

OGŁOSZENIE O ZAKUPIE
(Nr sprawy 314/2025/BSM)

1. Zamawiający - Państwowa Agencja Atomistyki, ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa, tel. 22 556 28 03
2. Zamawiający informuje, że nie jest płatnikiem podatku od towarów i usług (VAT).
3. Przedmiot zamówienia: wykonanie oraz dostarczenie do siedziby Zamawiającego opracowania graficznego, składu oraz wydruku dodatku specjalnego do biuletynu „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”.
4. Opis przedmiotu zamówienia określa załącznik nr 1 do Umowy.

Do opisu przedmiotu zamówienia przyjęto klasyfikację ze Wspólnego Słownika Zamówień 79800000-2 (usługi drukowania i powiązane).

5. Termin wykonania zamówienia:
12 dni roboczych od dnia podpisania umowy
6. Udział w postępowaniu i podstawy wykluczenia Wykonawcy z postępowania:
 - 1) O udzielenie zamówienia mogą ubiegać się Wykonawcy w stosunku, do których:
 - a) nie ogłoszono upadłości,
 - b) nie otwarto likwidacji,
 - c) w przeciągu ostatnich 5 lat nie stwierdzono nienależytego wykonania lub niewykonania wcześniejszych umów zawartych z Zamawiającym, skutkującego nałożeniem kar umownych z winy Wykonawcy,
 - d) oraz Wykonawcy, którzy nie wspierają agresji na Ukrainę.
 - 2) Z postępowania zakupowego zostanie wykluczony Wykonawca, który został wpisany na listę zawierającą oznaczenie osoby lub podmiotu, wobec których stosuje się środki, o których mowa w art. 1 ustawy z dnia 13 kwietnia 2022 r. o szczególnych rozwiązaniach w zakresie przeciwdziałania wspieraniu agresji na Ukrainę oraz służących ochronie bezpieczeństwa narodowego (Dz.U. z 2022 r. poz. 835). Lista jest publikowana w Biuletynie Informacji Publicznej na stronie podmiotowej ministra właściwego do spraw wewnętrznych.
 - 3) Z postępowania zakupowego zostanie wykluczony Wykonawca, którego beneficjentem rzeczywistym w rozumieniu ustawy z dnia 1 marca 2018 r. o przeciwdziałaniu praniu pieniędzy oraz finansowaniu terroryzmu (Dz.U. z 2022 r. poz. 593 i 655) jest osoba wymieniona w wykazach określonych w rozporządzeniu 765/2006 i rozporządzeniu 269/2014 albo wpisana na listę lub będąca takim beneficjentem rzeczywistym od dnia 24 lutego 2022 r., o ile została wpisana na listę na podstawie decyzji w sprawie wpisu na listę rozstrzygającej o zastosowaniu środka w postaci wykluczenia z postępowań o udzielenie zamówienia publicznego.
 - 4) Z postępowania zakupowego zostanie wykluczony Wykonawca, którego jednostką dominującą w rozumieniu art. 3 ust. 1 pkt 37 ustawy z dnia 29 września 1994 r. o rachunkowości (Dz.U. z 2021 r. poz. 217, 2105 i 2106), jest podmiot wymieniony w wykazach określonych w rozporządzeniu 765/2006 i rozporządzeniu 269/2014 albo wpisany na listę lub będący taką jednostką dominującą od dnia 24 lutego 2022 r., o ile został wpisany na listę na podstawie decyzji w sprawie wpisu na listę rozstrzygającej o zastosowaniu środka w postaci wykluczenia z postępowań o udzielenie zamówienia publicznego.

