowane są na głęboko sięgających, pięciu dużych systemach uskokowych. Te natomiast występują w obrębie gnejsów prekambryjskich. Wody lecznicze w Łądku-Zdroju wypływają w okolicach Grodzkiego Potoku z sześciu źródeł. Są to: Stare, Dąbrówka, Chrobry, Wojciech, Jerzy i Maria

Curie-Skłodowska. Wody lecznicze występują we wzajemnym kontakcie hydraulicznym, w obrębie anomalii geotermicznej (Mroczkowska, 2000; Awdankiewicz, 2004; Kłonowski, 2004a,b).

Zwiększone stężenie aktywności ^{222}Rn w radonowych wodach leczniczych Łądka-Zdroju wynika ze wzbogacenia skał zbiornikowych (zwłaszcza gnejsów) w macierzysty izotop – ^{226}Ra , a także zwiększony współczynnik emanacji w przecinających się strefach dyslokacyjnych. Radon rozpuszcza się w wypływającej z dużej głębokości wodzie termalnej jako ostatni jej składnik chemiczny w najpłytszej strefie w rejonie źródła, tj. w ciągu ostatnich około 40 dni przepływu podziemnego wody. Jego zawartość w wodzie wypływającej w źródle może być w niewielkim stopniu modyfikowana także niewielką domieszką zwykłych wód płytkiego krążenia, które na obszarze Łądka-Zdroju są również wzbogacone w ^{222}Rn .

W rejonach wszystkich ujęć uzdrowiska Łądek-Zdrój mierzone wartości stężenia aktywności ^{222}Rn są do siebie zbliżone z wyjątkiem ujęcia Jerzy, którego wody wykorzystywane są do zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych. Także ze zbiornika przy ujęciu Jerzy wzbogacone w radon powietrze z nad lustra wody jest pompowane do inhalatorium. Notowane znacznie większe wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej z tego ujęcia są efektem lokalizacji źródła Jerzy na rozwidleniu dużej strefy dyslokacyjnej i związanego z tym zwiększonego współczynnika emanacji radonu (Przylibski i Żebrowski, 1999; Przylibski 2005).

Wykorzystywana do przeprowadzania zabiegów radonoterapeutycznych woda z ujęcia Jerzy w Łądku-Zdroju jest wodą słabozmineralizowaną, termalną, wodorowęglanowo-sodową, fluorkową, radonową, siarczkową (typ $\text{HCO}_3\text{-F-Na}$) (Przylibski i Żebrowski, 1999).

5.2. Świeradów-Zdrój

Świeradów-Zdrój jest miastem uzdrowiskowym zlokalizowanym w powiecie lubańskim województwa dolnośląskiego. Miasto od zachodu graniczy z granicą Polsko-Czeską, od północy z gminą Leśna, a w pozostałej części graniczy z gminą Mirsk.

Uzdrowisko posiada 250-letnią historię i obiekty gwarantujące kuracjom kompleks zabiegowo-hotelowy.

Zarys budowy geologicznej

Świeradów-Zdrój zlokalizowany jest na obszarze makroregionu Sudetów Zachodnich, na krystaliniku karkonosko-izerskim.

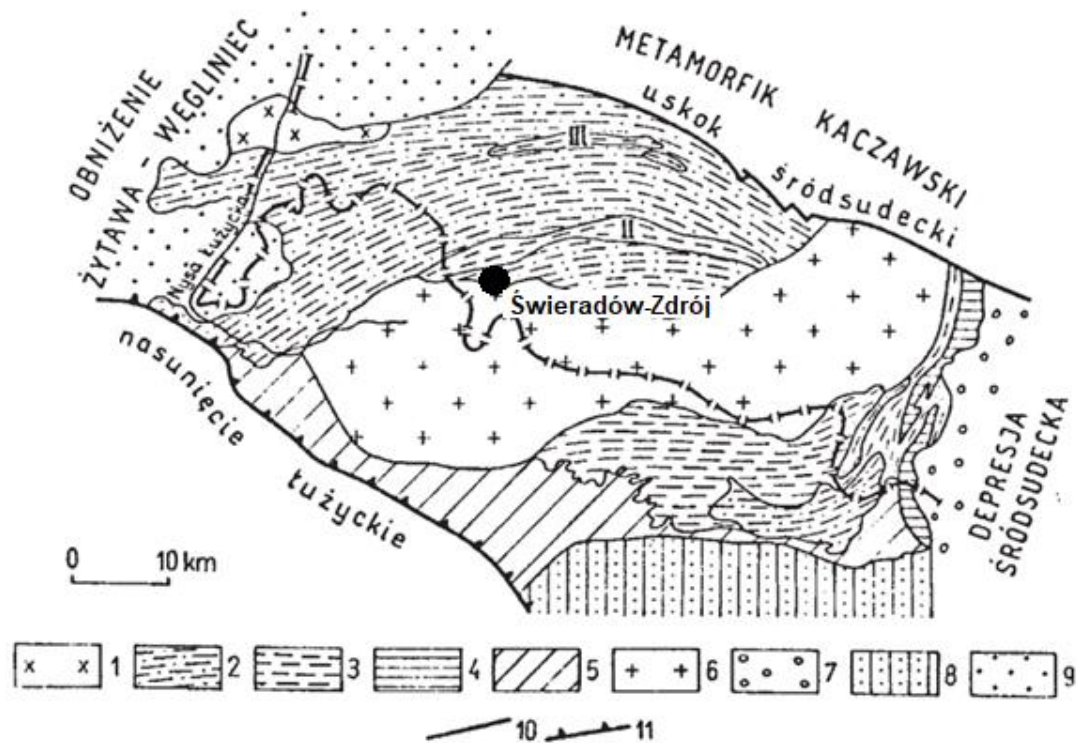
Krystalinik karkonosko-izerski jest ograniczony od południowego-zachodu nasunięciem łżyckim, od północnego-zachodu obniżeniem Żytawa-Węgliniec, a od północnego-wschodu uskokiem śródsudeckim (Stupnicka, 2013).

Skały krystaliniku dzielą się na (Teisseyre i in., 1957; Oberc, 1972; Szałamacha i Szałamacha, 1967; Teisseyre, 1973; Chaloupsky i in., 1988):

- zlokalizowane na północy oraz wschodzie i południowym wschodzie gnejsy karkonosko izerskie i łupki metamorficzne,
- występujące na wschodzie serie metamorficzne Kowar i Leszczyńca,
- zlokalizowane na zachodzie i południu skały epimetamorficzne (kompleksy: Jitrawy, Ponikly, Radczyc, Machnina i Velkiej Upy).

Gnejsy karkonosko-izerskie na obszarze krystaliniku zlokalizowane są w jej północnej części. Występują tam różne odmiany granitów i gnejsów. Można również wyróżnić wśród granitognejsów trzy pasma łupków metamorficznych, które rozciągają się równoleżnikowo. Są to pasma: Szklarskiej Poręby, Starej Kamienicy i Żłotnik Lubańskich (Rys. 5).

Granitognejsy w części północnej powstały na skutek procesów metamorficznych w głównej mierze ze skał osadowych (Smulikowski, 1972). Wyróżnia się również w pierwotnych skałach, skały intruzywne (granity). Ich wiek datuje się na okres końca kambru i ordowiku (Borkowska i in., 1980). Zakłada się, że to metasedymenty preordowickie, które są intrudowane granitami ordowickimi reprezentują gnejsy karkonosko-izerskie (Mierzejewski i Oberc-Dziedzic, 1990).



Rys. 5. Mapa geologiczna krystaliniku karkonosko-izerskiego (wg Teisseyre i in., 1957; Stupnicka, 2013). 1 – granodioryty zawidowskie, 2 – granitognejsy izerskie, 3 – łupki metamorficzne pasma: I – Szklarskiej Poręby, II – Starej Kamienicy, III – Złotnik Lubańskich; 4 – gnejsy, amfibolity i łupki mikowe serii Kowar i Leszczyńca, 5 – paleozoiczne skały epimetamorficzne, 6 – granity karkonoskie, 7 – karbon dolny, 8 – czerwony spągowiec, 9 – trzeciorząd, 10 – uskoki, 11 – nasunięcia

Grzbiet Lasocki i Rudaw Janowickich, znajdujący się na wschód od granitów karkonoskich, tworzą skały, które są podobne do gnejsów izerskich jednak są zmienione na kontakcie z intruzją. Przedłużają się aż na teren Czech tworząc serie Kowar i Leszczyńca. Reprezentują je: gnejsy, łupki chlorytowe i mikowe oraz amfibolity. Na południu gnejsy Kowar przechodzą w gnejsy karkonoskie (Mierzejewski i Oberc-Dziedzic, 1990) wśród których występują lawy, dajki oraz tufy. Wiek skał Kowar i Leszczyńca nie został jednoznacznie określony jednak pomiary radiometryczne skał wulkanicznych datują je na 490-520 milionów lat (Oliver i in, 1993).

Poglądy na temat samej genezy skał, jak i ewolucji krystaliniku karkonosko-izerskiego są różne. Autorzy (Oberc, 1972; Smulikowski, 1972; Don, 1984) są zgodni co do dwuetapowości ruchów orogenicznych, jednak zakładają różny wiek poszczególnych etapów.

W czasie fazy laramijskiej i w neogenie nastąpiły ostatnie ruchy obszaru karkonosko-izerskiego, a sam ruch wznoszący masyw trwa do dziś (Stupnicka, 2013).

Budowa geologiczna obszaru Świeradowa-Zdroju jest charakterystyczna dla Gór Izerskich i występują tu głównie granitognejsy i gnejsy, które powstały w orogenezie kaledońskiej. Wśród nich występują lokalnie leukogranity oraz pasma łupków łuszczkowych. Wśród gnejsów wyróżnia się: drobnooczkowe, drobnoziarniste i słojuowo-oczkowe. Przebiegają one równoleżnikowo. Występują także tzw. granity rumburskie i leukogranity. W granitach i gnejsach zlokalizowane są również pasma metamorficzne reprezentowane przez łupki (głównie średnio- oraz grubokrystaliczne) (Szałamacha i Szałamacha, 1984; Studium, 2021).

Od obszaru Czerniawy-Zdroju rozciąga się zbudowane z łupków łuszczkowo-chlorytowo-kwarcowych (zlokalizowane w kilku różnej grubości ławicach) i kwarcowo-skaleniowych (rozciągające się od południa wzdłuż kontaktu z gnejsami izerskimi) Pasma Kamienickie (Szałamacha i Szałamacha, 1984; Studium, 2021).

Na obszarze Świeradowa-Zdroju najstarsze czwartorzędowe utwory reprezentują piaski i żwiry (osady zlodowaceń środkowopolskich) tarasów 20 m nad poziomem Kwisy. Zlodowacenia północnopolskie reprezentują również piaski i żwiry zalegające od 4 do 7 m nad poziomem Kwisy. Czwartorzęd nierozdzielony występuje jako gliny pylaste, gliny deluwialne ze skalnym rumoszem i osady stożków napływowych (Szałamacha i Szałamacha, 1984; Studium, 2021).

Wody podziemne

Wody podziemne wypełniają utwory aluwialne, pokryw zwietrzelinowych oraz zbiorniki szczelinowe w skałach krystalicznych. Pierwsze z nich zlokalizowane są w utworach żwirowo-kamienistych oraz w osadach stożków napływowych i sporadycznie w spągowej warstwie glin. Te wody podziemne na obszarze Świeradowa-Zdroju stanowią płytko położony pierwszy poziom wodonośny. Przebiega on głównie w dolinach rzecznych i utworach stokowych. Poniżej tego poziomu występują wody szczelinowe, które są związane ze spękanymi kompleksami skalnymi. Wody szczelinowe występują w krystalicznych skałach starszego podłoża i krążą w strefach spękań i dyslokacji (Szałamacha i Szałamacha, 1984; Studium, 2021).

W obszarze miasta występują również udokumentowane złoża wód leczniczych Świeradów-Zdrój i Czerniawa-Zdrój. Są to wody słabo zmineralizowane, radonowe oraz szczawy radonowe i szczawy. Ich wypływy zlokalizowane są w Świeradowie-Zdroju w dwóch miejscach, w rejonie Domu Zdrojowego oraz w dolinie rzeki Kwisy. Wody lecznicze są pochodzenia infiltracyjnego (Szałamacha i Szałamacha, 1984; Studium, 2021).

Radonowe wody lecznicze w uzdrowisku Świeradów-Zdrój są słabo zmineralizowane, typu $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$ (Ciężkowski, 1983).

Dużym stężeniem aktywności ^{222}Rn charakteryzują się wody szczelinowe występujące w obrębie gnejsów i granitognejsów. Są to wody płytkiego krążenia i współczesnej infiltracji. Zwiększona zawartość ^{222}Rn związana jest w nich z występującymi na tym obszarze leukogranitami i granitognejsami, charakteryzującymi się zwiększoną zawartością ^{226}Ra (Ciężkowski, 1983; Przylibski 1996).

Wypływy na powierzchnię są związane z krzyżowaniem się uskoków (Dawgiałło, 1969; Fistek i Teisseyre, 1967). Liczne szczeliny oraz uskoki powodują, że ucieczka ^{222}Rn ze skał i jego rozpuszczenie w penetrujących je wodach są łatwiejsze (Przylibski, 1996). Przepływają one spękanymi strefami o kierunku zbliżonym do północnego. Obecność spękań i lokalnych uskoków wykazały prace kartograficzne, a także badania geofizyczne (Fistek i in., 1975; Rulski, 1975).

6. Zakres i metodyka prac

W ramach prowadzonych badań autor wykonał pomiary w uzdrowisku Łądek-Zdrój oraz w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.

W Łądku-Zdroju polegały one na przeprowadzeniu pomiarów podczas zabiegów indywidualnych kąpeli w leczniczej wodzie radonowej oraz w trakcie inhalacji grupowych. Stężenie aktywności ^{222}Rn zostało zmierzone w próbkach wód z miejsca ujęcia kopaliny (zbiornika) oraz z tworzywa radonowego wykorzystywanego do zabiegów indywidualnych kąpeli i w wodzie po przeprowadzonym zabiegu (w ścieku). W miejscach poboru próbek wód dokonywano także pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody (pH, Eh, PEW, T). Pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α zostały przeprowadzone w zbiorniku, w pomieszczeniu do radonowych inhalacji grupowych oraz w pomieszczeniu, w którym przeprowadzane były zabiegi indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych.

W Świeradowie-Zdroju pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn przeprowadzono w próbkach wody pobranych ze zbiornika radonowej wody leczniczej (kopaliny), ze zbiornika tworzywa radonowego (leczniczej wody radonowej), przed oraz po zabiegu indywidualnej kąpeli radonowo-siarczkowej, a także kąpeli grupowej w basenie, jak również w tężni radonowo-solankowej. Pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α zostały przeprowadzone podczas indywidualnych kąpeli, indywidualnych inhalacji, w tężni radonowo-solankowej oraz na basenie (kąpiele grupowe).

W obu uzdrowiskach pomiary prowadzone były, w miarę możliwości, na początku oraz na końcu każdego zabiegu radonoterapii.

Prowadzone badania miały na celu umożliwić:

- określenie zmian stężenia aktywności ^{222}Rn na poszczególnych etapach wykorzystania kopaliny i tworzywa radonowego,
- scharakteryzowanie procesu ucieczki ^{222}Rn z wód podziemnych do atmosfery,
- oszacowanie dawek promieniowania jonizującego od ^{222}Rn i jego promieniotwórczych pochodnych, jak również

- opracowanie wytycznych prowadzących do wystandaryzowania i zoptymalizowania zabiegów radonoterapeutycznych.

6.1. Pomiary podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody

Pomiary podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody odbywały się w każdym z możliwych miejsc pomiarowych (studnia-zbiornik, woda w wannie: świeża oraz ściek, woda w basenie, woda wykorzystywana do inhalacji, woda wykorzystywana w tężni: świeża oraz ściek). Pomiary dotyczyły zarówno kopaliny – eksploatowanej wody radonowej, jak i tworzywa radonowego – wody używanej do zabiegów, a także wody pozabiegowej odprowadzanej do kanalizacji. Dzięki temu pomiar był wiarygodny i nie było potrzeby utrwalania próbek w celu wykonania pomiarów w laboratorium, które byłyby obarczone dużym błędem. Wszystkie dane zapisywane były w zeszycie terenowym, w którym odnotowywano także informację o: dniu i godzinie (z dokładnością do minuty) pomiaru, lokalizacji oraz odczytanych wynikach pomiarów (T, pH, PEW, Eh).

Pierwszą czynnością jaka była wykonywana przed pobraniem próbki wody był pomiar podstawowych parametrów fizyko-chemicznych: temperatury (T), odczynu wody (pH), przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) oraz potencjału oksydacyjno-redukcyjnego (Eh). W tym celu wykorzystywano multimetr wieloparametrowy WTW 3430 z trzema kanałami pomiarowymi.

Pomiary PEW wykonywane były za pomocą uniwersalnego czujnika konduktometrycznego przeznaczonego do pomiarów terenowych jak i laboratoryjnych IDS TetraCon 925 z czujnikiem 4-elektrodowym z grafitu. Trzonek o średnicy 15,3 mm ma długość 120 mm i wykonany jest z epoksydu. Stała czujnika wynosi $0,475 \text{ cm}^{-1}$. Umożliwia on pomiar PEW w zakresie $1 \mu\text{S/cm}$ do $2000 \mu\text{S/cm}$ z dokładnością $\pm 0,5\%$ mierzonej wartości. Dodatkowo wykonywany jest pomiar T za pomocą czujnika NTC $30 \text{ k}\Omega$ w zakresie $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ z dokładnością $\pm 0,5\%$ mierzonej wartości (Katalog WTW).

Do pomiarów pH wykorzystywano elektrodę z serii IDS SenTix 980 z elektrolitem odniesienia $3 \text{ mol/dm}^3 \text{ KCl}$ bez Ag^+ , stożkową membraną i diafragmą z włókna platynowego. Długość szklanego trzonka wynosi 120 mm, a średnica 12 mm. Poza pomiarem pH w zakresie od 0,000 do 14,000 z dokładnością $\pm 0,004$ elektroda

ta umożliwia również pomiar T w zakresie 0°C - 100°C z dokładnością $\pm 0,2^\circ\text{C}$ za pomocą czujnika NTC 30 k Ω (Katalog WTW).

Do pomiaru potencjału redox (Eh) wykorzystywano platynową elektrodę redoks SenTix ORP-T 900 z elektrolitem odniesienia 3 mol/dm³ KCl i ceramiczną diafragmą. Jej szklany trzonek ma długość ok. 120 mm i średnicę ok. 12 mm. Zakres pomiarowy wynosi od -1250,0 mV do +1250,0 mV z dokładnością $\pm 0,2$ mV. Temperatura pracy mierzona za pomocą czujnika NTC 30 k Ω wynosi od 0 do 100°C (Katalog WTW).

6.2. Oznaczanie stężenia aktywności ²²²Rn w próbkach wód

Izotopy promieniotwórcze występują naturalnie w środowisku w różnych stężeniach. W przypadku dużych wartości stężeń problem ich detekcji nie jest tak kłopotliwy jak w chwili, gdy stężenia radioizotopów są niewielkie. Należy wówczas korzystać z metod pozwalających na ich detekcję na niskich poziomach energetycznych, nie zapominając jednak o możliwości wykonania analiz ilościowych. W tym celu często wykorzystywaną metodą jest metoda ciekłoscyntylacyjna – LSC (z ang. Liquid Scintillation Counting) znana już od połowy XX wieku (Kallman, 1950; Reynolds i in., 1950).

Metoda spektrometrii ciekłoscyntylacyjnej należy do metod bardzo czułych. Bazuje ona na zamianie na promieniowanie w widzialnym zakresie promieniowania jonizującego. Dzieje się to przy wykorzystaniu ciekłych scyntylatorów. Są to rozpuszczone w organicznym rozpuszczalniku stałe scyntylatory organiczne. Energia jonizacji, która zostaje pochłonięta przez rozpuszczalnik jest następnie przekazywana do odpowiadającej za fluorescencję substancji rozpuszczonej. Mechanizm emisji światła jest efektem molekularnym. Emisja promieniowania ultrafioletowego następuje na skutek wzbudzenia cząsteczki scyntylatora podczas powrotu rozpuszczalnika do stanu podstawowego. Rozpuszczalnik może być wzbudzony na skutek pochłonięcia przez jego cząsteczki energii, która jest niesiona przez promieniowanie jonizujące (Leroy i Rancoita, 2009).

Metoda ciekłoscyntylacyjna została wykorzystana przez autora podczas przeprowadzonych badań. W celu wykonania pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn w próbkach wody, w Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej Politechniki Wrocławskiej przed każdym zaplanowanym wyjazdem terenowym (do uzdrowiska

Lądek-Zdrój lub uzdrowiska Świeradów-Zdrój) odpowiednio przygotowywano naczynka scyntylicyjne. W tym celu do zubożonego w potas szklanego naczynka wlewano 10 cm³ scyntylicatora Insta-FLUOR™ Plus. Następnie, tak przygotowane naczynko ze scyntylicatorem ważono z dokładnością do 0,001 g na precyzyjnej wadze RADWAG AS 310.3Y. Każde naczynko było szczelnie zamykane oraz numerowane w sposób uniemożliwiający powtórzenie danego numeru.

W uzdrowiskach do tak przygotowanych naczynek, w każdym z punktów pomiarowych pobierano za pomocą strzykawek BD Discardit™ II i igieł KDM® KD-FINE® po 10 cm³ wody, którą wstrzykiwano pod warstwę scyntylicatora, jednocześnie zapisując czas pobrania próbki wody z dokładnością do 1 minuty. W każdym z punktów pobierano próbki wody do 2 naczynek scyntylicyjnych. Oznacza to, że każda pojedyncza próbka wody była reprezentowana przez około 20 cm³ wody pobranej do dwóch naczynek scyntylicyjnych, tj. po około 10 cm³ do każdego naczynka.

Próbki wody były pobierane z następujących punktów w uzdrowisku Lądek-Zdrój:

- w ujęciu (źródle) Jerzy, które stanowił zbiornik leczniczej wody radonowej wykorzystywanej w trakcie zabiegów kąpeli; jednocześnie uwalniany w tym zbiorniku z wody ²²²Rn gromadził się w poduszce powietrznej nad lustrem wody; wzbogacone w ²²²Rn powietrze z tego zbiornika wykorzystywane było do zabiegów inhalacji radonowych,
- bezpośrednio z wanny, przed wejściem kuracjusza w celu odbycia zabiegu kąpeli indywidualnej radonowo-siarczkowej (tzw. woda świeża),
- bezpośrednio z wanny, po odbyciu przez kuracjusza zabiegu kąpeli indywidualnej radonowo-siarczkowej (tzw. ściek).

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój próbki wody pobierane były:

- w zbiorniku leczniczej wody radonowej przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej wykorzystywanej w trakcie zabiegów kąpeli radonowych indywidualnych w wannach oraz kilkusobowych w basenie, a także w zabiegach inhalacji w tęźni radonowo-solankowej, jak również w radonowych inhalacjach indywidualnych,

- bezpośrednio z wanny, przed wejściem kuracjusza w celu odbycia zabiegu indywidualnej kąpeli radonowej (tzw. woda świeża),
- bezpośrednio z wanny, po odbytych przez kuracjusza zabiegach indywidualnej kąpeli radonowej (tzw. ściek).
- z miejsca, do którego pompowana jest woda w celu jej dalszego swobodnego spływu (tzw. woda świeża) w tężni,
- przed zbiornikiem ujmującym spływającą wodę z gałęzi w tężni (tzw. ściek),
- w basenie przeznaczonym do kąpeli radonowych kilkuosobowych,
- ze względu na brak możliwości pobierania próbek wody bezpośrednio ze zbiorników znajdujących się przy stanowiskach inhalacji radonowych indywidualnych, w których ^{222}Rn uwalniany był poprzez turbulentny przepływ powietrza przez słup wody radonowej, pobierano zimną wodę bezpośrednio z pobliskiego kranu, w którym założono, że stężenie aktywności ^{222}Rn jest identyczne do stężenia tego izotopu w wodzie w zbiornikach.

Po pobraniu próbki wody i zakręceniu naczynka, energicznie nim wstrząsano. Miało to na celu uwolnienie radonu z wody i umożliwienie jego przejścia do warstwy scyntylatora nie mieszającego się z wodą (tworzącego odrębną warstwę cieczy nad warstwą wody – pobranej próbki). Rozpuszczalność radonu w fazie organicznej (którą stanowi scyntylator) jest większa niż w fazie wodnej, dzięki czemu radon rozpuszczał się w warstwie ciekłego scyntylatora. To z kolei umożliwiało dalsze wykonanie pomiarów metodą ciekłoscyntylacyjną.

Pobrane w uzdrowiskach próbki wody transportowano do Laboratorium, gdzie pierwszą wykonywaną czynnością było ich ponowne ważenie. Zabieg ten umożliwiał wyznaczenie masy pobranej wody, wykorzystywanej w dalszych obliczeniach. Przygotowane naczynko scyntylacyjne wraz z pobraną próbką wody, z której ^{222}Rn uwolniono i przeprowadzono do warstwy ciekłego scyntylatora umieszczano w ultraniskotłowym spektrometrze ciekłoscyntylacyjnym α/β Quantulus 1220 w celu wykonania pomiaru stężenia aktywności ^{222}Rn .

Przed rozpoczęciem pomiarów naczynka spędzały w spektrometrze około pięciu godzin. Miało to na celu: wygaszenie błysków powstałych w efekcie ekspozycji scyntylatora na światło białe, uzyskanie stałej temperatury naczynka oraz uzyskanie równowagi promieniotwórczej pomiędzy ^{222}Rn a jego krótkożyciowymi pochodnymi.

W spektrometrze panowała stała temperatura 18,2°C. Po wyznaczonym czasie rozpoczynano właściwy pomiar.

Działanie spektrometru opiera się na dwóch zjawiskach: scyntylicyjnym oraz fotoelektrycznym zewnętrznym. Dzięki różnicy w czasie trwania poszczególnych impulsów, możliwe jest rozróżnienie cząstek α od cząstek β . Spektrometr umożliwia również redukcję tła promieniowania β . Ważnym aspektem jest to, że zarówno próbka jak i detektor są odizolowane od wpływu źródeł promieniowania nie pochodzących z mieszaniny znajdującej się w naczynku scyntylicyjnym. Jest to o tyle istotne, że umożliwia uzyskanie możliwie najniższej granicy wykrywalności (LLD). Z punktu widzenia prowadzonych badań było to kluczowe, ponieważ nie było wiadomo jakich wartości stężenia aktywności ^{222}Rn należy się spodziewać w pobranych próbkach wód – zwłaszcza ścieków.

Ultraniskotłowy spektrometr ciekłoscyntylicyjny α/β Quantulus 1220 sterowany był za pomocą programu WinQ. Pomiar programowano w taki sposób, aby impulsy każdej z próbek były zliczane w dziewięciu jednogodzinnych cyklach. Dzięki temu z każdego punktu pomiarowego uzyskiwano 18 wyników pomiaru, na podstawie których po przeprowadzeniu analizy statystycznej i odrzuceniu odstających wartości, obliczano średnią liczbę zarejestrowanych impulsów. Zarejestrowana liczba impulsów odczytywana była za pomocą programu EasyView. Na jej podstawie w oparciu o prawo rozpadu promieniotwórczego oraz rozpisane przez Batemana w 1910 r. równania, obliczane było stężenie aktywności ^{222}Rn w chwili poboru próbki wody. Szczegółowy opis wykorzystywanej metodyki znajduje się w formie aneksu do rozprawy doktorskiej dr inż. Agaty Kowalskiej (2017).

6.3. Pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu

W celu przeprowadzenia pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu wykorzystano urządzenie AlphaGUARD® PQ 2000 PRO firmy Genitron Instruments GmbH (aktualnie Bertin Technologies). Jest to stosunkowo niewielkie urządzenie o maksymalnych wymiarach (z podniesionym uchwytem do jego przenoszenia) 340 mm x 176 mm x 240 mm. W obudowie znajduje się dodatkowo blok połączeń elektrycznych, przyciski do ustawiania parametrów sterowania urządzeniem,

lampka kontrolna, wielofunkcyjny wyświetlacz oraz wlot i wylot powietrza. Wewnątrz obudowy znajduje się komora jonizacyjna o objętości roboczej 560 cm³. Dodatkowo wraz z urządzeniem wykorzystywana była gazoszczelna pompka AlphaPUMP®, która służyła do zasysania powietrza w punkcie pomiaru i tłoczenia go do komory jonizacyjnej urządzenia AlphaGUARD®. Pompka pracowała z zadaną wydajnością 1 dm³/min (Instrukcja, 2014).

Metalowe wnętrze cylindrycznej komory jonizacyjnej o pojemności 560 cm³ ma potencjał +750 V podczas gdy sztywne elektroda, umieszczona wzdłuż osi wzdłużnej ma potencjał 0 V. Elektroda ta jest połączona z wysokoczułym przedwzmacniaczem, skąd przetworzone sygnały są dalej przesyłane w celu następnej cyfrowej obróbki (Instrukcja, 2014).

Sygnał cyfrowy przetwarzany jest trzema kanałami. Pierwszy z nich jest kanałem spektrometrycznym. Następuje tu charakteryzacja impulsu według jego głębokości oraz formy, którego wynikiem jest trójwymiarowe widmo. Oś X klasyfikuje głębokość impulsu, oś Y liczbę impulsów w jednostce czasu, a oś Z klasy form impulsowych (Instrukcja, 2014).

Kanał drugi wykorzystywany jest jedynie przy dużych wartościach stężenia aktywności ²²²Rn. Dzięki zwymiarowaniu filtra środkowoprzepustowego, pierwiastek kwadratowy całkowitego strumienia jonizacji jest wprost proporcjonalny do amplitudy poziomu szumów. Pomiar jest więc precyzyjny, a jednocześnie eliminowane są źródła błędów wynikające ze struktury FET (z ang. Field Effect Transistor), która jest wrażliwa na temperaturę (Instrukcja, 2014).

Ostatni z kanałów odpowiedzialny jest za pomiar prądu stałego, którego użycie jest związane z pojawieniem się ekstremalnie dużych wartości stężenia aktywności ²²²Rn. Dodatkowo stanowi gwarancję szczelności samego układu pomiarowego (Instrukcja, 2014).

Dzięki tym trzem kanałom wykonywanych jest aż sześć algorytmów, a następnie za pomocą przeprowadzanej optymalizacji gęstości określone jest stężenie aktywności ²²²Rn, które w efekcie jest rezultatem około 50 milionów operacji arytmetycznych (Instrukcja, 2014).

Urządzenie AlphaGUARD® PQ 2000 PRO umożliwia wykonanie pomiarów w trybie dyfuzyjnym lub przepływowym. Ze względu na szybszą stabilizację

wyników pomiaru zdecydowano się na używanie trybu przepływowego z 10 minutowym skokiem czasu wraz z adapterem AlphaPUMP® o wydajności przepływu 1 dm³/min. Pomiar prowadzony był w trybie ciągłym, co oznacza, że w ciągu każdej godziny otrzymywano 6 wyników, z których każdy z nich stanowił średnią z 10 minut pomiaru.

6.4. Pomiary stężenia aktywności pochodnych ²²²Rn w powietrzu

Do pomiaru chwilowych wartości stężenia aktywności promieniotwórczych pochodnych radonu oraz energii potencjalnej ich promieniowania α w powietrzu wykorzystano wyprodukowany przez Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) przyrząd do pomiarów aktywnych - radiometr górniczy RGR-40.

Urządzenie wyposażone jest w detektor krzemowy z barierą powierzchniową oraz pompę, która zasysa powietrze przez filtr w czasie 5 minut. Filtr wykonany jest z włókniny szklanej o gęstości 50 g/m² i średnicy 20 mm. Wydajność pompowania wynosi 2 l/min i jest kontrolowana za pomocą rotametu. Pomiar odbywa się na podstawie cyklu Markowa. Opiera się on na dwóch interwałach czasowych cyklu pomiarowego: pomiędzy 1 a 4 minutą oraz pomiędzy 7 a 10 minutą, licząc od zakończenia pompowania powietrza. Następnie na podstawie otrzymanych dwóch liczb zliczeń, obliczane jest stężenie aktywności poszczególnych pochodnych radonu: ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb oraz ²¹⁴Bi i ²¹⁴Po łącznie. Sumaryczna aktywność promieniotwórczych pochodnych ²²²Rn jest odzwierciedlana za pomocą stężenia energii potencjalnej α .

Wyniki pomiarów są wyświetlane bezpośrednio po wykonanym pomiarze na wyświetlaczu urządzenia oraz zapisywane w pamięci mikroprocesora, skąd mogą być przesłane do komputera lub drukarki.

Wydajność detekcji wynosi $\leq 25\%$. Krótki czas pomiaru jak i niewielka wydajność przepływu powietrza przez filtr, skutkuje małą czułością, wynoszącą 1 μ J/m³. Z tego względu urządzenie to nie nadaje się do wykonywania pomiarów na otwartym terenie, czy też w mieszkaniach. Niemniej jednak możliwość wystąpienia zwiększonych wartości stężeń pochodnych radonu była motywacją do próby podjęcia się wykonania badań w tym zakresie w obu uzdrowiskach.

Pomiary stężenia pochodnych radonu i energii potencjalnej ich promieniowania α przeprowadzono w uzdrowiskach Łądek-Zdrój oraz Świeradów-Zdrój.

W uzdrowisku Łądek-Zdrój pomiarów dokonano:

- przed, w trakcie oraz po zabiegach inhalacji radonowych zbiorowych – w lokalizacji górnych dróg oddechowych, 20 cm od instalacji wypuszczającej powietrze wzbogacone w radon,
- przed oraz po kąpielach indywidualnej w wodach radonowych w wannach (kąpiel radonowo-siarczkowa) – na wysokości górnych dróg oddechowych kuracjuszy.

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój:

- w powietrzu wykorzystywanym do zabiegu inhalacji radonowej indywidualnej – bezpośrednio w ustniku,
- przed oraz po kąpielach indywidualnej w wodzie radonowej w wannach – nad lustrem wody, na wysokości górnych dróg oddechowych,
- w różnym czasie po napełnieniu wody do basenu – na wysokości górnych dróg oddechowych,
- w pomieszczeniu tężni radonowej – w miejscu usytuowania siedzeń dla kuracjuszy, na wysokości górnych dróg oddechowych.

Dzięki pomiarom wykonywanym w umiejscowieniu górnych dróg oddechowych w trakcie zabiegu, możliwe było wykonanie pomiarów w sposób możliwie najbardziej odzwierciedlający rzeczywiste stężenie aktywności pochodnych radonu oraz energii potencjalnej α , które mogą przyjąć kuracjusze.

6.5. Obliczanie dawek od radonu i jego pochodnych. Wartość współczynnika równowagi promieniotwórczej pomiędzy ^{222}Rn a jego pochodnymi

Radon jest gazem, którego część pomimo swojej chemicznej obojętności podczas inhalacji jest wchłaniana do organizmu poprzez krwioobieg płuc. Następnie rozprowadzany jest do tkanek i przenoszony do krwi żyłnej. Stamtąd dalej jest transportowany do krwi płucnej, z której część ponownie wraca do krwi tętniczej powtarzając cały cykl, a część jest wydychana. Szybkość zachodzącego transferu na linii krew-tkanki jest uzależniona od szybkości z jaką przepływa krew

i jej objętości, objętości tkanek i względnej rozpuszczalności radonu zarówno we krwi, jak i w tkankach (ICRP, 2017).

W celu oszacowania średnich wartości dawki promieniowania jonizującego, na przyjęcie których narażeni są kuracjusze w trakcie zabiegów w uzdrowiskach Łądek-Zdrój oraz Świeradów-Zdrój wzorowano się na schemacie liczenia dawek (ICRP, 2017) zalecanym przez International Commission on Radiological Protection (ICRP). W zaproponowanych wyliczeniach dawek efektywnych została uwzględniona również dawka efektywna pochodząca od krótkożyciowych pochodnych radonu.

W wyznaczonej przez ICRP dawce efektywnej od ^{222}Rn i jego pochodnych uwzględniony został współczynnik równowagi promieniotwórczej (F) pomiędzy ^{222}Rn i jego pochodnymi. ICRP nie podaje dokładnego sposobu wyliczenia w przypadków badań prowadzonych w uzdrowiskach. Do obliczeń dawek przyjętych przez kuracjuszy można więc założyć, że warunki zbliżone są do warunków panujących w miejscach pracy. W takim przypadku wartość F wynosi 0,4 a dawka efektywna w trakcie ekspozycji od ^{222}Rn i jego pochodnych wyniesie $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Gdyby jednak traktować pomieszczenia zabiegowe jako jaskinie turystyczne wartość F by się nie zmieniła i wynosiłaby nadal 0,4 natomiast dawka efektywna w trakcie ekspozycji od ^{222}Rn i jego pochodnych byłaby już równa $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Zgodnie z powyższym, dawki efektywne mogłyby zostać wyznaczone ze wzoru (4) jako iloczyn dawki efektywnej w trakcie ekspozycji, zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz czasu narażenia (czasu trwania zabiegu).

$$E = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C \cdot T \quad (4)$$

gdzie:

E – dawka efektywna, [mSv],

C – stężenie aktywności ^{222}Rn , [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$],

T – czas narażenia, [h].

Zakładając powyższe, przyjmuje się określoną wartość F. W trakcie prowadzonych badań w obu uzdrowiskach wykonywane były pomiary energii potencjalnej α . Z tego względu możliwe jest wyznaczenie dokładnej wartości F, która może zostać użyta do wyliczeń dawek efektywnych.

Należy się więc przyjrzeć czym tak naprawdę jest wartość F. Określa ona stan równowagi promieniotwórczej jaki panuje pomiędzy izotopem macierzystym (w tym wypadku ^{222}Rn) a jego krótkożyciowymi pochodnymi. Jest on więc definiowany jako stosunek pomiędzy zmierzonym (rzeczywistym) stężeniem energii potencjalnej α (PAE), a energią potencjalną α odpowiadającą pochodnym ^{222}Rn będącym w pełnej równowadze promieniotwórczej z izotopem macierzystym.

O ile w trakcie prowadzenia badań wartości PAE były mierzone, tak konieczne jest wyznaczenie wartości PAE pochodnych będących w równowadze z ^{222}Rn . Niezbędna w tym celu jest znajomość PAE przypadającej na jednostkę aktywności, którą w rozpatrywanych obliczeniach jest Bq (Tab. 3).

Tab. 3. Wartości PAE na jednostkę aktywności (Mamont-Cieśla, 2023)

Izotop	Energia potencjalna α na jednostkę aktywności [$\text{nJ}\cdot\text{Bq}^{-1}$]
^{222}Rn	1463
^{218}Po	0,58
^{214}Pb	2,86
^{214}Bi	2,12
^{214}Po	$0,293\cdot 10^{-6}$

Zakładając pełną równowagę promieniotwórczą pomiędzy radonem i jego krótkożyciowymi pochodnymi, wartość PAE, która odpowiada 1 Bq ^{222}Rn jest równa sumie PAE jego krótkożyciowych pochodnych (5).

$$\text{PAE}_w = 2,86 + 2,12 + 0,58 + 0,293 \cdot 10^{-6} = 5,56 \frac{\text{nJ}}{\text{Bq}} \quad (5)$$

gdzie:

PAE_w – energia potencjalna promieniowania α pochodnych ^{222}Rn odpowiadająca pełnej równowadze rzeczywistego stężenia aktywności ^{222}Rn , [$\text{nJ}\cdot\text{Bq}^{-1}$].

Należy również podkreślić, że wartość PEA/Bq w przypadku ^{214}Po jest pomijalnie mała w związku z czym może nie być nawet uwzględniana przy wyznaczaniu dawek.

Obliczenie wartości F możliwe jest więc ze wzoru (6):

$$F = \frac{\text{PAEC}_{rz}}{\text{PAE}_w \cdot C} \quad (6)$$

gdzie:

F – współczynnik równowagi promieniotwórczej, [-],

C – stężenie aktywności ^{222}Rn , [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$],

PAEC_{rz} – energia potencjalna promieniowania α odniesiona do objętości powietrza, [$\text{nJ} \cdot \text{m}^{-3}$],

PAE_w – energia potencjalna promieniowania α produktów rozpadu ^{222}Rn odpowiadająca pełnej równowadze rzeczywistego stężenia aktywności ^{222}Rn , [$\text{nJ} \cdot \text{Bq}^{-1}$].

Wykorzystywane podczas badań do pomiarów PAE urządzenie posiadało czułość detekcji $1 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$. Żaden z pomiarów nie wykazał przekroczenia tego poziomu. Oznacza to, że w trakcie zabiegów PAE jest mniejsze od $1 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$. Ze względu na brak możliwości dokładnego wyznaczenia PAE przyjęto więc do obliczeń $1 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$. Dodatkowo, zostało policzone (ICRP, 2017), że przy $F = 0,4$ dawka efektywna na ekspozycję od pochodnych radonu wynosi $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, można więc dla każdego wyznaczonego w trakcie badań rzeczywistego stężenia aktywności ^{222}Rn wyznaczyć F na zasadzie proporcjonalności. Zakładając wszystko co powyższe otrzymujemy wzór (7), który po uproszczeniu (8) został wykorzystany w celu obliczenia dawek efektywnych na przyjęcie których narażeni byli kuracjusze:

$$E = C_{\text{Rn}} \cdot T \cdot \left(1000k_{\text{defRn}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{RT-pow}} \cdot \frac{1}{24} + \frac{2,5 \cdot \text{PAEC}_{\text{rz}}}{\text{PAE}_w \cdot C_{\text{Rn}}} \cdot D_{\text{efpo}} \right) \quad (7)$$

czyli po uproszczeniu:

$$E = C_{\text{Rn}} \cdot T \cdot \left(\frac{1000k_{\text{defRn}} \cdot \lambda \cdot V_{\text{RT-pow}}}{24} + \frac{2,5 \cdot \text{PAEC}_{\text{rz}} \cdot D_{\text{efpo}}}{\text{PAE}_w \cdot C_{\text{Rn}}} \right) \quad (8)$$

gdzie:

E – dawka efektywna, [mSv],

C_{Rn} – stężenie aktywności ^{222}Rn , [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$],

T – czas narażenia (czas trwania zabiegu), [h],

k_{defRn} – współczynnik dawki efektywnej ^{222}Rn , [$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$],

λ – współczynnik przenikania z otoczenia do powietrza dróg oddechowych, [d^{-1}],

$V_{\text{RT-pow}}$ – średnia objętość powietrza w drogach oddechowych, [m^3],

PAEC_{rz} – energia potencjalna promieniowania α odniesiona do objętości powietrza, [$\text{nJ} \cdot \text{m}^{-3}$],

PAE_w – energia potencjalna promieniowania α produktów rozpadu ^{222}Rn odpowiadająca pełnej równowadze rzeczywistego stężenia aktywności ^{222}Rn , [$\text{nJ} \cdot \text{Bq}^{-1}$],

$D_{\text{ef}_{\text{po}}}$ – dawka skuteczna na ekspozycję od pochodnych ^{222}Rn , [$\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$].

Wartość współczynnika dawki efektywnej ($k_{\text{def}_{\text{Rn}}}$) dla ^{222}Rn wynosi $4,4\cdot 10^{-10}$ $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$, współczynnik przenikania z otoczenia do powietrza dróg oddechowych wynosi 2600 d^{-1} , średnia objętość powietrza w drogach oddechowych wynosi $3,858\cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, natomiast dawka skuteczna na ekspozycję od pochodnych ^{222}Rn w przypadku miejsc pracy (wewnątrz pomieszczeń) wynosi $1,2\cdot 10^{-5} \text{ mSv}\cdot\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$, a jaskiń turystycznych $1,5\cdot 10^{-5} \text{ mSv}\cdot\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ (ICRP, 2017).

7. Wyniki badań i ich analiza

7.1. Łądek Zdrój

W uzdrowisku Łądek-Zdrój przeprowadzone zostały pomiary w miejscu ujęcia leczniczej wody radonowej (zbiorniku), a następnie podczas zabiegów inhalacji oraz indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w wannach. Pomiary prowadzone były w dniach: 05.07.2021-09.07.2021, 31.08.2021-03.09.2021 i 22.08.2022-26.08.2022.

Pomiary w zbiorniku przeprowadzono w dniach 02.09.2021-03.09.2021 i 24.08.2022-26.08.2022, w trakcie których pobrano 20 próbek wód podziemnych oraz wykonano 10 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych radonowej wody leczniczej (PEW, pH, Eh, T).

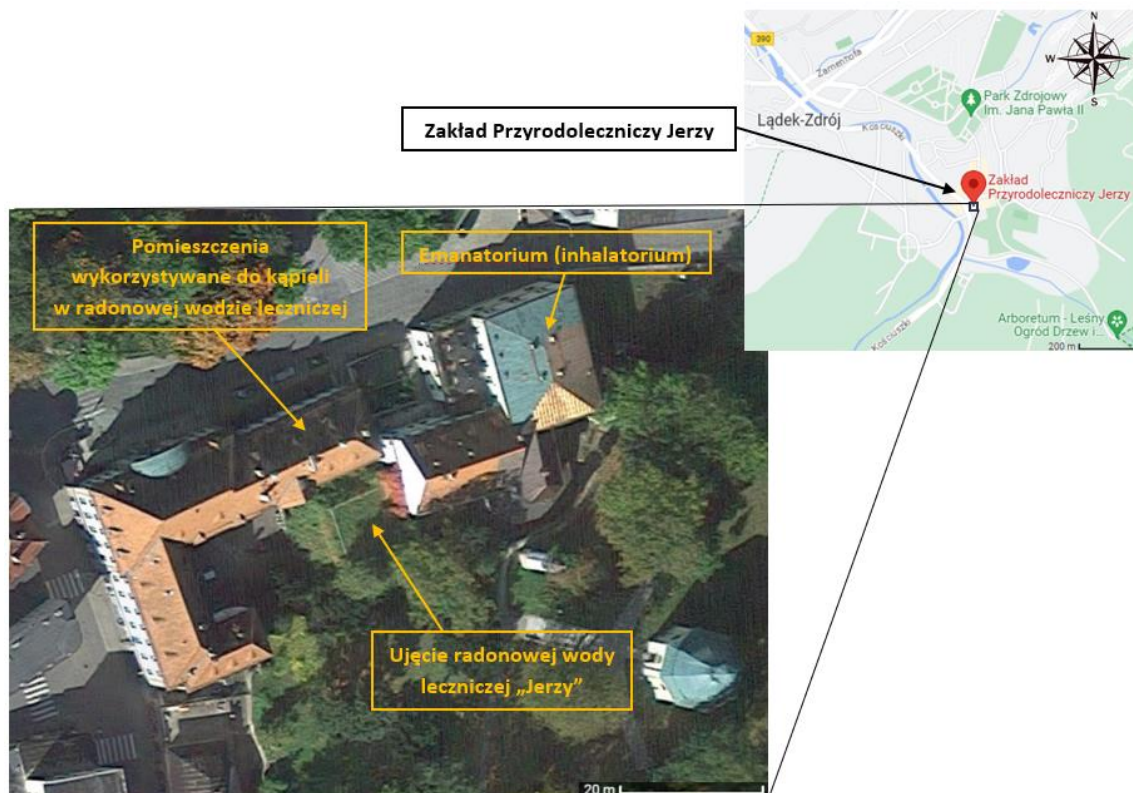
Podczas zabiegów indywidualnych kąpeli w trakcie badań prowadzonych w dniach 31.08.2021-03.09.2021 i 24.08.2022-26.08.2022 pobrano 92 próbki wody oraz wykonano 46 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych radonowej wody leczniczej i 46 pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu w pomieszczeniach zabiegowych oraz w zbiorniku kopaliny.

Podczas badań wykonano także pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu. Pomiary wykonane podczas zabiegów inhalacji (05.07.2021-09.07.2021 oraz 22.08.2022-23.08.2022) dostarczyły 868 wyników pomiarów 10-minutowych, a podczas zabiegów kąpeli indywidualnych (31.08.2021-03.09.2021 i 24.08.2022-26.08.2022) 752 wyników. Otrzymano także 23 wyniki z pomiarów wykonanych w powietrzu zgromadzonym ponad taflą wody w zbiorniku przy źródle Jerzy.

Podczas zabiegów polegających na inhalacji, przeprowadzono także 109 pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α .

Na poniższym rysunku (Rys. 6) przedstawiona została lokalizacja ujęcia radonowej wody leczniczej – źródła Jerzy oraz pomieszczeń emanatorium (inhalatorium), a także pomieszczeń służących do przeprowadzania

indywidualnych kąpiele w leczniczej wodzie radonowej (kąpiele radonowo-siarczkowe).



Rys. 6. Lokalizacja Zakładu Przyrodoleczniczego Jerzy, ujęcia radonowej wody leczniczej Jerzy oraz pomieszczeń zabiegowych radonoterapii w uzdrowisku Łądek-Zdrój (Mapy Google. 2023)

7.1.1. Kąpiel radonowo-siarczkowa

W uzdrowisku Łądek-Zdrój kąpiele radonowo-siarczkowe odbywają się w budynku zakładu przyrodoleczniczego Jerzy, do którego woda doprowadzana jest ze źródła Jerzy znajdującego się tuż obok budynku. Zabieg ten jest kąpielą indywidualną w wannie.

Przed każdym zabiegiem pomieszczenie, w którym znajduje się wanna kąpielowa było wietrzone przez pracownika obsługującego zabiegi. Następnie wanna była napełniana wodą radonowo-siarczkową. Do tak przygotowanego pomieszczenia zabiegowego zapraszany był kuracjusz, który odbywał kąpiel leczniczą trwającą 15 minut.

W trakcie zabiegu dokonywano pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn : w wodzie z ujęcia, w wodzie przed zabiegiem w wannie oraz w ścieku (po zabiegu w wannie). Za pomocą radiometru górniczego RGR-40 mierzono stężenie energii potencjalnej

promieniowania α oraz stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn w pomieszczeniu zabiegowym przed oraz po zabiegu, jak również w trakcie wietrzenia. Za pomocą multimetru wieloparametrowego WTW3430 sprawdzano podstawowe parametry fizyko-chemiczne (PEW, pH, Eh, T) w wodzie: w ujęciu, w wodzie przed zabiegiem oraz w ścieku (po zabiegu). W trybie ciągłym wykonywany był pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia kąpieli indywidualnej.

W dniach 02.09-03.09.2021 oraz 24-25.08.2022 zmierzono dwukrotnie podstawowe parametry fizyko-chemiczne wody w zbiorniku przy źródle Jerzy – od rana w trakcie pierwszych zabiegów oraz na koniec danego dnia, po przeprowadzeniu zaplanowanych zabiegów. W tym samym czasie pobierane były próbki wody w celu pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn (Tab. 4).

Tab. 4. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej w zbiorniku przy źródle Jerzy w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
02.09.2021	PZ	1279 \pm 43	212	9,091	-147,8	26,3
	KZ	1290 \pm 41	202	8,999	-118,5	26,5
03.09.2021	PZ	1280 \pm 45	200	9,020	-128,1	26,1
	KZ	1302 \pm 43	204	8,970	-131,4	26,0
24.08.2022	PZ	1170 \pm 28	199	9,000	-108,1	26,7
	KZ	1179 \pm 29	205	9,010	-111,5	26,9
25.08.2022	PZ	1133 \pm 30	210	9,050	-150,1	27,1
	KZ	1139 \pm 27	204	8,970	-135,7	26,9
26.08.2022	PZ	1181 \pm 29	206	8,880	-128,6	26,7
	KZ	1156 \pm 27	212	9,084	-132,2	26,4

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zarówno parametry fizyko-chemiczne, jak i stężenie aktywności ^{222}Rn można traktować jako parametry, które nie ulegają wahaniom w kontrolowanym przedziale czasu. W przypadku kluczowego ^{222}Rn wyniki pomiarów mieszczą się w granicach niepewności pomiarowych. Obliczone parametry statystyczne zostały przedstawione poniżej (Tab. 5).

Tab. 5. Parametry statystyczne dla zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zbiorniku przy źródle Jerzy w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr	Data	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	02-03.09.21	1288 ± 43	205	9,020	-131,5	26,2
	23-26.08.22	1160 ± 28	206	8,999	-127,7	26,8
	Całość	1211 ± 34	205	9,007	-129,2	26,6
Odchylenie standardowe	02-03.09.21	9,3	5	0,045	10,6	0,2
	23-26.08.22	18,6	4	0,064	14,3	0,2
	Całość	65	4	0,058	13,1	0,3
Mediana	02-03.09.21	1285 ± 29	203	9,010	-129,8	26,2
	23-26.08.22	1163 ± 29	206	9,005	-130,4	26,8
	Całość	1180 ± 29	205	9,005	-130,0	26,6

Dla pomiarów przeprowadzonych w dniach 02-03.09.2021 roku średnia arytmetyczna wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1288 ± 43 Bq/dm³, PEW 205 μS/cm, pH 9,020, Eh -131,5 mV i T 26,2°C. Odchylenie standardowe było równe dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 9,3 Bq/dm³, PEW 5, pH 0,045 μS/cm, Eh 10,6 mV i T 0,2°C. Środkowa wartość wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1285 ± 29 Bq/dm³, PEW 203 μS/cm, pH 9,010, Eh -129,8 mV i T 26,2°C.

W przypadku pomiarów przeprowadzonych w dniach 23-26.08.2022 roku średnia arytmetyczna wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1160 ± 28 Bq/dm³, PEW 206 μS/cm, pH 8,999, Eh -127,7 mV, T 26,8°C. Odchylenie standardowe było równe dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 18,6 Bq/dm³, PEW 4 μS/cm, pH 0,064, Eh 14,3 mV i T 0,2°C. Mediana wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1163 ± 29 Bq/dm³, PEW 206 μS/cm, pH 9,005, Eh -130,4 mV i T 26,8°C.

Dla wszystkich otrzymanych wyników stężenia aktywności ^{222}Rn średnia arytmetyczna wyniosła 1211 ± 34 Bq/dm³ natomiast dla: PEW 205 μS/cm, pH 9,007, Eh -129,2 mV i T 26,6°C. Odchylenie standardowe było równe w przypadku: stężenia aktywności ^{222}Rn 64,7 Bq/dm³, PEW 4 μS/cm, pH 0,058, Eh 13,1 mV i T 0,3°C. Wartość środkowa stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła 1180,0 ± 29,2 Bq/dm³, PEW 205 μS/cm, pH 9,005, Eh -130,0 mV i T 26,6°C.

Po pobraniu próbki kopaliny (ze zbiornika przy ujęciu Jerzy) kolejnym etapem był pobór próbek z tworzywa radonowego (lecniczej wody radonowej wykorzystywanej do zabiegu kąpeli) przed samym rozpoczęciem zabiegu.

Pobierana próbka tworzywa radonowego wykorzystywanego do zabiegu kąpeli, była mieszaniną zimnej wody pochodzącej bezpośrednio z pobliskiego zbiornika oraz wody podgrzewanej w kotłowni. Warty zaznaczenia jest również fakt, że ze względów techniczno-organizacyjnych pobranie próbki wody przed kąpielą kuracjusza odbywało się zanim kuracjusz zdejmie odzież i położy się w wannie. W tym momencie, chociaż bardzo rzadko, mogło dojść do sytuacji, w której dolewana była woda zimna lub ciepła, aby kuracjusz czuł się w niej komfortowo. Należy więc zaznaczyć, że podane w tabeli (Tab. 6) wartości stężenia aktywności ^{222}Rn odnoszą się do próbki wody nie uwzględniając ewentualnie dolanej, nieznannej ilości wody ciepłej lub zimnej. Próbka wody była pobierana także po zabiegu, ze ścieku – wodzie bezpośrednio po odbytych zabiegach.

Na początku oraz po zabiegu był również wykonywany pomiar stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu pomieszczenia kąpielowego.

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują wyraźnie, że transport i podgrzewanie wody wpływają na stężenie aktywności ^{222}Rn w wodzie z wanny przed odbyciem zabiegu przez kuracjusza. Stężenia te są znacznie mniejsze niż wyniki otrzymane podczas pomiarów bezpośrednio w zbiorniku przy źródle Jerzy. Dokładna analiza zmian na poszczególnych etapach została dokonana w rozdziale 7.1.3. „Analiza zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w lecniczej wodzie radonowej”. W tabeli (Tab. 7) przedstawiono opracowanie statystyczne wartości mierzonych parametrów.

Tab. 6. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych, stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej stosowanej do zabiegów kąpeli indywidualnych, przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) – wodzie po odbyciu zabiegu oraz energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu pomieszczenia zabiegowego przed i po zabiegu

Data	Nr zabiegu	Informacja na temat próbki	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne				Energia potencjalna α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
				PEW [uS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]	
31.08.2021	1	WP	598 ± 24	218,1	8,978	99,8	31,5	< 1
		Ś	587 ± 24	199,0	8,711	30,4	32,0	< 1
	2	WP	616 ± 24	205,1	8,850	95,3	33,5	< 1
		Ś	595 ± 23	204,5	8,888	81	33,1	< 1
	3	WP	602 ± 24	235,8	8,879	-8,4	30,9	< 1
		Ś	550 ± 22	203,0	8,823	-15,1	30,5	< 1
	4	WP	625 ± 22	204,5	8,780	30,1	34,3	< 1
		Ś	562 ± 22	205,8	8,876	67,9	33,9	< 1
01.09.2021	5	WP	611 ± 23	211,0	8,861	98,8	34,4	< 1
		Ś	589 ± 23	206,4	8,835	85,1	34,1	< 1
	6	WP	644 ± 24	208,4	8,868	72,6	35,7	< 1
		Ś	588 ± 23	201,3	8,862	91,6	35,1	< 1
	7	WP	643 ± 24	207,1	8,898	181,7	31,8	< 1
		Ś	600 ± 23	218,5	8,808	204,7	31,7	< 1
	8	WP	646 ± 24	196,5	8,980	100,2	33,1	< 1
		Ś	612 ± 23	201,0	8,921	116,9	32,8	< 1
02.09.2021	9	WP	578 ± 22	212,0	8,922	57,8	34,6	< 1
		Ś	524 ± 21	251,1	8,842	175,9	34,3	< 1
	10	WP	594 ± 22	197,4	8,830	90,3	35,4	< 1
		Ś	564 ± 21	196,8	8,879	95,8	35,1	< 1
	11	WP	599 ± 22	197,1	8,882	79,8	34,2	< 1
		Ś	578 ± 22	217,1	8,876	115,5	33,9	< 1
	12	WP	607 ± 23	217,4	8,904	188,8	34,7	< 1
		Ś	586 ± 22	225,5	8,928	213,2	34,6	< 1
13	WP	630 ± 23	220,0	8,925	218,4	36,4	< 1	
	Ś	605 ± 23	224,0	8,870	119,4	36,2	< 1	
03.09.202	14	WP	588 ± 21	195,5	8,835	52,1	34,4	< 1
		Ś	575 ± 21	215,0	8,916	67,9	33,8	< 1
	15	WP	663 ± 24	203,0	8,429	157,2	35,3	< 1
		Ś	589 ± 22	201,0	8,881	120,8	34,7	< 1
24.08.2022	16	WP	575 ± 18	195,9	9,253	-60,4	38,5	< 1
		Ś	532 ± 18	195,4	9,211	-21,5	38,3	< 1
	17	WP	658 ± 20	195,9	9,168	-3,4	36,9	< 1
		Ś	629 ± 21	196,7	9,020	10,2	36,3	< 1
18	WP	649 ± 20	201,1	8,850	48,1	37,1	< 1	

		Ś	623 ± 20	200,5	8,720	82,6	36,7	< 1
25.08.2022	19	WP	631 ± 22	194,4	9,458	48	35,2	< 1
		Ś	605 ± 22	195,0	9,476	99,4	34,9	< 1
	20	WP	652 ± 23	194,5	9,438	9,528	35,9	< 1
		Ś	636 ± 23	194,7	9,342	44,3	35,7	< 1
	21	WP	626 ± 23	195,7	9,426	51,5	39,5	< 1
		Ś	551 ± 17	195,5	9,263	49,6	39,2	< 1
26.08.202	22	WP	667 ± 22	195,3	9,411	-104,4	35,6	< 1
		Ś	641 ± 23	195,1	9,370	-102,6	34,9	< 1
	23	WP	651 ± 23	196,7	9,516	67,6	37,1	< 1
		Ś	623 ± 19	196,8	9,349	57,9	36,5	< 1

Tab. 7. Parametry statystyczne dla zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr		Data	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	WP	31.08-03.09.21	616 ± 23	209	8,855	102,1	34,0
	Ś	31.08-03.09.21	580 ± 22	211	8,861	106,7	33,7
	WP	24-26.08.22	639 ± 21	196	9,315	49,1	37,0
	Ś	24-26.08.22	605 ± 20	196	9,219	58,5	36,6
	WP	Całość	624 ± 23	204	9,015	83,7	35,0
	Ś		589 ± 21	206	8,986	90,0	34,7
Odchylenie standardowe	WP	31.08-03.09.21	24,0	11	0,125	58,0	1,5
	Ś	31.08-03.09.21	22,0	14	0,052	54,8	1,4
	WP	24-26.08.22	27,1	2	0,206	30,0	1,4
	Ś	24-26.08.22	38,1	2	0,227	32,0	1,4
	WP	Całość	27,3	10	0,270	56,0	2,0
	Ś		31,0	13	0,221	53,3	2,0
Mediana	WP	31.08-03.09.21	611 ± 23	207	8,879	95,3	34,4
	Ś	31.08-03.09.21	587 ± 22	206	8,876	95,8	33,9
	WP	24-26.08.22	650 ± 22	196	9,419	49,8	37,0
	Ś	24-26.08.22	623 ± 20	195	9,303	53,8	36,4
	WP	Całość	626 ± 23	201	8,904	72,6	35,2
	Ś		589 ± 22	201	8,881	85,1	34,7

W dniach pomiarowych 31.08.2021-03.09.2021 w wodzie przed wejściem kuracjusza, średnia arytmetyczna wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $616 \pm 23 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $209 \mu\text{S/cm}$, pH 8,855, Eh 102,1 mV i T $34,0^\circ\text{C}$. Po odbyciu zabiegu przez kuracjusza wartości w ścieku wyniosły natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $580 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $211 \mu\text{S/cm}$, pH 8,861, Eh 106,7 mV i T $33,7^\circ\text{C}$. Dla dni pomiarowych 24-26.08.2022 średnia arytmetyczna pomiarów wykonanych przed odbyciem zabiegu wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $638 \pm 21 \text{ Bq/dm}^3$. PEW $196 \mu\text{S/cm}$, pH 9,315, Eh 49,1 mV i T $37,0^\circ\text{C}$. W ścieku średnia stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $605 \pm 20 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $196 \mu\text{S/cm}$, pH 9,219, Eh 58,5 mV i T $36,6^\circ\text{C}$.

Średnia z obu serii pomiarowych w przypadku pomiarów w wodzie przed zabiegiem wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $624 \pm 23 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $204 \mu\text{S/cm}$, pH 9,015, Eh 83,7 mV i T $35,0^\circ\text{C}$. W ścieku natomiast była równa odpowiednio dla ^{222}Rn $589 \pm 21 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $206 \mu\text{S/cm}$, pH 8,986, Eh 90,0 mV i T $34,7^\circ\text{C}$.

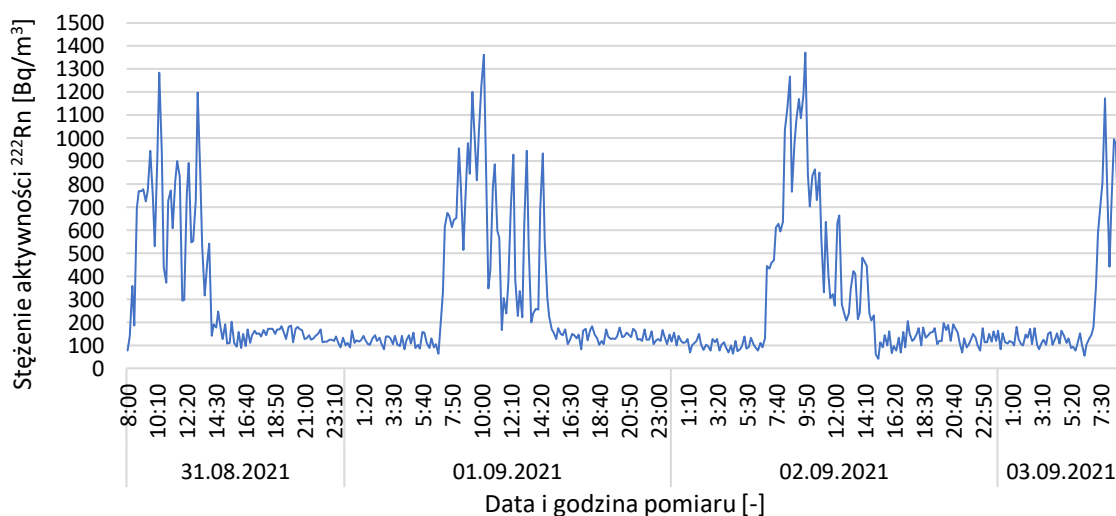
Odchylenie standardowe wyników uzyskanych z pomiarów przeprowadzonych w dniach 31.08.2021-03.09.2021 wyniosło w wodzie przed zabiegiem dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $23,9 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $11 \mu\text{S/cm}$, pH 0,125, Eh 58,0 mV i T $1,5^\circ\text{C}$. W tych samych dniach w ścieku (wodzie po zabiegu) wartości te były równe dla ^{222}Rn $22,0 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $14 \mu\text{S/cm}$, pH 0,052, Eh 54,8 mV i T $1,4^\circ\text{C}$. W przypadku pomiarów przeprowadzonych w dniach 24-26.08.2022 wartość odchylenia standardowego dla: stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $27,2 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $2 \mu\text{S/cm}$, pH 0,206, Eh 30,0 mV i T $1,4^\circ\text{C}$. W wodzie po zabiegu natomiast dla ^{222}Rn $38,2 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $2 \mu\text{S/cm}$, pH 0,227, Eh 32,0 mV i T $1,4^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe wszystkich otrzymanych wyników z obu serii pomiarowych wynosiło dla pomiarów w wodzie przed zabiegiem, w przypadku ^{222}Rn $27,3 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $10 \mu\text{S/cm}$, pH 0,270, Eh 56,0 mV i T $2,0^\circ\text{C}$. W ścieku wartości te były równe dla ^{222}Rn $31,0 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $13 \mu\text{S/cm}$, pH 0,221, Eh 53,3 mV i T $2,0^\circ\text{C}$.

Wartość środkowa pomiarów z dni 31.08.2021-03.09.2021 wyniosła w wodzie przed zabiegiem dla stężenia aktywności ^{222}Rn $611 \pm 23 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $207 \mu\text{S/cm}$, pH 8,879, Eh 95,3 mV i T $34,4^\circ\text{C}$. W ścieku wartości te wynosiły natomiast dla ^{222}Rn $587 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $206 \mu\text{S/cm}$, pH 8,876, Eh 95,8 mV i T $33,9^\circ\text{C}$.

W przypadku pomiarów przeprowadzonych w dniach 24-26.08.2022 mediana dla ^{222}Rn w wodzie przed zabiegiem była równa $650 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $196 \mu\text{S/cm}$, pH 9,419, Eh 49,8 mV i T $37,0^\circ\text{C}$. W ścieku dla ^{222}Rn $623 \pm 19 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $195 \mu\text{S/cm}$, pH 9,303, Eh 53,8 mV i T $36,4^\circ\text{C}$. Mediana wszystkich uzyskanych wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn przed zabiegiem wyniosła $626 \pm 23 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $201 \mu\text{S/cm}$, pH 8,904, Eh 72,6 mV i T $35,2^\circ\text{C}$. W ścieku dla ^{222}Rn była równa $589 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $201 \mu\text{S/cm}$, pH 8,881, Eh 85,1 mV i T $34,7^\circ\text{C}$.

Pomiar pochodnych radonu zarówno przed zabiegiem, jak i po zabiegu nie był możliwy. Czułość wykorzystywanego urządzenia, tj. radiometru górniczego RGR40 wynosi $1 \mu\text{J/m}^3$. Żaden z przeprowadzonych pomiarów nie wykazał jego przekroczenia w związku z czym nie był tym samym możliwy pomiar pochodnych radonu.

Przez wszystkie dni pomiarowe w trybie ciągłym dokonywany był także pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia z wanną (Rys. 7).



Rys. 7. Stężenie aktywności ^{222}Rn w pomieszczeniu zabiegowym wykorzystywanym do indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w dniach 31.08-03.09.2021 roku

Analizując przedstawione wyniki, nie można pominąć aspektu techniczno-organizacyjnego. Wszystkie pomiary prowadzone były z 10-minutowym skokiem czasu. Oznacza to, że stanowią średnią stężenia aktywności ^{222}Rn z każdych 10 minut. Przed każdym zabiegiem wanna jest przygotowywana przez pracownika (mycie i napełnianie wody). Następnie po wejściu, kuracusz zdejmuje odzież wierzchnią i zażywa leczniczej kąpeli. Po kąpeli woda (ściek) jest wypuszczana z wanny, a sala zabiegowa jest

wietrzona. W takiej sytuacji każdy wynik (średnia z 10 minut) może swoim zakresem obejmować zarówno moment wietrzenia pomieszczenia, nalewania wody, jak i samego zabiegu. Nie ma możliwości dokładnego przypisania osobnego wyniku dla pomiarów z czasu wietrzenia czy zażywania kąpeli przez kuracjusza.

Bez względu na to, wykresy obrazują to, o czym wspomniano powyżej. Widoczne są zarówno skoki wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu (momenty napełniania wanny, zażywania kąpeli) jak i spadki (momenty mycia wanny, wietrzenia sali). Poniżej (Tab. 8) zestawiono opracowanie parametrów statystycznych z pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w trakcie zabiegów.

Tab. 8. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (31.08.2021-03.09.2021) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)			
	31.08.2021 (8:00-15:00)	01.09.2021 (7:00-14:50)	02.09.2021 (7:00-14:50)	03.09.2021 (6:40-9:10)
Średnia arytmetyczna	650 ± 110	612 ± 98	603 ± 96	650 ± 110
Odchylenie standardowe	272	309	322	338
Mediana	728 ± 114	616 ± 89	521 ± 93	649 ± 114
Minimum	78 ± 68	167 ± 68	208 ± 54	128 ± 37
Maximum	1284 ± 238	1361 ± 163	1371 ± 163	1258 ± 149

Pierwszego dnia pomiarowego (31.08.2021) średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn w trakcie zabiegów (8:00-15:00) wyniosła 650 ± 110 Bq/m³, a odchylenie standardowe 272 Bq/m³. Wartość środkowa była równa 728 ± 114 Bq/m³, minimalna 78 ± 68 Bq/m³ oraz maksymalna 1284 ± 238 Bq/m³.

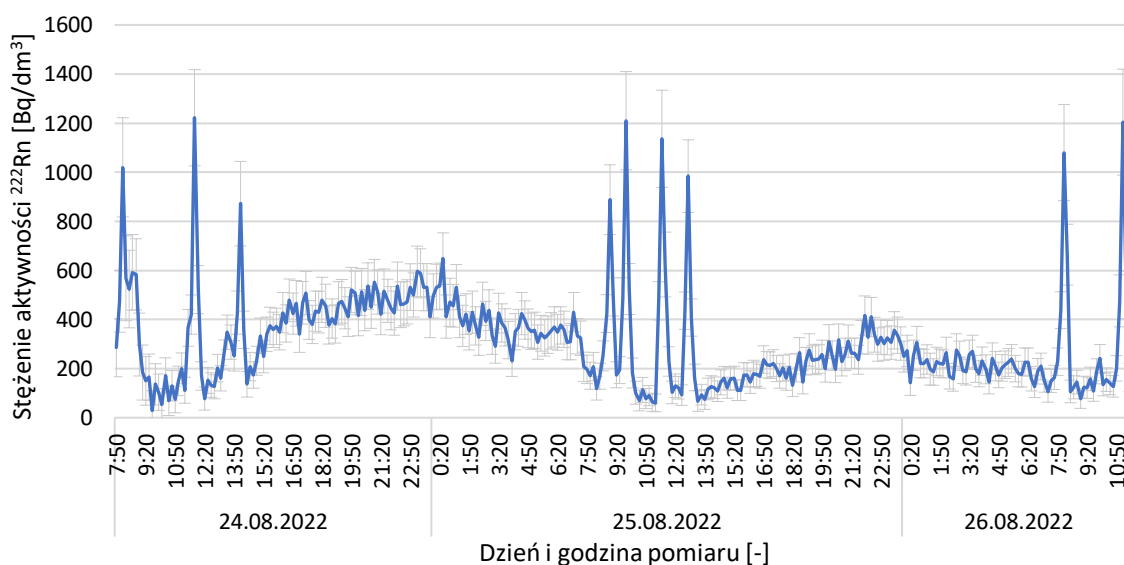
Kolejnego dnia wartości w godzinach zabiegów (7:00-14:50) były zbliżone, albowiem średnia wyniosła 612 ± 98 Bq/m³. Wartość odchylenia standardowego była równa 309 Bq/m³, a mediany 616 ± 89 Bq/m³. Ekstremalne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosły: minimum 167 ± 68 Bq/m³ oraz maksimum 1361 ± 163 Bq/m³.

Dnia 02.09.2021 roku średnia arytmetyczna w godzinach prowadzenia zabiegów (7:00-14:50) była równa 603 ± 96 Bq/m³, a odchylenie standardowe 322 Bq/m³. Mediana wyniosła 521 ± 93 Bq/m³, wartość minimalna 208 ± 54 Bq/m³, a maksymalna 1371 ± 163 Bq/m³.

Ostatniego dnia serii pomiarów (03.09.2021), prowadzono pomiary w godzinach zabiegów od 6:40, jednak jedynie do 9:10. Średnia arytmetyczna otrzymanych wyników wyniosła 650 ± 110 Bq/m³, odchylenie standardowe 338 Bq/m³, a mediana 649 ± 114 Bq/m³. Minimalna zarejestrowana wartość była równa 128 ± 37 Bq/m³, a maksymalna 1258 ± 149 Bq/m³.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w każdym z dni pomiarowych średnie wartości stężenia aktywności ²²²Rn, a więc także i dawki na przyjęcie których narażeni byli kuracjusze, były zbliżone.

W kolejnych dniach pomiarowych (24-26.08.2022) zmiany stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu wyglądały porównywalnie do uzyskanych w trakcie pomiarów w dniach 31.08-03.09.2021 (Rys. 8).



Rys. 8. Stężenie aktywności ²²²Rn w pomieszczeniu zabiegowym wykorzystywanym do indywidualnych kąpiei radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w dniach 24-26.08.2022 roku

Analogicznie do wcześniej przeprowadzonych pomiarów, widoczne są wyraźne zmiany stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu na skutek napełniania wanny leczniczą wodą radonową i zażywania kąpiei przez kuracjuszy (zwiększenie stężenia), jak i przygotowywania wanny do kolejnego zabiegu i wietrzenia sali (spadki stężenia). W porównaniu z poprzednią serią pomiarową, ze względu

na możliwości organizacyjne, w sali zabiegowej przeprowadzenie zabiegów odbywało się w sposób bardziej zaplanowany. Po zabiegach pomieszczenie było zwykle dłużej wietrzone, a kuracjusze zapraszani byli na zabieg na prośbę autora. Umożliwiło to lepsze obserwacje zmian stężenia aktywności ^{222}Rn . Zebrane wyniki stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu zostały ponownie opracowane statystycznie, a wyniki tego opracowania przedstawiono poniżej (Tab. 9).

Tab. 9. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (24.08.2022-26.08.2022) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpiele radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)		
	24.08.2022 (8:00-8:20, 11:40-12:00, 14:00-14:20)	25.08.2022 (8:50-9:10, 9:40-10:00, 11:30-11:50, 12:50-13:10)	26.08.2022 (8:00-8:20, 10:50-11:10)
Średnia arytmetyczna	692 ± 135	674 ± 116	677 ± 128
Odchylenie standardowe	332	284	357
Mediana	522 ± 98	508 ± 91	570 ± 115
Minimum	358 ± 76	408 ± 76	201 ± 52
Maximum	1222 ± 196	1210 ± 200	1204 ± 216

Dnia 24.08.2022 roku pomieszczenie, w którym dokonywano pomiarów, wykorzystane było jedynie trzykrotnie w celu przeprowadzenia zabiegu. Wyraźnie odzwierciedla się to na wykresie, w godzinach około 8:10, 11:50 i 14:10, gdzie wartości stężenia są największe. Sam zabieg trwa 15 minut, jednak kuracjusz w pomieszczeniu przebywa około dwa razy dłużej ze względu na konieczność zdjęcia odzieży przed zabiegiem oraz wytarcia ciała i założenia odzieży po zabiegu. Przy założeniu pomiarów 30 minutowych, z którego środkowy odpowiada największemu odnotowanemu stężeniu, średnia wartość stężenia aktywności ^{222}Rn podczas przebywania kuracjusza w pomieszczeniu zabiegowym wynosi $692 \pm 135 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 332 Bq/m^3 . Wartość minimalna wyniosła $358 \pm 76 \text{ Bq/m}^3$, środkowa $522 \pm 98 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $1222 \pm 196 \text{ Bq/m}^3$.

Kolejnego dnia pomiarowego pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn prowadzony był nadal w trybie ciągłym i tym razem rejestrował stężenie podczas czterech zabiegów, co również odzwierciedlają piki na wykresie o godzinie 9:00, 9:50, 11:40 i 13:00. Analogicznie do wyliczenia średniej poprzedniego dnia, według tego samego schematu postąpiono i tym razem. Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w podczas czterech zabiegów wyniosło $674 \pm 116 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 284 Bq/m^3 . Wartość minimalna była równa $408 \pm 76 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $1210 \pm 200 \text{ Bq/m}^3$. Wartość środkowa wyniosła $508 \pm 91 \text{ Bq/m}^3$.

Ostatniego dnia (26.08.2022 roku) z tej serii pomiarowej rejestracja stężenia aktywności ^{222}Rn prowadzona była do godziny 11:40 i w tym czasie pomiar dokonany był w trakcie trwania dwóch zabiegów, co tak jak w poprzednich dniach odzwierciedlają skoki stężenia aktywności ^{222}Rn o godzinie 8:10 i 11:10. Średnia wartość pomiarów wyniosła w czasie zabiegów $677 \pm 128 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 357 Bq/m^3 . Wartość minimalna i maksymalna wyniosły odpowiednio $201 \pm 52 \text{ Bq/m}^3$ i $1204 \pm 216 \text{ Bq/m}^3$, natomiast wartość środkowa $570 \pm 115 \text{ Bq/m}^3$.

Na podstawie otrzymanych wyników z drugiej serii pomiarów można stwierdzić, że w każdym z dni pomiarowych średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn były zbliżone. Były one jednocześnie niewiele większe od wartości średnich uzyskanych podczas pierwszej serii pomiarów, jednak należy pamiętać o różnicy w sposobie liczenia średnich wartości. W przypadku pierwszej serii, gdzie zabiegów przeprowadzonych było więcej, średnia wartość liczona była na podstawie pomiarów z całego dnia pomiarowego w zakresie godzin, w których odbywały się zabiegi. W przypadku drugiej serii pomiarów średnie były natomiast liczone na podstawie przybliżonego czasu przebywania kuracjusza w pomieszczeniu zabiegowym, a tym samym przybliżonego czasu narażenia na dawki promieniowania jonizującego pochodzące od ^{222}Rn . Niewielkie różnice są więc zapewne spowodowane tym, że podczas pierwszej serii do wyliczenia średniej brane były również pod uwagę ewentualne większe przerwy po zabiegach oraz czasy wietrzenia.

7.1.2. Emanatorium (inhalatorium)

W uzdrowisku Łądek-Zdrój sala, w której przeprowadzane są zabiegi polegające na wdychaniu powietrza wzbogaconego w ^{222}Rn nazywana jest emanatorium. Nazwa sugeruje uwalnianie radonu z jakiegoś źródła, podczas gdy radon jest dostarczany w postaci gotowego tworzywa radonowego, jakim jest powietrze wzbogacone w ^{222}Rn bezpośrednio pompowane do pomieszczenia. Dodatkowo kuracjusze w tym pomieszczeniu wdychają to wzbogacone w radon powietrze, a więc inhalują się tym tworzywem radonowym. Z tego względu pomieszczenie służące do inhalacji powinno nosić nazwę inhalatorium. W uzdrowisku Łądek-Zdrój kuracjusze wdychają powietrze dostarczane z nad lustra wody ze zbiornika pobliskiego ujęcia z leczniczą wodą radonową – źródła Jerzy. Kuracjusze znajdują się w pomieszczeniu, w którym w okolicy ich górnych dróg oddechowych wydmuchiwane jest to powietrze wzbogacone w radon za pomocą wielu wylotów przewodu doprowadzającego powietrze ze zbiornika pośredniego w sąsiednim pomieszczeniu.

Przeprowadzając pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i energii potencjalnej promieniowania α za pomocą radiometru górniczego RGR-40 starano się wykonywać je w taki sposób, aby reprezentowały stan przed lub w trakcie zabiegu (Tab. 10), w trakcie wietrzenia (Tab. 11) lub przed pierwszym zabiegiem danego dnia (Tab. 12).

Tab. 10. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium w trakcie zabiegów w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Data	Godz. rozpoczęcia pomiaru	Energia potencjalna α [μ]/m ³]
05.07.2021	08:55	< 1
	09:20	< 1
	09:54	< 1
	10:15	< 1
	10:36	< 1
	11:10	< 1
	11:29	< 1
	11:49	< 1
	12:10	< 1
	12:44	< 1
	13:34	< 1
	13:54	< 1
	14:15	< 1
06.07.2021	08:54	< 1
	09:19	< 1
	09:52	< 1
	10:13	< 1
	10:33	< 1
	11:06	< 1
	11:25	< 1
	11:51	< 1
	12:14	< 1
	13:59	< 1
	14:19	< 1
07.07.2021	09:07	< 1
	09:23	< 1
	09:44	< 1
	10:17	< 1
	10:37	< 1
	11:00	< 1
	11:33	< 1
	11:52	< 1
	12:15	< 1
	13:31	< 1
	13:56	< 1
	14:21	< 1

08.07.2021	08:58	< 1
	09:20	< 1
	09:55	< 1
	12:44	< 1
	13:37	< 1
	13:59	< 1
09.07.2021	09:06	< 1
	09:21	< 1
	09:41	< 1
	10:37	< 1
	11:37	< 1
	12:14	< 1
	12:56	< 1
	13:31	< 1
22.08.2022	09:49	< 1
	10:26	< 1
	10:51	< 1
	11:15	< 1
23.08.2022	07:43	< 1
	08:19	< 1
	08:36	< 1
	08:52	< 1
	09:46	< 1
	10:08	< 1
	11:05	< 1
	11:40	< 1

Wszystkie pomiary, niezależnie od tego na jakim etapie były wykonane, nie przekroczyły dolnego limitu detekcji urządzenia RGR-40 wynoszącego $1 \mu\text{J}/\text{m}^3$. Tym samym nie był możliwy dokładny pomiar wartości stężeń aktywności pochodnych ^{222}Rn . W związku z powyższym również spodziewano się, że wyniki pomiarów w trakcie wietrzenia (Tab. 11) będą poniżej czułości detektora.

Tab. 11. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium w trakcie wietrzenia pomieszczenia w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Data	Godz. rozpoczęcia pomiaru	Energia potencjalna α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
05.07.2021	09:37	< 1
	10:53	< 1
	12:27	< 1
	13:02	< 1
	13:18	< 1
	14:33	< 1
06.07.2021	09:36	< 1
	10:49	< 1
	12:30	< 1
	12:46	< 1
	13:08	< 1
	13:26	< 1
	13:43	< 1
	14:40	< 1
07.07.2021	10:02	< 1
	11:17	< 1
	12:39	< 1
	12:56	< 1
	13:12	< 1
	14:38	< 1
08.07.2021	09:37	< 1
	13:04	< 1
	13:22	< 1
	14:20	< 1
09.07.2021	09:59	< 1
	10:22	< 1
	10:54	< 1
	11:18	< 1
	11:53	< 1
	12:35	< 1
	13:13	< 1
	13:47	< 1
22.08.2022	10:02	< 1
	10:40	< 1
	11:00	< 1
23.08.2022	08:04	< 1
	09:10	< 1
	10:32	< 1
	10:48	< 1
	12:04	< 1

Wyniki podczas wietrzenia sali również wykazały, jak można było się spodziewać po otrzymanych wynikach w trakcie zabiegów, że zmierzone stężenie energii potencjalnej promieniowania α jest poniżej dolnego limitu detekcji urządzenia RGR-40. Pomiary wykonywano bezpośrednio po rozpoczęciu wietrzenia, w trakcie jego trwania lub na sam koniec wietrzenia sali. Uzyskane wyniki miały pokazać tempo w jakim maleje stężenie aktywności pochodnych radonu po zabiegu w trakcie wietrzenia i stan na różnych jego etapach. Ze względu na fakt, że stężenie energii potencjalnej promieniowania α w trakcie zabiegów nie przekraczało LLD, również oczekiwanymi wynikami po zabiegu były wyniki poniżej LLD. Z tego jednak powodu nie ma możliwości przy pomocy radiometru górniczego RGR-40 wykonania dokładnych pomiarów zarówno stężenia energii potencjalnej promieniowania α , stężenia aktywności pochodnych radonu, jak i szybkości zmian na skutek przeprowadzonego wietrzenia.

Wykonane zostały również pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn przed pierwszym zabiegiem danego dnia pomiarowego (Tab. 12).

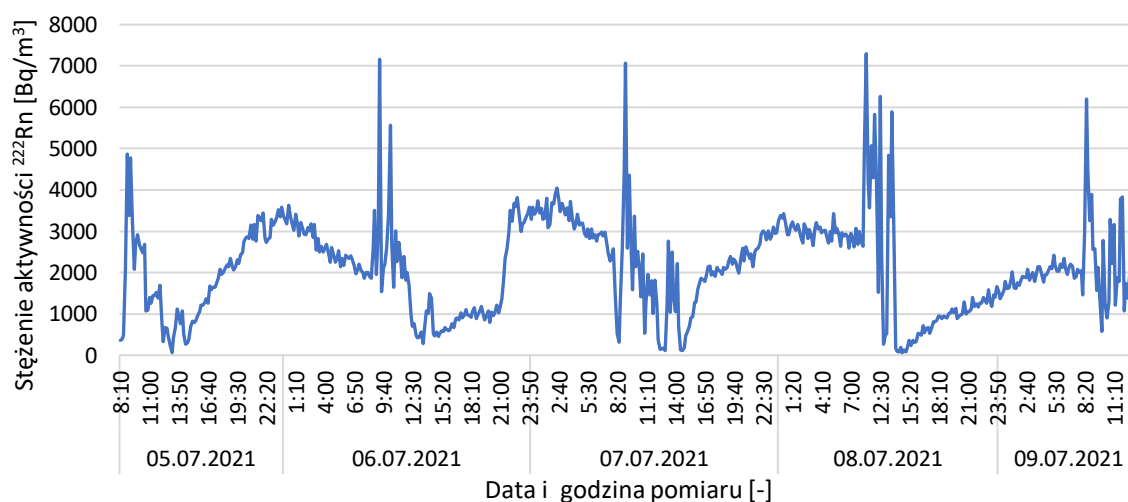
Tab. 12. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium przed pierwszym porannym zabiegiem w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Data	Energia potencjalna α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
05.07.2021	< 1
06.07.2021	< 1
07.07.2021	< 1
08.07.2021	< 1
09.07.2021	< 1
22.08.2022	< 1
23.08.2022	< 1

Wykonanie pomiarów przed pierwszym zabiegiem danego dnia miało przedstawiać tło w sali zabiegowej. Jednak również i wyniki tych pomiarów okazały się mniejsze niż LLD radiometru, przez co również nie było możliwe dokładne zbadanie tła, jak i stężenia aktywności pochodnych radonu i stężenia energii potencjalnej promieniowania α .

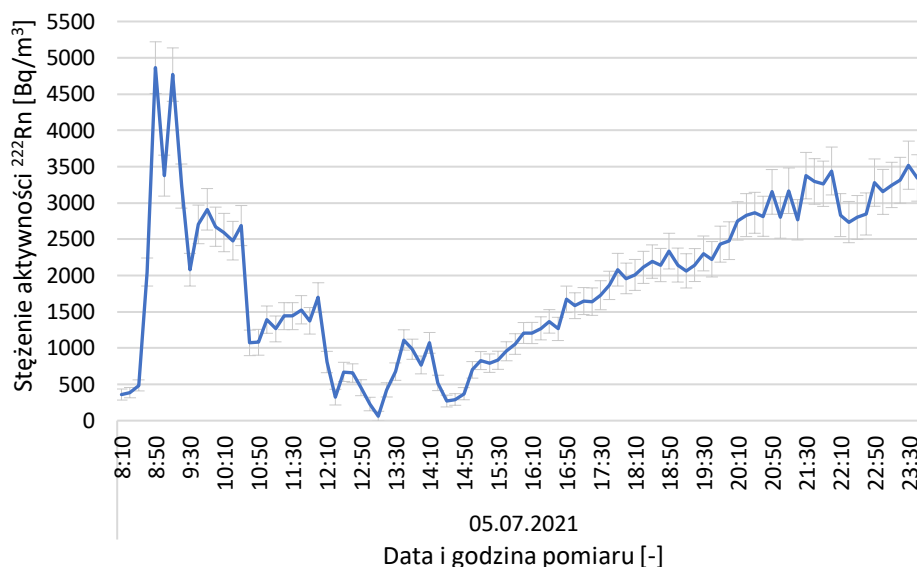
W inhalatorium (nazywanym przez pracowników uzdrowiska i kuracjuszy emanatorium) w trakcie zabiegów wykonywano również ciągły pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn . Każdy z otrzymanych wyników stanowi średnią wartość z 10 minut pracy urządzenia AlphaGUARD®.

Pierwsza seria pomiarów rozpoczęła się 05.07.2021 i trwała 5 dni, do 09.07.2021 roku (Rys. 9).



Rys. 9. Stężenie aktywności ^{222}Rn w kolejnych dniach pomiarowych (05-09.07.2021) w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Analizując jednocześnie wszystkie dni pomiarowe, interesujące wydaje się zanotowanie zwiększonego stężenia aktywności ^{222}Rn w trakcie godzin zabiegowych, a jednocześnie wysokiego stężenia aktywności ^{222}Rn po zabiegach i w nocy. Poniżej przedstawiono opracowanie otrzymanych wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, rozpoczynając od 05.07.2021 roku, w którym pomiary rozpoczęto po godzinie 8:00 (Rys. 10) i kontynuowano w trybie ciągłym przez kolejne dni.



Rys. 10. Stężenie aktywności ²²²Rn w dniu 05.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Ze względu na wykonywany pomiar w trybie ciągłym ze skokiem 10-minutowym, należy ponownie wziąć pod uwagę organizację przeprowadzania zabiegów w uzdrowisku. Każdy z zabiegów trwa 15 minut i po każdym z nich następuje wietrzenie pomieszczenia. Wynik pomiaru może więc obejmować całym swym zakresem zabieg, ale może być też wynikiem pomiaru częściowo z czasu trwania zabiegu, a częściowo z czasu wietrzenia pomieszczenia. Niemniej jednak warto zwrócić uwagę na skoki stężenia aktywności ²²²Rn. Są one spowodowane właśnie wietrzeniem inhalatorium. W momencie otwarcia okien i drzwi radon przedostaje się do sąsiednich pomieszczeń lub wydostaje poza budynek. Ponowne zamknięcie okien i drzwi i rozpoczęcie dostarczania powietrza wzbogaconego w radon, powoduje ponowny skok stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu. W tym momencie warto także podkreślić, że kuracjusze w trakcie zabiegów nie inhalują powietrza wzbogaconego w radon bezpośrednio na przykład przez ustnik. Ich górne drogi oddechowe znajdują się w odległości około 20 cm od dyszy, przez którą wypuszczane jest powietrze wzbogacone w radon. W trakcie wypuszczania miesza się ono z powietrzem z sali zabiegowej, przez co zmniejsza się ostatecznie stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu inhalowanym przez kuracjuszy. Urządzenie zasysało powietrze z wysokości górnych dróg oddechowych kuracjusza podczas zabiegu.

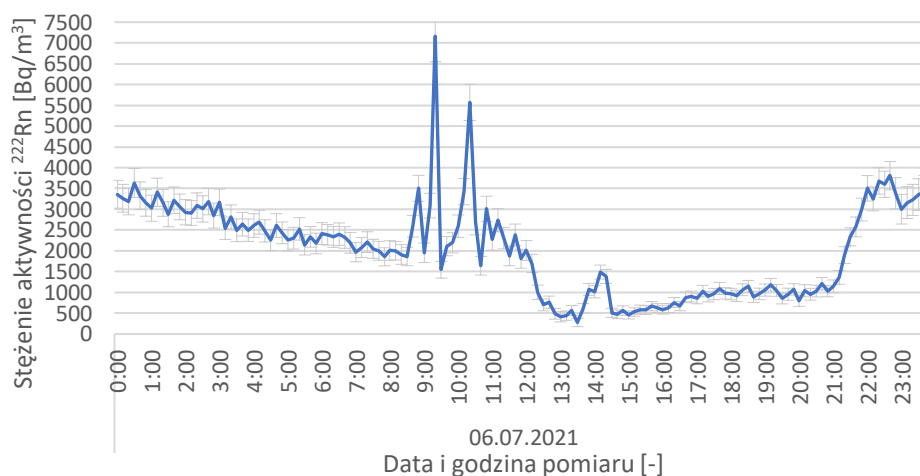
Pierwszego dnia pomiary rozpoczęto o godzinie 8:10, po czym kontynuowano je w trybie ciągłym przez kolejne dni. Po rozpoczęciu rejestracji wyników nastąpił szybki wzrost stężenia aktywności ²²²Rn, które z czasem pomimo widocznych

skoków na skutek przeprowadzanych zabiegów malało. Od momentu zakończenia zabiegów widoczny jest ponowny, stały wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn , które utrzymywało się przez całą noc.

Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w godzinach zabiegowych 8:30-12:20 i 13:40-14:20 wyniosła $1889 \pm 207 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 1154 Bq/m^3 . Wartość środkowa była równa $1440 \pm 186 \text{ Bq/m}^3$, a wartości ekstremalne minimum i maksimum odpowiednio $324 \pm 108 \text{ Bq/m}^3$ i $4864 \pm 356 \text{ Bq/m}^3$.

Ciekawym i wartym zaznaczenia jest wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn po zakończeniu samych zabiegów. Od godziny około 14:30 stężenie zaczyna rosnać i około północy osiąga już wartość ponad 3300 Bq/m^3 . Wpływ na zarejestrowany wzrost miało zamknięcie okien i drzwi, brak ruchu kuracjuszy i pracowników i zasysanie powietrza z gruntu.

Od północy stężenie aktywności ^{222}Rn zaczyna jednak stopniowo maleć (Rys. 11) aż do chwili, w której rozpoczynają się zabiegi.