- 5) Osoby lub podmioty podlegające wykluczeniu, na podstawie pkt 2, 3 i 4 które w okresie tego wykluczenia wezmą udział w postępowaniu zakupowym, podlegają karze pieniężnej. Karę pieniężną nakłada Prezes Urzędu Zamówień Publicznych, w drodze decyzji, w wysokości do 20.000.000,00 zł.
7. Kryterium oceny ofert – najniższa cena całkowita oferty brutto, podana w PLN z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Zamawiający wybierze jako najkorzystniejszą tę ofertę, w której zostanie zaoferowane wykonanie przedmiotu umowy za najniższą cenę całkowitą oferty brutto.
8. Opis sposobu przygotowania oferty:
- 1) oferta (Formularz oferty – załącznik nr 2 do Ogłoszenia o zakupie) musi być przygotowana w języku polskim,
 - 2) do Formularza oferty należy dołączyć nw. dokumenty:
 - a) odpis z właściwego rejestru (KRS) lub z centralnej ewidencji i informacji o działalności gospodarczej, jeżeli odrębne przepisy wymagają wpisu do rejestru lub ewidencji albo wskazać dostępność tych dokumentów w formie elektronicznej, wskazując w Formularzu oferty adres internetowy do ogólnodostępnych, bezpłatnych baz danych,
 - b) w przypadku gdy Wykonawca jest reprezentowany przez pełnomocnika, do oferty należy dołączyć pełnomocnictwo, określające zakres umocowania, podpisane przez osoby upoważnione do reprezentowania Wykonawcy.
 - 3) ofertę składa się pod rygorem nieważności, w formie elektronicznej (tj. opatrzonej kwalifikowanym podpisem elektronicznym) lub w postaci elektronicznej opatrzonej podpisem zaufanym lub podpisem osobistym lub podpisem własnoręcznym w postaci odwzorowania cyfrowego (skan).
9. Termin związania ofertą:
- 30 dni od upływu terminu składania ofert. Bieg terminu związania ofertą rozpoczyna się wraz z upływem terminu wyznaczonego na przesłanie ofert.
10. Kontakt z Zamawiającym w dni robocze w godzinach 8.00 – 15.00:
- Katarzyna Owsianko, tel. 22 556 26, e-mail: zakupy@paa.gov.pl
 - Barbara Czerw, tel.: 22 556 26 , e-mail: zakupy@paa.gov.pl
11. Sposób przygotowania oferty:
- 1) Ofertę wraz z załącznikami należy przesłać e-mailem na adres zakupy@paa.gov.pl **do dnia 02.12.2025 r. do godz. 10:00.**
 - 2) Zamawiający nie będzie dokonywał oceny ofert przesłanych na adres inny, niż wskazany powyżej oraz po wskazanym wyżej terminie.
12. Zasady rozliczeń i warunki płatności zostały określone we Wzorze umowy, stanowiącym załącznik nr 1 do Ogłoszenia o zakupie.
13. Klauzula informacyjna wynikająca z art. 13 RODO.

Państwowa Agencja Atomistyki z siedzibą w Warszawie (00-400) przy ul. Nowy Świat 6/12, (dalej: „PAA”) przetwarza dane zawarte w ofertach składanych w postępowaniu zakupowym, znajdujące się w publicznie dostępnych rejestrach (Krajowy Rejestr Sądowy, Centralna Ewidencja i Informacja o Działalności Gospodarczej RP, Krajowy Rejestr Karny) w celu prowadzenia postępowań zakupowych

na podstawie przepisów ustawy z dnia 23 kwietnia 1964 r. Kodeks cywilny (Dz. U. z 2019 r. poz. 1145, z późn. zm.). Pośród ww. informacji mogą pojawić się dane, które na gruncie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej: „RODO”), mają charakter danych osobowych. W świetle powyższego PAA informuje, że:

- 1) Administratorem danych osobowych (dalej: „Administrator”) jest Prezes Państwowej Agencji Atomistyki,
- 2) w sprawach związanych z danymi osobowymi proszę kontaktować się z Inspektorem Ochrony Danych, kontakt pisemny za pomocą poczty tradycyjnej na adres: Państwowa Agencja Atomistyki, ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa lub e-mailem na adres: iod@paa.gov.pl,
- 3) dane osobowe zawarte w ofertach będą przetwarzane na podstawie art. 6 ust. 1 lit. c RODO w celu związanym z niniejszym postępowaniem zakupowym,
- 4) odbiorcą danych osobowych będą upoważnieni pracownicy PAA oraz osoby lub podmioty, którym udostępniona zostanie dokumentacja postępowania w oparciu o przepisy ustawy o dostępie do informacji publicznej,
- 5) wszelkie dane osobowe będą przechowywane przez okres 4 lat od dnia zakończenia postępowania zakupowego,
- 6) obowiązek podania danych osobowych związany jest z udziałem w postępowaniu zakupowym
- 7) w odniesieniu do danych osobowych decyzje nie będą podejmowane w sposób zautomatyzowany, stosowanie do art. 22 RODO, 8) posiadają Państwo:
 - 1) na podstawie art. 15 RODO prawo dostępu do danych osobowych Państwa dotyczących*;
 - 2) na podstawie art. 16 RODO prawo do sprostowania danych osobowych**;
 - 3) na podstawie art. 18 RODO prawo żądania od administratora ograniczenia przetwarzania danych osobowych z zastrzeżeniem przypadków, o których mowa w art. 18 ust. 2 RODO ***;
 - 4) prawo do wniesienia skargi do Prezesa Urzędu Ochrony Danych Osobowych, gdy uznają Państwo, że przetwarzanie danych osobowych Państwa dotyczących narusza przepisy RODO, 9) nie przysługuje Państwu:
 - 1) w związku z art. 17 ust. 3 lit. b, d lub e RODO prawo do usunięcia danych osobowych,
 - 2) prawo do przenoszenia danych osobowych, o którym mowa w art. 20 RODO,
 - 3) na podstawie art. 21 RODO prawo sprzeciwu, wobec przetwarzania danych osobowych, gdyż podstawą prawną przetwarzania danych osobowych jest art. 6 ust. 1 lit. c RODO,
- 10) Administrator danych nie będzie przekazywał danych osobowych do państw trzecich lub organizacji międzynarodowych
- 11) PAA dokłada wszelkich starań, aby zapewnić wszelkie środki fizycznej, technicznej i organizacyjnej ochrony danych osobowych przed ich przypadkowym czy umyślnym zniszczeniem, przypadkową utratą, zmianą, nieuprawnionym ujawnieniem, wykorzystaniem czy dostępem, zgodnie ze wszystkimi obowiązującymi przepisami.

* w przypadku, gdy wykonanie obowiązków, o których mowa w art. 15 ust. 1-3 rozporządzenia 2016/679, wymagałoby niewspółmiernie dużego wysiłku, zamawiający może żądać od osób, której dane dotyczą, wskazania dodatkowych informacji mających na celu sprecyzowanie żądania, w szczególności podania nazwy lub daty postępowania zakupowego,

** skorzystanie z prawa do sprostowania nie może skutkować zmianą wyniku postępowania zakupowego ani zmianą postanowień zamówienia,

*** prawo do ograniczenia przetwarzania nie ma zastosowania w odniesieniu do przechowywania, w celu zapewnienia korzystania ze środków ochrony prawnej lub w celu ochrony praw innej osoby fizycznej lub prawnej, lub z uwagi na ważne względy interesu publicznego Unii Europejskiej lub państwa członkowskiego. Wystąpienie z żądaniem, o którym mowa w art. 18 ust. 1 rozporządzenia 2016/679, nie ogranicza przetwarzania danych osobowych do czasu zakończenia postępowania zakupowego.

14. Postanowienia końcowe:

Zamawiający zastrzega sobie prawo do żądania od Wykonawców szczegółowych informacji i wyjaśnień na każdym etapie postępowania. Wykonawcy, których oferty nie zostaną wybrane, nie mogą zgłaszać żadnych roszczeń względem Państwowej Agencji Atomistyki z tytułu niniejszego ogłoszenia o zakupie oraz przygotowania i złożenia/przesłania swojej oferty na to ogłoszenie o zakupie. Zamawiający zastrzega sobie prawo do zamknięcia postępowania zakupowego bez podania przyczyny na każdym jego etapie. Informacja o wyniku postępowania zakupowego bądź zamknięciu postępowania zakupowego zostanie ogłoszona w Biuletynie Informacji Publicznej PAA”. (<https://www.gov.pl/web/paa>).