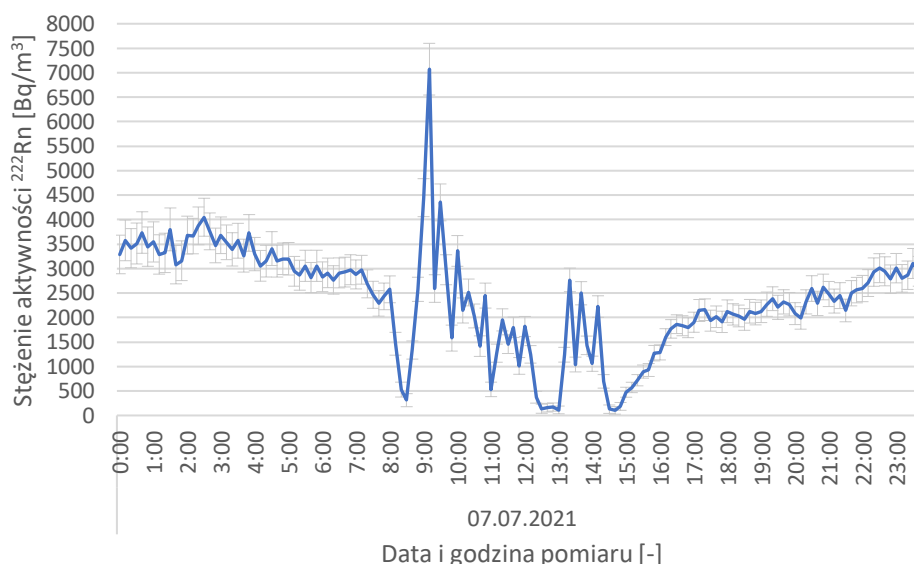


Rys. 11. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 06.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

W chwili rozpoczęcia kolejnego dnia zabiegowego, stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w sali zabiegowej wynosiło blisko 2000 Bq/m^3 . Rozpoczęcie zabiegów spowodowało wzrost stężenia na skutek dostarczenia powietrza wzbogaconego w ten izotop. W trakcie serii zabiegów ponownie można zaobserwować skoki stężenia spowodowane otwieraniem i zamykaniem okien i drzwi, jak i przemieszczaniem się kuracjuszy i pracowników. Maksymalne odnotowane tego dnia stężenie aktywności ^{222}Rn wyniosło $7160 \pm 612 \text{ Bq/m}^3$, a minimalne

$276 \pm 100 \text{ Bq/m}^3$. Wartość minimalna została zarejestrowana po długim wietrzeniu pomieszczenia. Biorąc pod uwagę główny przedział czasowy, w którym przeprowadzane były zabiegi (8:30-12:20 i 13:40-14:20), średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $2365 \pm 253 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 1312 Bq/m^3 . Mediana wyników była równa $2112 \pm 231 \text{ Bq/m}^3$, natomiast zarejestrowane minimum wyniosło $616 \pm 115 \text{ Bq/m}^3$, a maksimum $7160 \pm 612 \text{ Bq/m}^3$.

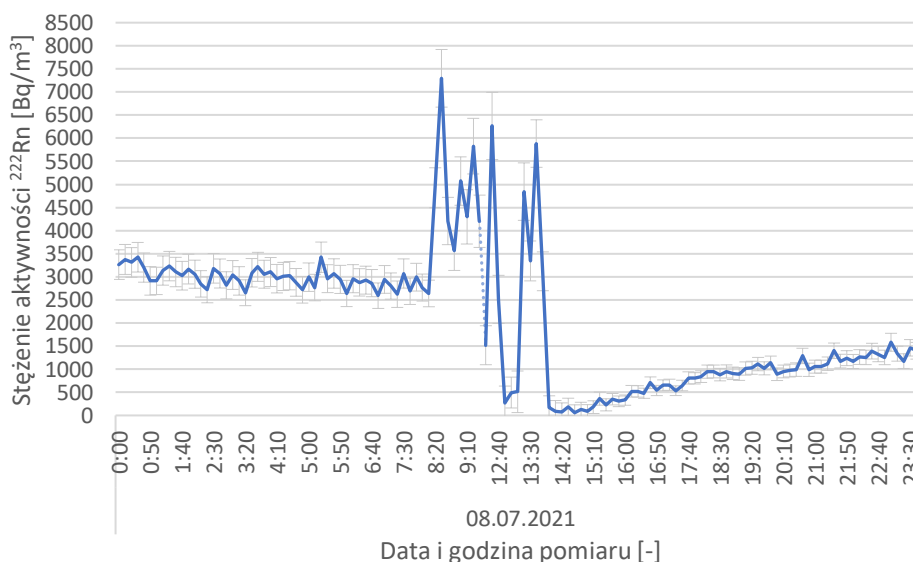
Także i tego dnia, po zakończonym dniu zabiegowym stężenie aktywności ^{222}Rn rosło do wartości około 3500 Bq/m^3 i utrzymywało się przez całą noc aż do godziny około 8:10, w którym zostały otworzone okno i drzwi. Kolejnego dnia zabiegi rozpoczęto ponownie około godziny 8:30 (Rys. 12).



Rys. 12. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 07.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Przed rozpoczęciem zabiegu pomieszczenie zostało wywietrzone poprzez otwarcie okien i drzwi, co odzwierciedla nagły spadek stężenia aktywności ^{222}Rn w tych godzinach. Następne skoki stężenia są wynikiem przeprowadzanych zabiegów oraz wietrzenia po ich przeprowadzeniu. Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w godzinach zabiegowych (8:30-12:20 i 13:10-14:20) wyniosło $2018 \pm 228 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 1362 Bq/m^3 . Mediana otrzymanych wyników to $1808 \pm 208 \text{ Bq/m}^3$, natomiast wartość minimalna $312 \pm 133 \text{ Bq/m}^3$ i maksymalna $7072 \pm 528 \text{ Bq/m}^3$.

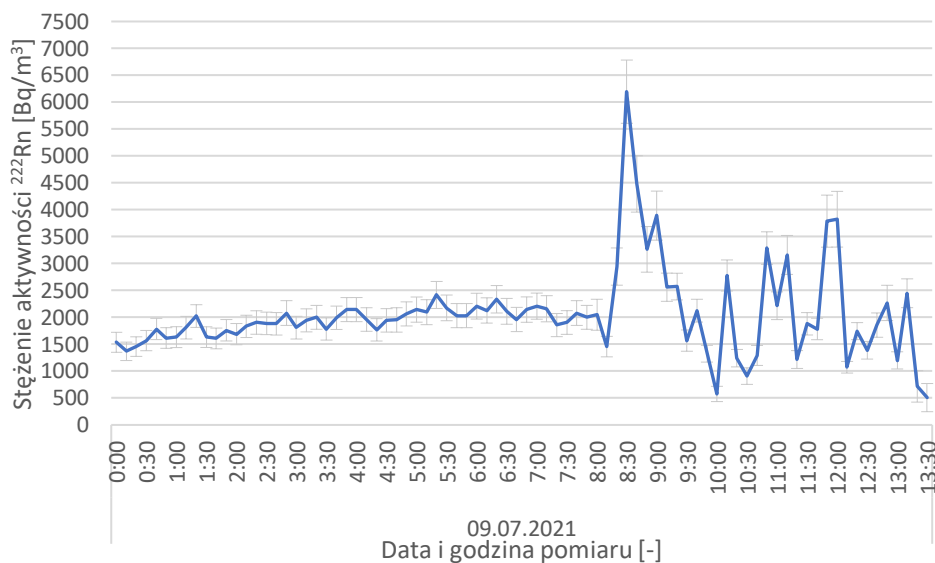
Również i tego dnia po ostatnim wietrzeniu sali widoczny jest wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn do poziomu 3000 Bq/m^3 , momentami 3500 Bq/m^3 . Utrzymuje się ono aż do pierwszych zabiegów kolejnego dnia, które rozpoczęto bez wcześniejszego wietrzenia sali około godziny 8:10 (Rys. 13).



Rys. 13. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 08.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Podobnie jak we wcześniejszych dniach pomiarowych, również i tego dnia widoczne są wyraźne skoki stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu. Spowodowane tak jak poprzednio organizacją zabiegów (zabieg-wietrzenie). Tego dnia, ze względu na przeprowadzanie innych pomiarów, nie uwzględniono wyników z godzin 9:30-12:10. Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w godzinach, w których odbywały się zabiegi z największą intensywnością (8:30-9:30 i 13:20-13:50) wyniosło $3858 \pm 514 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 2039 Bq/m^3 . Wartość mediany wyniosła $4205 \pm 539 \text{ Bq/m}^3$, wartość minimalna $274 \pm 362 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $7296 \pm 624 \text{ Bq/m}^3$.

Dnia 08.07.2021 roku, podobnie do wcześniejszych pomiarów, widoczny jest wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu inhalatorium po zakończonych zabiegach. Stężenie osiągało około $1500\text{-}2000 \text{ Bq/m}^3$, nad ranem blisko 2500 Bq/m^3 . Dopiero rozpoczęcie pomiarów kolejnego dnia spowodowało zarejestrowanie wyższego stężenia aktywności ^{222}Rn (Rys. 14).



Rys. 14. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 09.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w czasie zabiegów (8:20-13:10) wyniosło $2362 \pm 275 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 1219 Bq/m^3 . Mediana wartości była równa $2170 \pm 235 \text{ Bq/m}^3$, a wartość minimalna $576 \pm 142 \text{ Bq/m}^3$ i maksymalna $6195 \pm 588 \text{ Bq/m}^3$.

Parametry statystyczne wyników z pierwszej serii pomiarów w czasie zabiegów w inhalatorium zostały zebrane w poniższej tabeli (Tab. 13).

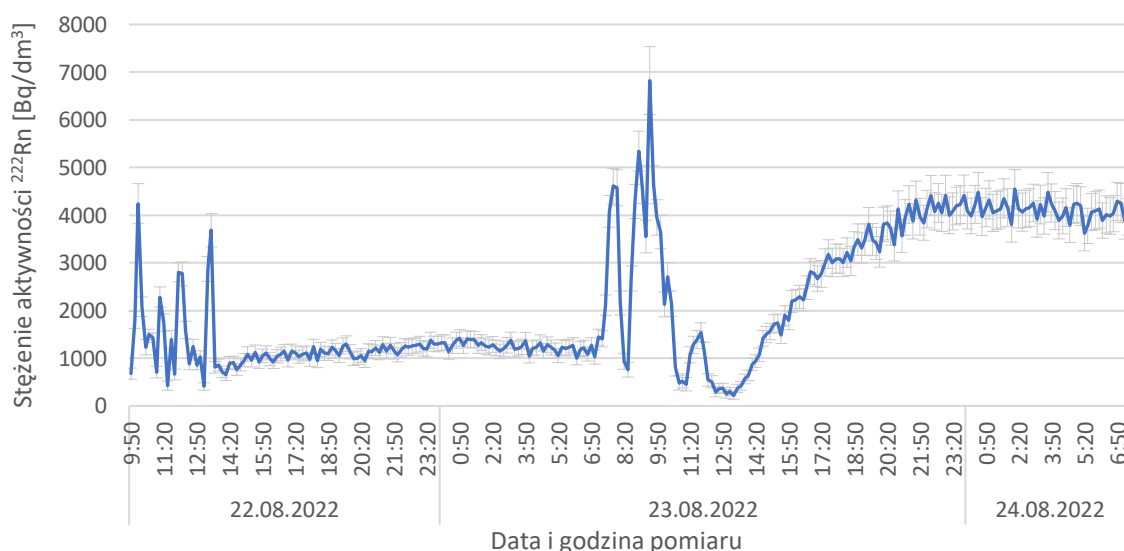
Tab. 13. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (05-09.07.2021) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)				
	05.07.2021 (8:30-12:20, 13:40-14:20)	06.07.2021 (8:30-12:20, 13:40-14:20)	07.07.2021 (8:30-12:20, 13:10-14:20)	08.07.2021 (8:30-9:30, 13:20-13:50)	09.07.2021 (8:20-13:10)
Średnia arytmetyczna	1889 ± 207	2365 ± 253	2018 ± 228	3858 ± 514	2362 ± 275
Odchylenie standardowe	1154	1312	1362	2039	1219
Mediana	1440 ± 186	2112 ± 231	1808 ± 208	4205 ± 539	2170 ± 235
Minimum	324 ± 108	616 ± 115	312 ± 133	274 ± 362	576 ± 142
Maximum	4864 ± 356	7160 ± 612	7072 ± 528	7296 ± 624	6195 ± 588

Podsumowując pierwszą serię pomiarów można stwierdzić, że średnie stężenie aktywności ^{222}Rn wahało się od $1889 \pm 207 \text{ Bq/m}^3$ do $2365 \pm 253 \text{ Bq/m}^3$

z wyjątkiem dnia 08.07.2021, kiedy wyniosło $3858 \pm 514 \text{ Bq/m}^3$. Taka różnica może wynikać z faktu, że tego dnia nastąpiła przerwa w rejestracji pomiarów w godzinach 9:30-13:20, a tym samym nie została zaliczona do niej (do średniej) duża liczba wyników. Analizując wykresy z wcześniejszych dni można wnioskować, że zaniżyłyby one tą średnią, ponieważ największe wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu przypadają na godzinę około 9 i po godzinie 13 – czyli te, w których akurat dnia 08.07.2021 zostały zarejestrowane wyniki pomiarów. Duże wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w godzinach porannych mogą świadczyć o tym, że pompowane powietrze z nad lustrem wody posiada większą wartość stężenia aktywności ^{222}Rn , niż pompowane w późniejszych godzinach. Świadczy to o tym, że radon nie jest w stanie się nagromadzić zawsze w takiej samej ilości (stężeniu) jak podczas początkowych zabiegów danego dnia. Skoki w godzinach popołudniowych mogą być natomiast efektem przerw obiadowych. W ich trakcie nie odbywają się zabiegi, a co za tym idzie ^{222}Rn może nagromadzić się w większym stężeniu nad lustrem wody, dzięki czemu po ponownym rozpoczęciu zabiegów dostarczone powietrze do inhalacji również posiada większe stężenie aktywności ^{222}Rn .

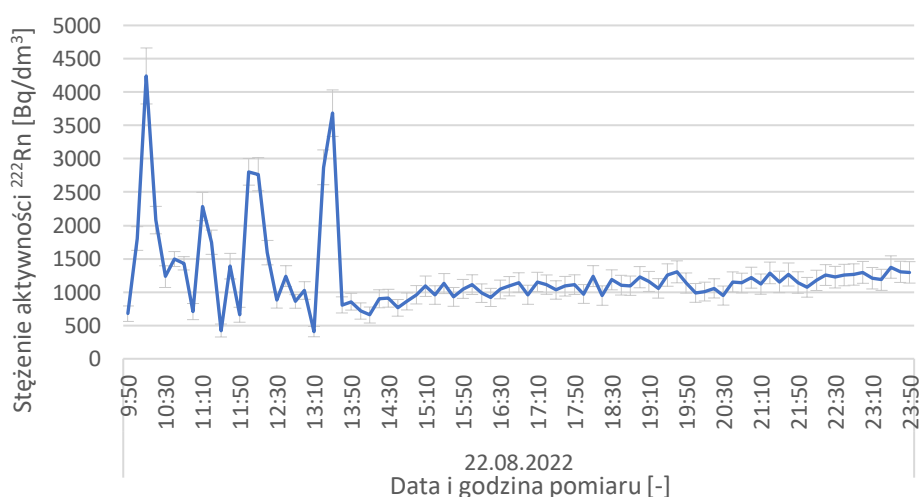
Kolejna seria pomiarów została przeprowadzona w dniach 22-24.08.2022 roku (Rys. 15).



Rys. 15. Stężenie aktywności ^{222}Rn w kolejnych dniach pomiarowych (22-24.08.2022) w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu prowadzony był również w trybie ciągłym, rejestrowane były więc także stężenia w godzinach, gdy inhalatorium było zamknięte. Ciekawe wydają się być godziny od momentów ostatnich zabiegów (około godziny 14-tej) do ich rozpoczęcia kolejnego dnia. Pomędzy dwoma zarejestrowanymi przebiegami stężenia aktywności ^{222}Rn w tych przedziałach czasowych są bowiem znaczne różnice. Podczas pomiarów pomiędzy 22.08. a 23.08. można uogólnić, że stężenie aktywności ^{222}Rn oscyluje wokół wartości 1000 Bq/m^3 , podczas gdy podczas pomiarów pomiędzy 23.08. a 24.08. stężenie osiąga wartość czterokrotnie większą. Zważywszy na poprzednią serię pomiarową można stwierdzić, że to pomiary w pierwszym z tych przedziałów są pewnego rodzaju anomalią, która była najpewniej spowodowana omyłkowo pozostawionym otwartym oknem na noc w sąsiadującym pomieszczeniu. Zwiększone stężenie aktywności ^{222}Rn jest związane z tak zwanym efektem kominowym. Ciepłe powietrze w budynku unosi się ku górze przez co powietrze z gruntu zawierające ^{222}Rn jest zasysane do budynku, powodując tym samym zwiększenie stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu wewnątrz budynku.

Podczas pomiarów w dniu 22.08.2022 roku widoczne są skoki stężenia aktywności ^{222}Rn świadczące o przeprowadzonych zabiegach oraz wietrzeniu sali zabiegowej (Rys. 16).

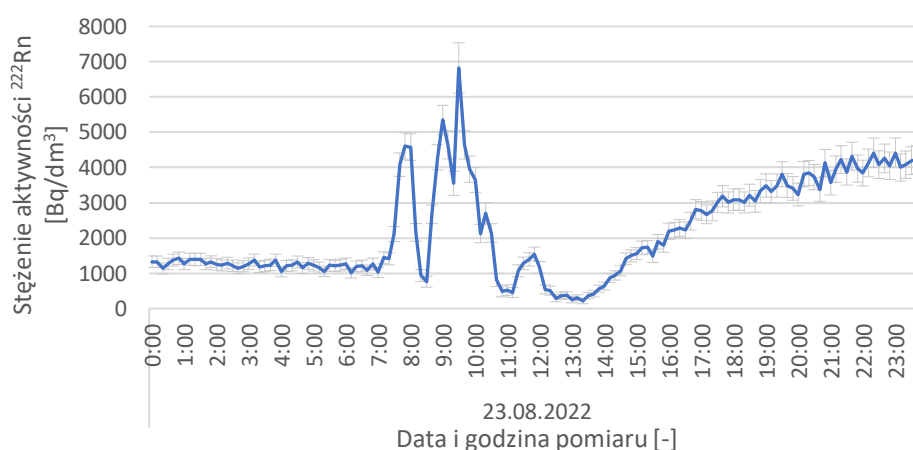


Rys. 16. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 22.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Ze względu na ciągłość zabiegów nie jest możliwe wyznaczenie dokładnego stężenia aktywności ^{222}Rn w trakcie trwania pojedynczego zabiegu. Możliwe jest natomiast ponowne wyznaczenie średniego stężenia aktywności ^{222}Rn w godzinach

zabiegowych, w tym przypadku od 9:50 (rozpoczęcie pomiarów) do około 13:40. Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w tych godzinach wyniosło $1630 \pm 173 \text{ Bq/m}^3$, natomiast odchylenie standardowe 1004 Bq/m^3 . Minimalna zarejestrowana wartość była równa $407 \pm 132 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $4242 \pm 200 \text{ Bq/m}^3$. Mediana uzyskanych wyników wyniosła $1411 \pm 146 \text{ Bq/m}^3$.

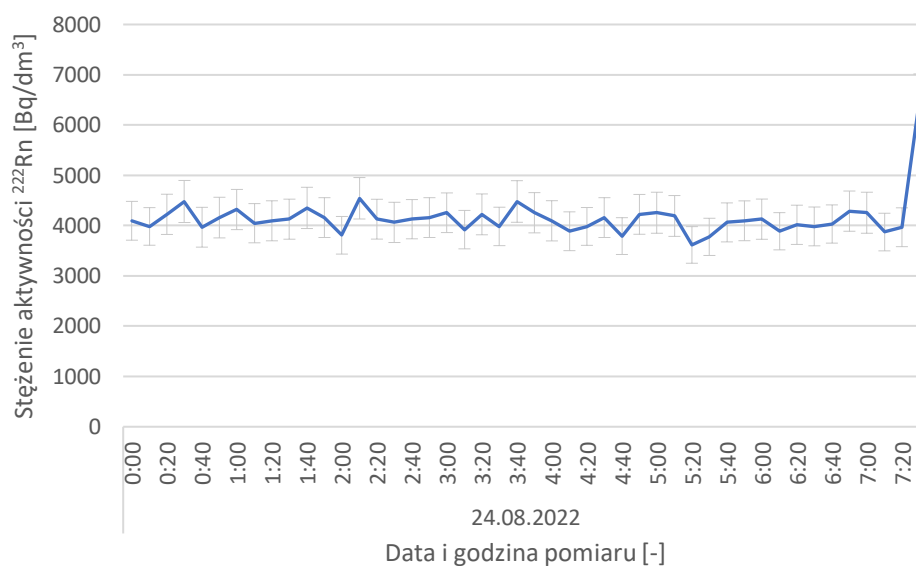
Zarejestrowane wartości stężenia aktywności ^{222}Rn kolejnego dnia (Rys. 17) przebiegały analogicznie.



Rys. 17. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 23.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

W dniu 23.08.2022 roku zabiegi przeprowadzane były w godzinach od 7:20 do 12:10. Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn było równe $2548 \pm 271 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 1716 Bq/m^3 . Minimalna i maksymalna zarejestrowana wartość wyniosły odpowiednio $456 \pm 141 \text{ Bq/m}^3$ oraz $6822 \pm 712 \text{ Bq/m}^3$. Mediana uzyskanych wyników była równa $2136 \pm 262 \text{ Bq/m}^3$.

Po pomiarach przeprowadzonych w tym dniu, kontynuowano rejestrację stężenia radonu aż do kolejnego dnia (Rys. 18).



Rys. 18. Stężenie aktywności ²²²Rn w dniu 24.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Wartości stężenia aktywności ²²²Rn w nocy były stabilne i nie ulegały wyraźnym wahaniom. Dopiero od rana, w chwili, gdy urządzenie zostało już wyłączone (około godziny 7:30) widoczny jest wzrost stężenia aktywności ²²²Rn świadczący o dostarczeniu do pomieszczenia zabiegowego powietrza znad lustra wody wzbogaconego w ²²²Rn.

Różnice wartości średniej arytmetycznej pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn podczas zabiegów w dniach 22.08.2022 i 23.08.2022 mogą być spowodowane tym, że podczas pierwszego z tych dni pomiary rozpoczęto o godzinie 9:50. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych analiz można wnioskować, że największe wartości stężenia są odnotowywane podczas pierwszych zabiegów, do godziny około 9:20. Oznacza to, że największe stężenie tego dnia mogło nie zostać zarejestrowane, a tym samym średnia arytmetyczna jest mniejsza. Natomiast przebieg zmian stężenia aktywności ²²²Rn podczas drugiej serii pomiarów jest analogiczny do pierwszej serii pomiarów, tak samo jak wartości średnie (Tab. 14).

Tab. 14. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (22-24.08.2022) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	22.08.2022	23.08.2022
Średnia arytmetyczna	1630 ± 173	2548 ± 271
Odchylenie standardowe	1004	1716
Mediana	1411 ± 146	2136 ± 262
Minimum	407 ± 132	456 ± 141
Maximum	4242 ± 200	6822 ± 712

Średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu są zbliżone do otrzymanych podczas pierwszej serii pomiarowej, tak samo jak pozostałe obliczone parametry.

7.1.3. Analiza zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej

Wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie przeprowadzonych w uzdrowisku Łądek-Zdrój podczas każdego dnia pomiarowego zostały uśrednione. Otrzymano w ten sposób wartości średnie arytmetyczne na każdym z etapów, na którym pobierano próbki wody: ze zbiornika przy ujęciu Jerzy (przy źródle Jerzy), w wodzie bezpośrednio przed zabiegiem oraz w ścieku – wodzie po zabiegu (Tab. 15).

Uzyskane średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn podczas poszczególnych etapów eksploatacji oraz wykorzystania leczniczej wody radonowej umożliwiły obliczenie zachodzących zmian w stężeniu aktywności ^{222}Rn od wydobycia kopaliny aż do wykorzystania tworzywa radonowego podczas zabiegów oraz ostatecznie do odprowadzenia ścieków pozabiegowych (Tab. 16).

Tab. 15. Średnia wartość stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie: ze zbiornika przy ujęciu Jerzy (kopalina), w wodzie przed zabiegiem oraz w ścieku po zabiegu indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

DATA	Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn [Bq/m^3]		
	Kopalina	ZABIEG	
		Tworzywo radonowe (przed zabiegiem)	Ściek
31.08.2021	–	610 ± 23	574 ± 23
01.09.2021	–	636 ± 24	597 ± 23
02.09.2021	1285 ± 42	602 ± 22	572 ± 22
03.09.2021	1291 ± 44	626 ± 23	582 ± 21
24.08.2022	1174 ± 29	627 ± 19	595 ± 19
25.08.2022	1136 ± 29	636 ± 23	598 ± 20
26.08.2022	1168 ± 28	659 ± 22	632 ± 21

Tab. 16. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej na kolejnych etapach jej eksploatacji i wykorzystania, tj. pomiędzy kopaliną a tworzywem radonowym oraz tworzywem radonowym a ściekiem, podczas zabiegów indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

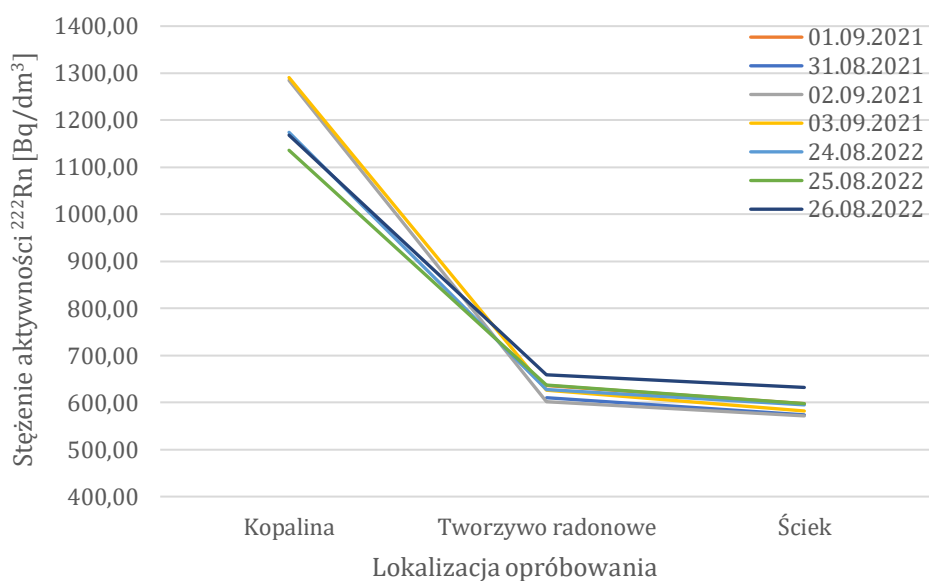
Data	Zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn [Bq/m^3]	
	Kopalina	Tworzywo radonowe
	↓ Tworzywo radonowe	↓ Ściek
31.08.2021	–	– 36,4
01.09.2021	–	– 38,7
02.09.2021	– 683	– 30,1
03.09.2021	– 665	– 43,7
24.08.2022	– 547	– 32,4
25.08.2022	– 500	– 38,9
26.08.2022	– 509	– 27,0

Największe zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej widoczne są pomiędzy etapem jej pozyskania ze źródła a bezpośrednio przed jej wykorzystaniem podczas zabiegu kąpeli indywidualnych (pomiędzy kopaliną a tworzywem radonowym). Zmiana (spadek) waha się w granicach 500-683 Bq/dm^3 (zmiana, spadek stężenia o 44,0%-53,2% pomiędzy kopaliną

a tworzywem przed zabiegiem). Średnio stężenie aktywności ^{222}Rn na tym etapie maleje o 581 Bq/dm^3 (48,1%). Wpływ na tak duże zmiany może mieć zarówno jej transport, na etapie którego jej ruch wzmacnia uwalnianie ^{222}Rn , jak i fakt, że woda transportowana jest do zbiornika, a część z niej jest dodatkowo podgrzewana w kotłowni. Podgrzewanie wody także prowadzi do intensywniejszego procesu uwalniania ^{222}Rn z wody. Również sam sposób nalewania wody do wanny może mieć wpływ na uwalnianie ^{222}Rn . Pomimo, że woda w wannie nalewana jest od dołu wanny przez specjalny wlew, dzieje się to pod stosunkowo wysokim ciśnieniem, przez co na początkowym etapie jest ona wzburzona, a co za tym idzie ^{222}Rn łatwiej przedostaje się do powietrza w sali zabiegowej.

Zmiany w stężeniu aktywności ^{222}Rn podczas zabiegu (różnica pomiędzy tworzywem radonowym a ściekiem) są już znacznie mniejsze. Wahają się w granicach $27,0\text{-}43,7 \text{ Bq/dm}^3$ (spadek o 4,1%-7,0% pomiędzy stężeniem w tworzywie przed zabiegiem, a w wodzie po zabiegu) i średnio wynoszą $35,3 \text{ Bq/dm}^3$ (5,6%). W tym przypadku zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn mogą zależeć od sposobu wejścia i wyjścia kuracjusza do i z wanny, ale także jego zachowania podczas samego zabiegu. Ruchy turbulencyjne wody spowodowane ruchem kuracjusza podczas zażywania kąpeli leczniczej mogą powodować szybszą ucieczkę ^{222}Rn z wody do pomieszczenia zabiegowego. Oznacza to w końcowym efekcie, że kuracjusz drogą oddechową może inhalować jedynie nieznaczną część radonu zawartego w wodzie nalanej do wanny i znacznie mniejszą część tego gazu jaka początkowo była rozpuszczona w leczniczej wodzie radonowej ujmowanej w źródle.

Zachodzące zmiany w stężeniu aktywności ^{222}Rn na poszczególnych etapach, w każdym z dni pomiarowych są do siebie zbliżone (Rys. 19).



Rys. 19. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie na poszczególnych etapach wykorzystania leczniczej wody radonowej podczas zabiegów indywidualnych kąpiele radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój

Średni łączny spadek stężenia aktywności ^{222}Rn od momentu ujęcia leczniczej wody radonowej (kopalina) do zakończenia jej wykorzystania (ściek) wynosił ponad 618 Bq/dm^3 (spadek o 51,0% względem zbiornika kopaliny). Oznacza to, że w celu przeprowadzenia zabiegu, podczas którego kuracjusz przez cały czas jego trwania zażywa kąpiele w leczniczej wodzie radonowej (tj. o zawartości $^{222}\text{Rn} \geq 74 \text{ Bq/dm}^3$), stężenie aktywności ^{222}Rn w ujęciu powinno wynosić w przybliżeniu nie mniej niż 700 Bq/dm^3 . Takie stężenie pozwoli uzyskać wymagane stężenie aktywności ^{222}Rn podczas trwania całego zabiegu. Biorąc pod uwagę początkowe stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie ze źródła Jerzy w uzdrowisku Łądek-Zdrój warunek ten był zawsze spełniony.

7.2. Świeradów Zdrój

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój przeprowadzone zostały pomiary w ujęciu leczniczej wody radonowej Marii Curie-Skłodowskiej. Pomiary parametrów fizyko-chemicznych wody leczniczej oraz próbki wody pobierane były ze zbiornika tej kopaliny znajdującego się przy ujęciu. Następnie próbki wody pobierano w jednym z pomieszczeń w Zakładzie Radocznym (pomiary te uznano za pomiary równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego znajdującym się w uzdrowisku - ze względu na brak możliwości bezpośredniego pobrania próby ze zbiornika tworzywa radonowego). Próbki wody autor pobierał także podczas zabiegów: inhalacji indywidualnych, inhalacji w tężni, kąpeli indywidualnych w wannach oraz kąpeli grupowych na basenie.

Pomiary w ujęciu (zbiorniku kopaliny) przeprowadzono łącznie 17 razy, w dniach: 28.07.2021-30.07.2021, 02.08.2021-05.08.2021, 19.04.2022-22.04.2022, 21.09.2022-23.09.2022, 27.09.2022-29.09.2022. Łącznie pobranych zostało 48 próbek wód do analizy stężenia aktywności ^{222}Rn i wykonano 24 analizy podstawowych parametrów fizyko-chemicznych radonowej wody leczniczej (PEW, pH, Eh, T).

W pomieszczeniu znajdującym się w pobliżu zbiornika tworzywa radonowego, zlokalizowanym w Zakładzie Radocznym pomiary przeprowadzono łącznie także w ciągu 17 dni (pomiary uznane zostały przez autora za pomiary równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego): 27.07.2021-30.07.2021, 02.08.2021-05.08.2021, 19.04.2022-21.04.2022, 21.09.2022-23.09.2022, 26.09.2022-28.09.2022, a w ich trakcie pobrano 62 próbki wody leczniczej do analizy stężenia aktywności ^{222}Rn i wykonano 31 analiz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody (PEW, pH, Eh, T).

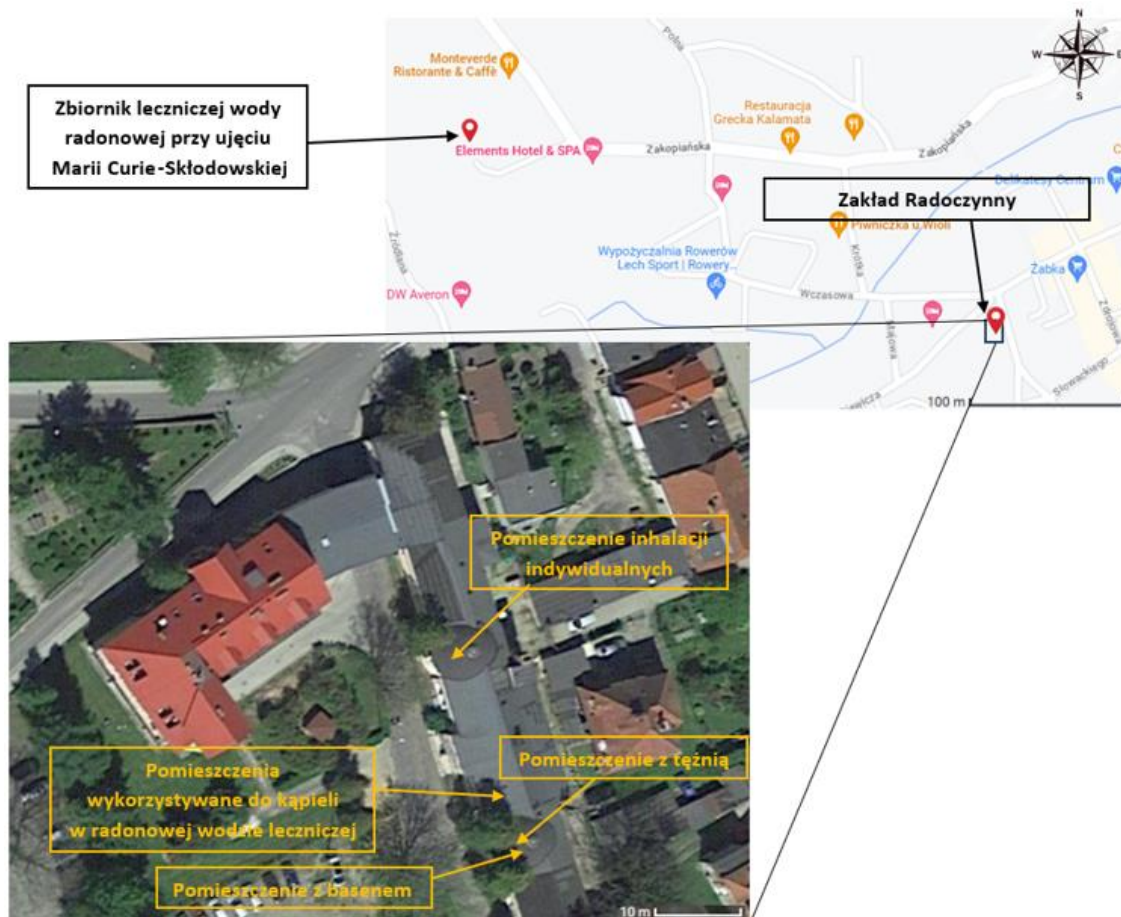
Podczas zabiegów kąpeli indywidualnych w wannach pomiary odbywały się w dniach 19.04.2022-21.04.2022 i 26.09.2022-28.09.2022. W trakcie tych zabiegów pobrano 56 próbek radonowej wody leczniczej do analizy stężenia aktywności ^{222}Rn oraz wykonano 28 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody i 28-krotnie przeprowadzono pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu w pomieszczeniach zabiegowych.

Pomiary w pomieszczeniu zabiegowym, w którym odbywają się kąpiele w basenie przeprowadzono w dniach 22.04.2022 i 29.04.2022. W trakcie tych pomiarów pobrano również 20 próbek radonowej wody leczniczej do analizy stężenia aktywności ^{222}Rn oraz wykonano po 10 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody oraz stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu na basenie.

W pomieszczeniu z tężnią badania odbywały się w dniach 27.07.2021-28.07.2021, 04.08.2021-05.08.2021 i 23.09.2022. W trakcie ich trwania pobrano łącznie 40 próbek wód do analizy stężenia aktywności ^{222}Rn , po 20 odpowiednio wody świeżej wykorzystywanej do przeprowadzenia zabiegu oraz ścieku (wodzie po zabiegu).

Podczas badań prowadzonych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój wykonywano również pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu we wszystkich dniach, w których wykonywano inne, opisane powyżej pomiary w trakcie zabiegów radonoterapii. W efekcie tego otrzymano: 471 wyników pomiarów 10-minutowych stężenia aktywności ^{222}Rn podczas inhalacji w tężni, 856 wyników stężenia aktywności ^{222}Rn podczas kąpeli indywidualnych, 741 wyników stężenia aktywności ^{222}Rn podczas inhalacji indywidualnych oraz 44 wyniki stężenia aktywności ^{222}Rn podczas kąpeli w basenie. Podczas inhalacji indywidualnych i inhalacji w tężni przeprowadzono także odpowiednio 29 i 42 pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α .

Na rysunku (Rys. 20) przedstawiona została lokalizacja zbiornika kopaliny przy ujęciu leczniczej wody radonowej Marii Curie-Skłodowskiej oraz pomieszczeń w Zakładzie Radoczyнным służących do przeprowadzania indywidualnych (wanny) i grupowych kąpeli (basen) w leczniczej wodzie radonowej oraz inhalacji indywidualnych i grupowych (tężnia).



Rys. 20. Lokalizacja Zakładu Radoczyńskiego, zbiornika kopaliny oraz pomieszczeń zabiegowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój (Mapy Google. 2023)

7.2.1. Kąpiel radonowa (indywidualna)

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój pomiary podczas zabiegów kąpieli radonowych wykonywane były analogicznie do pomiarów przeprowadzonych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.

Pierwszym miejscem opróbowania był zbiornik przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej, z którego radonowa woda lecznicza była dalej transportowana grawitacyjnie do Zakładu Radoczyńskiego. W próbkach pobranych ze zbiornika kopaliny wykonywano pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn , a także przeprowadzono pomiary podstawowych parametrów fizyko-chemicznych: PEW, pH, Eh, T (Tab. 17).

Tab. 17. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz pod koniec prowadzenia zabiegów (KZ) indywidualnych kąpiele radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
19.04.2022	PZ	1065 ± 30	580	5,581	225,8	6,4
20.04.2022	PZ	1076 ± 30	401	6,380	204,8	6,0
21.04.2022	PZ	1073 ± 30	400	7,120	238,3	6,5
	KZ	1043 ± 29	402	6,920	227,8	6,6
27.09.2022	PZ	1047 ± 29	401	6,580	222,4	9,7
	KZ	1017 ± 28	399	6,410	225,6	9,6
28.09.2022	PZ	1027 ± 28	384	6,620	231,0	9,8
	KZ	1057 ± 30	381	6,280	221,0	9,7

Pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie ze zbiornika wykazał, że w przypadku kolejnych dni pomiarowych wahania są niewielkie, wszystkie wyniki mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. Różnice w temperaturze mogą wynikać z okresu, w którym dokonywany był pomiar.

W poniższej tabeli (Tab. 18) przedstawione zostały wartości parametrów statystycznych dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych.

Tab. 18. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	Data	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	19-21.04.2022	1064 ± 30	446	6,500	224,2	6,4
	27-28.09.2022	1037 ± 29	391	6,473	225,0	9,7
	Całość	1051 ± 29	419	6,486	224,6	8,0
Odchylenie standardowe	19-21.04.2022	12,8	78	0,596	12,1	0,2
	27-28.09.2022	15,8	9	0,136	3,9	0,1
	Całość	20,0	62	0,432	9,0	1,7
Mediana	19-21.04.2022	1069 ± 30	402	6,650	226,9	6,5
	27-28.09.2022	1037 ± 27	392	6,495	224,0	9,7
	Całość	1052 ± 28	401	6,495	225,9	8,1

Dla pomiarów przeprowadzonych w dniach 19-21.04.2022 roku średnia arytmetyczna: stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $1064 \text{ Bq/dm}^3 \pm 30 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $446 \mu\text{S/cm}$, odczynu wody 6,50, Eh 224,2 mV, a T $6,4^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosło $12,8 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $78 \mu\text{S/cm}$, pH 0,596, Eh 12,1 mV, a T $0,2^\circ\text{C}$. Mediana zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $1069 \text{ Bq/dm}^3 \pm 30 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $402 \mu\text{S/cm}$, odczynu wody 6,650, Eh 226,9 mV, a T $6,5^\circ\text{C}$.

Dla pomiarów przeprowadzonych w dniach 27-28.09.2022 roku średnia arytmetyczna wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $1037 \text{ Bq/dm}^3 \pm 29 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $391 \mu\text{S/cm}$, pH 6,473, Eh 225 mV i T $9,7^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe wyniosło dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $15,8 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $9 \mu\text{S/cm}$, pH 0,136, Eh 3,9 mV i T 0,1. Wartość środkowa wynosiła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $1037 \text{ Bq/dm}^3 \pm 29 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $392 \mu\text{S/cm}$, pH 6,495, Eh 224,0 mV i T $9,7^\circ\text{C}$.

Średnia dla wszystkich otrzymanych wyników pomiarów, we wszystkich dniach pomiarowych w przypadku stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $1051 \text{ Bq/dm}^3 \pm 29 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $419 \mu\text{S/cm}$, pH 6,486, Eh 224,6 mV i T $8,0^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe stężenia aktywności ^{222}Rn było równe 20 Bq/dm^3 , PEW $62 \mu\text{S/cm}$, pH 0,432, Eh 9,0 mV i T $1,7^\circ\text{C}$. Wartość środkowa stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $1052 \pm 28 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $401 \mu\text{S/cm}$, pH 6,495, Eh 225,9 mV i T $8,1^\circ\text{C}$.

Pomiary wykonano również w zimnej wodzie pobranej z kranu pobliskiego pomieszczenia względem pomieszczenia zabiegowego (Tab. 19). Woda ta traktowana jest jak woda ze zbiornika tworzywa radonowego znajdującego się w pomieszczeniu poniżej poziomu pomieszczeń zabiegowych, z którego nie było możliwości bezpośredniego pobrania próbki wody, a z którego dostarczana jest ona do zabiegów kąpieli radonowych. Umożliwiło to dalsze analizy zmian stężenia aktywności ^{222}Rn podczas transportu wody ze studni do sali zabiegowej. Także w tym przypadku wykonano pomiary PEW, pH, Eh i T.

Tab. 19. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie ze zbiornika tworzywa radonowego w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) indywidualnych kąpieeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
19.04.2022	PZ	1018 ± 31	422	5,582	207,4	9,2
20.04.2022	PZ	1021 ± 31	420	6,152	254,1	8,7
21.04.2022	PZ	1025 ± 30	418	5,612	289,1	9,4
	KZ	980 ± 28	420	5,955	264,4	8,9
26.09.2022	PZ	981 ± 27	411	6,214	101,1	12,3
	KZ	991 ± 27	419	6,111	89,2	12,5
27.09.2022	PZ	987 ± 28	418	6,345	95,5	12,1
	KZ	969 ± 27	421	6,259	121,6	12,6
28.09.2022	PZ	980 ± 25	440	6,666	47,1	12,8
	KZ	1002 ± 25	428	6,420	67,1	13,1

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że stężenie aktywności ^{222}Rn w zbiorniku jest nieznacznie, ale wyraźnie mniejsze niż w wodzie ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej. Różnice te są jednak stosunkowo niewielkie i wynikają zapewne jedynie z czasu przepływu wody od zbiornika do zbiornika oraz czasu jej magazynowania w drugim ze zbiorników. W tym czasie zachodzi naturalny rozpad promieniotwórczy jąder ^{222}Rn , który jest odpowiedzialny za niewielki spadek stężenia aktywności tego izotopu w wodzie.

Średnia arytmetyczna pomiarów przeprowadzonych w dniach 19-21.04.2022 roku wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1011 ± 30 Bq/dm³, PEW 420 μS/cm, pH 5,825, Eh 253,8 mV i T 9,1°C. Średnia wyników z pomiarów z dni 26-28.09.2022 wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 985 ± 27 Bq/dm³, PEW 423 μS/cm, pH 6,336, Eh 86,9 mV i T 12,6°C. W przypadku wszystkich uzyskanych wyników ich średnia wynosi dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 996 Bq/dm³ ± 28 Bq/dm³, PEW 422 μS/cm, pH 6,132, Eh 153,7 mV i T 11,2°C.

Odchylenie standardowe dla pierwszej serii pomiarów wyniosło dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 18,1 Bq/dm³, PEW 1 μS/cm, pH 0,239, Eh 29,6 mV i T 0,3°C.

W dniach 26-28.2022 wyniosło natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 10,1 Bq/dm³, PEW 9 μS/cm, pH 0,177, Eh 24,0 mV i T 0,3°C. Dla wszystkich wyników odchylenie standardowe wyniosło dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 18,9 Bq/dm³, PEW 7 μS/cm, pH 0,323, Eh 85,9 mV i T 1,7°C.

Wartość środkowa otrzymanych wyników z pomiarów w dniach 19-21.04.2021 wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1020 ± 31 Bq/dm³, PEW 420 μS/cm, pH 5,784, Eh 259,3 mV i T 9,1°C. Dla pomiarów z dni 26-28.09.2022 wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 984 Bq/dm³ ± 28 Bq/dm³, PEW 420 μS/cm, pH 6,302, Eh 92,4 mV i T 12,6°C. Mediana z wszystkich wyników dla stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła 989 Bq/dm³ ± 27 Bq/dm³, PEW 420 μS/cm, pH 6,183, Eh 111,4 mV i T 12,2°C.

Kolejne pomiary, analogicznie do pomiarów wykonywanych w uzdrowisku Łądek-Zdrój, wykonywane były w tworzywie radonowym – radonowej wodzie leczniczej przed zabiegiem oraz w ścieku – po zabiegu.

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój woda do wanny nalewana była przez pracownika obsługującego zabieg, od spodu za pomocą przymocowanego do kranu węża. Dzięki temu możliwie maksymalnie unika się wzburzenia wody, co mogłoby doprowadzić do szybszej ucieczki z niej ^{222}Rn do atmosfery. Po napełnieniu wanny, kuracjusz jest proszony o położenie się w niej. Zabieg trwa 10 minut. W trakcie jego trwania kuracjusz ma możliwość dolania do wanny ciepłej lub zimnej wody, aby czuć się komfortowo. Dodatkowym napotkanym problemem techniczno-organizacyjnym był fakt, że wanny są niekiedy przygotowywane dla kuracjusza jeszcze przed jego przybyciem do Zakładu Radocznego. Po napełnieniu wanny wodą zdarzało się, że niekiedy zanim skorzystał z niej kuracjusz, kąpiel czekała nawet kilkanaście minut.

Prezentowane wyniki pomiarów (Tab. 20) przedstawiają wyniki podstawowych parametrów fizyko-chemicznych oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w tworzywie radonowym bezpośrednio przed zabiegiem oraz w wodzie po zabiegu – w ścieku. Dodatkowo w tym samym czasie, wykonywany był pomiar stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu pomieszczenia kąpielowego.

Tab. 20. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś), a także zmierzone w powietrzu pomieszczenia zabiegowego stężenie energii potencjalnej α podczas zabiegów kąpieli indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Nr zabiegu	Informacja na temat próbki	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne				Stężenie energii potencjalnej α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
				PEW [uS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]	
19.04.2022	1	WP	781 ± 24	430	5,62	209,2	38,6	< 1
		Ś	630 ± 23	433	5,507	247,8	36,5	< 1
	2	WP	820 ± 25	422	5,616	174,3	39,6	< 1
		Ś	705 ± 22	432	5,519	192	35,7	< 1
20.04.2022	3	WP	758 ± 23	419	6,139	194,3	33,9	< 1
		Ś	641 ± 20	423	5,82	197	34,3	< 1
	4	WP	790 ± 24	424	6,391	161,7	34,6	< 1
		Ś	651 ± 22	444	5,944	185	35,4	< 1
21.04.2022	5	WP	751 ± 20	416	5,755	202,3	35,6	< 1
		Ś	635 ± 20	422	5,662	209,5	36,7	< 1
	6	WP	788 ± 24	418	5,758	225,5	38,6	< 1
		Ś	642 ± 21	419	5,627	254,5	36,2	< 1
26.09.2022	7	WP	777 ± 24	441	6,293	233,6	39,1	< 1
		Ś	660 ± 22	430	6,311	245,1	38,7	< 1
	8	WP	806 ± 24	450	6,239	180,8	39,5	< 1
		Ś	714 ± 21	452	6,293	162,4	37,1	< 1
	9	WP	834 ± 25	452	6,315	169,5	39,1	< 1
		Ś	736 ± 22	453	6,177	209,1	39	< 1
27.09.2022	10	WP	805 ± 25	446	6,21	162,2	41,1	< 1
		Ś	701 ± 24	452	6,38	155,6	38,3	< 1
	11	WP	816 ± 25	462	6,38	175,3	39,1	< 1
		Ś	690 ± 23	462	6,032	275,3	37,5	< 1
	12	WP	759 ± 24	470	6,231	229,4	40	< 1
		Ś	630 ± 21	470	6,15	242,9	38,1	< 1
28.09.2022	13	WP	803 ± 25	439	6,525	216,1	40,7	< 1
		Ś	668 ± 22	444	6,418	202,7	36,3	< 1
	14	WP	777 ± 24	466	6,732	249	40,1	< 1
		Ś	648 ± 22	466	6,38	251	39,1	< 1

Na podstawie przedstawionych wyników należy stwierdzić, że w każdym przypadku woda po zabiegu posiadała mniejsze stężenie aktywności ^{222}Rn niż przed zabiegiem. Stopień zubożenia wody w ^{222}Rn mógł być zależny od wykonywanych ruchów kuracjusza w trakcie zabiegu. Podczas poruszania się w wodzie jej ruch turbulentny mógł powodować szybszą ucieczkę radonu z wody. Sam pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn mógł zostać dodatkowo zakłócony przez dolanie wody w trakcie zabiegu, na skutek czego dostarczano wodę o większym stężeniu aktywności ^{222}Rn względem wody już znajdującej się w wannie. W poniższej tabeli (Tab. 21) przedstawiono opracowane parametry statystyczne zmierzonych wartości.

Tab. 21. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów indywidualnych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr		Data	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	WP	19-21.04.2022	781 ± 23	422	5,880	194,6	36,8
	Ś	19-21.04.2022	641 ± 21	429	5,680	214,3	35,8
	WP	26-28.09.2022	797 ± 25	453	6,366	202,0	39,8
	Ś	26-28.09.2022	681 ± 22	454	6,268	218,0	38,0
	WP	Całość	790 ± 24	440	6,157	198,8	38,5
	Ś		668 ± 22	443	6,016	216,4	37,1
Odchylenie standardowe	WP	19-21.04.2022	22,5	5	0,288	21,3	2,2
	Ś	19-21.04.2022	25,4	9	0,157	27,1	0,8
	WP	26-28.09.2022	22,8	11	0,168	31,5	0,7
	Ś	26-28.09.2022	33,6	12	0,126	40,4	0,9
	WP	Całość	24,0	18	0,331	27,9	2,1
	Ś		33,8	16	0,323	35,3	1,4
Mediana	WP	19-21.04.2022	784 ± 24	421	5,757	198,3	37,1
	Ś	19-21.04.2022	641 ± 21	428	5,645	203,3	36,0
	WP	26-28.09.2022	804 ± 25	451	6,304	198,5	39,8
	Ś	26-28.09.2022	679 ± 22	453	6,302	226,0	38,2
	WP	Całość	789 ± 25	440	6,235	198,3	39,1
	Ś		656 ± 22	444	6,091	209,3	36,9

Średnia arytmetyczna wyników pomiarów przeprowadzonych w dniach 19-21.04.2022 w wodzie przed zabiegiem wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $781 \pm 23 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $422 \mu\text{S/cm}$, pH $5,880$, Eh $194,6 \text{ mV}$ i T $36,8^\circ\text{C}$. W tych samych dniach w ścieku wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $651 \pm 21 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $429 \mu\text{S/cm}$, pH $5,680$, Eh $214,3 \text{ mV}$ i T $35,8^\circ\text{C}$. W dniach pomiarowych 26-28.09.2022 wartość tego parametru statystycznego wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $797 \pm 25 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $453 \mu\text{S/cm}$, pH $6,366$, Eh $202,0 \text{ mV}$ i T $39,8^\circ\text{C}$. W ścieku natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $681 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $454 \mu\text{S/cm}$, pH $6,268$, Eh $218,0 \text{ mV}$ i T $38,0^\circ\text{C}$. Średnia arytmetyczna wszystkich uzyskanych wyników w wodzie przed zabiegiem była równa dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $790 \pm 24 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $440 \mu\text{S/cm}$, pH $6,157$, Eh $198,8 \text{ mV}$ i T $38,5^\circ\text{C}$. W ścieku natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $668 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $443 \mu\text{S/cm}$, pH $6,016$, Eh $216,4 \text{ mV}$ i T $37,1^\circ\text{C}$.

W przypadku wyników obliczeń odchylenia standardowego w wodzie przygotowanej do zabiegu w dniach 19-21.04.2022 wyniosło ono dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $22,5 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $5 \mu\text{S/cm}$, pH $0,288$, Eh $21,3 \text{ mV}$ i T $2,2^\circ\text{C}$. W tych samych dniach wartości odchylenia standardowego dla wyników pomiarów w ścieku były równe dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $25,4 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $9 \mu\text{S/cm}$, pH $0,157$, Eh $27,1 \text{ mV}$ i T $0,8^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe pomiarów w wodzie przed zabiegiem w dniach 26-28.09.2022 wyniosło natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $22,8 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $11 \mu\text{S/cm}$, pH $0,168$, Eh $31,5 \text{ mV}$ i T $0,7^\circ\text{C}$. W ścieku dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $33,6 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $12 \mu\text{S/cm}$, pH $0,126$, Eh $40,4 \text{ mV}$ i T $0,9^\circ\text{C}$. Odchylenie standardowe wszystkich otrzymanych wyników ze wszystkich dni pomiarowych wyniosło w wodzie przed zabiegiem dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $24,0 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $18 \mu\text{S/cm}$, pH $0,331$, Eh $27,9 \text{ mV}$ i T $2,1^\circ\text{C}$. Dla wszystkich wyników w ścieku odchylenie wynosiło natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $33,8 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $16 \mu\text{S/cm}$, pH $0,323$, Eh $35,3 \text{ mV}$ i T $1,4^\circ\text{C}$.

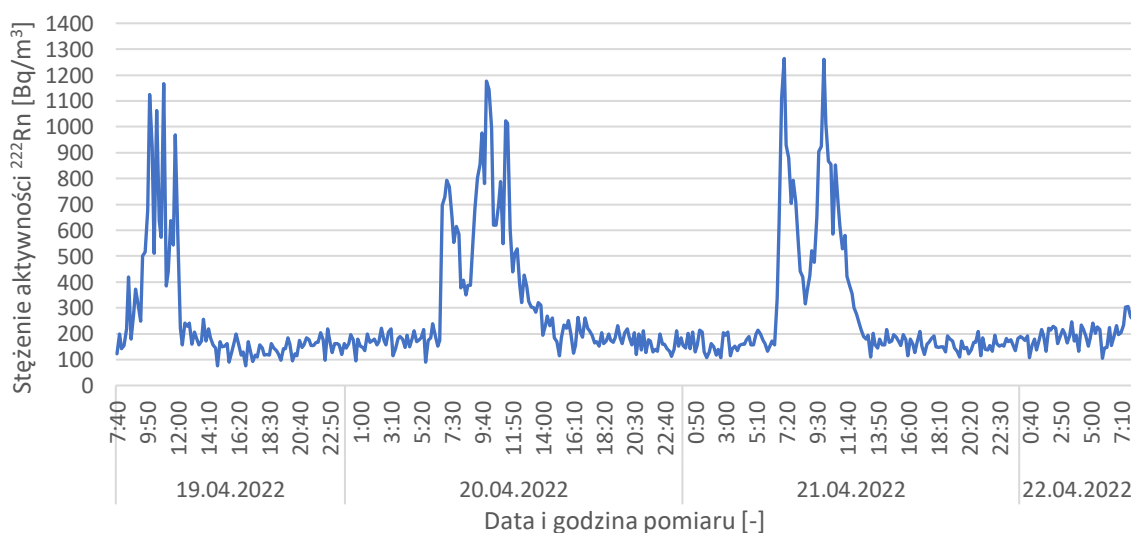
Wartość środkowa w wodzie przed zabiegiem dla wyników pomiarów z dni 19-21.04.2022 wyniosły dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $784 \pm 24 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $421 \mu\text{S/cm}$, pH $5,757$, Eh $198,3 \text{ mV}$ i T $37,1^\circ\text{C}$. W ścieku natomiast wynosiła ona dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $641 \pm 21 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $428 \mu\text{S/cm}$, pH $5,645$, Eh $203,3 \text{ mV}$ i T $36,0^\circ\text{C}$. W dniach pomiarowych 26-28.09.2022 w wodzie radonowej nalewanej do wanny mediana wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn

804 ± 25 Bq/dm³, PEW 451 μS/cm, pH 6,304, Eh 198,5 mV i T 39,8°C. W ścieku wynosiła ona dla: stężenia aktywności ²²²Rn 679 ± 22 Bq/dm³, PEW 453 μS/cm, pH 6,302, Eh 226,0 mV i T 38,2°C. Dla wszystkich otrzymanych wyników z obu serii pomiarowych w wodzie radonowej nalewanej do wanny mediana wyniosła dla: stężenia aktywności ²²²Rn 789 ± 24 Bq/dm³, PEW 440 μS/cm, pH 6,235, Eh 198,3 mV i T 39,1°C. W ścieku natomiast wynosiła ona dla: stężenia aktywności ²²²Rn 656 ± 22 Bq/dm³, PEW 444 μS/cm, pH 6,091, Eh 209,3 mV i T 36,9°C.

Podczas zabiegu indywidualnej kąpieli woda była zubażana w radon średnio od około 15% (w dniach 19-21.04.2022) do 18% (w dniach 26-28.09.2022). Średnie zubożenie w ²²²Rn podczas analizowanych dni pomiarowych wyniosło 15,4% stężenia aktywności. Kuracjusz w trakcie zabiegu mógł zainhalować ilość ²²²Rn wynikającą ze zmian stężenia aktywności ²²²Rn w wodzie, czyli tyle o ile zubożone zostało w ²²²Rn tworzywo radonowe wykorzystywane do przeprowadzenia zabiegu.

We wszystkich dniach, w których przeprowadzane były pomiary podczas zabiegu kąpieli w leczniczej wodzie radonowej, prowadzony był również pomiar stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu. Urządzenie zasysało powietrze z wysokości górnych dróg oddechowych kuracjusza podczas kąpieli.

Pierwsza seria pomiarów (w trybie ciągłym) odbyła się w dniach 19-22.04.2022 roku (Rys. 21).



Rys. 21. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu pomieszczenia zabiegowego wykorzystywanego do indywidualnych kąpieli radonowych w Świeradowie-Zdroju w dniach 19-22.04.2022 roku

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów jest zdecydowanie większe, niż poza czasem ich prowadzenia. W godzinach przeprowadzania indywidualnych kąpiel radonowych widoczne są piki świadczące o tym, że radon z wykorzystywanej wody przedostawał się do powietrza, które wdychali kuracjusze i pracownicy. Spadki stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy zabiegami spowodowane są wietrzeniem pomieszczeń. Po każdym zabiegu pracownik przeprowadzający zabieg otwierał drzwi i mył w tym czasie wannę, przygotowując ją do kolejnego zabiegu. Radon przedostawał się wówczas przez otwarte drzwi poza pomieszczenie zabiegowe, co skutkowało spadkiem stężenia aktywności ^{222}Rn w samym pomieszczeniu.

Podczas zabiegów w każdym z dni stężenie aktywności ^{222}Rn zwiększało się do około 1200 Bq/m^3 . Wartość ta mogła się różnić w zależności od ilości wody, czy poruszania się pacjenta w trakcie kąpeli. W przypadku wykonywania ruchów woda mogła zostać wzburzona, dzięki czemu zawarty w niej radon szybciej przedostawał się do powietrza. Po zabiegach w każdym z opisywanych powyżej dni stężenie aktywności ^{222}Rn malało do poziomu około 150 Bq/m^3 i utrzymywało się przez noc aż do kolejnego dnia i ponownego rozpoczęcia przeprowadzania zabiegów.

Podstawowe parametry statystyczne (Tab. 22) zostały wyliczone na podstawie zarejestrowanych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w zakresie czasu, w którym przeprowadzane były w pomieszczeniu zabiegi kąpeli radonowej.

Tab. 22. Parametry statystyczne charakteryzujące wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w pomieszczeniach, w których prowadzono zabiegi indywidualnej kąpeli radonowej (19-21.04.2022) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)		
	19.04.2022 (9:30-12:00)	20.04.2022 (6:50-12:00)	21.04.2022 (6:50-11:40)
Średnia arytmetyczna	702 ± 107	692 ± 108	710 ± 111
Odchylenie standardowe	249	222	251
Mediana	608 ± 93	670 ± 104	678 ± 108
Minimum	384 ± 82	350 ± 76	316 ± 84
Maximum	1166 ± 168	1176 ± 142	1264 ± 140

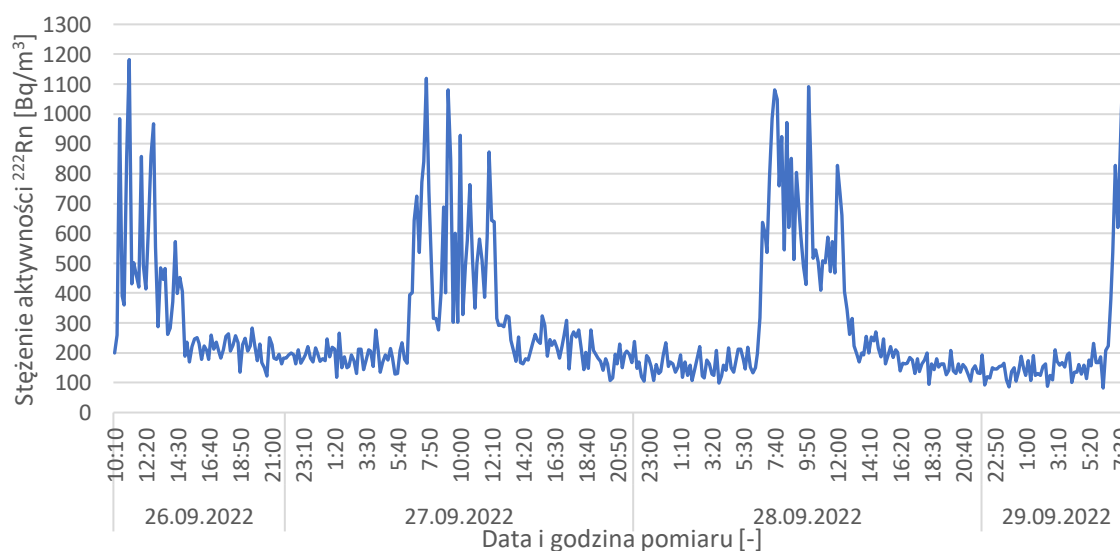
Dnia 19.04.2022 roku średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w trakcie zabiegów (9:30 – 12:00) wyniosło $702 \pm 107 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 249 Bq/m^3 . Wartość mediany była równa $608 \pm 93 \text{ Bq/m}^3$, a wartości minimalne i maksymalne wynosiły odpowiednio: $384 \pm 82 \text{ Bq/m}^3$ i $1166 \pm 168 \text{ Bq/m}^3$.

Kolejnego dnia wartości parametrów w trakcie zabiegów (6:50-12:00) były zbliżone. Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $692 \pm 108 \text{ Bq/m}^3$, odchylenie standardowe 222 Bq/m^3 , a mediana $670 \pm 104 \text{ Bq/m}^3$. Wartość minimalna była równa $350 \pm 76 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $1176 \pm 142 \text{ Bq/m}^3$.

Trzeciego dnia serii pomiarów (godziny zabiegów 6:50 – 11:40) średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $710 \pm 111 \text{ Bq/m}^3$, odchylenie standardowe 251 Bq/m^3 , natomiast mediana $678 \pm 108 \text{ Bq/m}^3$. Minimalna i maksymalna zmierzona wartość stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosły odpowiednio: $316 \pm 84 \text{ Bq/m}^3$ i $1264 \pm 140 \text{ Bq/m}^3$.

Można więc stwierdzić, że we wszystkich trzech dniach pomiarowych wszystkie wartości parametrów statystycznych były na jednakowym poziomie i mieściły się względem siebie w granicach błędów.

Analogiczne tendencje w wynikach pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu można zauważyć w wynikach z okresu 26-29.09.2022 roku (Rys. 22).



Rys. 22. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia zabiegowego wykorzystywanego do indywidualnych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniach 26-29.09.2022 roku

Zmierzone wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczeń służących do prowadzenia indywidualnych kąpeli radonowych w godzinach, w których odbywały się zabiegi są znacznie większe od tych zarejestrowanych po seriach zabiegów lub w nocy. W trakcie zabiegów stężenia osiągają wartość do nawet 1200 Bq/m^3 , podczas gdy w momencie zakończenia zabiegów i w nocy oscylują wokół wartości 150 Bq/m^3 .

Analogicznie do poprzedniej serii pomiarów, również i w tym okresie widoczne są nagłe wzrosty i spadki stężenia aktywności ^{222}Rn . Było to związane z samą organizacją prowadzenia zabiegów i otwieraniem drzwi pomiędzy zabiegami.

Poniżej (Tab. 23) przedstawiono wyznaczone parametry statystyczne dla drugiej serii pomiarowej.

Tab. 23. Parametry statystyczne charakteryzujące wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach (26-28.09.2022) w pomieszczeniu wykorzystywanym do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)		
	26.09.2022 (10:20-14:40)	27.09.2022 (6:30-12:40)	28.09.2022 (6:40-12:40)
Średnia arytmetyczna	543 ± 93	565 ± 94	654 ± 107
Odchylenie standardowe	241	219	210
Mediana	462 ± 82	526 ± 91	588 ± 104
Minimum	260 ± 60	276 ± 71	318 ± 64
Maximum	1182 ± 158	1120 ± 128	1092 ± 142

Średnia arytmetyczna w pierwszym dniu drugiej serii pomiarowej w godzinach, w których były prowadzone zabiegi (10:20 – 14:40) wyniosła $543 \pm 93 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 241 Bq/m^3 . Wartość środkowa stężenia aktywności ^{222}Rn była równa $462 \pm 82 \text{ Bq/m}^3$, natomiast minimalna i maksymalna wartość wynosiły odpowiednio $260 \pm 60 \text{ Bq/m}^3$ i $1182 \pm 158 \text{ Bq/m}^3$.

Drugiego dnia dla pomiarów w godzinach 6:30 – 12:40 wartość średniej arytmetycznej stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $565 \pm 94 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenia standardowego 219 Bq/m^3 . Mediana była równa $526 \pm 91 \text{ Bq/m}^3$, wartość minimalna $276 \pm 71 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalna $1120 \pm 128 \text{ Bq/m}^3$.

Dnia 28.09.2022, dla wyników zarejestrowanych w godzinach 6:40 – 12:40 średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn była równa $654 \pm 107 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 210 Bq/m^3 . Wartość środkowa wyniosła

$588 \pm 104 \text{ Bq/m}^3$. Wartości minimalne i maksymalne wyniosły odpowiednio: $318 \pm 64 \text{ Bq/m}^3$ i $1092 \pm 142 \text{ Bq/m}^3$.

W pierwszych dwóch dniach tej serii pomiarów wartości są względem siebie bardzo zbliżone. Jednak trzeciego dnia wartość średnia jest większa. Powodem tej różnicy może być liczba przeprowadzonych jednego dnia zabiegów. Im jest ich więcej, tym średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu będzie większe na skutek gromadzenia się radonu. W przypadku mniejszej liczby zabiegów, a jednocześnie otwartych drzwi od pomieszczenia zabiegowego radon może w większym stopniu przedostać się do innych, sąsiadujących pomieszczeń.

Analizując wyniki z pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu prowadzonych w pomieszczeniu zabiegowym, w którym odbywają się indywidualne kąpiele w leczniczej wodzie radonowej, należy brać pod uwagę, że urządzenie uśrednia wyniki z każdego kolejnych 10 minut pomiaru. Dochodziło więc do sytuacji, w której konkretny wynik odpowiada stężeniu aktywności ^{222}Rn w powietrzu zarówno w czasie kąpieli kuracjusza, jak i podczas wietrzenia sali. Organizacja zabiegów nie przewiduje również określonego czasu na wietrzenie pomieszczeń. Po każdym zabiegu pracownik obsługujący kuracjuszy przygotowuje wanny do kolejnych zabiegów poprzez ich umycie. Często dochodziło także do sytuacji, kiedy woda od razu po umyciu wanny była do niej napszczana podczas gdy nie było jeszcze następnego kuracjusza. W ten sposób radon w niej zawarty mógł wzbogacać powietrze w pomieszczeniu. Niemniej jednak należy przyjąć, że w trakcie zabiegów wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu są większe i osiągają wartości rzędu kilkuset Bq/m^3 .

7.2.2. Kąpiel w basenie radonowym

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój wykonano dodatkowe pomiary w pomieszczeniu, w którym odbywają się kąpiele w basenie radonowym dla kilku kuracjuszy jednocześnie. Basen ma owalny kształt o obwodzie około 13 m i wymiarach około 6 x 3 m. Gromadzi około 4 m^3 leczniczej wody radonowej. Ze względu na problemy techniczne basen w uzdrowisku został wyłączony z użytku na czas nieokreślony. Dzięki uprzejmości kierownictwa Uzdrowiska, został on jednak uruchomiony na potrzeby pomiarów, jednak z ograniczeniem w postaci

dostarczania do niego wyłącznie zimnej wody. Należy mieć więc na uwadze, że przedstawione wyniki pomiarów nie obrazują rzeczywistych warunków, w których mogliby przebywać kuracjusze odbywający zabiegi. Pomiarzy miały za zadanie zbadanie ewentualnej szybkości zmian w czasie stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie i powietrzu. Było to możliwe przy założeniu, że dopływ wody jest równomierny przez cały czas pomiarów.

To samo dotyczy również pomiarów w powietrzu: stężenia aktywności ^{222}Rn , jego pochodnych i stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Nie było możliwe dokładne określenie dawek, na których przyjęcie narażeni są kuracjusze oraz personel uzdrowiska, jednak samo określenie tempa zmian w czasie było wykonalne. W związku z tym autor zdecydował się na przeprowadzenie pomiarów w ograniczonym czasowo zakresie w pomieszczeniu z basenem napełnionym wyłącznie wodą zimną.

Analogicznie do wcześniej opisywanych pomiarów, również i w tym przypadku pomiary rozpoczynano od wykonania pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn i podstawowych parametrów w zbiorniku ujęcia Maria Curie-Skłodowska (Tab. 24).

Tab. 24. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej na rozpoczęcie (PZ) oraz na zakończenie (KZ) pomiarów w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpiele radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
22.04.2022	PZ	1042 ± 29	396	6,910	246,3	6,4
	KZ	1022 ± 29	394	6,897	236,9	6,3
29.09.2022	PZ	1076 ± 30	373	7,112	228,6	9,5
	KZ	1092 ± 30	377	7,226	232,7	9,5

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów w wodzie ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej można stwierdzić, że stężenie aktywności ^{222}Rn w obu dniach pomiarowych było identyczne, mieściło się w zakresie błędu pomiarowego. Dla wszystkich wyników obliczono parametry statystyczne (Tab. 25).

Tab. 25. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie basenu kąpieli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	1058 ± 30	385	7,036	236,1	7,9
Odchylenie standardowe	27,6	10	0,139	6,6	1,6
Mediana	1059 ± 30	386	7,011	234,8	8,0

Średnia arytmetyczna wszystkich otrzymanych wyników wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1058 ± 30 Bq/dm³, PEW 385 μS/cm, pH 7,036, Eh 236,1 mV i T 7,9°C. Odchylenie standardowe w przypadku stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosło 27,6 Bq/dm³, PEW 10 μS/cm, pH 0,139, Eh 6,6 mV i T 1,6°C. Wartość środkowa wynosiła natomiast dla stężenia aktywności ^{222}Rn 1059 ± 30 Bq/dm³, PEW 386 μS/cm, pH 7,011, Eh 234,8 mV i T 8,0°C.

Po pomiarach przeprowadzonych w zbiorniku ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej wykonywano po kilkunastu minutach pomiary w wodzie w basenie (Tab. 26). Pomiar podstawowych parametrów fizyko-chemicznych, stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie przeprowadzany był w tworzywie radonowym - świeżo nalanej do basenu wodzie radonowej oraz po upływie 60, 120 i 240 minut, a także 30, 60, 90, 120 i 150 minut. Jednocześnie w powietrzu pomieszczenia basenowego mierzono stężenie energii potencjalnej promieniowania α i stężenia pochodnych radonu. Wszystkie pomiary wykonywano w dwóch dniach pomiarowych.

Tab. 26. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) i stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu wokół basenu w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Upływ czasu od napełnienia basenu do poboru próbki [min]	Stężenie aktywności ^{222}Rn	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne				Energia potencjalna α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
		[Bq/dm^3]	PEW [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	pH [-]	Eh [mV]	T [$^{\circ}\text{C}$]	
22.04.2022	-	997 ± 28	422	6,731	202,3	8,1	< 1
	60	906 ± 31	422	5,933	208,8	8,5	< 1
	120	927 ± 31	418	6,040	197,8	8,7	< 1
	240	916 ± 30	421	5,714	221,7	8,8	< 1
29.09.2022	-	1041 ± 30	421	6,945	200,0	13,0	< 1
	30	997 ± 30	423	6,870	228,0	13,0	< 1
	60	981 ± 28	424	6,470	233,3	13,3	< 1
	90	996 ± 30	434	6,520	232,3	13,0	< 1
	120	990 ± 30	433	6,575	234,5	13,2	< 1
	150	999 ± 30	432	6,544	231,2	13,4	< 1

Wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie basenowej wykazały, że w początkowej fazie (świeżo po nalaniu wody) stężenie było niewiele większe niż po ustabilizowaniu przepływu. Najprawdopodobniej było to konsekwencją szybszego dopływu wody do basenu na skutek jego napełniania. Następnie, po napełnieniu i utrzymaniu stałego poziomu wody w basenie, a tym samym unormowaniu przepływu wody, stężenie aktywności ^{222}Rn utrzymywało się na stałym poziomie. W odróżnieniu od zabiegów kąpieli indywidualnych, podczas kąpieli zbiorowych w basenie pracownik ma możliwość regulacji szybkości przepływu zimnej i ciepłej wody (pośrednio wpływając tym na stężenie aktywności ^{222}Rn , zarówno w wodzie basenowej jak i w powietrzu). Można więc stwierdzić, że w przypadku wody mieszanej (zimnej z ciepłą) sytuacja ta wyglądałaby identycznie. Pomiary przeprowadzone za pomocą radiometru nie przekroczyły LLD stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Jest to równoznaczne z tym, że nie było także możliwe dokonanie pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn .

Poniżej (Tab. 27) zaprezentowano parametry statystyczne pomiarów wykonanych w czasie dwóch dni pomiarowych.

Tab. 27. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej z basenu w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	Data	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	22.04.2022	937 ± 30	421	6,105	207,7	8,5
	29.09.2022	1001 ± 30	428	6,654	226,6	13,2
	Całość	975 ± 30	425	6,434	219,0	11,3
Odchylenie standardowe	22.04.2022	35,9	2	0,380	9,0	0,3
	29.09.2022	19,2	5	0,183	12,0	0,2
	Całość	41,5	5	0,388	14,3	2,3
Mediana	22.04.2022	922 ± 30	422	5,987	205,6	8,6
	29.09.2022	996 ± 30	428	6,560	231,8	13,1
	Całość	993 ± 30	423	6,532	224,9	13,0

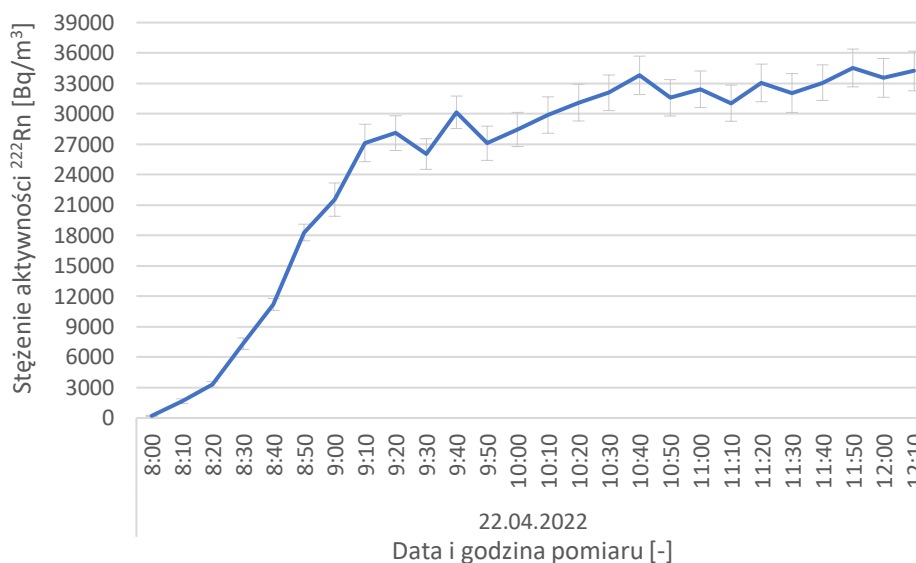
Średnia arytmetyczna pomiarów przeprowadzonych w dniu 22.04.2022 wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 937 ± 30 Bq/dm³, PEW 421 μS/cm, pH 6,105, Eh 207,7 mV i T 8,5°C. Średnia pomiarów z dnia 29.09.2022 wyniosła natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1001 ± 30 Bq/dm³, PEW 428 μS/cm, pH 6,654, Eh 226,6 mV i T 13,2°C. Średnia dla wszystkich otrzymanych wyników była równa dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 975 ± 30 Bq/dm³, PEW 425 μS/cm, pH 6,434, Eh 219,0 mV i T 11,3°C.

Odchylenie standardowe z pomiarów pierwszego dnia było równe dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 35,9 Bq/dm³, PEW 2 μS/cm, pH 0,380, Eh 9,0 mV i T 0,3°C. Dla drugiego z dni dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 19,2 Bq/dm³, PEW 5 μS/cm, pH 0,183, Eh 12,0 mV i T 0,2°C. Odchylenie standardowe wszystkich otrzymanych wyników wyniosło w przypadku: stężenia aktywności ^{222}Rn 41,5 Bq/dm³, PEW 5 μS/cm, pH 0,388, Eh 14,3 mV i T 2,3°C.

Wartość środkowa wyników z 22.04.2022 roku wynosiła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 922 ± 30 Bq/dm³, PEW 422 μS/cm, pH 5,987, Eh 205,6 mV i T 8,6°C. Dla wyników z dnia 29.09.2022 wyniosła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 996 ± 30 Bq/dm³, PEW 428 μS/cm, pH 6,560, Eh 231,8 mV i T 13,1°C.

Mediana wszystkich wyników pomiarów wyniosła natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn $993 \pm 30 \text{ Bq/dm}^3$, PEW $423 \mu\text{S/cm}$, pH 6,532, Eh 224,9 mV i T $13,0^\circ\text{C}$.

W trakcie pomiarów w dniach 22.04.2022 roku (Rys. 23) oraz 29.09.2022 roku (Rys. 24) przeprowadzono także pomiary ciągłe stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu znad lustra wody. Powietrze zasysane było z wysokości, na której znajdują się górne drogi oddechowe kuracjuszy w trakcie zabiegu.

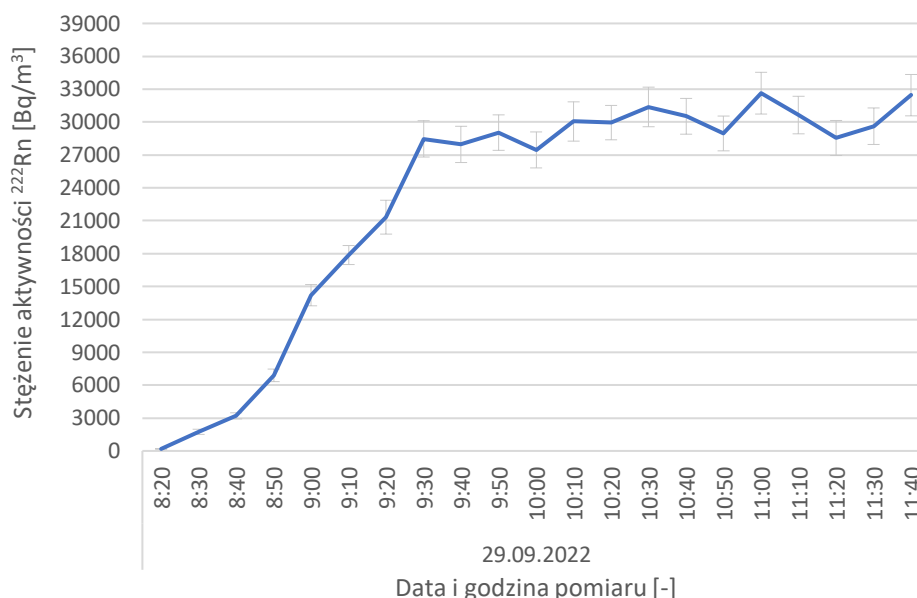


Rys. 23. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój dnia 22.04.2022 roku

W pierwszym dniu pomiar rozpoczął się około godziny 8:00, po czym rozpoczęto napełniać wodę do basenu. Widoczny jest wówczas nagły wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn , który trwa przez około godzinę. Dalsze pomiary również wykazują wzrost stężenia, jednak w porównaniu z początkową fazą jest on niewielki i powolny.

Średnie stężenie aktywności ^{222}Rn , licząc od momentu osiągnięcia ustabilizowanego poziomu (około godziny 9:10) do zakończenia pomiarów, wyniosło $31\,000 \pm 1800 \text{ Bq/m}^3$. Odchylenie standardowe było równe 2533 Bq/m^3 , a mediana $34\,600 \pm 1800 \text{ Bq/m}^3$. Minimalne zarejestrowane w tym przedziale czasowym stężenie aktywności ^{222}Rn wyniosło $26\,000 \pm 1500 \text{ Bq/m}^3$, a maksymalne $34\,500 \pm 1900 \text{ Bq/m}^3$.

W kolejnym dniu pomiarowym zarówno szybkość wzrostu stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, jak i jego dalszy poziom były do siebie zbliżone (Rys. 24).



Rys. 24. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu pomieszczenia z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój dnia 29.09.2022 roku

Rejestracja stężenia aktywności ²²²Rn rozpoczęła się po godzinie 8 i o tej samej godzinie rozpoczęto napełniać wodę do basenu. Widoczny jest szybki wzrost stężenia radonu przez 1,5 godziny od rozpoczęcia napełniania basenu. Następnie w godzinach 9:30 – 11:40 oscyluje ono w granicach $27\,500 \pm 900$ Bq/m³ (wartość minimalna) do $32\,600 \pm 1900$ Bq/m³ (wartość maksymalna). Wartość średnia była równa $29\,800 \pm 1600$ Bq/m³. W tym samym zakresie czasu średnia arytmetyczna stężenia aktywności ²²²Rn wyniosła $29\,800 \pm 1700$ Bq/m³, a odchylenie standardowe 1521 Bq/m³.

Wartości obliczonych parametrów statystycznych w obu dniach pomiarowych były do siebie zbliżone (Tab. 28).

Tab. 28. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn przeprowadzonych w dniach 22.04.2022 i 29.09.2022 w powietrzu w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	22.04.2022	29.09.2022
Średnia arytmetyczna	$31\,000 \pm 1800$	$29\,800 \pm 1700$
Odchylenie standardowe	2533	1521
Mediana	$31\,600 \pm 1800$	$29\,800 \pm 1600$
Minimum	$26\,000 \pm 1500$	$27\,500 \pm 900$
Maximum	$34\,500 \pm 1900$	$32\,600 \pm 1900$

Średnie arytmetyczne wyników 10-minutowych pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w dniach 22.04.2022 i 29.09.2022 są względem siebie bardzo zbliżone i mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. Również wartości pozostałych parametrów, przy uwzględnieniu ich błędów pomiarowych, można uznać za równe sobie.

7.2.3. Indywidualne inhalacje radonowe

Uzdrowisko Świeradów-Zdrój oferuje swoim gościom również indywidualne zabiegi inhalacji powietrzem wzbogaconym w radon. Odbywają się one w Świeradowie-Zdroju w Zakładzie Radoczyнным. Kuracjusz po zajęciu miejsca (fotela) montuje swój własny ustnik do przewodu, który jest połączony ze szklaną komorą. Wewnątrz komory znajdują się dysze, z których wypuszczana jest woda radonowa, która następnie swobodnie spływa ujściem znajdującym się w dolnej części komory. Budowa urządzenia powoduje, że woda wydostaje się z dysz pod zwiększonym ciśnieniem. Dodatkowo spływa po ścianach komory. Czynniki te powodują zubożenie leczniczej wody radonowej w ^{222}Rn , a tym samym wzbogacenie w ^{222}Rn powietrza znajdującego się wewnątrz komory. Jest to o tyle istotne, że to powietrze jest następnie wdychane przez kuracjusza. Cały zabieg planowo trwa 10 minut.

W przypadku dni pomiarowych, w których dokonywano pomiarów w trakcie inhalacji radonowych, zaczynano je od pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn i podstawowych parametrów fizyko-chemicznych w zbiorniku ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej (Tab. 29).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że stężenie aktywności ^{222}Rn w wodzie ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej we wszystkich dniach pomiarowych utrzymywało się na podobnym poziomie, co pod względem planowania zabiegów jest kluczowe. W tabeli (Tab. 30) przedstawione zostały parametry statystyczne wyznaczone na podstawie wszystkich pomiarów przeprowadzonych w kopalinie, tj. eksploatowanej i zgromadzonej w zbiorniku przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej wodzie radonowej.

Tab. 29. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
29.07.2021	PZ	1026 ± 33	234	5,665	334,4	10,0
30.07.2021	PZ	1000 ± 31	230	5,684	308,2	10,0
02.08.2021	PZ	1016 ± 32	228	5,761	330,0	11,0
03.08.2021	PZ	1010 ± 32	241	5,697	311,0	10,9
21.09.2022	PZ	1044 ± 29	375	6,745	68,9	15,5
	KZ	1056 ± 30	399	6,497	41,2	19
22.09.2022	PZ	1089 ± 28	424	6,390	30,4	14,5
	KZ	1040 ± 29	429	6,527	40,5	15,4

Tab. 30. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	1035 ± 30	320	6,121	183,1	13,3
Odchylenie standardowe	26,9	88	0,430	138,4	3,1
Mediana	1033 ± 29	308	6,076	188,6	12,8

Średnia arytmetyczna otrzymanych wyników w przypadku stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła 1035 ± 30 Bq/dm³, PEW 320 μS/cm, pH 6,121, Eh 183,1 mV i T 13,3°C. Odchylenie standardowe otrzymanych wyników wyniosło dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 26,85 Bq/dm³, PEW 88 μS/cm, pH 0,430, Eh 138,4 mV, T 3,1°C. Mediana natomiast wynosiła dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1033 ± 29 Bq/dm³, PEW 308 μS/cm, Eh 188,6 mV i T 12,8°C.

Po przeprowadzeniu opróbowania wody w zbiorniku kopaliny, kolejnym zaplanowanym miejscem opróbowania był jej pobór bezpośrednio z komory, w której ^{222}Rn uwalniany był z wody do powietrza, którym inhalował się kuracjusz w czasie indywidualnych inhalacji. Niestety ze względu na fakt, że jej rozkręcenie

jest technicznie bardzo trudne i wiąże się z ryzykiem uszkodzenia szklanej obudowy, przeprowadzano pomiary w zimnej wodzie pobliskiego pomieszczenia zabiegowego. Lecznicza woda radonowa w Zakładzie Radocznym jest w podobny sposób transportowana w celu jej dalszego wykorzystania do różnych zabiegów. Ze względu na niewielkie odległości przyjęto więc, że stężenie aktywności ^{222}Rn w wodzie pobranej bezpośrednio z komory oraz zimnej wody pobranej z pobliskiego pomieszczenia zabiegowego (reprezentującego zbiornik tworzywa radonowego) będzie niemal identyczne. Również w tym punkcie pomiarowym przeprowadzano pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody radonowej, będącej już w tym miejscu tworzywem radonowym (Tab. 31).

Tab. 31. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) wody oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w zimnej, radonowej wodzie leczniczej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów danego dnia (KZ) z próbek pobranych z najbliższego inhalatorium punktu poboru (zbiornik tworzywa) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
29.07.2021	PZ	959 ± 31	298	5,764	274,6	15,1
	KZ	963 ± 31	254	5,735	300,3	16,9
30.07.2021	PZ	922 ± 30	238	5,719	282,7	18,8
	KZ	912 ± 29	287	5,748	316,0	18,2
02.08.2021	PZ	951 ± 30	288	5,758	281,4	16,7
	KZ	940 ± 30	273	5,736	291,2	14,3
03.08.2021	PZ	933 ± 30	301	5,728	247,1	17,1
	KZ	955 ± 31	289	5,684	287,5	17,5
21.09.2022	PZ	984 ± 32	420	6,846	108,9	19,5
	KZ	956 ± 30	431	6,521	61,5	21,3
22.09.2022	PZ	1021 ± 32	440	6,445	50,1	19,7
	KZ	940 ± 30	441	6,577	60,7	20,8

We wszystkich dniach pomiarowych najważniejszy z parametrów, stężenie aktywności ^{222}Rn , charakteryzował się bardzo zbliżonymi wartościami, uwzględniając błędy pomiarowe wręcz identycznymi. Tylko jeden z wyników

z początku zabiegów dnia 22.09.2022 roku jest większy od pozostałych o około 40-100 Bq/dm³. Powodem tego może być na przykład zwiększony przepływ wody bezpośrednio przed pobraniem próbki. Wówczas woda nie gromadziła się w przyłączach, gdzie mogło nastąpić jej zubożenie w ²²²Rn.

W poniższej tabeli (Tab. 32) przedstawiono obliczone parametry statystyczne dla wszystkich analizowanych wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn i parametrów fizyko-chemicznych radonowej wody leczniczej z najbliższego inhalatorium punktu poboru.

Tab. 32. Parametry statystyczne dla wartości zmierzonego stężenia aktywności ²²²Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zimnej, radonowej wodzie leczniczej z najbliższego inhalatorium punktu poboru (zbiornik tworzywa) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	²²² Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	953 ± 31	330	6,022	213,5	18,0
Odchylenie standardowe	27,6	75	0,417	103,2	2,1
Mediana	953 ± 31	294	5,753	278,0	17,9

Średnia arytmetyczna uzyskanych wyników stężenia aktywności ²²²Rn wyniosła 953 ± 31 Bq/dm³, PEW 330 μS/cm, pH 6,022, Eh 213,5 mV, T 18,0°C. Odchylenie standardowe wyniosło dla stężenia aktywności ²²²Rn: 27,6 Bq/dm³, PEW 75 μS/cm, pH 0,417, Eh 103,2 mV i T 2,1°C. Mediana uzyskanych wyników była równa dla: stężenia aktywności ²²²Rn 953 ± 31 Bq/dm³, PEW 294 μS/cm, pH 5,753, Eh 278,0 mV i T 17,9°C.

Kolejnym pomiarem wykonywanym podczas zabiegów indywidualnych inhalacji był pomiar stężenia aktywności pochodnych ²²²Rn w powietrzu. Bezpośrednio do przewodu, przez który kuracjusze wdychają powietrze wzbogacone w radon montowany był w sposób szczelny radiometr górniczy RGR-40. Dzięki temu możliwy był pomiar stężenia energii potencjalnej promieniowania α oraz stężenia aktywności pochodnych ²²²Rn w powietrzu (Tab. 33). Pomiar wykonywany był w różnych godzinach w sześciu dniach pomiarowych.

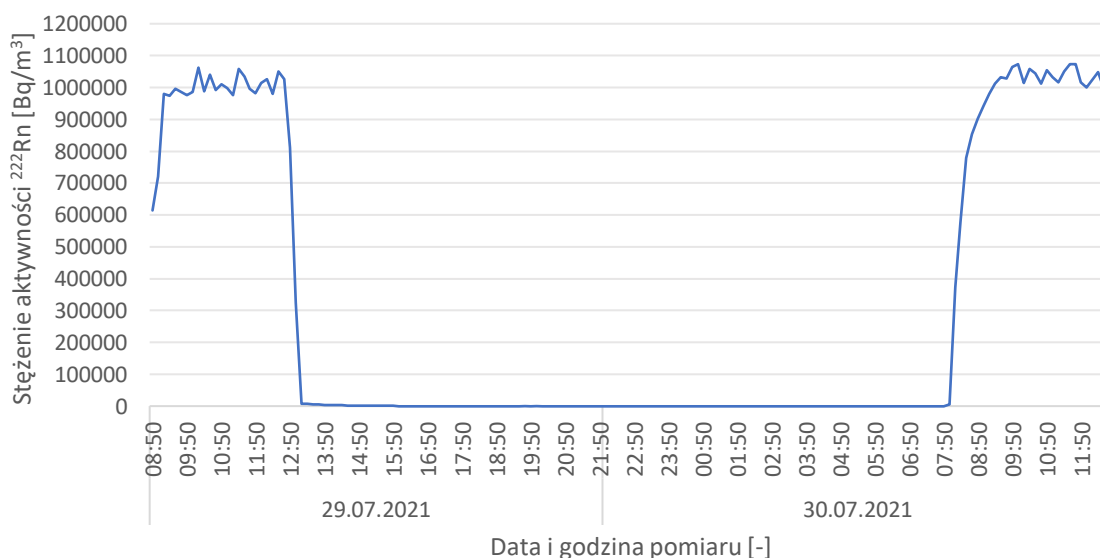
Tab. 33. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Godz. rozpoczęcia pomiaru	Energia potencjalna α [μ]/m ³]
29.07.2021	09:45	< 1
	10:07	< 1
	10:24	< 1
30.07.2021	08:40	< 1
	08:56	< 1
	09:13	< 1
	10:36	< 1
	10:53	< 1
	11:10	< 1
02.08.2021	09:01	< 1
	09:18	< 1
	09:34	< 1
	10:14	< 1
	12:15	< 1
	12:31	< 1
	12:50	< 1
03.08.2021	11:00	< 1
	11:40	< 1
	12:30	< 1
	13:30	< 1
	14:30	< 1
21.09.2022	09:10	< 1
	09:39	< 1
	11:07	< 1
	12:25	< 1
22.09.2022	09:33	< 1
	10:16	< 1
	11:41	< 1
	12:20	< 1

Wszystkie z wykonanych pomiarów wykazały, że w przypadku stężenia energii potencjalnej promieniowania α uzyskane wyniki nie przekraczały LLD radiometru, a co za tym idzie nie jest możliwy także pomiar stężenia aktywności pochodnych radonu.