Procedura zgłoszeń wewnętrznych naruszeń prawa w Państwowej Agencji Atomistyki znajduje się na stronie <https://www.gov.pl/web/paa/zglos-naruszenie-prawa>

Wykaz załączników:

1. *Załącznik nr 1* – Wzór umowy
2. *Załącznik nr 2* – Formularz ofertowy
3. *Załącznik nr 3* – Wykaz usług

Z A T W I E R D Z A M

Katarzyna Krzywda

Dyrektor Generalna

Państwowej Agencji Atomistyki

UMOWA Nr 314/2025/BSM

W dniu w Warszawie pomiędzy:

Skarbem Państwa – Państwową Agencją Atomistyki, ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa, NIP 526-10-46-191, REGON: 000907473, zwanym dalej „Zamawiającym”, w imieniu którego działa:

Katarzyna Krzywda – Dyrektor Generalny Państwowej Agencji Atomistyki

a

.....
.....
zwanym dalej „Wykonawcą, reprezentowaną przez

W wyniku przeprowadzenia postępowania – wniosek zakupowy nr 314/2025/BSM – bez stosowania ustawy z dnia 11 września 2019 r. – Prawo zamówień publicznych (Dz. U. z 2024 r. poz. 1320, z późn. zm.) – zakup poniżej wartości 130.000,00 zł, strony zawierają umowę następującej treści:

§ 1.

1. Wykonawca zobowiązuje się do wykonania oraz dostarczenia do siedziby Zamawiającego opracowania graficznego, składu oraz wydruku dodatku specjalnego do biuletynu „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”, zwanego dalej „biuletynem”.
2. Przedmiot umowy określony w ust. 1 zostanie wykonany zgodnie z Opisem przedmiotu zamówienia, stanowiącym załącznik nr 1 do umowy, wskazówkami i uwagami przekazywanymi przez Zamawiającego w toku konsultacji z Wykonawcą, zgodnie z Systemem Identyfikacji Wizualnej Zamawiającego stanowiącym załącznik nr 4 do umowy, z układem graficznym (*layout*) biuletynu „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” stanowiącym załącznik nr 5 do umowy i będzie obejmował:
 - 1) opracowanie dwóch projektów okładki, z których wybrana zostanie jedna do dalszych prac, przygotowanie koncepcji layoutu, opracowanie graficzne 5 infografik z zakresu tematyki każdego z rozdziałów, opracowanie projektu dodatku specjalnego, skład, korektę językową i edytorską projektu dodatku specjalnego do biuletynu;
 - 2) wydruk, oprawę, zapakowanie, konfekcjonowanie i dostarczenie Zamawiającemu 500 egzemplarzy dodatku specjalnego do biuletynu na podstawie zaakceptowanego przez Wykonawcę projektu, o którym mowa w pkt 1.
3. Wykonawca przekaże Zamawiającemu do akceptacji opracowanie dwóch projektów okładki oraz koncepcji layoutu, o których mowa w ust. 2 pkt 1 w terminie dwóch dni roboczych od daty zawarcia umowy, w formie wskazanej w załączniku nr 1 do umowy za pośrednictwem poczty elektronicznej na adres e-mail wskazany w § 7 ust. 3 pkt 1 umowy.