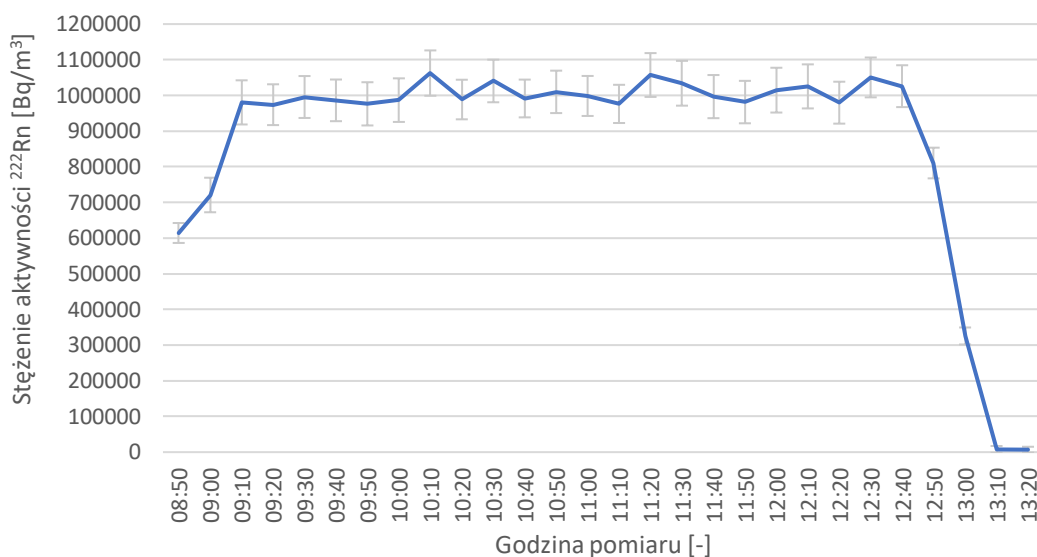
Podczas trzech serii pomiarowych wykonanych w dniach 29-30.07.2021, 02-03.08.2021 roku oraz 21-22.09.2022 roku przeprowadzono pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji.

Podczas pierwszej z serii (Rys. 25) pomiary rozpoczęto od rana (w trakcie trwania pierwszych zabiegów) do ich zakończenia, następnie w trybie ciągłym kontynuowano pomiar przez całą noc. Pomiar był kontynuowany w trybie ciągłym aż do jego zakończenia kolejnego dnia.



Rys. 25. Stężenie aktywności ^{222}Rn w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych oraz pomiędzy nimi w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniach 29-30.07.2021 roku

Na podstawie wykresu (Rys. 25) można stwierdzić, że wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w trakcie zabiegów oraz po ich zakończeniu drastycznie się różnią. W czasie trwania zabiegu wartości stężenia aktywności ^{222}Rn osiągają nawet ponad 1 MBq/m³, podczas gdy po zakończeniu zabiegów szybko maleją do poniżej 300 Bq/m³. Wartości w trakcie zabiegów pierwszego (Rys. 26) i drugiego (Rys. 27) dnia są do siebie zbliżone.



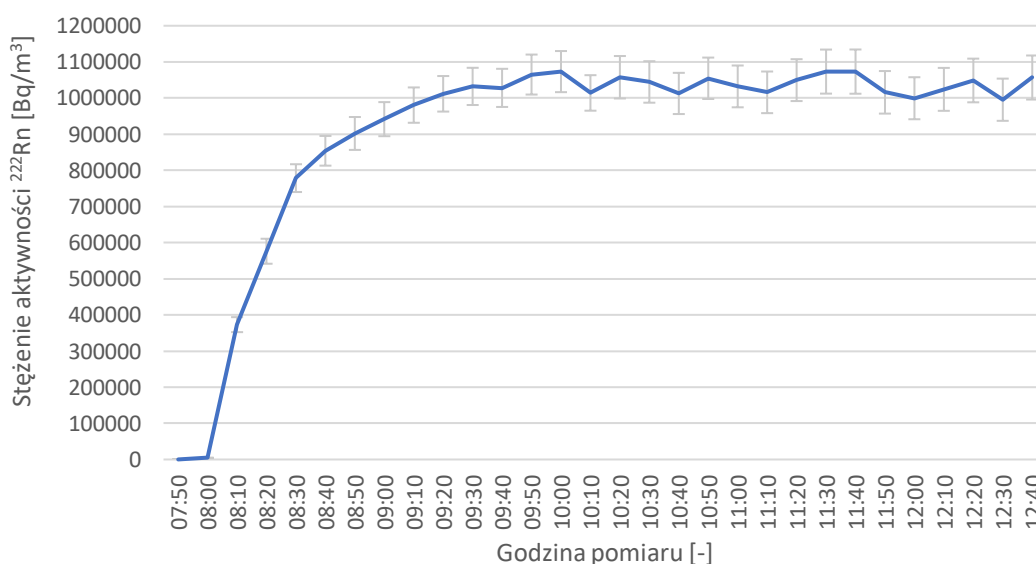
Rys. 26. Stężenie aktywności ²²²Rn w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 29.07.2021 roku

Dnia 29.07.2021 roku pomiar rozpoczęto w trakcie trwania pierwszych zabiegów. Urządzenie AlphaGUARD® bardzo szybko zarejestrowało duże wartości stężenia aktywności ²²²Rn w badanym tworzywie radonowym - powietrzu wykorzystywanym przez kuracjuszy do inhalacji. Już po 20 minutach od momentu rozpoczęcia pomiaru zostały zarejestrowane wartości blisko 1 MBq/m³, który odpowiadał poziomowi w granicach których oscylowało stężenie aktywności ²²²Rn tego dnia. Około godziny 12:40 nastąpiło zakończenie pomiarów (równoczesne z wyłączeniem natrysku wody do zbiorników) i wówczas widoczny był bardzo szybki spadek stężenia aktywności ²²²Rn.

W ciągu pierwszych 10 minut od wyłączenia natrysku wody, stężenie aktywności ²²²Rn zmalało z $1\,026\,000 \pm 58\,700$ Bq/m³ do $810\,600 \pm 43\,000$ Bq/m³ (spadek o blisko 21%). Kolejne 10 minut skutkowało spadkiem do wartości $325\,600 \pm 23\,800$ Bq/m³ (spadek o blisko 60%), a w ciągu następnych 10 minut stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu do inhalacji zmalało do $7\,800 \pm 9\,300$ Bq/m³ (spadek o blisko 98%). W przeciągu pierwszych 20 minut można więc zauważyć, że stężenie aktywności ²²²Rn bardzo szybko maleje (o ponad 99%). Dalszy spadek wartości jest już o wiele wolniejszy. Kolejna godzina skutkuje spadkiem z $7\,800 \pm 9\,300$ Bq/m³ do $2\,990 \pm 3\,580$ Bq/m³ (spadek o blisko 62%), a po kolejnej godzinie do $916 \pm 1\,360$ Bq/m³ (spadek o ponad 69%). Dopiero po 3,5h stężenie aktywności ²²²Rn osiąga wartość poniżej 300 Bq/m³.

Średnia arytmetyczna wyników stężenia aktywności ^{222}Rn w inhalowanym powietrzu w trakcie trwania zabiegów (pomiędzy godziną 9:10 a 12:40) wynosiła $1\,006\,100 \pm 59\,100 \text{ Bq/m}^3$, przy odchyleniu standardowym równym $27\,700 \text{ Bq/m}^3$. Wartość środkowa była równa $996\,200 \pm 59\,600 \text{ Bq/m}^3$. Minimalne zarejestrowane stężenie aktywności ^{222}Rn wynosiło $974\,000 \pm 57\,200 \text{ Bq/m}^3$, natomiast maksymalne $1\,062\,700 \pm 63\,600 \text{ Bq/m}^3$.

Kolejnego dnia (Rys. 27) pomiary trwały już przed rozpoczęciem zabiegów i były dalej kontynuowane, możliwa jest więc analiza tempa w jakim rośnie stężenie aktywności ^{222}Rn od chwili uruchomienia natrysku wody radonowej do zbiornika uwalniającego ^{222}Rn z wody do powietrza dostarczanego do indywidualnego inhalatora.



Rys. 27. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 30.07.2021 roku w powietrzu dostarczanym do zabiegu indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Natrysk do zbiornika został rozpoczęty około godziny 7:50. Już po pierwszych 10 minutach stężenie aktywności ^{222}Rn wzrosło od $181 \pm 48 \text{ Bq/m}^3$ do $4480 \pm 736 \text{ Bq/m}^3$, a po kolejnych 10 minutach do $373\,100 \pm 20\,700 \text{ Bq/m}^3$. Po kolejnych 10 minutach wzrosło do $576\,200 \pm 34\,600 \text{ Bq/m}^3$ (wzrost o ponad 54%) i szybki wzrost trwał aż do 8:30, kiedy stężenie osiągnęło wartość $778\,400 \pm 38\,500 \text{ Bq/m}^3$ (wzrost o ponad 35%). Następnie około godziny 9:10 (czyli po 1:10h od włączenia natrysku) stężenie aktywności ^{222}Rn osiągnęło $980\,500 \pm 48\,900 \text{ Bq/m}^3$ (wzrost o ponad 70%) i dalej utrzymywało się na zbliżonym poziomie. Pomiar w trakcie zabiegów trwał do godziny 12:40.

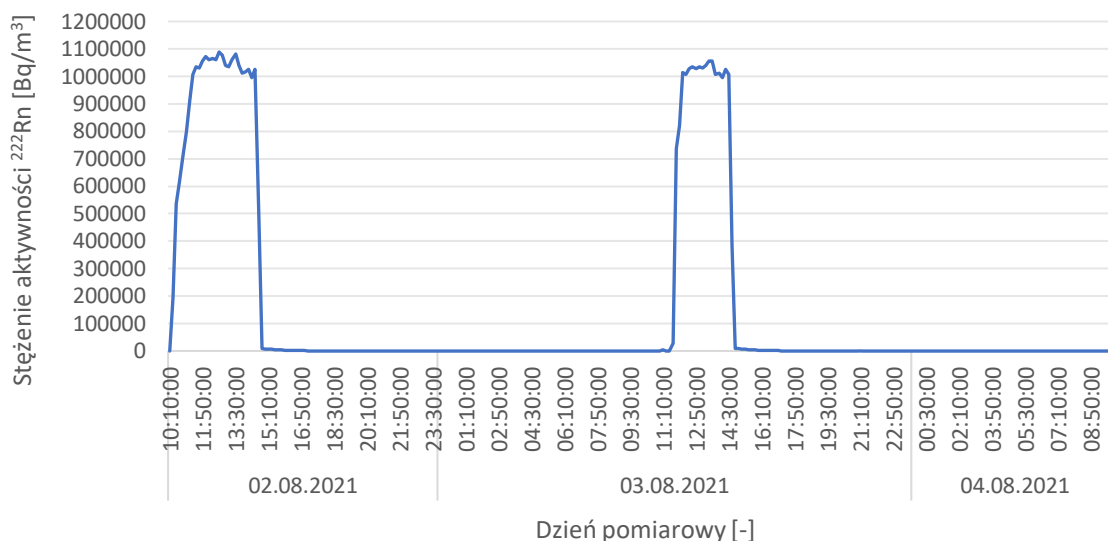
Od chwili osiągnięcia wartości utrzymującej się przez cały czas zabiegów, czyli od godziny około 9:10 do godziny zakończenia, czyli około 12:40, średnia arytmetyczna wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła $1\,034\,400 \pm 56\,600 \text{ Bq/m}^3$. Odchylenie standardowe było równe $26\,400 \text{ Bq/m}^3$, a mediana $1\,032\,200 \pm 51\,500 \text{ Bq/m}^3$. Minimalna zarejestrowana wartość to $980\,500 \pm 48\,900 \text{ Bq/m}^3$, natomiast maksymalna wynosiła $1\,073\,200 \pm 60\,900 \text{ Bq/m}^3$.

Parametry statystyczne z pierwszej serii pomiarów podczas indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój przedstawiono w poniższej tabeli (Tab. 34).

Tab. 34. Parametry statystyczne wartości pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn dniach 29-30.07.2021 w powietrzu dostarczanym do zabiegu indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	29.07.2021 (9:10 – 12:40)	30.07.2021 (9:10 – 12:40)
Średnia arytmetyczna	$1\,006\,100 \pm 59\,100$	$1\,034\,400 \pm 56\,600$
Odchylenie standardowe	27 700	26 390
Mediana	$996\,200 \pm 59\,600$	$1\,032\,200 \pm 51\,500$
Minimum	$974\,000 \pm 57\,200$	$980\,500 \pm 48\,900$
Maximum	$1\,062\,700 \pm 63\,600$	$1\,073\,200 \pm 60\,900$

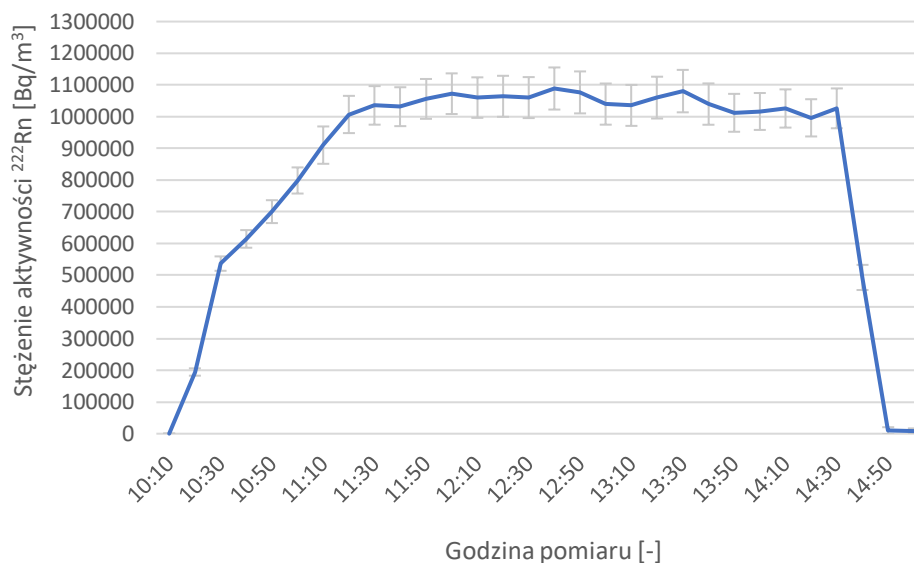
Analogiczne pomiary wykonano także w dniach 02-04.08.2021 roku. Pomiary ciągłe stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu obejmowały zabiegi w dniach 02.08.2021 i 03.08.2021 oraz czas po zakończeniu zabiegów i ich rozpoczęciu kolejnego dnia, jak i pomiary prowadzone w nocy po zabiegach 03.08.2021 roku aż do południa kolejnego dnia (Rys. 28).



Rys. 28. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu wzbogaconym w ^{222}Rn dostarczanym do inhalacji indywidualnych w trakcie zabiegów oraz w okresach pomiędzy zabiegami w dniach 02-03.08.2021 r. w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Na wykresie (Rys. 28) ponownie bardzo wyraźnie widać moment rozpoczęcia i zakończenia zabiegów w trakcie prowadzonych pomiarów. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w momencie, gdy dopływ wody przez dysze jest uruchomiony, jest znacznie większy (o ponad 1 MBq/m³) względem stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, gdy dopływ wody przez dysze jest zamknięty.

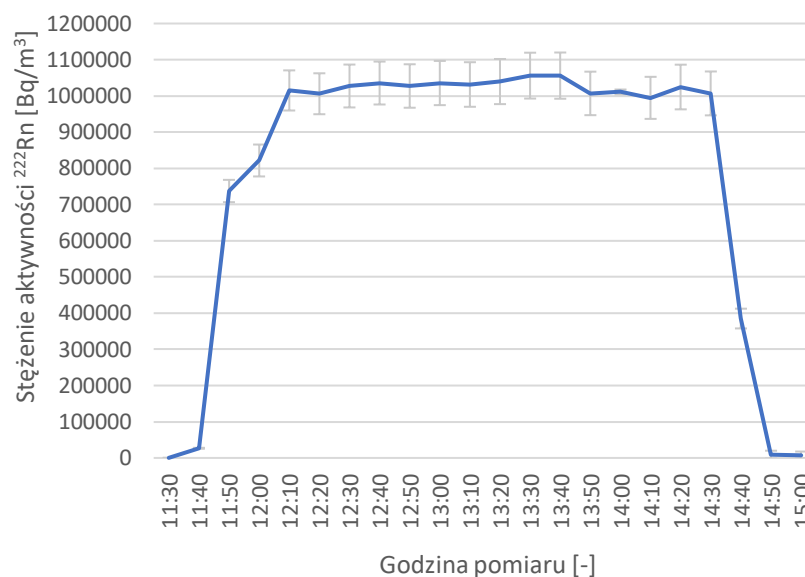
Dnia 02.08.2021 roku dopływ wody uruchomiono około godziny 8:20. Najszybszy wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn nastąpił w pierwszych 20 minutach, kiedy ze $125 \pm 64 \text{ Bq/m}^3$ wartości wzrosły do $536\,600 \text{ Bq/m}^3$ (Rys. 29). Przez kolejne 50 minut stężenie aktywności ^{222}Rn rosło aż do osiągnięcia $1\,006\,900 \pm 58\,800 \text{ Bq/m}^3$ (wzrost o blisko 88%). Na tym poziomie utrzymywało się przez cały czas trwania zabiegów. Pomiary w trakcie zabiegów zakończono tego dnia około 12:40 i wówczas widoczny jest szybki spadek stężenia aktywności ^{222}Rn . W około 20 minut stężenie zmalało do wartości $9\,300 \pm 11\,100 \text{ Bq/m}^3$. Po kolejnych 3h i 10 minutach wartość stężenia aktywności ^{222}Rn spadła poniżej 300 Bq/m^3 .



Rys. 29. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu wzbogaconym w ²²²Rn dostarczanym do indywidualnych inhalacji radonowych podczas zabiegów w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 02.08.2021 r.

W trakcie zabiegów, kiedy stężenie aktywności ²²²Rn jest największe, jego średnia wartość wyniosła $1\,044\,300 \pm 63\,100$ Bq/m³, a odchylenie standardowe było równe $25\,500$ Bq/m³. Mediana uzyskanych wyników pomiarów to $1\,039\,700 \pm 65\,000$ Bq/m³. Najmniejsze zmierzone stężenie aktywności ²²²Rn wynosiło $996\,300 \pm 58\,800$ Bq/m³, a maksymalne $1\,088\,800 \pm 66\,400$ Bq/m³.

Wyniki pomiarów otrzymane kolejnego dnia wykazały podobną tendencję zmian do wyników opisanych powyżej. Najszybszy wzrost stężenia aktywności ²²²Rn nastąpił w pierwszych 20 minutach od włączenia dopływu radonowej wody leczniczej. Stężenie aktywności ²²²Rn wzrosło w tym czasie z 243 ± 78 Bq/m³ do $737\,300 \pm 30\,900$ Bq/m³ (Rys. 30). Po kolejnych 20 minutach osiągnęło poziom $1\,015\,100 \pm 55\,400$ Bq/m³, na którym utrzymywało się przez cały czas trwania zabiegów. Po odłączeniu dopływu wody, spadek stężenia aktywności ²²²Rn był równie szybki. W przeciągu 20 minut stężenie aktywności ²²²Rn spadło z $1\,006\,900 \pm 60\,600$ Bq/m³ do $9\,100 \pm 10\,900$ Bq/m³. Po kolejnych 3 godzinach jego stężenie wynosiło już poniżej 300 Bq/m³.



Rys. 30. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu do inhalacji podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 03.08.2021 r.

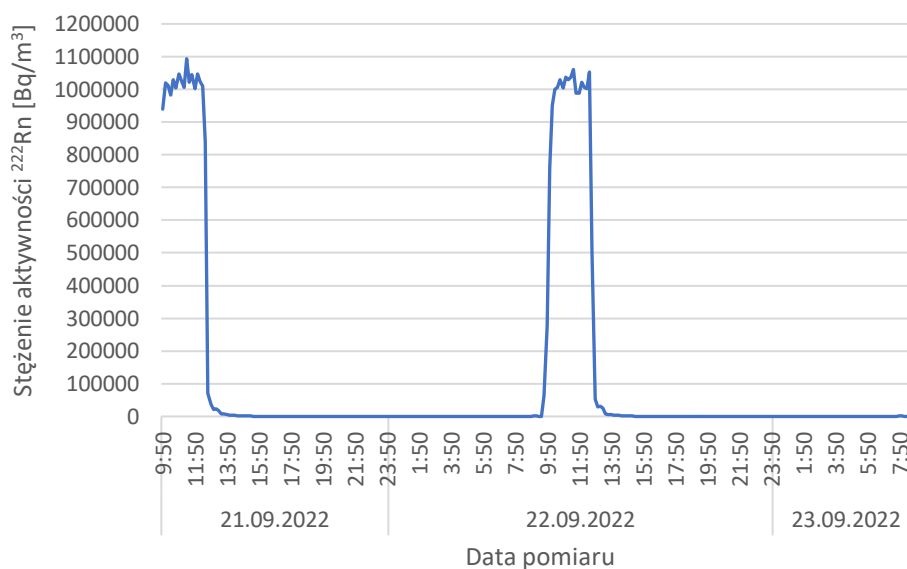
Średnia arytmetyczna wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn od godziny 10:20, czyli od chwili, w której zarejestrowano stężenie na poziomie odpowiadającym dalszym pomiarom, a godziną 12:40, czyli do chwili zakończenia zabiegów, wyniosła $1\,025\,000 \pm 56\,700$ Bq/m³. W tym samym zakresie godzin odchylenie standardowe stężenia aktywności ²²²Rn wyniosło 17 600 Bq/m³, natomiast mediana $1\,027\,400 \pm 59\,200$ Bq/m³. Wartość minimalna była równa $994\,600 \pm 58\,100$ Bq/m³, a maksymalna $1\,056\,100 \pm 63\,900$ Bq/m³.

Obliczone parametry statystyczne dla wyników z drugiej serii pomiarowej przedstawiono w poniższej tabeli (Tab. 35).

Tab. 35. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu do inhalacji radonowych w dniach 29-30.07.2021 podczas zabiegu inhalacji indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	02.08.2021 (9:30 – 12:40)	03.08.2021 (10:20 – 12:40)
Średnia arytmetyczna	$1\,044\,300 \pm 63\,100$	$1\,025\,000 \pm 56\,700$
Odchylenie standardowe	25 500	17 600
Mediana	$1\,039\,700 \pm 65\,000$	$1\,027\,400 \pm 59\,200$
Minimum	$996\,300 \pm 58\,800$	$994\,600 \pm 58\,100$
Maximum	$1\,088\,800 \pm 66\,400$	$1\,056\,100 \pm 63\,900$

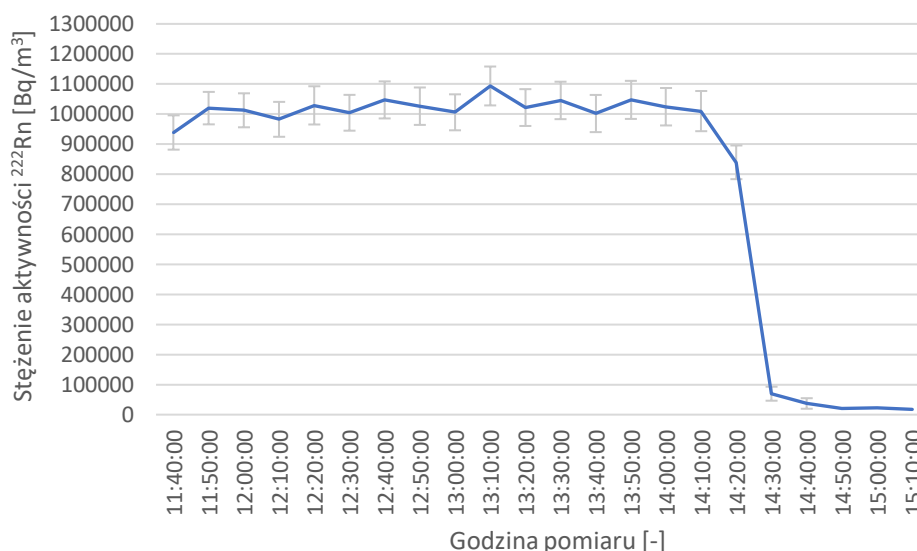
Kolejne pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn przeprowadzone były w dniach 21-23.09.2022 (Rys. 31) i obejmowały dwa dni pomiarów w trakcie zabiegów oraz ze względu na prowadzenie pomiarów ciągłych również pomiar pomiędzy tymi zabiegami (popołudnie, noc).



Rys. 31. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu do inhalacji w trakcie zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych oraz przed i po zabiegach w dniach 21-23.09.2022 r. w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

W przypadku pomiarów przeprowadzonych w dniach 21-23.09.2022 wyraźnie widoczne są okresy, w których przeprowadzano zabieg. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w trakcie ich trwania utrzymuje się na poziomie około 1 MBq/m³.

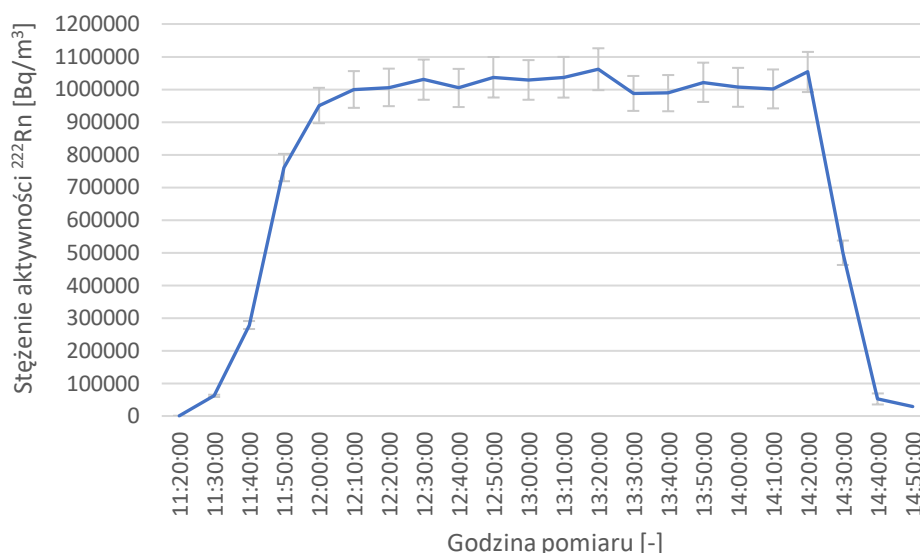
Dnia 21.09.2022 urządzenie rozpoczęło rejestrację wyników w trakcie serii zabiegów kuracjuszy. Z tego względu nie było możliwości określenia szybkości z jaką stężenie aktywności ^{222}Rn rośnie od chwili rozpoczęcia zabiegu. Można natomiast stwierdzić, że z chwilą ich zakończenia, stężenie to bardzo szybko maleje. Spadek wartości od $1\,009\,900 \pm 66\,800$ Bq/m³ do $37\,100 \pm 17\,500$ Bq/m³ nastąpił w przeciągu około 30 minut. Następnie tempo spadku maleje i po następnych 3h i 20 minutach spada poniżej 300 Bq/m³.



Rys. 32. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu wzbogaconym w radon podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 21.09.2022 r.

W czasie zabiegów średnie stężenie aktywności ²²²Rn wyniosło $1\,019\,400 \pm 61\,000$ Bq/m³, a odchylenie standardowe było równe $32\,200$ Bq/m³. Wartość środkowa wynosiła $1\,020\,700 \pm 57\,600$ Bq/m³, przy czym wartość minimalna wynosiła $938\,700 \pm 57\,100$ Bq/m³, a maksymalna $1\,093\,500 \pm 64\,700$ Bq/m³.

Następnego dnia pomiarowego (22.09.2022 roku) zostało zarejestrowane tempo z jakim stężenie aktywności ²²²Rn rośnie od momentu rozpoczęcia dostarczania przez dysze radonowej wody leczniczej do indywidualnych zbiorników szklanych, w których ²²²Rn jest uwalniany do powietrza przeznaczonego do inhalacji indywidualnych. Wzrost stężenia aktywności ²²²Rn z 424 ± 90 Bq/m³ do $760\,600 \pm 41\,800$ Bq/m³ następuje w pierwszych 30 minutach. Po kolejnych 20 minutach stężenie osiąga poziom $999\,600 \pm 56\,200$ Bq/m³, w granicach którego utrzymuje się przez pozostały czas zabiegów. Spadek stężenia aktywności ²²²Rn od chwili zakręcenia wody, podobnie jak we wcześniej analizowanych pomiarach, jest bardzo szybki. W pierwszych 20 minutach jest on największy i z $1\,053\,200 \pm 61\,400$ Bq/m³ maleje do $52\,200 \pm 16\,900$ Bq/m³. Dopiero po kolejnych 3h i 20 minutach maleje osiągając poziom poniżej 300 Bq/m³.



Rys. 33. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu do radonowych inhalacji indywidualnych podczas zabiegów inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 22.09.2022 r.

Średnie stężenie aktywności ²²²Rn w trakcie trwania zabiegów wynosiło $1\,014\,100 \pm 59\,100$ Bq/m³. Odchylenie standardowe było równe $27\,500$ Bq/m³. Mediana wyników wyniosła $1\,006\,100 \pm 59\,600$ Bq/m³, a wartości ekstremalne były równe: minimum $950\,500 \pm 54\,200$ Bq/m³ i maksimum $1\,061\,600 \pm 64\,100$ Bq/m³.

Zebrane parametry statystyczne dla wyników uzyskanych w czasie obu dni pomiarowych przedstawiono poniżej (Tab. 36).

Tab. 36. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn w powietrzu do indywidualnych inhalacji radonowych w dniach 21-22.09.2022 w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	21.09.2022 (9:50 – 12:20)	22.09.2022 (10:10 – 12:30)
Średnia arytmetyczna	$1\,019\,400 \pm 61\,000$	$1\,014\,100 \pm 59\,100$
Odchylenie standardowe	32 200	27 500
Mediana	$1\,020\,700 \pm 57\,600$	$1\,006\,100 \pm 59\,600$
Minimum	$938\,700 \pm 57\,100$	$950\,500 \pm 54\,200$
Maximum	$1\,093\,500 \pm 64\,700$	$1\,061\,600 \pm 64\,100$

7.2.4. Inhalacje grupowe w tężni radonowo-solankowej

Kolejnymi zabiegami z wykorzystaniem leczniczej wody radonowej, oferowanymi przez uzdrowisko Świeradów-Zdrój są zabiegi inhalacji w tężniach radonowo-solankowych w Świeradowie-Zdroju. Zabieg ten trwa 25 minut i w trakcie jego trwania kuracjusz przebywa w pomieszczeniu z centralnie usytuowaną tężnią. W tym czasie zakazane są rozmowy, natomiast zalecana jest relaksacja i spokojne oddychanie.

W celu oceny zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn , badano wodę w: zbiorniku ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej (Tab. 37), pobliskim pomieszczeniu w sali zabiegowej (Tab. 39), początku spływu wody po tężni oraz w ścieku – wodzie po całkowitym spłynięciu z tężni bezpośrednio przed wpływem do zbiornika na ścieki (Tab. 41).

Tab. 37. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie zabiegów w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
		PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
28.07.2021	1043 ± 35	226	5,711	313,3	9,8
04.08.2021	988 ± 31	228	5,598	308,2	10,0
05.08.2021	1002 ± 32	225	5,561	319,4	9,9
23.09.2022	999 ± 32	216	5,472	309,9	10,1

Pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn przeprowadzany był każdego dnia od rana, przed rozpoczęciem zabiegów lub podczas pierwszych zabiegów. Zmierzone wartości stężenia aktywności ^{222}Rn są porównywalne ze sobą w granicach błędów pomiarowych, a średnia ze wszystkich pomiarów wynosi ponad 1000 Bq/dm³ (Tab. 38).

Tab. 38. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	1008 ± 32	224	5,586	312,7	10,0
Odchylenie standardowe	20,7	5	0,086	4,3	0,1
Mediana	1001 ± 31	226	5,580	311,6	10,0

Średnia arytmetyczna otrzymanych wyników wynosi dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1008 ± 32 Bq/dm³, PEW 224 μS/cm, pH 5,586, Eh 312,7 mV i T 10,0°C. Odchylenie standardowe było równe dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 20,7 Bq/dm³, PEW 5 μS/cm, pH 0,086, Eh 4,3 mV oraz T 0,1°C. Wartość środkowa wyniosła natomiast dla: stężenia aktywności ^{222}Rn 1001 ± 31 Bq/dm³, PEW 226 μS/cm, pH 5,580, Eh 311,6 mV i T 10,0°C.

Po pomiarach przeprowadzanych w wodzie ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej, kolejne pomiary autor planował przeprowadzić w próbkach wody pobranych ze zbiornika tworzywa radonowego. Ze względu jednak na brak technicznych możliwości pobrania próbki z założonej lokalizacji, były one pobierane z pobliskiego punktu poboru, znajdującego się w jednym z pomieszczeń w Zakładzie Radoczyнным. Pomiary te traktowano jako równoważne pomiarom wykonanym w zbiorniku tworzywa radonowego. Pomiaru dokonywano wyłącznie w zimnej wodzie (Tab. 39).

Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że ponownie są one sobie równe w granicach błędów pomiarowych. Wartość średniej arytmetycznej ze wszystkich przeprowadzonych pomiarów wyniosła powyżej 900 Bq/dm³ (Tab. 40).

Tab. 39. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w zimnej, radonowej wodzie leczniczej pobranej z punktu poboru znajdującego się w jednym z pomieszczeń Zakładu Radocznego (równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego) w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) w każdym dniu wykonywania pomiarów w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]	Podstawowe parametry fizyko-chemiczne			
			PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
27.07.2021	PZ	972 ± 31	418	6,251	102,0	15,8
28.07.2021	PZ	983 ± 31	421	6,218	120,9	15,9
	KZ	971 ± 31	425	6,114	92,1	16,5
04.08.2021	PZ	934 ± 31	415	6,221	91,4	18,7
	KZ	946 ± 31	409	6,339	130,6	18,5
05.08.2021	PZ	947 ± 31	411	6,148	89,0	17,1
	KZ	950 ± 31	115	6,350	12,0	19,5
23.09.2022	PZ	880 ± 22	435	6,425	47,7	19,9
	KZ	922 ± 23	441	6,761	122,4	17,1

Tab. 40. Parametry statystyczne dla wartości zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zimnej, radonowej wodzie leczniczej z punktu poboru znajdującego się w jednym z pomieszczeń Zakładu Radocznego (równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr	^{222}Rn [Bq/dm ³]	PEW [μS/cm]	pH [-]	Eh [mV]	T [°C]
Średnia arytmetyczna	945 ± 29	388	6,314	89,8	17,7
Odchylenie standardowe	29,4	97	0,184	36,1	1,4
Mediana	945 ± 31	418	6,251	92,0	17,1

Średnia arytmetyczna: stężenia aktywności ^{222}Rn była równa 945 ± 29 Bq/dm³, PEW 388 μS/cm, pH 6,314, Eh 89,8 mV i T 17,7°C. Wartości odchylenia standardowego w przypadku: stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosła 29,4 Bq/dm³, PEW 97 μS/cm, pH 0,184, Eh 36,1 mV i T 1,4°C. Mediana wyników stężenia aktywności ^{222}Rn była równa 945 ± 31 Bq/dm³, PEW 418 μS/cm, pH 6,251, Eh 92,0 mV oraz T 17,1°C.

Kolejny pomiar przeprowadzany był już w sali, w której kuracjusze odbywają zabieg inhalacji, czyli w tężni radonowo-solankowej (Tab. 41). Próbki wody pobierano w miejscu wypływu radonowej wody leczniczej (u szczytu tężni) oraz u dołu tężni, przed spłynięciem wody do zbiornika na ścieki.

Tab. 41. Wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie świeżo dostarczonej do tężni (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Pomiar	Stężenie aktywności ^{222}Rn [Bq/dm ³]
27.07.2021	WP	$57,3 \pm 4,2$
	Ś	$6,5 \pm 0,9$
	WP	$52,2 \pm 3,4$
	Ś	$2,4 \pm 0,50$
28.07.2021	WP	$64,1 \pm 4,7$
	Ś	$2,19 \pm 0,45$
	WP	$62,2 \pm 4,5$
	Ś	$2,49 \pm 0,49$
04.08.2021	WP	$58,8 \pm 3,7$
	Ś	$1,38 \pm 0,30$
	WP	$54,7 \pm 3,1$
	Ś	$1,50 \pm 0,32$
05.08.2021	WP	$55,7 \pm 3,42$
	Ś	$1,36 \pm 0,29$
	WP	$62,4 \pm 3,5$
	Ś	$1,43 \pm 0,29$
23.09.2022	WP	$80,9 \pm 3,8$
	Ś	$0,98 \pm 0,21$
	WP	$76,6 \pm 3,6$
	Ś	$1,12 \pm 0,24$

Zmierzone wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w próbkach wody pobranych z tężni w porównaniu z próbkami ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej, czy też z punktu poboru położonego w pobliżu zbiornika tworzywa radonowego są o wiele mniejsze. W miejscu, gdzie woda rozpoczyna swój bieg, gdzie zaczyna

splywać po przygotowanym drewnie, stężenie aktywności ^{222}Rn ma wartości kilkudziesięciu Bq/dm^3 (średnio $62,5 \pm 3,8 \text{ Bq}/\text{dm}^3$). Po przebyciu całej drogi, radon uwalnia się do powietrza w sali i w ścieku jego stężenie wynosi już maksymalnie kilka Bq/dm^3 (średnio $2,14 \pm 0,40 \text{ Bq}/\text{dm}^3$). Oznacza to, że średnio ponad 96,5% radonu znajdującego się w wodzie przedostaje się do atmosfery. Odchylenie standardowe wyników w przypadku wody świeżo pobranej wynosiło $8,91 \pm 0,48 \text{ Bq}/\text{dm}^3$, a mediana $60,5 \pm 3,6 \text{ Bq}/\text{dm}^3$. W przypadku ścieku odchylenie standardowe stężenia aktywności ^{222}Rn wyniosło $1,55 \pm 0,20 \text{ Bq}/\text{dm}^3$, a mediana $1,47 \pm 0,31 \text{ Bq}/\text{dm}^3$. Pomiar pozostałych parametrów (PEW, pH, Eh, T) ze względu na stosunkowo duże rozmiary elektrod w porównaniu z bardzo niewielkimi ilościami wody przepływającymi przez rynny nie był możliwy.

Tab. 42. Parametry statystyczne wartości zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie świeżo dostarczonej do tężni (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr		$^{222}\text{Rn} [\text{Bq}/\text{dm}^3]$
Średnia arytmetyczna	WP	$62,5 \pm 3,8$
	Ś	$2,14 \pm 0,40$
Odchylenie standardowe	WP	8,91
	Ś	1,55
Mediana	WP	$60,5 \pm 3,6$
	Ś	$1,47 \pm 0,31$

W pomieszczeniu zabiegowym (tężni radonowo-solankowej) poza pomiarami stężenia aktywności ^{222}Rn w wykorzystywanej radonowej wodzie leczniczej wykonano również pomiary w powietrzu, zarówno stężenia aktywności ^{222}Rn , stężenia energii potencjalnej promieniowania α , jak i stężenia aktywności pochodnych radonu.

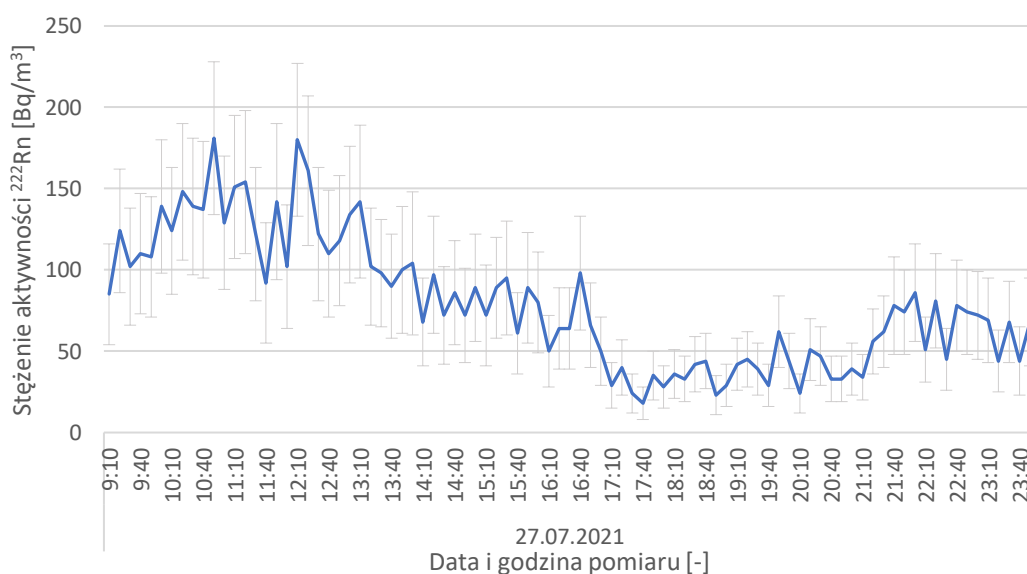
Pomiary stężenia energii potencjalnej promieniowania α oraz stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn dokonywano kilkakrotnie podczas jednego dnia pomiarowego (Tab. 43). Urządzenie podczas pomiaru znajdowało się w miejscu, w którym przebywa kuracjusz (fotel), na wysokości górnych dróg oddechowych.

Tab. 43. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w trakcie zabiegów w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Data	Godzina rozpoczęcia pomiaru	Stężenie energii potencjalnej promieniowania α [$\mu\text{J}/\text{m}^3$]
27.07.2021	9:20	< 1
	10:00	< 1
	10:30	< 1
	11:00	< 1
	11:30	< 1
	12:00	< 1
	12:30	< 1
	13:00	< 1
	13:30	< 1
	14:00	< 1
28.07.2021	7:00	< 1
	7:30	< 1
	8:00	< 1
	8:50	< 1
	9:30	< 1
	10:00	< 1
	10:30	< 1
	11:00	< 1
	11:30	< 1
	12:00	< 1
	12:30	< 1
	13:00	< 1
04.08.2021	8:30	< 1
	9:20	< 1
	10:30	< 1
	11:15	< 1
	12:00	< 1
	12:30	< 1
	13:00	< 1
	13:50	< 1
05.08.2021	7:30	< 1
	8:30	< 1
	9:15	< 1
	10:15	< 1
	11:15	< 1
	12:20	< 1
	13:00	< 1
23.09.2022	9:00	< 1
	10:00	< 1
	10:45	< 1
	11:30	< 1
	12:10	< 1

W przypadku stężenia energii potencjalnej promieniowania α i stężenia aktywności pochodnych radonu, pomiary za pomocą radiometru wykazały, że stężenie energii potencjalnej promieniowania α jest poniżej LLD. Oznacza to, że pomiar stężenia aktywności pochodnych był tym samym niemożliwy.

W pomieszczeniu przez wszystkie dni pomiarowe w trybie ciągłym mierzone było stężenie aktywności ^{222}Rn (Rys. 34 – Rys. 38). Powietrze zasysane było z poziomu położenia górnych dróg oddechowych kuracjuszy.



Rys. 34. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji radonowej w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 27.07.2021 r.

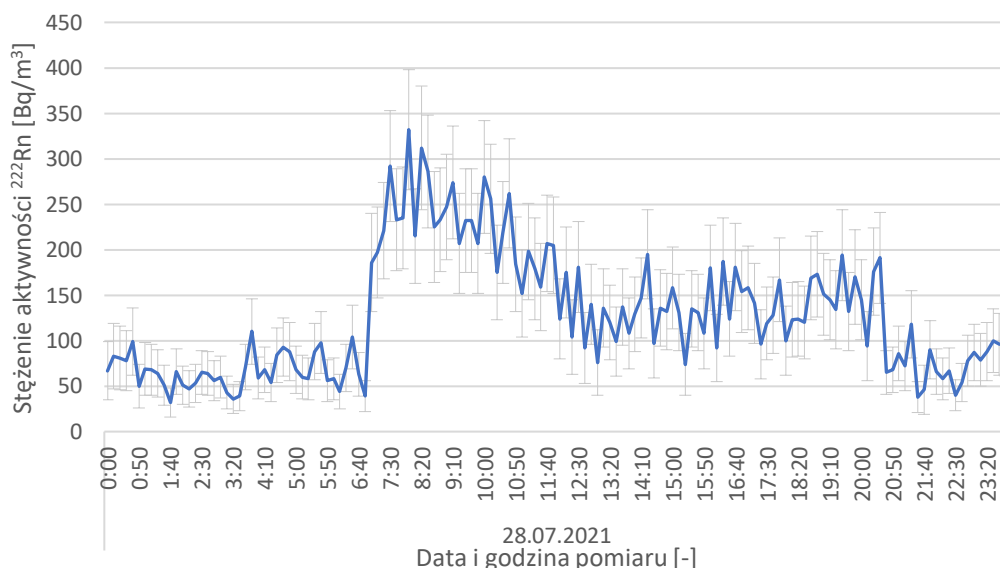
Tężnia radonowa dnia 27.07.2021 roku została uruchomiona około godziny 8:00 (informacja otrzymana od pracowników). Pomiary rozpoczęto o godzinie 9:10, czyli po 1h i 10 minutach od momentu rozpoczęcia pracy tężni. Pompa obsługująca tężnię została wyłączona około godziny 13:00. Należy podkreślić, że tego dnia występowały problemy techniczne podczas pracy pompy skutkujące jej czasowymi wyłączeniami w różnych odstępach czasu.

Średnia arytmetyczna wyników pomiarów (9:10-13:00) stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów wyniosła 130 ± 41 Bq/m³, a odchylenie standardowe 25 Bq/m³. Mediana była równa 127 ± 40 Bq/m³, przy czym wartość minimalna wynosiła 85 ± 31 Bq/m³, a maksymalna 181 ± 47 Bq/m³.

Po wyłączeniu tężni stężenie aktywności ^{222}Rn zmniejszyło się i przez kolejne 3h i 30 minut wahało się w zakresie 50 ± 22 Bq/m³ – 142 ± 47 Bq/m³ (średnio 85 ± 32 Bq/m³). Przez kolejne 4h i 40 minut było jeszcze mniejsze

i mieściło się w granicach $18 \pm 10 \text{ Bq/m}^3 - 98 \pm 35 \text{ Bq/m}^3$ (średnio $40 \pm 16 \text{ Bq/m}^3$) i następnie aż do uruchomienia urządzenia kolejnego dnia oscylowało w przedziale $36 \pm 16 - 110 \pm 36 \text{ Bq/m}^3$ (średnio $66 \pm 26 \text{ Bq/m}^3$).

Moment uruchomienia pompy obsługującej tężnię kolejnego dnia pomiarowego jest wyraźny (Rys. 35).



Rys. 35. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia tężni radonowej podczas zabiegów inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 28.07.2021 r.

Po uruchomieniu urządzenia kolejnego dnia nastąpił nagły wzrost stężenia aktywności ^{222}Rn w pomieszczeniu z $39 \pm 17 \text{ Bq/m}^3$ do $186 \pm 54 \text{ Bq/m}^3$, a więc prawie pięciokrotnie. Po osiągnięciu wartości maksymalnej wynoszącej $332 \pm 66 \text{ Bq/m}^3$, stężenie regularnie malało.

Tego dnia tężnia działała od godziny 6:40 do godziny 12:50. Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn w godzinach przeprowadzania zabiegów wyniosła $204 \pm 53 \text{ Bq/m}^3$, a odchylenie standardowe 64 Bq/m^3 . Wartość środkowa była równa $207 \pm 55 \text{ Bq/m}^3$. Ekstremalne wartości wynosiły: minimalna $39 \pm 17 \text{ Bq/m}^3$ oraz maksymalna $332 \pm 66 \text{ Bq/m}^3$.

Po wyłączeniu urządzenia stężenie aktywności ^{222}Rn utrzymywało się na zbliżonym poziomie, w granicach $74 \pm 34 \text{ Bq/m}^3 - 195 \pm 49 \text{ Bq/m}^3$ (średnio $137 \pm 43 \text{ Bq/m}^3$) przez blisko 8 godzin. Następnie ponownie zmalało do $38 \pm 17 \text{ Bq/m}^3 - 118 \pm 37 \text{ Bq/m}^3$ (średnio $78 \pm 29 \text{ Bq/m}^3$) i utrzymywało się aż do zakończenia pomiarów kolejnego dnia.

Parametry statystyczne z pierwszej serii pomiarowej w tężni radonowo-solankowej zebrano w tabeli (Tab. 44).