4. Wykonawca przekaże Zamawiającemu do akceptacji projekt dodatku specjalnego do biuletynu, o którym mowa w ust. 2 pkt 1, wraz z plikiem z naniesionymi i zaznaczonymi poprawkami lub raportem zawierającym wykaz dokonanych zmian w zakresie korekty, o której mowa w ust. 2 pkt 1, w formie wskazanej w załączniku nr 1 do umowy za pośrednictwem poczty elektronicznej na adres e-mail wskazany w § 7 ust. 3 pkt 1 umowy w terminie 3 dni roboczych od daty zaakceptowania przez Zamawiającego projektu okładki i koncepcji layoutu.
5. Dodatek specjalny do biuletynu będzie zawierał materiał wskazany w załączniku nr 6 do umowy.
6. Korekta językowa i edytorska, o której mowa w ust. 2 pkt 1 obejmuje:
 - 1) poprawność językową, ortograficzną i interpunkcyjną;
 - 2) poprawność stylistyczną i typograficzną;
 - 3) jednolitość formatowania i zgodność ze standardami edytorskimi.
7. Za przeprowadzanie korekty językowej i edytorskiej nie uważa się wyłącznie automatycznego sprawdzenia pisowni przez oprogramowanie.
8. Zamawiający zaakceptuje projekt dodatku specjalnego do biuletynu lub zgłosi do niego uwagi na piśmie w terminie 1 dnia roboczego od dnia jego otrzymania.
9. Wykonawca zobowiązuje się do uwzględnienia uwag Zamawiającego, o których mowa w ust. 8, i przedstawienia poprawionych materiałów w terminie 1 dnia roboczego od dnia zgłoszenia uwag przez Zamawiającego.
10. Do odbioru poprawionych projektów stosuje się odpowiednio ust. 8-9.
11. Wykonawca zobowiązuje się do wykonania przedmiotu umowy w terminie 12 dni roboczych od dnia zawarcia umowy. Do terminu wykonania umowy wlicza się terminy akceptacji i nanoszenia ewentualnych uwag, o których mowa w ust. 8 i 9.
12. Odbiór przedmiotu umowy odbędzie się na podstawie protokołu odbioru, którego wzór stanowi Załącznik nr 2 do Umowy. Osobami uprawnionymi do podpisania protokołu odbioru ze strony Zamawiającego jest samodzielnie każdy z przedstawicieli Zamawiającego wskazany w § 7 ust. 3 pkt 1.
13. O terminie dostawy przedmiotu umowy Wykonawca powiadomi Zamawiającego pocztą elektroniczną na adres e-mail wskazany w § 7 ust. 3 pkt 1 w terminie 2 dni roboczych przed jej realizacją. Zamawiający zastrzega sobie możliwość nieprzyjęcia dostawy przedmiotu zamówienia bez uprzedniego powiadomienia przez Wykonawcę o jej terminie.
14. Przez dzień roboczy rozumie się dzień przypadający od poniedziałku do piątku, z wyjątkiem dni będących dniami ustawowo wolnymi od pracy oraz dni ustalonych jako wolne od pracy na podstawie § 5 Rozporządzenia Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 kwietnia 2025 r. w sprawie zasad ustalania przez kierowników niektórych urzędów rozkładu czasu pracy w tygodniu oraz jego wymiaru w poszczególnych dniach tygodnia (Dz. U. z 2025 r., poz. 512).

§ 2.

1. Wykonawca oświadcza, że ma kwalifikacje wystarczające do wykonania umowy i przy jej wykonaniu nie będzie naruszał praw osób trzecich.
2. Wykonawca zapewnia, że dodatek do biuletynu stanowiący przedmiot niniejszej umowy będzie odpowiadał ściśle warunkom określonym w umowie oraz będzie zgodny z wytycznymi i uwagami ze strony Zamawiającego. Wykonawca odpowiada za wady dostarczonego dodatku specjalnego do biuletynu.
3. Wykonawca może powierzyć wykonanie prac innemu podmiotowi (dalej: „Podwykonawcy”).
4. Wykonawca jest odpowiedzialny wobec Zamawiającego za działania lub zaniechania wszystkich Podwykonawców oraz osób zatrudnionych przez siebie do wykonywania prac, tak jak za własne działania lub zaniechania.
5. Opóźnienie w wykonaniu prac przez Podwykonawców nie zwalnia Wykonawcy z odpowiedzialności za naruszenie terminów przewidzianych w niniejszej umowie.

§ 3.