Tab. 44. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach (29-30.07.2021) podczas zabiegu inhalacji radonowych w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	27.07.2021 (9:10 – 13:00)	28.07.2021 (6:40 – 12:50)
Średnia arytmetyczna	130 ± 41	204 ± 53
Odchylenie standardowe	25	64
Mediana	127 ± 40	207 ± 55
Minimum	85 ± 31	39 ± 17
Maximum	181 ± 47	332 ± 66

Kolejne dni pomiarowe przypadły na 04-05.08.2021 roku. W pierwszym z nich (Rys. 36) pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu rozpoczęto około godziny 8:40 i kontynuowano w trybie ciągłym do dnia kolejnego, do godziny 12:30 (Rys. 37).



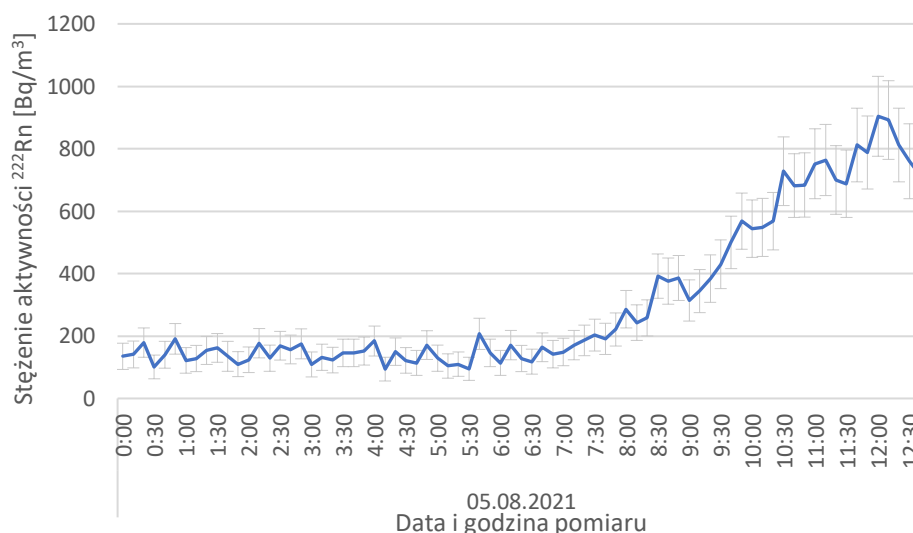
Rys. 36. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji radonowych w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 04.08.2021 r.

Od momentu, w którym rozpoczęto rejestrację pomiarów, stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu cały czas rosło. Po dwóch godzinach osiągnęło poziom, na którym utrzymywało się do końca zabiegów, czyli około 700 Bq/m³. O godzinie 12:50 zakończono zabiegi i wówczas zaznaczył się szybki spadek stężenia aktywności ^{222}Rn . Średnia arytmetyczna aktywności ^{222}Rn w czasie zabiegów, czyli

od rozpoczęcia pomiarów do 12:50 osiągnęła 570 ± 91 Bq/m³, odchylenie standardowe 219 Bq/m³, środkowa wartość 684 ± 110 Bq/m³, a wartości minimum i maksimum odpowiednio 104 ± 48 Bq/m³ i 856 ± 128 Bq/m³ (Tab. 45).

Po zakończeniu zabiegów i tym samym odłączeniu dopływu wody stężenie aktywności ²²²Rn w przeciągu 1h i 10 minut zmniejszyło się z 688 ± 110 Bq/m³ do 92 ± 37 Bq/m³ (spadek o blisko 87%). Następnie aż do uruchomienia urządzenia kolejnego dnia, stężenie to utrzymywało się na zbliżonym poziomie w granicach 58 ± 24 Bq/m³ – 207 ± 50 Bq/m³ (średnio 126 ± 41 Bq/m³).

Kolejnego dnia tężnia została uruchomiona około godziny 7:00 i wyłączona około godziny 12:20 (Rys. 37).



Rys. 37. Stężenie aktywności ²²²Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 05.08.2021 r.

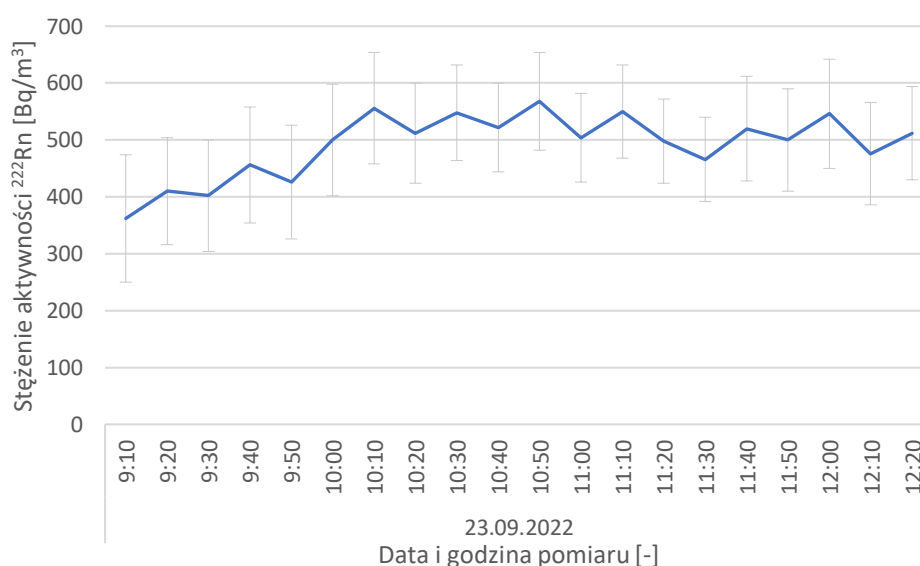
Od chwili włączenia dopływu wody do tężni widoczny jest wzrost stężenia aktywności ²²²Rn. Do momentu rozpoczęcia pierwszego zabiegu (około godziny 8:00) osiągnęło ono wartość 286 ± 60 Bq/m³. Dopiero około godziny 10:30 (3h i 30 minut od uruchomienia dopływu wody do tężni) stężenie aktywności ²²²Rn osiągnęło poziom, na którym utrzymywało się do końca zabiegów (około godziny 12:20).

Średnia arytmetyczna wyników pomiarów stężenia aktywności ²²²Rn w trakcie zabiegów (godziny 8:00 – 12:20) wyniosła 568 ± 93 Bq/m³, odchylenie standardowe 202 Bq/m³. Mediana osiągnęła wartość 568 ± 92 Bq/m³, a wartość minimalna i maksymalna wynosiły odpowiednio 243 ± 57 Bq/m³ i 904 ± 128 Bq/m³ (Tab. 45).

Tab. 45. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w dniach 04-05.08.2021 podczas zabiegu zbiorowej inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)	
	04.08.2021 (8:40 – 12:50)	05.08.2021 (8:00 – 12:20)
Średnia arytmetyczna	570 ± 91	568 ± 93
Odchylenie standardowe	219	202
Mediana	684 ± 110	568 ± 92
Minimum	104 ± 48	243 ± 57
Maximum	856 ± 128	904 ± 128

Kolejne pomiary przeprowadzone zostały 23.09.2022 roku (Rys. 38). Pomiary w całym swoim zakresie objęły wówczas część serii zabiegów przeprowadzanych tego dnia.



Rys. 38. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia tężni radonowo-solankowej podczas zabiegów zbiorowych inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 23.09.2022 r.

Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn w trakcie zabiegów wyniosła 492 ± 90 Bq/m³, odchylenie standardowe było równe 55 Bq/m³. Mediana zarejestrowanych wartości wyniosła 502 ± 110 Bq/m³, natomiast minimalne i maksymalne stężenie wyniosło odpowiednio 362 ± 112 Bq/m³ i 568 ± 86 Bq/m³ (Tab. 46).

Tab. 46. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w dniach 29-30.07.2021 podczas zabiegu inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Data (zakres godzin)
Średnia arytmetyczna	492 ± 90
Odchylenie standardowe	55
Mediana	502 ± 110
Minimum	362 ± 112
Maximum	568 ± 86

7.2.5. Analiza zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej

Uzyskane wyniki z pomiarów w Uzdrawisku Świeradów-Zdrój z każdego dnia pomiarowego zostały uśrednione (Tab. 47) na każdym z poszczególnych etapów poboru próbek wody:

- w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej, tj. w kopalinie,
- w zimnej wodzie radonowej z sali zabiegowej (zastępującej pomiar stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku znajdującym się w Zakładzie Radoczynnym, z którego nie było możliwości pobrania próbki), tj. w tworzywie radonowym – radonowej wodzie leczniczej bezpośrednio przed zabiegami radonoterapii,
- w ścieku, tj. w wodzie po różnych zabiegach.

Ze względu na techniczne możliwości poboru próbek wody podczas zabiegu kąpieli w basenie uwzględniono pomiary jedynie ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej oraz podczas zabiegu. Również brak możliwości poboru próbek wody ze szklanych indywidualnych zbiorników, w których zachodzi uwolnienie ^{222}Rn z wody do powietrza używanego przez kuracjuszy podczas zabiegu indywidualnej inhalacji radonowej spowodował, że nie mogły one zostać uwzględnione w przeprowadzonej analizie.

Tab. 47. Średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w badanych próbkach wody na poszczególnych etapach wykorzystania wody radonowej – od ujęcia eksploatowanej kopaliny, poprzez gromadzone tworzywo radonowe do zużytej w zabiegach wody (ścieku) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Zabieg	Data	Średnia arytmetyczna stężenia aktywności ^{222}Rn [Bq/m ³]			
		Kopalina	Tworzywo radonowe – zbiornik	Tworzywo radonowe – przed zabiegiem	Ściek
kąpiel	19.04.2022	1065 ± 30	1018 ± 31	800 ± 24	668 ± 22
	20.04.2022	1076 ± 30	1021 ± 31	774 ± 24	646 ± 21
	21.04.2022	1058 ± 30	1003 ± 29	770 ± 22	638 ± 21
	26.09.2022	–	986 ± 27	806 ± 25	704 ± 22
	27.09.2022	1032 ± 29	978 ± 28	793 ± 25	674 ± 23
	28.09.2022	1042 ± 29	991 ± 25	790 ± 24	658 ± 22
teżnia	27.07.2021	–	972 ± 31	54,7 ± 3,8	4,47 ± 0,72
	28.07.2021	1043 ± 35	977 ± 31	63,1 ± 4,6	2,34 ± 0,47
	04.08.2021	988 ± 31	940 ± 31	56,7 ± 3,4	1,44 ± 0,31
	05.08.2021	1002 ± 32	948 ± 31	59,1 ± 3,5	1,40 ± 0,29
	23.09.2022	999 ± 32	901 ± 22	78,7 ± 3,7	1,05 ± 0,23
basen	22.04.2022	1032 ± 29	–	937 ± 30	–
	29.09.2022	1084 ± 30	–	1001 ± 30	–
inhalacje	29.07.2021	1026 ± 33	961 ± 31	–	–
	30.07.2021	1000 ± 31	917 ± 30	–	–
	02.08.2021	1016 ± 32	946 ± 30	–	–
	03.08.2021	1010 ± 312	944 ± 31	–	–
	21.09.2022	1050 ± 29	970 ± 31	–	–
	22.09.2022	1064 ± 27	980 ± 31	–	–

Wyliczenie średniego stężenia aktywności ^{222}Rn podczas poszczególnych zabiegów, na kolejnych etapach przepływu leczniczej wody radonowej, umożliwiło obliczenie zmian stężenia aktywności ^{222}Rn podczas: transportu wody ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej (gdzie gromadzona była jako kopalina) do zbiornika w Zakładzie Radocznym (gdzie gromadzona była jako tworzywo lecznicze; odwzorowywała jej właściwości fizyko-chemiczne zimna woda pobierana w sali zabiegowej), transportu ze zbiornika do wykorzystania przed samym zabiegiem (woda zimna mieszana z ciepłą) oraz zmiany w stężeniu aktywności

^{222}Rn przed i po samym zabiegu (Tab. 48). Możliwe było więc wyznaczenie zmian zachodzących w wodzie radonowej od kopaliny przez tworzywo radonowe do ścieku.

Tab. 48. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w badanych próbkach wody na poszczególnych etapach – od ujęcia eksploatowanej kopaliny, poprzez gromadzone tworzywo radonowe, jego użycie podczas zabiegów aż do zużytej w zabiegach wody (ścieku) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Zabieg	Data	Zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn [Bq/m^3]		
		Kopalina → Tworzywo radonowe (zbiornik)	Tworzywo radonowe → Tworzywo radonowe (zbiornik)	Tworzywo radonowe → Tworzywo radonowe (zabieg)
Kąpiel indywidualna	19.04.2022	- 47,3	- 218	- 133
	20.04.2022	- 54,3	- 247	- 127
	21.04.2022	- 55,3	- 233	- 131
	26.09.2022	—	- 180	- 102
	27.09.2022	- 53,5	- 185	- 120
	28.09.2022	- 50,6	- 201	- 132
Tężnia	27.07.2021	—	- 918	- 50,2
	28.07.2021	- 65,8	- 914	- 60,8
	04.08.2021	- 48,2	- 883	- 55,3
	05.08.2021	- 53,3	- 889	- 57,7
	23.09.2022	- 98,3	- 822	- 77,7
Basen	22.04.2022	- 95,7*		—
	29.09.2022	- 83,9*		—
Inhalacje	29.07.2021	- 65,1	—	—
	30.07.2021	- 82,5	—	—
	02.08.2021	- 70,8	—	—
	03.08.2021	- 65,9	—	—
	21.09.2022	- 80,0	—	—
	22.09.2022	- 84,0	—	—

* dotyczy zmian stężenia aktywności ^{222}Rn na etapie kopalina → tworzywo radonowe (zabieg)

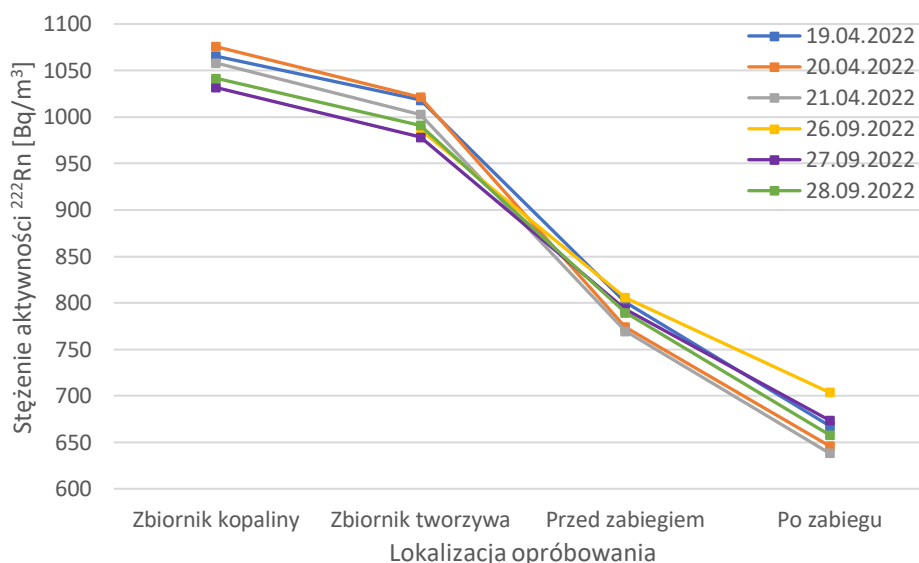
Ze względu na identyczny transport leczniczej wody radonowej ze zbiornika kopaliny do zbiornika tworzywa radonowego w celu dalszego wykorzystania do każdego z przeprowadzanych zabiegów, analizę tego etapu wykonano na podstawie wszystkich otrzymanych wyników.

Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy jego zawartością w kopalinie, a stężeniem w tworzywie radonowym w zbiorniku gromadzącym wodę radonową w Zakładzie Radoczyнным (bezpośrednio przed podaniem jej na zabiegi) wynoszą 47,3-98,3 Bq/dm³ (spadek o 4,4%-9,8% względem stężenia w kopalinie). Średnio stężenie w tworzywie było mniejsze niż stężenie w kopalinie o 54,9 Bq/dm³ (5,2%).

Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie podziemnej w czasie jej transportu pomiędzy zbiornikiem tworzywa radonowego a wykorzystaniem jej w czasie zabiegów radonoterapeutycznych w przypadku kąpeli indywidualnych wynoszą 180-247 Bq/dm³ (spadek stężenia o 18,3%-24,2% względem stężenia w zbiorniku tworzywa radonowego). Średnio stężenie zmniejsza się o 211 Bq/dm³ (21,1%). W porównaniu ze zmianami zachodzącymi na poprzednim etapie, są one ponad trzykrotnie większe. Tak duża różnica może być spowodowana mieszaniami wody zimnej z wodą ciepłą oraz sposobem napełniania wanny wodą. Wanna napełniana jest wodą pod stosunkowo wysokim ciśnieniem, co doprowadza do jej ruchu turbulentnego, a tym samym szybszego uwalniania ^{222}Rn do powietrza w sali zabiegowej.

Podczas zabiegu kąpeli zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy tworzywem radonowym przed zabiegiem, a ściekiem wahają się w granicach od 102 do 133 Bq/dm³ (spadek stężenia o 12,7%-16,6% względem tworzywa radonowego przed zabiegiem), średnio stężenie maleje o 124 Bq/dm³ (15,8%). Jest ono w dużej mierze uzależnione od sposobu zażywania kąpeli przez kuracjusza. Zależy od tego, czy kuracjusz powodował ruch wody, czy zażywał kąpeli spokojnie bez dodatkowego wzbudzania wody.

Obserwując zmiany na poszczególnych etapach, można także stwierdzić, że w każdym dniu pomiarowym, w przypadku zabiegów kąpeli indywidualnych, zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn przebiegały podobnie (Rys. 39).



Rys. 39. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie od kopaliny do ścieku podczas zabiegu indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Największe spadki stężenia aktywności ^{222}Rn miały miejsce na etapie jej transportu ze zbiornika do wykorzystania podczas zabiegu, a zatem w tworzywie radonowym, pośrednie zubożenie w ^{222}Rn następowało podczas zabiegu, a najmniejsze podczas transportu ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej do Zakładu Radocznego.

Średnia łączna zmiana (spadek) stężenia aktywności ^{222}Rn od momentu ujęcia leczniczej wody radonowej do zakończenia jej wykorzystania wynosi 390 Bq/dm^3 (37,0%). Oznacza to tym samym, że w celu przeprowadzenia zabiegu indywidualnej kąpeli w leczniczej wodzie radonowej w taki sposób, aby kuracusz przez cały czas zażywania kąpeli miał styczność z wodą, w której stężenie aktywności ^{222}Rn wynosi powyżej 74 Bq/dm^3 , w ujęciu stężenie aktywności ^{222}Rn powinno wynosić ponad 464 Bq/dm^3 .

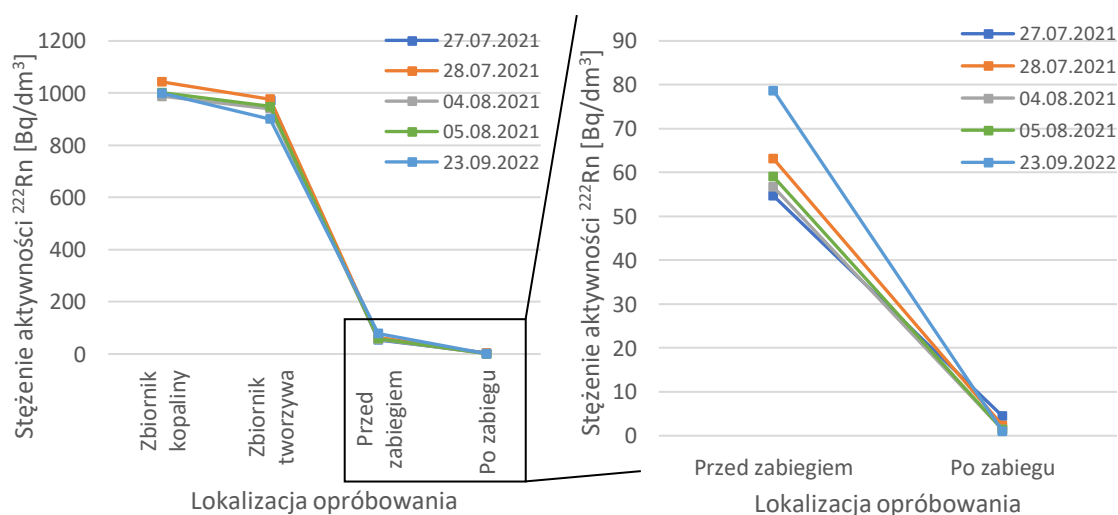
Kolejnym zabiegiem, w trakcie którego pobierane były próbki wody, był zabieg inhalacji w tęźni radonowo-solankowej. W tym przypadku zaskakujący jest spadek stężenia aktywności ^{222}Rn na etapie od zbiornika tworzywa radonowego do rozpoczęcia wykorzystywania wody. Waha się on w granicach $822\text{-}918 \text{ Bq/dm}^3$ (zmiana stężenia o 91,3%-94,4% względem zbiornika tworzywa radonowego) i średnio wynosi 885 Bq/dm^3 (93,4%). Dopływ wody do tęźni jest stosunkowo niewielki. Tak duże odnotowane spadki mogą więc oznaczać, że cały zawarty w wodzie radon w sposób prawie natychmiastowy przedostaje się do powietrza sali zabiegowej, jeszcze przed pobraniem próbki. Z drugiej strony może to także

świadczą o zaleganiu wody w przyłączach i doprowadzaniu już zubożonej w radon wody do tężni. Ta ostatnia możliwość wydaje się bardziej prawdopodobna.

Kolejna zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn dotyczyła różnicy pomiędzy stężeniem aktywności ^{222}Rn w wodzie świeżo dopływającej do tężni a w wodzie, która została już wykorzystana i może zostać uznana za ściek. W tym przypadku zmiany wahały się od 50,3 do 77,7 Bq/dm³ (spadek stężenia o 91,8%-98,7% względem stężenia w dostarczonym do tężni tworzywie radonowym), średnio stężenie aktywności ^{222}Rn malało o 60,3 Bq/dm³ (96,6%). Stężenie aktywności ^{222}Rn w ścieku wynosiło maksymalnie kilka Bq/dm³. Można więc stwierdzić, że cały ^{222}Rn zawarty w leczniczej wodzie radonowej został wykorzystany.

Całkowita zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn od ujęcia kopaliny (od 988 ± 31 Bq/dm³ do 1043 ± 35 Bq/dm³) do zakończenia wykorzystania tworzywa radonowego podczas zabiegu inhalacji w tężni radonowo-solankowej (od $1,05 \pm 0,23$ Bq/dm³ do $4,47 \pm 0,72$ Bq/dm³) wynosi średnio 1006 Bq/dm³ (99,8%).

Tempo zmian stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej w poszczególnych dniach pomiarowych, pomiędzy kolejnymi etapami – od jej gromadzenia w zbiorniku przy ujęciu, poprzez wykorzystanie do odprowadzenia do ścieków było zbliżone (Rys. 40).



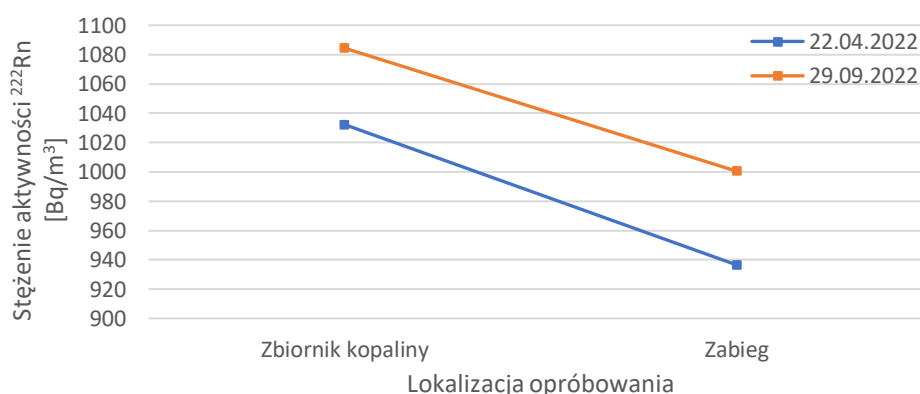
Rys. 40. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej od jej eksploatacji jako kopaliny do ścieku po zabiegu inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

Jak wcześniej podkreślono, największe zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn są zauważalne na etapie pomiędzy zbiornikiem tworzywa radonowego a rozpoczęciem wykorzystania wody w tężni. W celu głębszej analizy należałoby

przeprowadzić dokładną kontrolę instalacji i przyłączy oraz ilości zużytej wody w trakcie całego dnia wykorzystywania tęźni. Mogłoby to być pomocne w stwierdzeniu czy faktycznie ^{222}Rn w sposób wręcz natychmiastowy uwalnia się do atmosfery (co jest bardzo mało prawdopodobne), jeszcze zanim została pobrana próbka wody, czy jest doprowadzana już zubożona w radon woda do instalacji tęźni. Zważywszy na fakt, że wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w sali wykorzystywanej do zabiegów inhalacji grupowych były stosunkowo niewielkie (opisano je we wcześniejszym rozdziale 7.2.4 „Tęźnia radonowo-solankowa (inhalacje)”) można przypuszczać, że problem tkwi w małych wydajnościach przepływu wody lub szybkiej ucieczce radonu z pomieszczenia poprzez nieszczelności, poruszanie się kuracjuszy i częste otwieranie i zamykanie drzwi.

Kolejnym zabiegiem były kąpiele w basenie napełnionym leczniczą wodą radonową. W tym przypadku przeprowadzenie pełnej analizy jest jednak niemożliwe ze względu na fakt, że basen był nieczynny. Z tego też względu pomiary przeprowadzono w niewielkim wymiarze, ponieważ nie odzwierciedlały one realnego przebiegu zabiegów. Woda wypełniająca basen w 100% była wodą zimną. Nie było więc również możliwości przeprowadzenia badań w warunkach panującym podczas dnia zabiegowego z udziałem kuracjuszy.

Niemniej jednak spadek stężenia aktywności ^{222}Rn wahał się w granicach 83,9-95,7 Bq/dm³ (spadek stężenia o 7,7%-9,3% względem stężenia w kopalinie), średnio wynosił 89,8 Bq/dm³ (8,5%). Był on w każdym z dni zbliżony (Rys. 41).



Rys. 41. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej od ujęcia kopaliny do tworzywa radonowego wykorzystywanego do zabiegów w basenie radonowym w uzdrowisku Świeradów-Zdrój

W przypadku, gdyby zabiegi były przeprowadzane w basenie wypełnionym wodą wyłącznie zimną, wówczas w celu osiągnięcia stężenia aktywności ^{222}Rn

powyżej 74 Bq/dm^3 , wystarczyłoby, aby w ujęciu wynosiło ono blisko 164 Bq/dm^3 . Oczywiście przy założeniu stałego przepływu wody w basenie.

Ostatnim z analizowanych zabiegów w uzdrowisku Świeradów-Zdrój były zabiegi indywidualnych inhalacji powietrza wzbogaconego w ^{222}Rn . Ze względu na brak technicznej możliwości pobrania próbek wody bezpośrednio wtryskiwanej do zbiornika, a następnie spływającej do ścieków, analiza jest ograniczona do zmian stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy wodą w zbiorniku kopaliny a próbkami pobranymi z najbliższego inhalatorium punktu poboru (zbiornik tworzywa). Ta z kolei została przeprowadzona na początku tego rozdziału dla wszystkich pomiarów, ponieważ ten etap transportu wody jest identyczny niezależnie od zabiegu, w którym jest ona następnie wykorzystywana.

7.3. Oszacowanie dawek efektywnych od promieniowania jonizującego dla kuracjuszy i pracowników

Szacowanie dawek od promieniowania jonizującego otrzymanych od ^{222}Rn oraz jego krótkożyciowych pochodnych zostało przeprowadzone na podstawie wzoru (8) przedstawionego w rozdziale 6.5. Dawki zostały oszacowane na podstawie zarejestrowanych minimalnych, maksymalnych oraz średnich wartości stężenia aktywności ^{222}Rn scharakteryzowanych w rozdziałach 7.1 (dla uzdrowiska Łądek-Zdrój) oraz 7.2 (dla uzdrowiska Świeradów-Zdrój). Dzięki temu został wyznaczony przedział, w granicach którego mieści się dawka efektywna od promieniowania jonizującego otrzymywana od ^{222}Rn i jego pochodnych. Wykorzystując wartość średnią stężenia aktywności ^{222}Rn możliwe było również oszacowanie średniej dawki, na otrzymanie której narażeni są kuracjusze.

Szacowanie dawek w obu rozpatrywanych uzdrowiskach przeprowadzono osobno oraz w zależności od rodzaju zabiegu. W uzdrowisku Łądek-Zdrój (Tab. 49) były to zabiegi radonowo-siarczkowej kąpeli indywidualnej oraz inhalacji. Dawki zostały obliczone na dwa sposoby. Pierwszym z nich było założenie, że dawka skuteczna od pochodnych ^{222}Rn jest przyjmowana jak dla miejsc pracy, wewnątrz pomieszczeń ($D_{\text{efpo}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$; za ICRP, 2017). Drugim przypadkiem było założenie, że dawka jest przyjmowana jak dla jaskiń turystycznych ($D_{\text{efpo}} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$; za ICRP, 2017).

Ze względu na fakt, że panujące warunki podczas zabiegów nie odpowiadają klasycznym pomieszczeniom w budynkach mieszkalnych czy biurowych, ani jaskiniom, a są pomieszczeniami, w których wilgotność powietrza (nawet podczas inhalacji indywidualnych) jest bliska 100%, dawki efektywne zostały obliczone według dwóch równań: jak dla warunków w pomieszczeniach budynków oraz w jaskiniach. Jest to zgodne z podejściem dozymetrycznym. Należy więc założyć bardziej niekorzystne warunki, aby nie doszło do przekroczenia dawki granicznej. Oszacowanie wymaga jednak w przyszłości przeprowadzenia osobnych badań lub ostatecznego rozstrzygnięcia kwestii charakterystyki warunków panujących w trakcie zabiegów i przyjęcia w związku z tym odpowiedniego algorytmu obliczeń.

Dla każdego z zabiegów wyznaczono wartość minimalną, maksymalną oraz średnią dawki efektywnej odpowiadającą wartościom minimalnym, maksymalnym oraz średnim stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu dodatkowo pomniejszonym i powiększonym o wartość błędu pomiarowego. Przykładowo, chcąc oszacować wartość minimalną dawki efektywnej dla kąpieli indywidualnych w pierwszym etapie wyznaczano wartość minimalną stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas opisywanego zabiegu. Następnie od wyznaczonej wartości odejmowano i dodawano wartość błędu pomiarowego. Na podstawie otrzymanych dwóch wartości (minimum minus błąd pomiarowy oraz minimum plus błąd pomiarowy) wyznaczano dawkę efektywną w oparciu o możliwe dwa założenia: że panujące w pomieszczeniu warunki odpowiadają warunkom panującym wewnątrz pomieszczeń w budynkach ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub warunkom panującym w jaskini ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$). W rezultacie przeprowadzonych działań otrzymywano dwa zakresy dawek efektywnych.

Tab. 49. Oszacowane dawki dla pojedynczego zabiegu kąpieli radonowej i inhalacji radonowej w uzdrowisku Łądek-Zdrój w podziale ze względu na wartości: minimum, średnią i maksimum stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, w zależności od założonego środowiska – pomieszczenie w budynku ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub jaskinia turystyczna ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)

Zabieg	Wartość stężenia aktywności ^{222}Rn [Bq/m^3]		Dawka efektywna [nSv]	
			Pracownicy – pom. w budynku	Jaskinia turystyczna
Kąpiele indywidualne	Minimum	78 ± 68	1,2 – 5,4	1,4 – 5,6
	Średnia	631 ± 105	17 – 24	17 – 24
	Maksimum	1371 ± 163	38 – 48	38 – 48
Inhalacje	Minimum	274 ± 362	0,0 – 31	0,0 – 31
	Średnia	2295 ± 260	95 – 119	95 – 119
	Maksimum	7296 ± 624	308 – 366	308 – 366

W przypadku uzdrowiska Łądek-Zdrój i zabiegu kąpieli indywidualnych minimalna dawka efektywna podczas pojedynczego zabiegu jaką może przyjąć kuracjusz wynosi od 1,2 nSv do 5,6 nSv, średnia natomiast wynosi od około 17 nSv do 24 nSv, podczas gdy wartość maksymalna mieści się w przedziale od 38 nSv do 48 nSv. Podczas inhalacji, minimalna wartość dawki efektywnej wynosi od 0 nSv do 31 nSv, średnia od 95 nSv do 119 nSv natomiast maksymalna od 308 nSv do 366 nSv.

Zarówno w przypadku kąpieli indywidualnych, jak i inhalacji, wielkość dawki efektywnej otrzymanej przez kuracjusza jest wprost proporcjonalna do liczby zabiegów w trakcie np. turnusu (Tab. 50). W przypadku korzystania jednocześnie z obu zabiegów (kąpieli indywidualnych i inhalacji) w turnusie dawka efektywna będzie sumą dawki otrzymanej w trakcie kąpieli indywidualnej i dawki otrzymanej w trakcie inhalacji (Tab. 51).

Tab. 50. Dawka efektywna otrzymywana w trakcie zabiegu kąpiele indywidualnych oraz inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby zabiegów

Zabieg	Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Dawka efektywna [nSv] w zależności od liczby zabiegów				
		5	10	14	18	25
Kąpiele indywidualne	Minimum	6-28	12- 56	17 - 78	22-101	30-140
	Średnia	85-118	170 - 237	238- 332	306-426	426-592
	Maksimum	190-241	379 - 481	531- 674	683-867	948-1204
Inhalacje	Minimum	0 - 155	0 - 309	0 - 433	0 - 557	0 - 773
	Średnia	475 - 596	949 - 1192	1329 - 1668	1708 - 2145	2373 - 2979
	Maksimum	1541 - 1829	3081 - 3658	4313 - 5121	5546 - 6584	7702 - 9145

Tab. 51. Sumaryczna dawka efektywna otrzymywana w czasie zabiegów kąpiele indywidualnych i inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby zabiegów

Zabieg	Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Dawka efektywna [nSv] w zależności od liczby zabiegów				
		Po 5	Po 10	Po 14	Po 18	Po 25
Kąpiel ind. oraz inhalacje	Minimum	6-183	12-365	17-511	22-658	30-913
	Średnia	560-714	1119-1428	1567-2000	2015-2571	2798-3571
	Maksimum	1730-2070	3460-4139	4844-5795	6228-7451	8650-10349

Jak wynika z tabel (Tab. 50, Tab. 51), w przypadku kuracjusza odbywającego 25 zabiegów kąpeli radonowej indywidualnej średnia dawka efektywna wyniesie od 426 nSv do 592 nSv, natomiast maksymalna od 948 nSv do 1204 nSv. W tym przypadku przyjęty zakres minimum-maksimum ponownie jest efektem oszacowania dawki w zależności od przyjętych, panujących warunków, tj. jak wewnątrz pomieszczeń ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub jak w jaskiniach turystycznych ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$). Dla zabiegów inhalacji, średnio dla 25 zabiegów dawka wynosi od 2373 nSv do 2979 nSv, a maksymalna od 7702 nSv do 9145 nSv. Gdyby kuracjusz odbywał jednocześnie 25 zabiegów kąpeli oraz 25 zabiegów inhalacji, wówczas średnia dawka wyniosłaby od 2798 nSv do 3571 nSv a maksymalna od 8650 nSv do 10349 nSv.

Maksymalna dawka po 25 zabiegach kąpeli indywidualnych oraz inhalacji, przy założeniu oszacowania dawki efektywnej jak dla warunków zbliżonych do panujących wewnątrz budynków, otrzymana przez kuracjusza wyniosłaby w przybliżeniu 10 μSv , co w porównaniu z dopuszczalną dawką efektywną dla osób z ogółu ludności wynoszącą 1 mSv/rok (Ustawa, 2000) stanowi jedynie 1%.

W przypadku pracowników uzdrowiska obsługujących oba omawiane zabiegi (inhalacje oraz indywidualne kąpiele) należy spodziewać się otrzymania większych dawek efektywnych w zależności od czasu pracy w środowisku o danym stężeniu aktywności ^{222}Rn w powietrzu.

Dla sali, w której odbywają się zabiegi inhalacji, pracownik przebywa w jednym z sąsiadujących z nią pomieszczeń (pokój obok lub szatnia i poczekalnia). W okresach letnich pokój jest stale wietrzony dzięki otwieraniu okna. Wówczas wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu są pomijalne w porównaniu ze stężeniami panującymi w sali zabiegowej. Otrzymana dawka efektywna będzie więc zależała od czasu, w którym pracownik obsługuje pacjentów w pomieszczeniu zabiegowym (Tab. 52). Do obliczeń założono, że w roku kalendarzowym występuje 250 dni roboczych.

Tab. 52. Roczne dawki efektywne otrzymane przez pracownika obsługującego zabiegi inhalacji radonowej w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu pracy spędzonego na sali zabiegowej

Udział czasu pracy na sali zabiegowej [%]	Dzienna liczba godzin pracy [h]				
	2	4	6	7	8
	Roczna średnia dawka efektywna [mSv]				
10	0,02–0,02	0,04–0,05	0,06–0,07	0,07–0,08	0,08–0,10
20	0,04–0,05	0,08–0,10	0,11–0,14	0,13–0,17	0,15–0,19
30	0,06–0,07	0,11–0,14	0,17–0,21	0,20–0,25	0,23–0,29
40	0,08–0,10	0,15–0,19	0,23–0,29	0,27–0,33	0,30–0,38
50	0,09–0,12	0,19–0,24	0,28–0,36	0,33–0,42	0,38–0,48
60	0,11–0,14	0,23–0,29	0,34–0,43	0,40–0,50	0,46–0,57
70	0,13–0,17	0,27–0,33	0,40–0,50	0,47–0,58	0,53–0,67
80	0,15–0,19	0,30–0,38	0,46–0,57	0,53–0,67	0,61–0,76
90	0,17–0,21	0,34–0,43	0,51–0,64	0,60–0,75	0,68–0,86
100	0,19–0,24	0,38–0,48	0,57–0,71	0,66–0,83	0,76–0,95

W opisywanym przypadku jedynie przy 8 godzinach pracy dziennie, z czego 100% czasu spędzane byłoby na sali zabiegowej, należy się liczyć z możliwością otrzymania dawki blisko 1 mSv (tj. 100% dawki dla ogółu ludności i 5% dla pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące).

Analogiczne oszacowanie zostało wykonane dla pracownika obsługującego kuracjuszy podczas kąpiei indywidualnych (Tab. 53).

Tab. 53. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi kąpielii indywidualnych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego w sali kąpielowej

Udział czasu pracy na sali kąpielowej [%]	Dzienna liczba godzin pracy [h]				
	2	4	6	7	8
	Roczna średnia dawka efektywna [mSv]				
10	0,01-0,01	0,01-0,01	0,02-0,02	0,02-0,02	0,02-0,03
20	0,01-0,01	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,04-0,06
30	0,02-0,02	0,03-0,04	0,05-0,06	0,05-0,07	0,06-0,09
40	0,02-0,03	0,04-0,06	0,06-0,09	0,07-0,10	0,08-0,11
50	0,03-0,04	0,05-0,07	0,08-0,11	0,09-0,12	0,10-0,14
60	0,03-0,04	0,06-0,09	0,09-0,13	0,11-0,15	0,12-0,17
70	0,04-0,05	0,07-0,10	0,11-0,15	0,13-0,17	0,14-0,20
80	0,04-0,06	0,08-0,11	0,12-0,17	0,14-0,20	0,16-0,23
90	0,05-0,06	0,09-0,13	0,14-0,19	0,16-0,22	0,18-0,26
100	0,05-0,07	0,10-0,14	0,15-0,21	0,18-0,25	0,20-0,28

Możliwe do otrzymania roczne dawki efektywne podczas obsługi indywidualnych kąpeli radonowych wynoszą maksymalnie (przy założeniu 8 godzin pracy dziennie, 250 dni w roku, w 100% w sali zabiegowej) 0,28 mSv, co stanowi niewielką część (28%) dawki dla osób z ogółu ludności i zaledwie ułamek (1,4%) dawki dla pracowników zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące.

W żadnym z powyższych przypadków nie występuje więc ryzyko przekroczenia dopuszczalnej dawki ani dla osób z ogółu ludności ani dla pracowników przeprowadzających zabiegi inhalacji oraz indywidualnych kąpeli.

Analogiczne oszacowanie dawek efektywnych dla zabiegów wykorzystujących radonową wodę leczniczą zostało przeprowadzone dla uzdrowiska Świeradów-Zdrój (Tab. 54).

Tab. 54. Oszacowane dawki efektywne dla pojedynczych zabiegów wykorzystujących radonową wodę leczniczą w uzdrowisku Świeradów-Zdrój obliczone dla minimum, średniej i maksimum stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, w zależności od założonego środowiska – pomieszczenie w budynku ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub jaskinia turystyczna ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)

Zabieg	Wartość [Bq/m ³]		Dawka efektywna [nSv]	
			Pracownicy – pom. w budynku	Jaskinia turystyczna
Kąpiele indyw.	Minimum	260 ± 60	7 – 11	7 – 11
	Średnia	639 ± 103	17 – 24	18 – 24
	Maksimum	1264 ± 140	35 – 44	36 – 44
Basen	Minimum	26000 ± 1500	1129 – 1268	1129 – 1268
	Średnia	30500 ± 1700	1324 – 1485	1324 – 1485
	Maksimum	34500 ± 1900	1503 – 1674	1503 – 1674
Inhalacje indyw.	Minimum	938700 ± 57100	27022 – 30521	27022 – 30521
	Średnia	1024300 ± 59300	29579 – 33212	29579 – 33212
	Maksimum	1093500 ± 64700	31533 – 35499	31533 – 35499
Tężnia	Minimum	39 ± 17	4 – 7	5 – 7
	Średnia	377 ± 71	26 – 37	26 – 37
	Maksimum	904 ± 128	62 – 81	62 – 82

Dla zabiegu indywidualnych kąpiei w leczniczej wodzie radonowej minimalna dawka, na przyjęcie której narażeni są kuracjusze wynosi od 7 do 11 nSv, a maksymalna od 35 do 44 nSv. Dla średniego stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu występującego podczas zabiegów ($639 \pm 103 \text{ Bq/dm}^3$), dawka efektywna waha się w zakresie od 17 nSv do 24 nSv.

W przypadku zabiegów kąpiei w basenie z leczniczą wodą radonową należy ponownie podkreślić, że oszacowane dawki dotyczą tylko sytuacji, w której w basenie byłaby używana wyłącznie woda zimna. Jest to więc czysto hipotetyczne oszacowanie, chyba że pomieszczenie, w którym odbywają się zabiegi kąpiei zostałyby wykorzystane jako pomieszczenie do inhalacji radonu z wody napełniającej basen.

Minimalna dawka efektywna wynosi od 1129 nSv do 1268 nSv, średnia od 1324 nSv do 1485 nSv, natomiast maksymalna, na przyjęcie której mogliby być narażeni kuracjusze sięga od 1503 nSv do 1674 nSv.

Kolejnym rozpatrywanym zabiegiem, w którym wykorzystywany jest ^{222}Rn są zabiegi indywidualnych inhalacji. Minimalna wartość dawki efektywnej jaką w czasie tego zabiegu mogą otrzymać kuracjusze waha się od 27 022 nSv do 30 521 nSv, średnia wynosi od 29 579 nSv do 33 212 nSv, natomiast maksymalna od 31 533 nSv do 35 499 nSv.

Ostatnim z rozpatrywanych zabiegów radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój jest zabieg inhalacji w tęźni radonowo-solankowej. Minimalna dawka efektywna wynosi dla pojedynczego zabiegu od 4 nSv do 7 nSv, średnia od 26 nSv do 37 nSv, natomiast maksymalna, na przyjęcie której mogliby być narażeni kuracjusze wynosi od 62 nSv do 82 nSv.

Największa z oszacowanych dawek, na którą mogą zostać narażeni kuracjusze podczas zabiegów radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój jest zabieg inhalacji indywidualnych. Dawki efektywne, jakie mogą otrzymać kuracjusze w czasie indywidualnych inhalacji radonowych są o 3 rzędy wielkości większe od dawek podczas zabiegów kąpieli indywidualnych i inhalacji w tęźni i o 1 rząd wielkości większe niż oszacowane dawki na basenie. W przypadku kąpieli indywidualnych oraz tęźni radonowo-solankowej dawki większe występują w tęźni, pomimo że stężenie aktywności ^{222}Rn jest tam mniejsze. Wpływ na taki rozkład dawek ma jednak czas trwania zabiegu, który w przypadku kąpieli wynosi 10 min., natomiast w tęźni 25 minut.

Ponieważ kuracjusze odbywają zabiegi w określonej liczbie, należy brać pod uwagę liczbę zabiegów, która ma wpływ na sumaryczną dawkę efektywną w czasie całego pobytu w uzdrowisku. Poniżej (Tab. 55) zostały przedstawione oszacowane wartości dawki efektywnej w zależności od liczby zabiegów kąpieli indywidualnych, kąpieli w basenie, inhalacji indywidualnych oraz inhalacji w tęźni radonowo-solankowej. Ze względu na to, że kuracjusze odbywają nie tylko kilka zabiegów jednego typu (na przykład 10 zabiegów kąpieli indywidualnych), ale również łączą różne rodzaje zabiegów radonowych, należy pamiętać, że w tym przypadku w zależności od tego jakie zabiegi są ze sobą połączone, ostateczna dawka otrzymana przez kuracjusza w czasie jednego turnusu (pobytu w uzdrowisku) może się różnić. Dla przykładu zostało przedstawione (Tab. 56) na jakie wielkości dawki efektywnej może być narażony kuracjusz łączący zabieg

indywidualnych kąpiel radonowych i indywidualnych inhalacji radonowych w zależności do liczby tych zabiegów.

Tab. 55. Oszacowana dawka efektywna otrzymywana w trakcie zabiegów wykorzystujących leczniczą wodę radonową w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby zabiegów

Zabieg	Wartość [Bq/m ³]	Dawka efektywna [nSv] w zależności od liczby zabiegów				
		5	10	14	18	25
Kąpiele	Minimum	35-55	70-109	98-153	127-197	176-273
	Średnia	87-119	173-239	243-334	312-430	433-597
	Maksimum	177-221	354-442	495-618	636-795	884-1104
basen	Minimum	5644-6341	11288-12682	15804-17755	20319-22827	28221-31705
	Średnia	6620-7425	13240-14850	18536-20789	23832-26729	33100-37124
	Maksimum	7514-8372	15029-16744	21040-23442	27052-30140	37572-41861
Inhalacje	Minimum	135108-152607	270217-305213	378303-427299	486390-549384	675541-763033
	Średnia	147894-166060	295789-33220	414104-464967	532420-597815	739472-830299
	Maksimum	157664-177497	315328-354993	441459-496991	567590-638988	788320-887483
Tężnia	Minimum	20-36	39-71	55-99	71-128	98-178
	Średnia	129-186	257-371	360-520	463-669	643-929
	Maksimum	309-410	617-819	863,9-1147	1111-1474	1543-2047

Tab. 56. Sumaryczna dawka efektywna dla zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych i indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności liczby zabiegów

Zabieg	Parametr statystyczny [Bq/m ³]	Dawka efektywna [mSv] w zależności od liczby zabiegów				
		Po 5	Po 10	Po 14	Po 18	Po 25
Kąpiel indywidualna oraz inhalacja indywidualna	Minimum	0,14–0,15	0,27–0,31	0,38–0,43	0,49–0,55	0,68–0,76
	Średnia	0,15–0,17	0,30–0,33	0,41–0,47	0,53–0,60	0,74–0,83
	Maksimum	0,16–0,18	0,32–0,36	0,44–0,50	0,57–0,64	0,79–0,89

W przypadku zabiegów w tęźni radonowo-solankowej oraz radonowych kąpeli indywidualnych oszacowana dawka po największej liczbie zabiegów (25) jest stosunkowo niewielka. Dla pierwszego z nich wynosi średnio od 643 nSv do 929 nSv natomiast w przypadku kąpeli od 433 nSv do 597 nSv. Dawki efektywne w przypadku obu zabiegów są więc mniejsze niż 10^{-3} mSv, co przy dopuszczalnej dawce 1 mSv dla osób z ogółu ludności (Ustawa, 2000) jest jedynie jej niewielką częścią (poniżej 0,1%). Nawet przy założeniu otrzymywania maksymalnych oszacowanych dawek, nadal dawka graniczna nie zostanie na pewno przekroczona.

Dawka efektywna w przypadku indywidualnych inhalacji wygląda już zupełnie inaczej. Średnia dawka po 25 zabiegach wynosi od 739 472 nSv do 830 299 nSv, czyli od 0,74 mSv do 0,83 mSv. Ze względu na dopuszczalną dawkę roczną określoną dla osób z ogółu ludności na 1 mSv (Ustawa, 2000), należałoby mieć dodatkowo na uwadze kierując kuracjusza na tego typu zabiegi jego dotychczasowe narażenie na promieniowanie jonizujące (np. podczas prześwietleń Rtg) i dawkę, którą kuracjusz mógł już wcześniej przyjąć. Należy mieć na względzie, że w efekcie dawka graniczna może zostać ostatecznie przekroczona. W przypadku, gdyby kuracjusz dodatkowo wykupił zabiegi indywidualnych inhalacji lub danego roku ponownie odwiedził to samo lub inne uzdrowisko i korzystał w nim z zabiegów, podczas których narażony byłby na promieniowanie jonizujące, wówczas roczna dawka graniczna może zostać przekroczona. Podczas planowania zabiegów indywidualnych inhalacji konieczne jest więc branie pod uwagę dotychczasowego narażenia kuracjusza na promieniowanie jonizujące.

Oszacowanie dawek efektywnych, analogicznie jak dla pracowników Uzdrowiska Łądek-Zdrój, zostało przeprowadzone dla pracowników uzdrowiska Świeradów-Zdrój. Otrzymana dawka zależy, tak jak wspomniano podczas wcześniejszego oszacowania, od liczby godzin pracy, w szczególności od czasu, w którym pracownik przebywa w pomieszczeniu zabiegowym, w którym prowadzona jest radonoterapia.

W przypadku indywidualnych kąpeli radonowych, pracownicy są narażeni w czasie przygotowywania wanny do zabiegów, tłumaczenia kuracjom na czym zabieg polega wewnątrz sali, czy też mycia wanny po zabiegu. Do oszacowania dawek otrzymanych podczas obsługi zabiegów tego typu, ponownie założono, że w roku kalendarzowym występuje 250 dni roboczych (Tab. 57).

Tab. 57. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi radonowych kąpielí indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej

Udział czasu pracy na sali zabiegowej [%]	Dzienna liczba godzin pracy [h]				
	2	4	6	7	8
	Roczna średnia dawka efektywna [mSv]				
10	0,01–0,01	0,01–0,01	0,02–0,02	0,02–0,03	0,02–0,03
20	0,01–0,01	0,02–0,03	0,03–0,04	0,04–0,05	0,04–0,06
30	0,02–0,02	0,03–0,04	0,05–0,06	0,05–0,08	0,06–0,09
40	0,02–0,03	0,04–0,06	0,06–0,09	0,07–0,10	0,08–0,11
50	0,03–0,04	0,05–0,07	0,08–0,11	0,09–0,13	0,10–0,14
60	0,03–0,04	0,06–0,09	0,09–0,13	0,11–0,15	0,12–0,17
70	0,04–0,05	0,07–0,10	0,11–0,15	0,13–0,18	0,15–0,20
80	0,04–0,06	0,08–0,11	0,12–0,17	0,15–0,20	0,17–0,23
90	0,05–0,06	0,09–0,13	0,14–0,19	0,16–0,23	0,19–0,26
100	0,05–0,07	0,10–0,14	0,16–0,21	0,18–0,25	0,21–0,29

Największa dawka efektywna występuje oczywiście przy założeniu 100% czasu przebywania w sali przez 8 godzin pracy dziennie. Należy jednak mieć na uwadze, że do takiej sytuacji nie dochodzi o ile w pomieszczeniu sąsiadującym z pomieszczeniem zabiegowym nie wystąpi stężenie aktywności ^{222}Rn równe stężeniu w sali zabiegowej. Jest to jednak sytuacja nierealna ze względu na fakt, że pomieszczenie sąsiadujące stanowi bardzo długi korytarz, z wieloma oknami połączony z drzwiami wejściowymi do Zakładu Przyrodoleczniczego. Niemniej jednak, nawet przy założeniu najbardziej niekorzystnej (choć nierealnej) sytuacji, dawka efektywna wyniosłaby maksymalnie 0,29 mSv, co nadal nie przekracza dopuszczalnej dawki rocznej dla osób z ogółu ludności. Można więc uznać, że pracownicy obsługujący zabiegi kąpielí indywidualnych nie są narażeni na przekroczenie dopuszczalnej dawki dla osób z ogółu ludności, wynoszącej 1 mSv/rok.

Kolejnym zabiegiem, dla którego zostały oszacowane dawki efektywne dla pracowników był zabieg kąpielí w basenie (Tab. 58).

Tab. 58. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi kąpiel radonowej w basenie w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej

Udział czasu pracy na sali zabiegowej [%]	Dzienna liczba godzin pracy [h]				
	2	4	6	7	8
	Roczna średnia dawka efektywna [mSv]				
10	0,26–0,30	0,53–0,59	0,79–0,89	0,93–1,04	1,06–1,19
20	0,53–0,59	1,06–1,19	1,59–1,78	1,85–2,08	2,12–2,38
30	0,79–0,89	1,59–1,78	2,38–2,67	2,78–3,12	3,18–3,56
40	1,06–1,19	2,12–2,38	3,18–3,56	3,71–4,16	4,24–4,75
50	1,32–1,48	2,65–2,97	3,97–4,45	4,63–5,20	5,30–5,94
60	1,59–1,78	3,18–3,56	4,77–5,35	5,56–6,24	6,36–7,13
70	1,85–2,08	3,71–4,16	5,56–6,24	6,49–7,28	7,41–8,32
80	2,12–2,38	4,24–4,75	6,36–7,13	7,41–8,32	8,47–9,50
90	2,38–2,67	4,77–5,35	7,15–8,02	8,34–9,36	9,53–10,69
100	2,65–2,97	5,30–5,94	7,94–8,91	9,27–10,39	10,59–11,88

Dawki w tym przypadku zostały oszacowane czysto hipotetycznie ze względu na fakt, że sala była wyłączona z użytku ze względów technicznych, a do pomiarów została wykorzystana jedynie zimna woda. Fakt braku kuracjuszy również mógł mieć wpływ na wynik pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, który także przełożył się na oszacowaną dawkę.

Warto zwrócić jednak w tym przypadku szczególną uwagę na to, że pracownik w trakcie zabiegów przebywa większość czasu pracy w sali z basenem. Oznacza to, że w porównaniu z innymi zabiegami procentowy udział czasu narażenia do całkowitego czasu pracy będzie znacznie większy. Zakładając, że pracownik całość 8-godzinnego czasu pracy przebywa w środowisku, w którym stężenie aktywności ^{222}Rn jest równe średniemu stężeniu podczas zabiegów, wówczas w ciągu roku otrzymana dawka efektywna może wynieść nawet blisko 12 mSv. W porównaniu z dawką dla osób z ogółu ludności stanowi to aż dwunastokrotne przekroczenie dopuszczalnej dawki. Nawet gdyby z 8-godzinnego dnia pracy jedynie 10% czasu pracownik pracował we wspomnianym środowisku, wówczas nadal doszłoby do przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej.

Z drugiej strony można byłoby stwierdzić, że do przekroczenia nie doszłoby tylko w kilku przypadkach. Mianowicie w przypadku pracy na tym stanowisku 2 godzin dziennie, z czego czas przebywania w pomieszczeniu, w którym odbywają się kąpiele grupowe nie wynosiłby więcej niż 30%. Kolejnym przypadkiem jest praca przez 4 albo 6 godzin dziennie, jednak wówczas jedynie 10% czasu mogłoby być przepracowane w pomieszczeniu, w którym znajduje się basen. Mogłoby również nie dojść do przekroczenia dawki w przypadku 7 godzin pracy dziennie przy założeniu spędzania jedynie 10% w pomieszczeniu z basenem. W tym przypadku maksymalna oszacowana dawka efektywna dla pracownika na tym stanowisku mogłaby jednak wynieść 1,04 mSv.

Należy więc stwierdzić, że w przypadku umożliwienia kuracjom uczestniczenia w tego typu zabiegach, warto brać pod uwagę czas pracy pracownika, a same badania należałoby przeprowadzić ponownie w warunkach panujących w trakcie przeprowadzania zabiegów (dopływ zarówno zimnej jak i ciepłej wody, przemieszczanie się kuracjuszy, otwieranie i zamykanie drzwi wejściowych).

Kolejnym zabiegiem radonoterapii, który obsługują pracownicy uzdrowiska są zabiegi w tężni radonowo-solankowej (Tab. 59).

Tab. 59. Roczne dawki efektywne otrzymane przez pracownika obsługującego zabiegi w tężni radonowo-solankowej w Uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej

Udział czasu pracy na sali zabiegowej [%]	Dzienna liczba godzin pracy [h]				
	2	4	6	7	8
	Roczna średnia dawka efektywna [mSv]				
10	0,00–0,00	0,01–0,01	0,01–0,01	0,01–0,02	0,01–0,02
20	0,01–0,01	0,01–0,02	0,02–0,03	0,02–0,03	0,02–0,04
30	0,01–0,01	0,02–0,03	0,03–0,04	0,03–0,05	0,04–0,05
40	0,01–0,02	0,02–0,04	0,04–0,05	0,04–0,06	0,05–0,07
50	0,02–0,02	0,03–0,04	0,05–0,07	0,05–0,08	0,06–0,09
60	0,02–0,03	0,04–0,05	0,06–0,08	0,06–0,09	0,07–0,11
70	0,02–0,03	0,04–0,06	0,06–0,09	0,08–0,11	0,09–0,12
80	0,02–0,04	0,05–0,07	0,07–0,11	0,09–0,12	0,10–0,14
90	0,03–0,04	0,06–0,08	0,08–0,12	0,10–0,14	0,11–0,16
100	0,03–0,04	0,06–0,09	0,09–0,13	0,11–0,16	0,12–0,18

W przypadku obsługi tego zabiegu, pracownik zdecydowaną większość czasu pracy spędza poza pomieszczeniem zabiegowym – w sąsiadującej sali. Czas narażenia powinien być więc stosunkowo niewielki. Gdyby jednak doszło do sytuacji, w której 8 godzin pracy przebywałby w pomieszczeniu o średnim stężeniu aktywności ^{222}Rn , tj. $377 \pm 71 \text{ Bq/m}^3$ w trakcie zabiegów, roczna dawka wyniosłaby zaledwie ułamek (0,12-0,18 mSv) dopuszczalnej dawki dla osób z ogółu ludności wynoszącej 1 mSv (Ustawa, 2000). Można więc uznać, że pracownicy obsługujący ten zabieg nie są narażeni na przekroczenie dopuszczalnej rocznej dawki efektywnej.

Ostatnim z zabiegów z oferty uzdrowiska z wykorzystaniem leczniczej wody radonowej są indywidualne inhalacje radonowe. Są to zabiegi obsługiwane przez ten sam personel, co tężnia radonowo-solankowa. Ze względu na techniczny aspekt tego zabiegu – inhalacje powietrza wzbogaconego w ^{222}Rn przez kuracjuszy bezpośrednio za pomocą indywidualnych ustników, pracownicy nie są narażeni na bezpośredni kontakt z ^{222}Rn podczas obsługi tych zabiegów. Autor uznał, że szacowanie dawek otrzymanych przez pracowników na tym stanowisku (obsługa inhalacji indywidualnych) jest bezzasadna.

7.4. Granica stężenia aktywności ^{222}Rn w tworzywach radonowych ze względu na dopuszczalne dawki efektywne

Na podstawie wszystkich zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn , zarówno w wodzie ze zbiornika kopaliny, w wodzie wykorzystywanej podczas zabiegu (tworzywie radonowym), jak i w wodzie po zabiegu (ścieku) oraz zmian zachodzących pomiędzy poszczególnymi etapami, podjęto próbę wyznaczenia górnej granicy stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie ze względu na dopuszczalne dawki efektywne.

Należy podkreślić, że oszacowane górne granice obarczone są stosunkowo dużym błędem ze względu na znaczną liczbę założeń. Głównymi problemami są brak standaryzacji samych zabiegów oraz problem w pomiarach stężenia aktywności ^{222}Rn w taki sposób, aby możliwe było dokładne określenie zachodzących zmian na etapach od przygotowania sali do zabiegu do zakończenia wietrzenia i rozpoczęcia przygotowywania sali do kolejnego zabiegu. Dzięki temu

możliwe byłoby odczytanie dokładnych zmian w stężeniu aktywności ^{222}Rn podczas jednego zabiegu w zależności od ilości nalanej wody, czy też ilości zużytej wody podczas inhalacji. Fakt, że nieznane jest dokładne stężenie aktywności ^{222}Rn przed konkretnymi zabiegami jak i w trakcie ich trwania oraz po ich zakończeniu, powoduje trudność w przeprowadzeniu analizy.

Niemniej jednak autor podjął próbę oszacowania górnych granic stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie, aby w trakcie zabiegów radonoterapii nie została przekroczona dawka efektywna dla osób z ogółu ludności.

W celu oszacowania górnej granicy stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie, aby kuracjusz w zależności od liczby zabiegów nie przekroczył dopuszczalnej dawki efektywnej dla osób z ogółu ludności, wykorzystano znane wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie, a następnie średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w czasie zabiegów radonoterapii. Dzięki temu możliwe było oszacowanie w jaki sposób stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalinie, tj. eksploatowanej wodzie radonowej wykorzystywane w trakcie napełniania wanny (wówczas już w tworzywie radonowym) przekłada się na średnie stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia, w którym kuracjusz korzysta z zabiegu. Na podstawie znajomości średniego stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu i znajomości dawki efektywnej, na jaką się ono przekłada, dodatkowo znając dopuszczalną dawkę efektywną, możliwe było oszacowanie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie na takim poziomie, aby nie została przekroczona dawka efektywna dla osób z ogółu ludności. Górna granica możliwa jest do wyznaczenia dzięki dodatkowemu założeniu, że zmienne są wprost proporcjonalne, tzn., że wraz ze wzrostem stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny, wprost proporcjonalnie wzrasta dawka efektywna otrzymana przez kuracjusza w trakcie zabiegu.

Pierwsze z szacowań zostało przeprowadzone dla zabiegu indywidualnych kąpieeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój (Tab. 60).

Tab. 60. Oszacowane graniczne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny podczas indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój, które nie spowodują przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej dla ogółu ludności

Parametr	Data				
	02.09.21	03.09.21	24.08.22	25.08.22	26.08.22
$^{222}\text{Rn}_k$ [Bq/dm ³]	1285 ± 42	1291 ± 44	1174 ± 29	1136 ± 29	1168 ± 28
$^{222}\text{Rn}_p$ [Bq/m ³]	603 ± 96	650 ± 110	692 ± 135	674 ± 116	677 ± 128
D_{ef} [nSv]	25-34	26-37	27-40	27-38	27-39
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(1)$ [MBq/dm ³]	38,0-52,1	35,2-49,3	29,6-43,6	29,9-42,1	30,2-43,9
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(5)$ [MBq/dm ³]	7,6-10,4	7,0-9,9	5,9-8,7	6,0-8,4	6,0-8,8
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(10)$ [MBq/dm ³]	3,8-5,2	3,5-4,9	3,0-4,4	3,0-4,2	3,0-4,4
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(14)$ [MBq/dm ³]	2,7-3,7	2,5-3,5	2,1-3,1	2,1-3,0	2,2-3,1
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(18)$ [MBq/dm ³]	2,1-2,9	2,0-2,7	1,6-2,4	1,7-2,3	1,7-2,4
$^{222}\text{Rn}_{kdef}(25)$ [MBq/dm ³]	1,5-2,1	1,4-2,0	1,2-1,7	1,2-1,7	1,2-1,8

k - stężenie w kopalinie, p - stężenie w powietrzu, kdef - maksymalne stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalinie niepowodujące przekroczenia dawki granicznej dla osób z ogółu ludności, w zależności od liczby zabiegów ujętych w nawiasie

Dla zabiegów kąpeli indywidualnych w uzdrowisku Łądek-Zdrój możliwość przekroczenia dawki efektywnej dla osób z ogółu ludności jest uzależniona od liczby otrzymanych przez kuracjusza zabiegów. Graniczne stężenie aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny jest najmniejsze (najbardziej restrykcyjne) przy założeniu, że kuracjusz otrzyma 25 zabiegów indywidualnych kąpeli. Dawki efektywne dla osób z ogółu ludności nie zostały przekroczone. Graniczne stężenie wynosi wówczas $1,2 \text{ MBq/dm}^3$. Należy podkreślić, że w środowisku wód podziemnych stężenie aktywności ^{222}Rn na takim poziomie nie występuje (Girault i in., 2018). Można więc stwierdzić, że górna granica stężenia aktywności ^{222}Rn , pomimo iż teoretycznie występuje, to praktycznie jest nieosiągalna. W związku z powyższym nie ma potrzeby wyznaczania górnej granicy stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny dla zabiegów inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój oraz dla zabiegów: indywidualnych kąpeli radonowych, kąpeli radonowych w basenie oraz inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój. Ze względu na największe odnotowane wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w inhalowanym powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój zostało przeprowadzone dodatkowe oszacowanie ze względu na ten zabieg (Tab. 61).

Tab. 61. Oszacowane graniczne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój, które nie spowodują przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej dla ogółu ludności

Parametr	Data					
	29.07.2021	30.07.2021	02.08.2021	03.08.2021	21.09.2022	22.09.2022
$^{222}\text{Rn}_k$ [Bq/dm ³]	1030 ± 30	1000 ± 30	1020 ± 30	1010 ± 30	1050 ± 30	1060 ± 30
$^{222}\text{Rn}_p$ [kBq/m ³]	1010 ± 60	1030 ± 30	1040 ± 60	1030 ± 60	1020 ± 60	1010 ± 60
Dawka ef. zabiegu [μSv]	29,0-32,6	30,0-33,4	30,1-33,9	29,7-33,2	29,4-33,1	29,3-32,9
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(1)$ [kBq/dm ³]	31,4-35,4	29,9-33,4	29,9-33,8	30,5-34,0	31,7-35,8	32,4-36,4
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(5)$ [Bq/dm ³]	6286-7071	5978-6670	5989-6759	6093-6806	6344-7151	6470-7271
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(10)$ [Bq/dm ³]	3143-3536	2989-3335	2995-3380	3047-3403	3172-3575	3235-3636
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(14)$ [Bq/dm ³]	2245-2526	2135-2382	2139-2414	2176-2431	2266-2554	2311-2597
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(18)$ [Bq/dm ³]	1746-1964	1660-1853	1664-1878	1693-1891	1762-1986	1797-2020
$^{222}\text{Rn}_{k\text{def}}(25)$ [Bq/dm ³]	1257-1414	1196-1334	1198-1352	1219-1361	1269-1430	1294-1454

k - stężenie w kopalnie, p - stężenie w powietrzu, kdef - maksymalne stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalnie niepowodujące przekroczenia dawki granicznej dla osób z ogółu ludności, w zależności od liczby zabiegów ujętych w nawiasie

Ze względu na różne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny, dla każdego z dni pomiarowych w pierwszym etapie została osobno oszacowana górna granica stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny. Dla bezpieczeństwa kuracjuszy (aby nie doszło do przekroczenia dawki granicznej) należy jednak przyjąć najbardziej niekorzystny wariant (najbardziej restrykcyjna graniczna wartość stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny). W odróżnieniu od poprzednich wyników dla kąpeli indywidualnych w uzdrowisku Łądek-Zdrój, w tym przypadku graniczne wartości w kopalinie jaką jest radonowa woda lecznicza z ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej, zwłaszcza w przypadku 25 zabiegów, są możliwe do przekroczenia. W związku z tym należałoby kontrolować stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalinie w celu uniknięcia przekroczenia dopuszczalnej dawki 1 mSv dla osób z ogółu ludności, do którego może dojść już na poziomie stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie wynoszącym około 1200-1300 Bq/dm³. W trakcie prowadzonych badań stężenia aktywności ^{222}Rn na takim poziomie były rejestrowane w zbiorniku kopaliny w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.

Podsumowując, można stwierdzić, że jedynym zabiegiem, w którym wprowadzenie granicznych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie może zapobiec przekroczeniu granicznej dawki efektywnej dla osób z ogółu ludności jest zabieg indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.

8. Podsumowanie badań

Badania przeprowadzono w dwóch uzdrowiskach leżących w Sudetach, w Łądku-Zdroju i w Świeradowie-Zdroju, które w oferowanych zabiegach wykorzystują radonową wodę leczniczą. Oferta uzdrowisk zawiera zarówno zabiegi polegające na kąpielach w tworzywie radonowym, jakim jest radonowa woda lecznicza, jak i inhalacjach radonu uwalnianego z tych wód do atmosfery. W tym drugim przypadku tworzywem radonowym jest powietrze wzbogacone w radon. Łądek-Zdrój i Świeradów-Zdrój są jedynymi w Polsce uzdrowiskami, w których stosowane są różnorodne zabiegi radonoterapeutyczne. Dzięki przeprowadzonym badaniom otrzymano obszerny zbiór wyników, który umożliwił przeprowadzenie dalszych analiz.

W uzdrowisku Łądek-Zdrój prowadzono pomiary w miejscu ujęcia kopaliny – leczniczej wody radonowej oraz podczas zabiegów: inhalacji w emanatorium (inhalatorium) oraz indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w wannach.

W trakcie prowadzonych badań ze zbiornika przy ujęciu Jerzy pobrano 20 próbek radonowej wody leczniczej oraz wykonano 10 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T). Otrzymano także 23 wyniki pomiarów 10-minutowych stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu nad lustrem wody. Powietrze to jest wykorzystywane do inhalacji radonowych w tzw. emanatorium.

W trakcie zabiegów indywidualnych kąpeli pobrano 92 próbki wody, z czego połowę stanowiły próbki pobrane przed zabiegiem, a drugą połowę stanowiły próbki pobrane z wody po zabiegu, tj. ze ścieku. Wykonano także 46 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych i 46 pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn , jak i stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Pomiary stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn , jak i stężenia energii potencjalnej promieniowania α prowadzono w powietrzu pomieszczenia zabiegowego na wysokości górnych dróg oddechowych kuracjusza oddychającego powietrzem wzbogaconym w radon uwalniany z wody w czasie kąpeli. W trakcie zabiegów indywidualnej kąpeli radonowo-siarczkowej prowadzono także pomiary stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, z których otrzymano 752 wyniki 10-minutowych pomiarów.

Podczas zabiegów prowadzonych w emanatorium (inhalatorium) prowadzone badania dostarczyły 868 wyników pomiarów 10-minutowych stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu oraz 109 wyników pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α .

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój przeprowadzone zostały pomiary w radonowej wodzie leczniczej gromadzonej w zbiorniku kopaliny przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej. Pomiary autor prowadził także w jednym z pomieszczeń uzdrowiska (pomiary te uznano za pomiary równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego – radonowej wody leczniczej, znajdującym się w Zakładzie Radoczynnym, w którym prowadzone są zabiegi radonoterapii), a następnie podczas zabiegów radonoterapeutycznych: inhalacji indywidualnych, inhalacji w tężni, kąpeli indywidualnych oraz kąpeli w basenie.

W trakcie badań w zbiorniku kopaliny autor pobrał 48 próbek wód i przeprowadził 24 analizy podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T). W jednym z pomieszczeń zabiegowych (równoważnym zbiornikowi tworzywa radonowego) pobrano natomiast 62 próbki wód i wykonano 31 analiz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych.

Podczas zabiegów kąpeli indywidualnych pobranych zostało 56 próbek wód oraz wykonano 28 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wody, a także 28-krotnie przeprowadzono pomiar stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Otrzymano także 865 wyników pomiarów 10-minutowych stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu.

Pomiary w pomieszczeniu zabiegowym, w którym odbywają się kąpiele w basenie przeprowadzono w mniejszej liczbie, co wynikało z faktu jego zamknięcia ze względów technicznych. Dzięki uprzejmości Zarządu Uzdrowiska możliwe było jednak pobranie 20 próbek wód oraz wykonanie po 10 pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych i stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Otrzymano również 44 wyniki z 10-minutowych pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu.

W trakcie zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych otrzymano 741 wyników pomiarów 10-minutowych stężenia aktywności ^{222}Rn oraz 29 wyników pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α . Pomiary autor prowadził w strumieniu powietrza,

który wdychają kuracjusze. W trakcie badań prowadzonych podczas indywidualnych inhalacji, pobranych zostało łącznie 16 próbek wody – kopaliny (12 przed rozpoczęciem zabiegów i 4 po ich zakończeniu) oraz 24 próbki wody – tworzywa radonowego (12 przed rozpoczęciem serii zabiegów i 12 po ich zakończeniu).

W przypadku pomiarów prowadzonych w tęźni, otrzymano 471 wyników 10-minutowych pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn oraz 42 wyniki pomiarów stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn i stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu. Autor pobrał także do analiz łącznie 40 próbek wody, z czego połowę stanowiły próbki tworzywa radonowego pobrane na początku zabiegu (woda dopływająca do tęźni), a drugą połowę próbki wody po swobodnym spływie, bezpośrednio przed jej ujęciem w zbiorniku na ścieki.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że transport, przygotowanie wody do zabiegu (w przypadku kąpeli), jak i wykorzystanie tworzywa radonowego w zabiegach radonoterapii prowadzą do zubożenia radonowej wody leczniczej w izotop ^{222}Rn .

W uzdrowisku Łądek-Zdrój średnia wartość stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie wynosi od $1136 \pm 29 \text{ Bq/dm}^3$ do $1291 \pm 44 \text{ Bq/dm}^3$. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy kopaliną a tworzywem radonowym przed zabiegiem indywidualnych kąpeli radonowych wahają się od 500 do 683 Bq/dm^3 (spadek stężenia o 44,0%-53,2% względem stężenia w kopalinie). Zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej pomiędzy tworzywem radonowym a ściekiem oscyluje natomiast w granicach $27\text{-}44 \text{ Bq/dm}^3$ (spadek stężenia o 4,1%-7,0% względem stężenia w tworzywie radonowym).

Średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w uzdrowisku Łądek-Zdrój pomiędzy kopaliną w zbiorniku a tworzywem radonowym przygotowanym do zabiegu kąpeli indywidualnej wynosi 48,1%. Zmiana pomiędzy stężeniem w kopalinie a wodzie po zabiegu (ścieku) wynosi natomiast 51,0%.

Stężenie aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zbiorniku kopaliny oscyluje w granicach od $988 \pm 31 \text{ Bq/dm}^3$ do $1084 \pm 30 \text{ Bq/dm}^3$, a w zbiorniku tworzywa radonowego od $901 \pm 22 \text{ Bq/dm}^3$ do $1021 \pm 31 \text{ Bq/dm}^3$. Zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy kopaliną, a tworzywem radonowym w zbiorniku wynosi $47,3\text{-}98,3 \text{ Bq/dm}^3$ (spadek stężenia

o 4,4%-9,8% względem stężenia w kopalinie). Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy tworzywem radonowym w zbiorniku, a tworzywem radonowym przed zabiegiem wynoszą: 180-247 Bq/dm³ w przypadku indywidualnych kąpiel (spadek stężenia o 18,3%-24,2% względem stężenia w tworzywie radonowym w zbiorniku), 822-918 Bq/dm³ w przypadku tężni radonowo-solankowej (spadek stężenia o 91,3%-94,4% względem stężenia w tworzywie radonowym w zbiorniku). W przypadku wody z basenu zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy stężeniem w kopalinie a stężeniem w tworzywie radonowym wykorzystywanym podczas zabiegu wynosiła 84-96 Bq/dm³ (spadek stężenia o 7,7%-9,3% względem stężenia w kopalinie). Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn pomiędzy tworzywem radonowym wykorzystanym podczas zabiegu radonoterapii, a ściekiem wynoszą natomiast: 102-133 Bq/dm³ w przypadku indywidualnych kąpiel radonowych (spadek stężenia o 12,7%-16,6% względem stężenia w tworzywie radonowym przed zabiegiem) i 50,3-77,8 Bq/dm³ w przypadku tężni radonowo-solankowej (spadek stężenia o 91,8%-98,7% względem stężenia w tworzywie radonowym przed zabiegiem). Średnia całkowita zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn podczas zabiegów wynosi: 390 Bq/dm³ w przypadku indywidualnych kąpiel (spadek stężenia o 37,0% pomiędzy stężeniem w kopalinie i ścieku) i 1006 Bq/dm³ w przypadku tężni radonowo-solankowej (spadek stężenia o 99,8% pomiędzy stężeniem w kopalinie i ścieku).

Średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój od zbiornika kopaliny do zbiornika tworzywa radonowego wynosi 6,3%.

Podczas zabiegów indywidualnych kąpiel średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej od kopaliny do tworzywa radonowego przed rozpoczęciem zabiegu wyniosła 25,2%, a do wody po zabiegu (ścieku) wyniosła 37,0%.

Podczas zabiegów inhalacji grupowych (w tężni) średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej od kopaliny do tworzywa radonowego przed jej swobodnym spływem w tężni wyniosła 93,8%, a do wody po jej spływie (przed ujęciem w zbiorniku na ścieki) wyniosła 99,8%.

Ze względu na zmierzone wartości stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu poniżej LLD wykorzystywanego do pomiarów urządzenia i tym

samym brak możliwości oznaczenia stężenia aktywności promieniotwórczych pochodnych ^{222}Rn w powietrzu, zarówno w uzdrowisku Łądek-Zdrój, jak i Świeradów-Zdrój nie została przeprowadzona analiza zmian stężenia aktywności produktów rozpadu ^{222}Rn .

W uzdrowisku Łądek-Zdrój dawka efektywna otrzymana przez kuracjusza w trakcie pojedynczego zabiegu indywidualnej kąpeli radonowo-siarczkowej wynosi od 1,2 do 48 nSv (średnio od 17 do 24 nSv), a podczas inhalacji od 0 nSv do 366 nSv (średnio od 95 do 119 nSv). W przypadku połączenia obu tych zabiegów i skorzystaniu przez kuracjusza z serii 25 takich par zabiegów, dawka wyniesie od 30 nSv do 10 349 nSv (średnio 2798-3571 nSv).

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój dawka otrzymana przez kuracjusza w trakcie pojedynczego zabiegu wynosi w przypadku indywidualnych kąpeli od 7 do 44 nSv (średnio 17-24 nSv), w czasie kąpeli w basenie wynosi 1129-1674 nSv (średnio od 1324 do 1485 nSv), podczas inhalacji indywidualnych zmienia się od 27 022 do 35 499 nSv (średnio 29 579 do 33 212 nSv) i w czasie inhalacji w tężni radonowo-solankowej wynosi od 4 nSv do 82 nSv (średnio 26 do 37 nSv). Oznacza to, że łącząc dwa typy dostępnych zabiegów o największych dawkach, tj. indywidualną kąpiel oraz indywidualne inhalacje, w przypadku skorzystania przez kuracjusza z serii 25 takich par zabiegów, dawka wyniosłaby od 0,68 do 0,89 mSv (średnio od 0,74 do 0,83 mSv). W szacowaniach nie uwzględniono połączenia dowolnego z zabiegów z zabiegiem kąpeli grupowej (w basenie) ze względu na fakt, że w efekcie przeprowadzenia oszacowania dawki efektywnej na podstawie pomiarów wyłącznie z wykorzystaniem zimnej wody i bez udziału kuracjuszy mogą być niemiarodajne.

W uzdrowisku Łądek-Zdrój pracownicy obsługujący zabiegi indywidualnych kąpeli są narażeni na otrzymanie maksymalnej dawki efektywnej wynoszącej 0,28 mSv/rok, natomiast przy obsłudze inhalacji radonowych wartość tej dawki sięga 0,95 mSv/rok.

W uzdrowisku Świeradów-Zdrój najmniej narażeni są pracownicy obsługujący indywidualne inhalacje (ze względu na brak bezpośredniego kontaktu z tworzywem radonowym), następnie tężni radonowo-solankowej, gdzie dawka efektywna przez nich otrzymywana może dochodzić do 0,18 mSv/rok oraz obsługi kąpeli indywidualnych, gdzie dawka efektywna może dochodzić do 0,29 mSv/rok.

Największe ryzyko występuje na stanowisku obsługi kąpiel w basenie radonowym ze względu na stałe przebywanie w środowisku narażenia oraz potencjalnie duże wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu. W przypadku zastosowania wyłącznie zimnej wody otrzymana dawka mogłaby wynieść nawet 11,88 mSv/rok, co oznacza duże przekroczenie dawki granicznej dla ogółu ludności, wynoszącej 1 mSv/rok (Ustawa, 2000). W związku z tym po ponownym uruchomieniu zabiegów w basenie z wodą radonową należy pomyśleć o działaniach zapobiegających narażeniu na promieniowanie jonizujące pracowników obsługujących te zabiegi.

Górna granica stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w ujęciu (w kopalinie) ze względu na dopuszczalne dawki promieniowania jonizującego dla osób z ogółu ludności dla zabiegów w uzdrowisku Łądek-Zdrój oraz uzdrowisku Świeradów-Zdrój dla większości zabiegów jest realnie nieosiągalna, niewystępująca w przyrodzie i może wynosić nawet miliony Bq/dm³. Jedynym zabiegiem, dla którego wyznaczenie górnej granicy stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalinie – eksploatowanej leczniczej wodzie radonowej odgrywa istotną rolę jest zabieg indywidualnych inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój. Aby nie przekroczyć dopuszczalnej dawki podczas 14 zabiegów, stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalinie powinno być mniejsze niż 2135 Bq/dm³, a przy 25 zabiegach powinno być mniejsze od 1198 Bq/dm³. Należy zauważyć, że stężenie aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej znajdującej się w zbiorniku kopaliny oscyluje w granicach od 988 ± 31 Bq/dm³ do 1084 ± 30 Bq/dm³. Najwyższe zmierzone stężenie aktywności ^{222}Rn z uwzględnieniem błędu pomiarowego (1114 Bq/dm³) jest więc niewiele mniejsze od wyznaczonej wartości granicznej. Wskazane byłoby więc zwracanie szczególnej uwagi na stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalinie podczas planowania zabiegów indywidualnych inhalacji.

Dolne granice stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w ujęciu (w kopalinie) w celu utrzymania poziomu radonu powyżej 74 Bq/dm³ w radonowej wodzie leczniczej podczas kąpiel (w tworzywie radonowym), wynoszą dla uzdrowiska Łądek-Zdrój 700 Bq/dm³, a dla uzdrowiska Świeradów-Zdrój 464 Bq/dm³. Wartości te w znacznej mierze zależą od technicznych uwarunkowań gromadzenia i przesyłania kopaliny oraz wykorzystywania tworzywa radonowego. Niemniej jednak eksploatowane ujęcia z dużym zapasem zapewniają odpowiednią

ilość (stężenie aktywności) ^{222}Rn do prowadzonych zabiegów radonoterapeutycznych w obu uzdrowiskach.

W celu wystandardyzowania i zoptymalizowania zabiegów radonoterapeutycznych w uzdrowisku Łądek-Zdrój i w uzdrowisku Świeradów-Zdrój konieczne jest wprowadzenie zmian umożliwiających zapewnienie jak najbardziej stabilnego stężenia aktywności ^{222}Rn w czasie zabiegu w tworzywie radonowym. W tym przypadku konieczne jest:

- bieżące kontrolowanie istotnych parametrów tworzyw radonowych, w szczególności stężenia aktywności ^{222}Rn , stężenia aktywności jego pochodnych oraz energii potencjalnej promieniowania α , jak również objętości (przepływu) wody radonowej i jej temperatury, objętości powietrza wzbogaconego w radon,
- w celu zapewnienia powyższych warunków niezbędne jest zmodernizowanie konstrukcji pomieszczeń zabiegowych oraz zakup niezbędnej aparatury kontrolno-pomiarowej o odpowiednich parametrach dobranych do istniejących warunków podczas zabiegów,
- kontynuowanie kontrolowania istotnych parametrów kopalin – leczniczych wód radonowych, a w szczególności stężenia aktywności ^{222}Rn w tych wodach,
- zapewnienie precyzyjnego nalewania wody w wyznaczonej objętości i o zadanej temperaturze do indywidualnej kąpieli radonowej w wannie, w basenie oraz tężni,
- zapewnienie szczelności (hermetyczności) pomieszczeń zabiegowych wraz z możliwością ich kontrolowanej wentylacji powietrzem atmosferycznym,
- wietrzenie pomieszczeń po przeprowadzonym zabiegu (przez wyznaczony czas i z określoną intensywnością),
- dokładne ustalenie i pilnowanie czasu trwania zabiegu, a także przebywania kuracjusza w pomieszczeniu po przeprowadzonym zabiegu (na przykład w sali po wyjściu z wanny),
- wyznaczenie i kontrolowanie przestrzegania przez pracowników czasu pracy na stanowiskach o zwiększonym narażeniu na promieniowanie jonizujące, w szczególności dotyczy to obsługi kąpieli radonowych w basenie w Świeradowie-Zdroju oraz emanatorium (inhalatorium) w Łądku-Zdroju.

9. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski, które odnoszą się do następujących aspektów pracy: (a) zmian stężenia aktywności ^{222}Rn , (b) dawek granicznych, (c) granicznych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz (d) wystandaryzowania i zoptymalizowania zabiegów radonoterapeutycznych.

a) Wnioski dotyczące zmian stężenia aktywności ^{222}Rn :

1. Kopalina, którą jest radonowa woda lecznicza, od momentu jej ujęcia w wyniku transportu, a następnie jej wykorzystania, zostaje zubożona w izotop ^{222}Rn . Zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej pomiędzy kopaliną a wodą po zabiegu (ściekiem) wynosi w Łądku-Zdroju dla zabiegu indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych 618 Bq/dm^3 (51,0%), a w Świeradowie-Zdroju dla zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych 390 Bq/dm^3 (37,0%) i 1006 Bq/dm^3 (99,8%) dla zabiegów inhalacji grupowych (tężnia).
2. Kąpiel indywidualna nie powoduje uwolnienia dużej ilości ^{222}Rn , którą może inhalować kuracusz. Zabieg ten należy więc traktować jako zabieg o małej efektywności dla oddechowej drogi wchłaniania ^{222}Rn .
3. Średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w uzdrowisku Łądek-Zdrój pomiędzy kopaliną w zbiorniku, a tworzywem radonowym przygotowanym do zabiegu kąpeli indywidualnej wynosi 48,1%. Zmiana pomiędzy stężeniem aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej będącej kopaliną, a wodą po zabiegu (ścieku) wynosi natomiast 51,0%.
4. Średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój od zbiornika kopaliny do zbiornika tworzywa radonowego wynosi 6,3%. Podczas zabiegów indywidualnych kąpeli średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej od kopaliny do tworzywa radonowego przed rozpoczęciem zabiegu wyniosła 25,2%, a do wody po zabiegu (ścieku) wyniosła 37,0%. Podczas zabiegów inhalacji grupowych (tężnia) średnia zmiana stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej od kopaliny do tworzywa radonowego przed jej swobodnym spływem w tężni wyniosła 93,8%, natomiast średnia zmiana stężenia

aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej od kopaliny do jej spływu (przed ujęciem w zbiorniku na ścieki) wyniosła 99,8%.

b) Wnioski dotyczące dawek granicznych:

1. Żadne z przeprowadzonych przez autora obliczeń w oparciu o pomiary prowadzone w uzdrowisku Łądek-Zdrój i w uzdrowisku Świeradów-Zdrój nie wykazały przekroczenia dopuszczalnej dawki dla osób z ogółu ludności (przez kuracjuszy) zarówno w przypadku jednego zabiegu jak i ich serii.
2. W uzdrowisku Łądek-Zdrój kuracjusz podczas pojedynczego zabiegu narażony jest na otrzymanie dawki, średnio:
 - 17-24 nSv (max 48 nSv) w przypadku indywidualnej kąpieli,
 - 95-119 nSv (max 366 nSv) w przypadku inhalacji.
3. W uzdrowisku Świeradów-Zdrój kuracjusz podczas pojedynczego zabiegu narażony jest na otrzymanie dawki, średnio:
 - 17-24 nSv (max 44 nSv) w przypadku indywidualnej kąpieli,
 - 26-37 nSv (max 82 nSv) w przypadku inhalacji w tężni,
 - 1324-1485 nSv (max 1674 nSv) w przypadku kąpieli w basenie; ten wynik wymaga jednak korekty w momencie rozpoczęcia stosowania tych zabiegów i używania ciepłej wody w basenie,
 - 29 579-33 212 nSv (max 35 499 nSv) w przypadku inhalacji indywidualnych.
4. Istnieje ryzyko przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej dla osób z ogółu ludności na skutek przyjęcia zabiegów inhalacji radonowych (lub kąpieli w basenie) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój. Należy brać pod uwagę dotychczasowe i zaplanowane w każdym roku narażenie kuracjusza na promieniowanie jonizujące, aby nie przekroczyć dopuszczalnej dawki efektywnej.
5. Pracownicy w uzdrowisku Łądek-Zdrój narażeni są na otrzymanie maksymalnej dawki efektywnej od 0,28 mSv/rok (obsługa indywidualnych kąpieli) do 0,95 mSv/rok (obsługa emanatorium-inhalatorium). Żaden z pracowników nie był narażony na przekroczenie dawki granicznej (1 mSv/rok) określonej w ustawie Prawo atomowe dla osób z ogółu ludności.
6. Największe narażenie na promieniowanie jonizujące pracowników występuje na stanowisku obsługi radonowych kąpieli grupowych w basenie

w Świeradowie-Zdroju. W przypadku ponownego uruchomienia tych zabiegów należy rozważyć przeprowadzenie dodatkowych pomiarów i ponowne oszacowanie dawek otrzymywanych przez pracowników. Zalecane jest zastosowanie indywidualnych dozymetrów dla pracowników obsługujących kąpiele w basenie.

7. Pracownicy w uzdrowisku Świeradów-Zdrój narażeni są na otrzymanie maksymalnej dawki efektywnej: 0,18 mSv/rok (obsługa tężni radonowo-solankowej), 0,29 mSv/rok (obsługa indywidualnych kąpielii) i 11,88 mSv/rok (obsługa zabiegów na basenie). Ze względu na specyfikę prowadzenia zabiegów indywidualnych inhalacji ich obsługa nie powoduje narażenia pracownika na oddziaływanie promieniowania jonizującego.
8. Ze względu na oszacowaną dawkę, bliską dopuszczalnej dawce efektywnej dla osób z ogółu ludności dla pracowników obsługujących emanatorium (inhalatorium) w uzdrowisku Łądek-Zdrój, należy rozważyć wykonanie dokładnych pomiarów z zastosowaniem indywidualnych dozymetrów. W uzdrowisku Świeradów-Zdrój po ponownym uruchomieniu zabiegów kąpielii grupowych (basen) należy przeprowadzić dodatkowe pomiary a Zarząd uzdrowiska powinien wziąć pod uwagę czy nie objąć pracowników obsługujących ten zabieg dodatkowymi pomiarami za pomocą dozymetrów indywidualnych.

c) Wnioski dotyczące granicznych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn :

1. Zapewnienie stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej będącej kopaliną na wymaganym ustawą (Ustawa, 2011) poziomie ($\geq 74 \text{ Bq/dm}^3$) może nie być wystarczające do zapewnienia takiego stężenia przez cały czas trwania zabiegu radonoterapeutycznego z wykorzystaniem tej wody. W związku z tym istnieje konieczność wprowadzenia zmiany w przeprowadzanych pomiarach kontrolnych, które powinny być wykonywane nie tylko w kopalinie, ale także w tworzywie radonowym przed zabiegiem. Stężenie aktywności ^{222}Rn w tworzywie wykorzystywanym do zabiegu w dużej mierze zależy od sposobu jego transportu z miejsca ujęcia kopaliny, ale także od sposobu jego magazynowania. Konieczne może okazać się wprowadzenie zmian

w tym zakresie w obowiązujących przepisach prawa geologicznego i górniczego (Ustawa, 2011).

2. W celu zapewnienia stężenia aktywności ^{222}Rn na poziomie co najmniej 74 Bq/dm^3 podczas kąpieli, zawartość ^{222}Rn w kopalnie w uzdrowisku Łądek-Zdrój powinna wynosić nie mniej niż 700 Bq/dm^3 , a w uzdrowisku Świeradów-Zdrój nie mniej niż 464 Bq/dm^3 . Zmierzone przez autora średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w uzdrowisku Łądek-Zdrój w poszczególnych dniach prowadzenia pomiarów wahają się od $1136 \pm 29 \text{ Bq/dm}^3$ do $1291 \pm 44 \text{ Bq/dm}^3$, natomiast w Świeradowie-Zdroju zmieniają się od $988 \pm 31 \text{ Bq/dm}^3$ do $1084 \pm 30 \text{ Bq/dm}^3$, czyli są odpowiednio większe od wartości minimalnych o co najmniej 58% i 106%.
3. W przypadku zabiegów przeprowadzanych z wykorzystaniem tworzywa radonowego w Łądku-Zdroju i w Świeradowie-Zdroju, nie występuje (z jednym wyjątkiem) ryzyko przekroczenia dawki granicznej dla osób z ogółu ludności spowodowanego dużymi wartościami stężenia aktywności ^{222}Rn w kopalnie. Wspomnianym wyjątkiem są zabiegi w uzdrowisku Świeradów-Zdrój, w którym stężenie aktywności ^{222}Rn w kopalnie powinno być mniejsze niż 2135 Bq/dm^3 (przy 14 zabiegach) i 1198 Bq/dm^3 (przy 25 zabiegach), aby dawka graniczna nie została przekroczona.

d) Wnioski dotyczące wystandaryzowania oraz zoptymalizowania zabiegów radonoterapii:

1. W żadnym z uzdrowisk nie prowadzi się zabiegów radonoterapii w sposób wystandaryzowany. W obu uzdrowiskach należy zwrócić szczególną uwagę, aby tworzywo radonowe wykorzystywane podczas zabiegów kąpieli indywidualnych, było przygotowywane bezpośrednio przed wejściem kuracjusza na zabieg.
2. Procedura prowadzonych zabiegów sprawia, że dzięki wietrzeniu pomieszczeń pochodne ^{222}Rn nie kumulują się w pomieszczeniach lub osadzają się w miejscach, z których ich dalszy transport jest mocno ograniczony – stężenie energii potencjalnej promieniowania α nie przekroczyło $1 \mu\text{J/m}^3$ w żadnym ze stosowanych zabiegów radonoterapii.

3. Zabiegi indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój wymagają przeprowadzenia dodatkowych analiz ze względu na wysokie stężenia aktywności ^{222}Rn i szybko zachodzące zmiany tego stężenia. Powinny one uwzględnić różne warianty rozpoczęcia zabiegu: bezpośrednio po zakończeniu wcześniejszego zabiegu, jak i po różnych przerwach czasowych. Należy również wystandaryzować i zoptymalizować ten zabieg poprzez ustalenie odstępów pomiędzy zabiegami (lub o ich braku). Niezbędne jest ścisłe przestrzeganie czasu trwania zabiegu. W przypadku jego przedłużania, dawka graniczna może zostać przekroczona.
4. W celu wystandaryzowania i zoptymalizowania zabiegów w obu uzdrowiskach, konieczne jest odpowiednie przygotowanie i wyposażenie pomieszczeń zabiegowych. Tworzywo radonowe powinno być nalewane w określonej objętości i o określonej temperaturze (w zabiegach kąpielowych). Sala powinna zostać przygotowana w sposób umożliwiający jej całkowite przewietrzenie (najlepiej powietrzem zewnętrznym, atmosferycznym), niezależnie od warunków pogodowych, w określonym (wyznaczonym) czasie. Należy wykorzystać aparaturę pomiarową umożliwiającą wykonywanie pomiaru w trybie ciągłym z jak najczęstszym odczytem danych, nie rzadziej niż raz na minutę stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu. Należy wykorzystać także aparaturę do pomiarów stężenia aktywności pochodnych radonu i stężenia energii potencjalnej promieniowania α o jak najmniejszym LLD (znacznie poniżej $1 \mu\text{J}/\text{m}^3$). Pomiar po wietrzeniu, w trakcie zabiegu, po zabiegu, po rozpoczęciu wietrzenia i na jego zakończenie umożliwi wówczas wyznaczenie procedury i dobranie czasów poszczególnych etapów, zarówno trwania zabiegów, jak i wietrzenia oraz umożliwi dokładniejsze oszacowanie dawek efektywnych od promieniowania jonizującego, które może przyjąć kuracjusz.
5. W uzdrowisku Łądek-Zdrój, zważywszy na fakt wysokiego stężenia aktywności ^{222}Rn w emanatorium (inhalatorium) pomiędzy zabiegami w kolejnych dniach, sięgającego nawet $4 \text{ kBq}/\text{m}^3$, warto rozważyć możliwość wykorzystania pomieszczenia bez dostarczania do niego powietrza wzbogaconego w ^{222}Rn . W przypadku zbyt małych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w pomieszczeniu wystarczające może się okazać dostarczanie powietrza

wzbogaconego w ^{222}Rn jedynie co określony czas, umożliwiając tym samym jego większą akumulację nad lustrem wody (z którego jest pompowane).

Mając powyższe na uwadze, należy stwierdzić, że cele pracy zostały zrealizowane, a tezy pracy:

1. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w czasie i przestrzeni w procesie eksploatacji, transportu i wykorzystania wód radonowych w zabiegach leczniczych mogą sięgać dwóch rzędów wielkości – **została potwierdzona.**
2. Kontakt radonowej wody podziemnej z powietrzem atmosferycznym prowadzi do szybkiego zmniejszenia stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie – **została potwierdzona.**
3. Wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego, którego źródłem jest ^{222}Rn i jego pochodne znajdujące się w powietrzu pomieszczeń służących do zabiegów radonoterapeutycznych nie przekraczają dopuszczalnych norm dla osób z ogółu ludności (kuracjuszy, pacjentów), jak i pracowników pracujących w warunkach narażenia zawodowego na promieniowanie jonizujące – **została potwierdzona.**

10. Literatura

- Tubiana, M. (2005). Dose-effect relationship and estimation of the Carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the académie des sciences (paris) and ofThe académie nationale de médecine. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys*, 63(2), pp. 317-319.
- Adamczyk-Lorenc, A. (2007). Tło hydrogeochemiczne radonu w wodach podziemnych Sudetów. *Rozprawa doktorska*. Wrocław: Politechnika Wrocławska.
- Alekin, O. A. (1948). *Obszczaja gidrochimija*. Leningrad: Gidrometeozdat.
- Audi, G., Bersillon, O., Blachot, J., Wapstra, A. H. (2003). The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*, 729, pp. 3-128.
- Awdankiewicz, H. (2004). Objasnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski w skali 1:50000, arkusz Złoty Stok nr 902.
- Becker, K. (2004). One century of radon therapy. *Int. J. Low Radiat.*, 1, pp. 333-357.
- Bilska, I. (2016). Wpływ radioaktywnego radonu i jego pochodnych na zdrowie człowieka. *Medycyna Środowiskowa - Environmental Medicine*, 19(1), pp. 51-56.
- Bobiński, W. (2004a). Objasnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski w skali 1:50000, arkusz Stronie Śląskie, nr 934.
- Bobiński, W. (2004b). Objasnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski w skali 1:50000, arkusz Biela, nr 935.
- Bogen, K. T. (2001). Biologically based prediction of empirical nonlinearity in lung cancer risk vs. residential/occupational radon exposure. *Human and Ecological Risk Assessment*, 7(4), pp. 811-827.
- Borkowska, M., Hameurt, J., Vidal, P. (1980). Origin and age of the Izera gneisses and Rum-burk granites in the Western Sudetes. *Acta Geol. Pol.*, 30(2).
- Brown, E., Skougstad, M., Fishman, M. (1960). Methods for collection and analysis of water samples. *USGS Water-Supply Pap*, 1454.
- Calabrese, E. J., Baldwin, L. A. (2002a). Radiation hormesis and cancer. *Human and Ecological Risk Assessment*, 8(2), pp. 327-353.
- Calabrese, E. J., Baldwin, L. A. (2002b). Defining hormesis. *Human & Experimental Toxicology*, 21, pp. 91-97.

- Calabrese, E. J., Baldwin, L. A. (2003). Toxicology rethinks its central belief. Hormesis demands a reappraisal of the way risks are assessed. *Nature*, 421(6924), pp. 691–692.
- Cebulska-Wasilewska, A. (1997). Skutki biologiczne ekspozycji na radon i produkty jego rozpadu. *Materiały konferencyjne XVII Szkoły Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. Marii Skłodowskiej-Curie nt. „Radon – występowanie, konsekwencje”*, (pp. 70-81). Zakopane.
- Chaloupsky, J., Wojciechowska, I., Gunia, T., Dziedzic, H. (1988). *Lugicum in: Precambrian in Younger Fold Belts: European Variscides, the Carpathians and Balkans*. (V. Zoubek, Ed.) Chichester, Anglia.
- Ciężkowski, W. (1983). Jednostka hydrogeologiczna szczaw Gór Izerskich. *Kwartalnik Geologiczny*, 27(3), pp. 595-604.
- Ciężkowski, W., Przylibski, T. A. (1997). Radon in Waters from Health Resorts of the Sudety Mountains (SW Poland). *Appl. Radiat. Isot.*, 48(6), pp. 855-856.
- Clark, M. W. (1923). *Studies on Oxidation-Reduction*. London.
- Cohen, B. L. (1995). Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Phys.*, 68, pp. 157-174.
- Cohen, B. L. (2002). Review: cancer risk from low-level radiation. *AJR*, 179, pp. 1137-1143.
- Cothorn, C. R., Smith, J. E. (1987). *Environmental Radon*. New York: Plenum Press.
- Czerwiński, A. (1998). *Energia jądrowa i promieniotwórczość*. Warszawa: Oficyna Edukacyjna Krzysztof Pazdro.
- Dadel, M., Trościanko-Wilk, E. (2014). Wybrane przykłady zastosowania radonoterapii w leczeniu schorzeń narządu ruchu w literaturze polskiej i zagranicznej (lata 1950-2013). *Acta Balneologica*, 1(135), pp. 46-50.
- Daniels, W. L., Zipper, C. E., Orndorff, Z. W., Skousen, J., Barton C, D., McDonald, L. M., Beck M, A. (2016). Predicting total dissolved solids release from central Appalachian coal mine spoils. *Environ. pollut.*, 216, pp. 371-379.
- Darby, S., Hill, D., Doll, R. (2001). Radon: A likely carcinogen at all exposures. *Annals of Oncology*, 12, pp. 1341–1351.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H.; Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M.,

- Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G. (2005). Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomášek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, 330(7485), pp. 223–226.
- Dawgiało, J. (1969). *Występowanie wód leczniczych w Polsce. Geologia surowców balneologicznych*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Deetjen, P., Falkenbach, A., Harder, D., Jöckel, H., Kaul, A., von Philippsborn, H. (2014). *Radon as a medicine. Therapeutic effectiveness, biological mechanism and comparative risk assessment*. Germany: Verlag Dr Kovac.
- Dobrzyński, D. (2006). Chemizm wód podziemnych. In A. Macioszczyk (Ed.), *Podstawy hydrogeologii stosowanej* (pp. 123-169). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Dobrzyński, D., Kmiecik, E., Wątor, K. (2018). Potencjał utleniająco-redukcyjny – informatywny i niewykorzystany wskaźnik jakości wód leczniczych i mineralnych. *Acta Balneologica, LX(4(154))*, pp. 233-238.
- Don, J. (1964). Góry Złote i Krowiarki jako element metamorfiku Łądką i Śnieżnika. *Geol. Sudetica, I*.
- Dowgiało, J., Kleczkowski, A., Macioszczyk, T., Rożkowski, A. (2002). *Słownik Hydrogeologiczny*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Dumicz, M. (1979). Próba wyjaśnienia tektogenezy serii zmetamorfizowanych Ziemi Kłodzkiej. *Geol. Sudetica, 14(2)*.
- Dumicz, M. (1986). Następstwo serii gnejsowych i deformacji tektonicznych w świetle analizy strukturalnej tektogenu sudeckiego na przykładzie wybranych obszarów Ziemi Kłodzkiej. *Historia ruchów tektonicznych na ziemiach polskich, cykl kaledońsko-waryscyjski*. Wrocław: Komitet Nauk Geol. PAN.
- Dynowska, I., Tłałka, A. (1982). *Hydrografia*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Erickson, B. E. (2007). The therapeutic use of radon: A biomedical treatment in Europe; An „alternative” remedy in the United States. *Dose-Response, 5(1)*, pp. 48-62.

- Falkenbach, A., Kovacs, J., Franke, A., Jorgens, K., Ammer, K. (2005). Radon therapy for the treatment of rheumatic diseases—review and meta-analysis of controlled clinical trials. *RheumatolInt*, 25, pp. 205-210.
- Feinendegen, L. E. (2005). Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis. *Br J Radiol*, 78, pp. 3-7.
- Felter, A., Skrzypczyk, L., Socha, M., Sokołowski, J., Stożek, J., Gryszkiewicz, I., Gryczko-Gostyńska, A. (2018). Mapa zagospodarowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w Polsce 2017. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- Fistek, J., Teisseyre, J. (1967). Geneza wód mineralnych Świeradowa-Zdroju. *Przew. 40 Zjazdu Pol. Tow. Geol.*, pp. 177-178.
- Fistek, J., Iwanowski, S., Iciek, A., Jagodziński, A. (1975). Badania geologiczne, geofizyczne i hydrogeologiczne jako przykład kompleksowego rozwiązania problemu poszukiwań wód leczniczych w uzdrowiskach sudeckich. *Biuletyn Infor. Geogizyka*, 1, pp. 5-30.
- Franke, A., Reiner, L., Pratzel, H. G., Franke, T., Resh, K. L. (2000). Long-term efficacy of radon spa therapy in rheumatoid arthritis – a randomized, sham-controlled study and follow-up. *Rheumatology*, 39(8), pp. 894-902.
- Fulica–Jankowski, W. (2002). Inwentaryzacja Przyrodnicza Województwa Dolnośląskiego, Gmina Łądek Zdrój, Wrocław.
- Gierwielaniec, J. (1971). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1:25000*. *Ark. Łądek Zdrój*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Girault, F., Perrier, F., Przylibski, T. A. (2018). Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. In G. K. Gillmore, F. E. Perrier, R. G. Crockett, *Radon, Health and Natural Hazards* (Vol. 451, pp. 131-154). Geological Society, London, Special Publications. doi:10.1144/SP451.3
- Gudzenko, V. (1992). Radon in subsurface water studies. Isotopes of noble gases as tracers in environmental studies. *Proceedings of a consultants meeting on isotopes of noble gases as tracers in environmental studies organized by the International Atomic Energy Agency And Held in Vienna from 29 may to 2 june 1989* (pp. 249–261). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Hayter, C. (2003). Seeds of discord: The politics of radon therapy in Canada in the 1930s. *Bulletin of the History of Medicine*, 77(1), pp. 75-102.

- Hem, D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical of Natural of Characteristics Natural Water. *USGS Water Supply Paper, 2254*, pp. 66-69.
- Hryniewicz, A. Z. (red). (2001). Człowiek i promieniowanie jonizujące. *Wydawnictwo Naukowe PWN*.
- Huber, J., O., E. (2001). Response to Eichholz. *Health Physics, 81(6)*, p. 729.
- Iashina, L. M., Shatrova, L. E., Zhdanova, K. S., Kuznetsova T, A. (2011). The influence of radon baths on the lipid profile of patients with cardiovascular diseases and dyslipidemia. *Vopr Kurortol Fizioter Lech Fiz Kult., 2*, pp. 3-4.
- ICRP. (2017). *Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4)*.
- Janik, M. (2005). *Przenikanie radonu z gruntu do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych*. Raport nr 1966/ AP IFJ PAN.
- Jaworowski, Z. (1997). Dobroczynne promieniowanie. *Wiedza i Życie, 3*, pp. 20-29.
- Johansson, L. (2003). Hormesis, an update of the present position. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 30(6)*, pp. 921-933.
- Joly, J. (1914). On the local application radium in therapeutics. *The Scientific proceedings of the Royal Dublin Society, XIV*, pp. 290-296.
- Jimi, E., Ghosh, S. (2005). Role of nuclear factor-kappaB in the immune system and bone. *Immunol. Rev., 208*, pp. 80-87.
- Kallman, H. (1950). Scintillation counting with solutions. *Phys Rev., 78(5)*, pp. 621-622.
- Katalog WTW. (dostęp 01.03.2023). *Katalog Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG WTW@: <http://wtw.pl/katalog-plik/232>*
- Kłonowski, M. (2004a). Objąsnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski w skali 1:50000, arkusz Stronie Śląskie, nr 934.
- Kłonowski, M. (2004b). Objąsnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski w skali 1:50000, arkusz Biela, nr 935.
- Kobal, I., Renier, A. (1987). Radioactivity of the atomic SPA at Podčetrtek, Slovenia, Yugoslavia. *Health Physics, 53(3)*, pp. 307-310.
- Kochański, J. W. (1978). Medicinal applications of radon-222 in Łądek health resort. *Problemy Uzdrawiskowe, 4(126)*, pp. 47-67.

- Kochański, J. W. (1978). Lecznicze zastosowanie radonu-222 w Uzdrowisku Łądek. *Problemy Uzdrowiskowe*, 4(126), pp. 47–67.
- Kochański, J. W. (2002). A review of research into medicinal applications of radon-222 in Polish health resorts. *Folia Medica Lodziensia*, 29(1/2), pp. 31-68.
- Kowalska, A. (2017). *Zależność występowania zwiększonych stężeń aktywności izotopów ^{226}Ra i ^{228}Ra od składu i typu chemicznego wód podziemnych. Aneks do pracy doktorskiej*. Wrocław (niepublikowane): Politechnika Wrocławska.
- Lázár, I., Tóth, E., Marx, G., Cziegler, I., G.J., K. (2003). Effects of residential radon on cancer incidence. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 258(3), pp. 519-524.
- Leroy, C., Rancoita, P.-G. (2009). *Principles of Radiation Interaction on Matter and Detection (2nd Edition)*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Li, W., Wang, G., Cui, J., Xue, L., Cai, L. (2004). Low-dose radiation (LDR) induces hematopoietic hormesis: LDR-induced mobilization of hematopoietic progenitor cells into peripheral blood circulation. *Exp Hematol*, 32, pp. 1088-1096.
- Luckey, T. D. (1986). Ionizing radiation promotes protozoan reproduction. *Radiat Res*, 108, pp. 215-221.
- Macioszczyk, A., Dobrzyński, D. (2002). *Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych*. Warszawa: PWN.
- Mamont-Cieśla, K. (2023). *Radon – promieniotwórczy gaz w środowisku człowieka*. Strona WWW (dostęp 04.04.2023): https://www.clor.waw.pl/images/pliki/Pomiar_Radonu/Radon-1a_Kalina_radon.pdf
- Mapy Google (2023). Strona WWW (dostęp 03.01.2023): <https://www.google.com/maps/>
- Marandi, A., Polikarpus, M., Jöeleht, A. (2013). A new approach for describing the relationship between electrical conductivity and major anion concentration in natural waters. *Appl. Geochemistry*, 38, pp. 103-109.
- Maraziotis, E. (1996). Effects of intraparticle porosity on the radon emanation coefficient. *Environmental Science and Technology*, 30, pp. 2441–2448.

- Mazur, J. (2008). *Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby (praca doktorska)*. Raport IFJ PAN Nr 2014/Ap.
- Mazur, S., Aleksandrowski, P., Szczepański, J. (2010). Zarys budowy i ewolucji tektonicznej waryscyjskiej struktury Sudetów. *Przegląd Geologiczny*, 58(2), pp. 133-145.
- McLaughlin, J. (2012). An historical overview of radon and its progeny: applications and health effects. *Radiation Protection Dosimetry*, 152(1-3), pp. 2-8. doi:10.1093/rpd/ncs189
- Merkel, B., Sperling, B. (1996). Hydrogeochemische Stoffsysteme. *DVWK-Schriften*, 110.
- Merzbacher, E. (2012). Radioactive toothpaste and reversed helicity. *Physics Today*, 65(4), pp. 10-11. doi:10.1063/PT.3.1500
- Mierzejewski, M. P., Oberc-Dziedzic, T. (1990). The Izera-Karkonosze Block and its tectonic development (Sudetes, Poland). *N. Jb. Geol. Paleont. Abh.*, 179(2/3).
- Miliszkiwicz, A. (1978). *Radon*. Wrocław: PWN.
- Mitsunobu, F., Yamaoka, K., Hanamoto, K., Kojima, S., Hosaki, Y., Ashidak, K., Sugita, K., Tanizaki, Y. (2003). Elevation of antioxidant enzymes in the clinical effects of radon and thermal therapy for bronchial asthma. *J. Radiat. Res.*, 44, pp. 95-99.
- Mnich, Z., Karpińska, M., Kapała, J., Kozak, K., Mazur, J., Birula, A., Antonowicz, K. (2004). Radon concentration in hospital buildings erected during the last 40 years in Białystok, Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 75(2), pp. 225-232. doi:10.1016/j.jenvrad.2003.12.006
- Moder, A., Hufnagl, C., Jakab, M., Hitzl, W., Ritter, M. (2011). Radon-therapy in ankylosing spondylitis reduces auto-antibody titers. *Open Journal of Molecular and Integrative Physiology*, 1, pp. 52-54.
- Moskal, P. (2010). Czy promieniowanie jonizujące jest zawsze szkodliwe dla zdrowia? Hormeza radiacyjna. *Foton*, 110, pp. 26-27.
- Mroczkowska, B. (2000). Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50000, arkusz Żłoty Stok, nr 902.
- Nagy, K., Kávási, N., Kovács, T., Somlai, J. (2008). Radon therapy and speleotherapy in Hungary. *La Presse Thermale et Climatique*, 145, pp. 219-225.

- National Atomic Energy Agency. (2021). *Annual Report. Activities of the President of the National Atomic Energy Agency and assessment of nuclear safety and radiological protection in Poland in 2020*. Warszawa.
- NCBJ. (2020). *Position Statement of SARI and XLNT Regarding Health Effects of Ionizing Radiation*. Strona WWW (dostęp 28.06.2022): http://www.ncbj.gov.pl/sites/default/files/position_statement_by_sari.pdf
- Nikolaishvili, M., Nanobashvili, Z., Mitagvaria, N., Chkadua, G., Museliani, T. (2022). Assessment of Integrated Antioxidant Systems and Hormezis Effect of Radon in Experimental Studies. *Journal of Biosciences and Medicines*, 10, pp. 212-227. doi:10.4236/jbm.2022.103020
- Oberc, J. (1972). Sudety i obszary przyległe. In *Budowa geologiczna Polski* (Vol. 4). Warszawa: Wyd. Geol.
- Oliver, G. J., Corfu, F., Krogh, T. E. (1993). U-Pb ages from SW Poland: evidence for Caledonian suture zone between Baltica and Gondwana. *Journ. of the Geol. Soc.*, 150.
- Ongori, J. N., Lindsay, R., J, Mvelase M. (2015). Radon transfer velocity at the water-air interface. *Appl. Radiat. Isot.*, 105, pp. 144-149.
- Owczynn timer, A. M. (1963). *Mineralnyje wody*. Moskwa: GOSGEOLTECHIZDAT.
- Papierkowski, J. (1969). „Antroterapia” czyli leczenie podziemne w sztolni radioaktywnej w Kowarach-Podgórzu i rola Kowar jako potencjalnego uzdrowiska. *Problemy Uzdrowiskowe*, 3(45), pp. 65–100.
- Patil, P. N., Sawant, D. V., Deshmukh, R. N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water – a review. *Int. J. Environ. sci.*, 3, pp. 1194-1207.
- Pazdro, Z. (1983). *Hydrogeologia ogólna*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Pazdro, Z., Kozerski, B. (1990). *Hydrogeologia ogólna*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Pazdro, Z., Kozerski, B. (1990). *Hydrogeologia ogólna*. Warszawa: PAE.
- Peńsko, J., Pachocki, K., Różycki, Z., Majle, T., Gorzkowski, B., Wilejczyk, E. (1998). Terapia radonowa – inhalatorium radonowe w Kowarach. *Roczn. PZH*, 49, pp. 189–198.
- PeriodicTable. (2023). Strona WWW (dostęp: 26.01.2023): <https://periodictable.com/Isotopes/086.218/index3.full.dm.prod.html>

- Persianova-Dubrova, A. L., Badalov, N. G., Lvova, N. V., Tupitsyna, I. U., Uianaeva, A. I., Krikorova, S. A., Adilov, V. B., Linok, V. A., Povazhnaia, E. L. (2012). Crenobalneotherapy in Russia. *La Presse Thermale et Climatique*, 149, pp. 93-102.
- Piispanen, R. (2000). Radon and lung cancer in Finland: are there signs of radiation hormesis? *Environmental Geochemistry and Health*, 22, pp. 113-130.
- Planinić, J., Faj, Z., Šuveljak, B., Radolić, V., Vaupotič, B., Kobal, I. (1996). Radon in the spa of Bizovac. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 210(1), pp. 227-231.
- Pollycove, M., Feinendegen, L. (2003). Radiation-included versus endogenous DNA damage: possible effects of inducible protective responses in mitigating endogenous damage. *Hum. Exp Toxicol*, 22(6), pp. 290-306. doi:10.1191/0960327103ht365oa
- Ponikowska, I., Walczak-Sielicka, J., Latour, T., Łaukajtys, T. (1995). *Medycyna uzdrowiskowa w zarysie*. Warszawa: *Watext's*.
- Przylibski, T. A. (1996). Origin of radon in medicinal waters of Świeradów Zdrój. *Nukleonika*, 41(4), pp. 109-116.
- Przylibski, T. A. (1998). Zmiany stężeń radonu w podziemnych wodach leczniczych Świeradowa Zdroju (Sudety). *Przegląd Geologiczny*, 46(4), pp. 365-370.
- Przylibski, T. A. (1999). "Radioactive" or "radon" waters? *Przegląd Geologiczny*, 47, pp. 53-55.
- Przylibski, T. A. (2000). ²²²Rn concentration changes in medicinal groundwaters of Łądek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *J. Environ. Radioact.*, 48(3), pp. 327-347.
- Przylibski, T. A. (2004). Concentration of ²²⁶Ra in rocks of the southern part of Lower Silesia (SW Poland). *J. Environ. Radioact.*, 75(2), pp. 171-191.
- Przylibski, T. A. (2005). *Radon. Składnik swoisty wód leczniczych Sudetów*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Przylibski, T. A. (2015). Radon research in Poland: A review. *Solid State Phenom.*(238), pp. 90-115.
- Przylibski, T. A. (2018). Radon: a radioactive therapeutic element. In G. K. Gillmore, F. E. Perrier, R. G. Crockett, *Radon, Health and Natural Hazards. Geological*

- Society* (Vol. 451, pp. 209–236). London, Special Publications. doi:10.1144/sp451.7
- Przylibski, T. A., Żebrowski, A. (1999). Origin of radon in medicinal waters of Łądek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, 46, pp. 121-129.
- Przylibski, T. A., Maciejewski, P., Zagożdżon, P. P., Zagożdżon, K. D. (2022). Szybkość uwalniania się ^{222}Rn z wód podziemnych do atmosfery. *Przegląd Geologiczny*, 70(10), pp. 742-750. doi:10.7306/2022.27
- PubChem. (2023). Strona WWW (dostęp: 26.01.2023): <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Radon#section=Atomic-Mass-Half-Life-and-Decay>
- Reynolds, G. T., Harrison, F. B., Salvini, G. (1950). Liquid scintillation counters. *Physical Review*, 78(4), p. 488.
- Rowe, P. M. (1996). Finnish study shows low risk from home radon exposure. *The Lancet*, 348, p. 257.
- Rudnicki, T., Wysocki, Z. (1987). Leczenie uzdrowiskowe z wykorzystaniem tworzyw radonowych w świetle aktualnych badań i poglądów. *Problemy Uzdrowiskowe*, 7-8(237/238), pp. 115–120.
- Rühle, P. F., Wunderlich, R., Deloch, L., Fournier, C., Maier, A., Klein, G., Fietkau, R., Gaipl, U. S., Frey, B. (2017). Modulation of the peripheral immune system after low-dose radon spa therapy: Detailed longitudinal immune monitoring of patients within RAD-ON01 study. *Autoimmunity*. doi:10.1080/08916934.2017.1284819
- Rulski, S. (1975). Zastosowanie aparatury Turam do poszukiwania złóż rud polimetalu na wybranych obiektach geologicznych w Sudetach. *Biul. Infor. Geofizyka*, 1, pp. 31-42.
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *Global Colloquium on GeoSciences and Engineering*. IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmenta. doi:10.1088/1755-1315/118/1/012019
- Rutherford, E. (1913). *Radioactive Substances and Their Radiations*. Cambridge: The University Press.

- Sahoo, B. K. (2013). *Modeling and Measurement of Radon and Thoron Emission from Naturally Occurring Radioactive Materials (praca doktorska)*. Mumbai: Bhabha Atomic Research Centre.
- Sakoda, A., Ishimori, Y., Yamaoka, K. (2011). A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Radiation and Isotopes*, 69, pp. 1422–1435.
- Samet, J. M. (1997a). Indoor radon exposure and lung cancer: Risky or not? – All over again. *Journal of National Cancer Institute*, 89, pp. 4-6.
- Samet, J. M. (1997b). Epidemiologic studies of ionizing radiation and cancer: Past successes and future challenges. *Environmental Health Perspectives*, 105, pp. 883–889.
- Sanders, C. L., Scott, B. R. (2006). Smoking and hormesis as confounding factors in radiation pulmonary carcinogenesis. *Dose Response*, 6, pp. 53–79.
- Santos, I., Cantista, P., Vasconcelos, C. (2016). Balneotherapy in rheumatoid arthritis - A systematic review. *International Journal of Biometeorology*, 60, pp. 1287–1301.
- Sas, D., Navrátil, O., Sládek, P., Surý, J., Štelcl, J., Zimák, J. (1998). Geologická a mikroklimatická charakteristika speleoterapeutické léčebny na 2. Patře ložiska Zlaté Hory-Jih. *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Masaryk. Brun.*, 25, pp. 37–46.
- Sasaki, T., Gunji, Y., Okuda, T. (2004). Radon emanation dependence on grain configuration. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41(10), pp. 993–1002.
- Schöllnberger, H., Ménache, M. G., E, H. T. (2001). A biomathematical modelling approach to explain the phenomenon of radiation hormesis. *Hum. Ecol. Risk Assess.*, 7(4), pp. 867-890.
- Schöllnberger, H., Ménache, M. G., Hanson, T. E. (2001). A biomathematical modeling approach to explain the phenomenon of radiation hormesis. *Human and Ecological Risk Assessment*, 7(4), pp. 867-890.
- Scott, B. R. (2011). Residential radon appears to prevent lung cancer. *Dose Response*, 9, pp. 444–464.

- Skulimowski, M. (1981). Zarys subterranoterapii. In T. Cieniawa, M. Skulimowski, J. Żebrak (Ed.), *Inhalacje*. Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich.
- Smulikowski, K. (1979). Ewolucja polimetamorficzna krystaliniku Śnieżnika Kłodzkiego i Gór Żłoty. *14*(1).
- Smulikowski, W. (1972). Petrograficzne i strukturalne problemy północnej okrywy granitu Karkonoszy. *Geol. Sudetica*, *6*.
- Sokołowski, J., Skrzypczyk, L. (2022). Solanki, wody lecznicze i termalne. In M. Szuflicki, A. Malon, M. Tymiński, *Bilans Zasobów Złóż Kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2021* (pp. 488-505). Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy.
- Somlai, J., Kávási, N., Szabó, B., Várhegyi, A., Kovács, T. (2007). The function of radon in curing respiratory diseases in the therapeutic cave of Topolca. *J. Radioanal.*, *273*(2), pp. 363-370.
- Soto, J., Fernández, P. L., Quindós, L. S., Gómez-Arozamena, J. (1995). Radioactivity in Spanish spas. *The Science of the Total Environment*, *162*, pp. 187-192.
- Štelcl, J., Zimák, J., Navrátil, O., Sládek, P., Sas, D. (1998). Geologické faktory a mikroklima speleoterapeutické léčebny v Javoříčských Jeskyních. *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Masaryk. Brun.*, *25*, pp. 47-58.
- Studium. (2021). *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Świeradów-Zdrój*. M&R BIURO PROJEKTÓW MIELOCH SP Z O.O.
- Stupnicka, E. (2013). *Geologia regionalna Polski* (III zmienione ed.). Warszawa: Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego.
- Sun, H., Semkow, T. M. (1998). Mobilization of thorium, radium and radon radionuclides in ground water by successive alpha-recoils. *205*, pp. 126-136.
- Svensson, L. (1979). *Dose conversion factors for external photon radiation*. Umeå: Försvarets Forskningsanstalt.
- Szałamacha, J., Szałamacha, M. (1967). Seria Niedamirowa w świetle nowego strukturalnego podziału wschodniej części pokrywy granitu karkonoskiego. *Kwart. Geol.*, *11*(2).
- Szałamacha J., Szałamacha, M. (1984). Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Sudetów, arkusz Świeradów-Zdrój. *Inst. Geol. Warszawa*.

- Szerbin, P. (1996). Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary. *Environment International*, 22, pp. 389-398.
- Tanner, A. B. (1980). Radon migration in the ground: A supplementary review. In T. F. Gessel, W. M. Lowder (Eds.), *Natural radiation environment III* (vol. 5, pp. 5-56). Symposium Proceedings.
- Teisseyre, H., Smulikowski, K., Oberc, J. (1957). *Regionalna geologia Polski* (vol. 3. Sudety z. 1).
- Teisseyre, J. H. (1973). Skały metamorficzne Rudaw Janowickich i Grzbietu Lasockiego. *Geologia Sudetica*, 8.
- Tołstichin, N. I., Posochow, E. W. (1975). *Mineralnyje wody*. Leningrad: LGI.
- US Environmental Protection Agency. (2016). *A citizen's guide to radon: the guide to protecting yourself and your family from radon*.
- Ustawa. (2000). *Ustawa z dnia 29 listoapada 2000 r. Prawo atomowe*. (Dz.U. 2021 poz. 1941).
- Ustawa. (2011). *Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze* (tekst jednolity, Dz.U. 2022 poz. 1072).
- Uzdrowisko. (2023). Strona WWW (dostęp 15.02.2023): <https://uzdrowiskoladek.pl/>
- Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi, A., Halvadakis, C. P. (2004a). Radon exposure in the thermal Spas of Lesvos Island –Greece. *Radiat. Prot. Dosim.*, 111(1), pp. 121-127. doi:10.1093/rpd/nch373
- Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi, A., Halvadakis, C. P. (2004b). Radon variations during treatment in thermal spas of Lesvos Island (Greece). *J. Environ. Radioact.*, 75, pp. 159-170.
- Volkova, P. Y., Bondarenko, E. V., Kazakova, E. A. (2022). Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*, 30: 100334. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>
- Wacławski, M. (1999). *Geologia inżynierska i hydrogeologia, część II. Hydrogeologia* (2 ed.). Kraków: Politechnika Krakowska.
- Walczak, K., Zmyślony, M. (2013). Estimation of effective doses derived from radon in selected spa centers that use geothermal waters based on the information of radon concentrations. *Medycyna Pracy*, 64(2), pp. 193-198. doi:10.13075/mp.5893/2013/0015

- Walton, N. R. (1989). Electrical Conductivity and total dissolved solids – What is their precise relationship? *Desalination*, 72, pp. 275-292.
- WHO. (2010). *WHO Guidelines for indoor air*. Bonn: WHO Regional Office for Europe.
- Wieser, M. E. (2006). Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 78(11), pp. 2051–2066. doi:doi:10.1351/pac200678112051
- Załącznik. (2017). *Załącznik Nr 1 do uchwały Nr XLIX/309/2017 Rady Miejskiej Łódka-Zdroju z dnia 30 listopada 2017 r. Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta i gminy Łódka Zdrój. Tekst ujednolicony.*
- Zdrojewicz, Z., Belowska-Bień, K. (2004). Radon i promieniowanie jonizujące a organizm człowieka. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 58, pp. 150–157.

11. Spis tabel

Tab. 1. Właściwości wybranych izotopów radonu (Svensson, 1979; Wieser 2006; Audi i in., 2003; PubChem; PeriodicTable; Przylibski, 2005)	15
Tab. 2. Uzdrowiska dysponujące radonowymi wodami leczniczymi wraz z ich poziomami stężenia aktywności ^{222}Rn (Felter i in., 2018).....	20
Tab. 3. Wartości PAE na jednostkę aktywności (Mamont-Cieśla, 2023).....	56
Tab. 4. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej w zbiorniku przy źródle Jerzy w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	61
Tab. 5. Parametry statystyczne dla zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zbiorniku przy źródle Jerzy w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	62
Tab. 6. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych, stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej stosowanej do zabiegów kąpieli indywidualnych, przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) – wodzie po odbyciu zabiegu oraz energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu pomieszczenia zabiegowego przed i po zabiegu.....	64
Tab. 7. Parametry statystyczne dla zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów indywidualnych kąpieli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	65
Tab. 8. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (31.08.2021-03.09.2021) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpieli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	68
Tab. 9. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (24.08.2022-26.08.2022) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpieli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	70
Tab. 10. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium w trakcie zabiegów w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	73

Tab. 11. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium w trakcie wietrzenia pomieszczenia w uzdrowisku Łądek-Zdrój	75
Tab. 12. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalatorium przed pierwszym porannym zabiegiem w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	76
Tab. 13. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (05-09.07.2021) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	82
Tab. 14. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w sali zabiegowej (22-24.08.2022) wykorzystywanej do przeprowadzania zabiegów inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	87
Tab. 15. Średnia wartość stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie: ze zbiornika przy ujęciu Jerzy (kopalina), w wodzie przed zabiegiem oraz w ścieku po zabiegu indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	88
Tab. 16. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w leczniczej wodzie radonowej na kolejnych etapach jej eksploatacji i wykorzystania, tj. pomiędzy kopalnią a tworzywem radonowym oraz tworzywem radonowym a ściekiem, podczas zabiegów indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	88
Tab. 17. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz pod koniec prowadzenia zabiegów (KZ) indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	94
Tab. 18. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	94

Tab. 19. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie ze zbiornika tworzywa radonowego w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	96
Tab. 20. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś), a także zmierzone w powietrzu pomieszczenia zabiegowego stężenie energii potencjalnej promieniowania α podczas zabiegów kąpeli indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	98
Tab. 21. Parametry statystyczne dla zmierzonych wartości stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie przed zabiegiem (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	99
Tab. 22. Parametry statystyczne charakteryzujące wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach w pomieszczeniach, w których prowadzono zabiegi indywidualnej kąpeli radonowej (19-21.04.2022) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	102
Tab. 23. Parametry statystyczne charakteryzujące wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach (26-28.09.2022) w pomieszczeniu wykorzystywanym do przeprowadzania zabiegów indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	104
Tab. 24. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej na rozpoczęcie (PZ) oraz na zakończenie (KZ) pomiarów w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	106
Tab. 25. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie basenu kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	107

Tab. 26. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) i stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej oraz stężenia energii potencjalnej promieniowania α w powietrzu wokół basenu w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	108
Tab. 27. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej z basenu w uzdrowisku Świeradów-Zdrój	109
Tab. 28. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn przeprowadzonych w dniach 22.04.2022 i 29.09.2022 w powietrzu w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	111
Tab. 29. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	113
Tab. 30. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej ze zbiornika przy ujęciu Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	113
Tab. 31. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) wody oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w zimnej, radonowej wodzie leczniczej w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów danego dnia (KZ) z próbek pobranych z najbliższego inhalatorium punktu poboru (zbiornik tworzywa) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój	114
Tab. 32. Parametry statystyczne dla wartości zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zimnej, radonowej wodzie leczniczej z najbliższego inhalatorium punktu poboru (zbiornik tworzywa) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój	115
Tab. 33. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	116

Tab. 34. Parametry statystyczne wartości pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn dniach 29-30.07.2021 w powietrzu dostarczanym do zabiegu indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	120
Tab. 35. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu do inhalacji radonowych w dniach 29-30.07.2021 podczas zabiegu inhalacji indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	123
Tab. 36. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu do indywidualnych inhalacji radonowych w dniach 21-22.09.2022 w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	126
Tab. 37. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie leczniczej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w trakcie zabiegów w tęźni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	127
Tab. 38. Parametry statystyczne dla wyników zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w leczniczej wodzie radonowej ze zbiornika ujęcia Marii Curie-Skłodowskiej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	128
Tab. 39. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) oraz stężenia aktywności ^{222}Rn w zimnej, radonowej wodzie leczniczej pobranej z punktu poboru znajdującego się w jednym z pomieszczeń Zakładu Radocznego (równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego) w trakcie pierwszych zabiegów (PZ) oraz na koniec zabiegów (KZ) w każdym dniu wykonywania pomiarów w tęźni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	129
Tab. 40. Parametry statystyczne dla wartości zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w zimnej, radonowej wodzie leczniczej z punktu poboru znajdującego się w jednym z pomieszczeń Zakładu Radocznego (równoważne pomiarom w zbiorniku tworzywa radonowego) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	129
Tab. 41. Wyniki pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn oraz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych (PEW, pH, Eh, T) w wodzie świeżo dostarczonej do tęźni (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w tęźni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	130

Tab. 42. Parametry statystyczne wartości zmierzonego stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie świeżo dostarczonej do tężni (WP) oraz w ścieku (Ś) podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	131
Tab. 43. Wyniki pomiarów stężenia energii potencjalnej promieniowania α w trakcie zabiegów w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	132
Tab. 44. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w poszczególnych dniach (29-30.07.2021) podczas zabiegu inhalacji radonowych w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	135
Tab. 45. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w dniach 04-05.08.2021 podczas zabiegu zbiorowej inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	137
Tab. 46. Parametry statystyczne wyników pomiarów stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu w dniach 29-30.07.2021 podczas zabiegu inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	138
Tab. 47. Średnie wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w badanych próbkach wody na poszczególnych etapach wykorzystania wody radonowej – od ujęcia eksploatowanej kopaliny, poprzez gromadzone tworzywo radonowe do zużytej w zabiegach wody (ścieku) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	139
Tab. 48. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w badanych próbkach wody na poszczególnych etapach – od ujęcia eksploatowanej kopaliny, poprzez gromadzone tworzywo radonowe, jego użycie podczas zabiegów aż do zużytej w zabiegach wody (ścieku) w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	140
Tab. 49. Oszacowane dawki dla pojedynczego zabiegu kąpieli radonowej i inhalacji radonowej w uzdrowisku Łądek-Zdrój w podziale ze względu na wartości: minimum, średnią i maksimum stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, w zależności od założonego środowiska – pomieszczenie w budynku ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub jaskinia turystyczna ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	147

Tab. 50. Dawka efektywna otrzymywana w trakcie zabiegu kąpiei indywidualnych oraz inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby zabiegów	148
Tab. 51. Sumaryczna dawka efektywna otrzymywana w czasie zabiegów kąpiei indywidualnych i inhalacji w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby zabiegów	148
Tab. 52. Roczne dawki efektywne otrzymane przez pracownika obsługującego zabiegi inhalacji radonowej w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu pracy spędzonego na sali zabiegowej	150
Tab. 53. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi kąpiei indywidualnych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego w sali kąpielowej	151
Tab. 54. Oszacowane dawki efektywne dla pojedynczych zabiegów wykorzystujących radonową wodę leczniczą w uzdrowisku Świeradów-Zdrój obliczone dla minimum, średniej i maksimum stężenia aktywności ^{222}Rn w powietrzu, w zależności od założonego środowiska – pomieszczenie w budynku ($D_{\text{efpo}}=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) lub jaskinia turystyczna ($D_{\text{efpo}}=1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	152
Tab. 55. Oszacowana dawka efektywna otrzymywana w trakcie zabiegów wykorzystujących leczniczą wodę radonową w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby zabiegów	155
Tab. 56. Sumaryczna dawka efektywna dla zabiegów indywidualnych kąpiei radonowych i indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności liczby zabiegów	156
Tab. 57. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi radonowych kąpiei indywidualnych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej	158

Tab. 58. Roczne dawki efektywne otrzymywane przez pracownika obsługującego zabiegi kąpeli radonowej w basenie w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej.....	159
Tab. 59. Roczne dawki efektywne otrzymane przez pracownika obsługującego zabiegi w tężni radonowo-solankowej w Uzdrowisku Świeradów-Zdrój w zależności od liczby godzin pracy i udziału czasu spędzonego na sali zabiegowej.....	160
Tab. 60. Oszacowane graniczne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn w zbiorniku kopaliny podczas indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Lądek-Zdrój, które nie spowodują przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej dla ogółu ludności	163
Tab. 61. Oszacowane graniczne wartości stężenia aktywności ^{222}Rn podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój, które nie spowodują przekroczenia dopuszczalnej dawki efektywnej dla ogółu ludności	165

12. Spis rysunków

Rys. 1. Szereg uranowo-radowy; s –sekundy, min – minuty, d – doby, a –lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska – rozpad β (Miliszkiewicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005)	13
Rys. 2. Szereg torowy; s – sekundy, min – minuty, d – doby, a – lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska – rozpad β (Miliszkiewicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005).....	14
Rys. 3. Szereg uranowo-aktynowy; s – sekundy, min – minuty, d – doby, a –lata, strzałka czarna – rozpad α , strzałka niebieska –rozpad β (Miliszkiewicz, 1978; Czerwiński, 1998; Przylibski, 2005)	14
Rys. 4. Mapa geologiczna krystaliniku Łądko-Śnieżnika (wg Teisseyre’a, Dona, Gierwielañca, Kaszy, Oberca: Oberc, 1972, uproszczona); 1: łupki stroñskie, 2: granitognejsy Śnieżnika, 3: granitognejsy gierałtowskie, 4: granitoidy waryscyjskie, 5: osie synklinoriów, 6: osie antyklinoriów, 7: uskoki; Antyklinoria: I: Międzygórze, III: Gierałtowa, V: Radochowa, VII: Skrzynki; synklinoria: II: Śnieżnika, IV: Łądko, VI: Orłowca.....	38
Rys. 5. Mapa geologiczna krystaliniku karkonosko-izerskiego (wg Teisseyre i in., 1957; Stupnicka, 2013). 1 – granodioryty zawidowskie, 2 – granitognejsy izerskie, 3 – łupki metamorficzne pasma: I – Szklarskiej Poręby, II – Starej Kamienicy, III – Złotnik Lubañskich; 4 – gnejsy, amfibolity i łupki mikowe serii Kowar i Leszczyñca, 5 – paleozoiczne skały epimetamorficzne, 6 – granity karkonoskie, 7 – karbon dolny, 8 – czerwony spągowiec, 9 – trzeciorząd, 10 – uskoki, 11 – nasunięcia.....	43
Rys. 6. Lokalizacja Zakładu Przyrodoleczniczego Jerzy, ujęcia radonowej wody leczniczej Jerzy oraz pomieszczeń zabiegowych radonoterapii w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	60
Rys. 7. Stężenie aktywności ^{222}Rn w pomieszczeniu zabiegowym wykorzystywanym do indywidualnych kąpeli radonowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w dniach 31.08-03.09.2021 roku	67
Rys. 8. Stężenie aktywności ^{222}Rn w pomieszczeniu zabiegowym wykorzystywanym do indywidualnych kąpeli radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój w dniach 24-26.08.2022 roku	69

Rys. 9. Stężenie aktywności ^{222}Rn w kolejnych dniach pomiarowych (05-09.07.2021) w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	77
Rys. 10. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 05.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	78
Rys. 11. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 06.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	79
Rys. 12. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 07.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	80
Rys. 13. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 08.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	81
Rys. 14. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 09.07.2021 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	82
Rys. 15. Stężenie aktywności ^{222}Rn w kolejnych dniach pomiarowych (22-24.08.2022) w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	83
Rys. 16. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 22.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	84
Rys. 17. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 23.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	85
Rys. 18. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 24.08.2022 roku w powietrzu pomieszczenia inhalatorium w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	86
Rys. 19. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie na poszczególnych etapach wykorzystania leczniczej wody radonowej podczas zabiegów indywidualnych kąpiei radonowo-siarczkowych w uzdrowisku Łądek-Zdrój.....	90
Rys. 20. Lokalizacja Zakładu Radoczynnego, zbiornika kopaliny oraz pomieszczeń zabiegowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	93
Rys. 21. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia zabiegowego wykorzystywanego do indywidualnych kąpiei radonowych w Świeradowie-Zdroju w dniach 19-22.04.2022 roku.....	101
Rys. 22. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia zabiegowego wykorzystywanego do indywidualnych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniach 26-29.09.2022 roku.....	103

Rys. 23. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu w pomieszczeniu z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój dnia 22.04.2022 roku	110
Rys. 24. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia z basenem wykorzystywanym do wieloosobowych kąpeli radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój dnia 29.09.2022 roku.....	111
Rys. 25. Stężenie aktywności ^{222}Rn w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych oraz pomiędzy nimi w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniach 29-30.07.2021 roku	117
Rys. 26. Stężenie aktywności ^{222}Rn w inhalowanym przez kuracjuszy powietrzu podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 29.07.2021 roku	118
Rys. 27. Stężenie aktywności ^{222}Rn w dniu 30.07.2021 roku w powietrzu dostarczonym do zabiegu indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	119
Rys. 28. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu wzbogaconym w ^{222}Rn dostarczonym do inhalacji indywidualnych w trakcie zabiegów oraz w okresach pomiędzy zabiegami w dniach 02-03.08.2021 r. w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	121
Rys. 29. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu wzbogaconym w ^{222}Rn dostarczonym do indywidualnych inhalacji radonowych podczas zabiegów w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 02.08.2021 r.	122
Rys. 30. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu do inhalacji podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 03.08.2021 r.....	123
Rys. 31. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu do inhalacji w trakcie zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych oraz przed i po zabiegach w dniach 21-23.09.2022 r. w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	124
Rys. 32. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu wzbogaconym w radon podczas zabiegów indywidualnych inhalacji radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 21.09.2022 r.....	125

Rys. 33. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu do radonowych inhalacji indywidualnych podczas zabiegów inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 22.09.2022 r.....	126
Rys. 34. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji radonowej w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 27.07.2021 r.....	133
Rys. 35. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia tężni radonowej podczas zabiegów inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 28.07.2021 r.....	134
Rys. 36. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji radonowych w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 04.08.2021 r.....	135
Rys. 37. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu podczas zabiegów inhalacji zbiorowych w pomieszczeniu tężni radonowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 05.08.2021 r.....	136
Rys. 38. Stężenie aktywności ^{222}Rn w powietrzu pomieszczenia tężni radonowo-solankowej podczas zabiegów zbiorowych inhalacji w uzdrowisku Świeradów-Zdrój w dniu 23.09.2022 r.....	137
Rys. 39. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie od kopaliny do ścieku podczas zabiegu indywidualnych kąpiei radonowych w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	142
Rys. 40. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej od jej eksploatacji jako kopaliny do ścieku po zabiegu inhalacji w tężni radonowo-solankowej w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	143
Rys. 41. Zmiany stężenia aktywności ^{222}Rn w wodzie radonowej od ujęcia kopaliny do tworzywa radonowego wykorzystywanego do zabiegów w basenie radonowym w uzdrowisku Świeradów-Zdrój.....	144