1. Za wykonanie umowy Zamawiający zapłaci Wykonawcy wynagrodzenie w wysokości XXXXX złotych (słownie: złotych) brutto, składające się z następujących części:
 - 1) za realizację części opisanej w § 1 ust. 2 pkt 1) – XXXXX zł brutto, z czego 10% wynagrodzenia za wykonanie części I, tj. XXXXX zł (słownie złote, 00/100) brutto, stanowi wynagrodzenie z tytułu przeniesienia praw autorskich, o których mowa w § 6 ust. 1, po podpisaniu bez uwag protokołu odbioru tej części;
 - 2) za realizację części opisanej w § 1 ust. 2 pkt 2) – XXXXX zł brutto, po podpisaniu bez uwag protokołu odbioru tej części.
2. Zapłata wynagrodzenia dokonana zostanie na rachunek bankowy Wykonawcy podany na prawidłowo wystawionej przez Wykonawcę fakturze, w terminie 21 dni kalendarzowych od daty jej otrzymania.
3. Przez prawidłowo wystawioną fakturę strony rozumieją fakturę wystawioną zgodnie z obowiązującymi przepisami, postanowieniami umowy oraz, w przypadku czynnych płatników podatku od towarów i usług, z pozytywnie zweryfikowanym rachunkiem bankowym w wykazie podmiotów, o których mowa w art. 96b ustawy o podatku od towarów i usług. Na fakturze Wykonawca umieści numer niniejszej umowy oraz datę jej podpisania.
4. Wartość wynagrodzenia brutto, o którym mowa w ust. 1, obejmuje wszelkie koszty związane z realizacją zamówienia, w tym koszty: opakowania w koperty ochronne, transportu, dostarczenia i rozładunku do siedziby Zamawiającego, koszty ubezpieczenia na czas transportu, wszelkie należne cła i podatki.
5. Podstawę wystawienia faktury będzie stanowił każdorazowo podpisany przez Zamawiającego i Wykonawcę bez uwag protokół odbioru. W przypadku odbioru przedmiotu umowy bez zastrzeżeń, protokół może zostać podpisany wyłącznie przez Zamawiającego.

6. Fakturę należy przesłać na adres: e-mail: faktury@paa.gov.pl lub za pomocą platformy, o której mowa w ustawie z dnia 9 listopada 2018 r. o elektronicznym fakturowaniu w zamówieniach publicznych, koncesjach na roboty budowlane lub usługi oraz partnerstwie publiczno-prywatnym (Dz.U. z 2020 r. poz. 1666). Fakturę na wskazany adres e-mail należy przesłać w dniu roboczym do godziny 16:15. Jeżeli faktura wpłynie po godzinie 16:15, datą jej dostarczenia będzie następny dzień roboczy.
7. Wykonawca nie może żądać podwyższenia ani waloryzacji kwoty określonej w ust. 1.

§ 4.

1. W przypadku niewykonania lub nienależytego wykonania przedmiotu umowy w terminie określonym w § 1 ust. 11, Zamawiający może wyznaczyć Wykonawcy dodatkowy termin na wykonanie przedmiotu umowy i żądać zapłaty kary umownej w wysokości 1% wynagrodzenia brutto, za każdy rozpoczęty dzień roboczy opóźnienia, a po bezskutecznym upływie wyznaczonego terminu – odstąpić od umowy w całości lub w części i żądać dodatkowo zapłaty kary umownej w wysokości 20% wynagrodzenia brutto, o którym mowa w § 3 ust. 1, należnego za realizację części umowy, której dotyczy odstąpienie.
2. Jeśli na skutek niewykonania lub nienależytego wykonania przedmiotu umowy powstanie szkoda przewyższająca zastrzeżoną karę umowną bądź szkoda powstanie z innych przyczyn niż te, dla których zastrzeżono kary umowne, Zamawiający zastrzega sobie prawo dochodzenia odszkodowania przewyższającego wartość kar umownych.
3. Wykonawca wyraża zgodę na potrącenie ewentualnych kar umownych z kwoty należnego wynagrodzenia.

§ 5.

1. Wykonawca zobowiązuje się do zachowania w poufności wszelkich informacji i dokumentów dotyczących realizacji Umowy, informacji technicznych, organizacyjnych, z wyłączeniem informacji ogólnodostępnych, które Wykonawca uzyska w trakcie realizacji przedmiotu umowy.
2. Wykonawca zobowiązuje się do zachowania w tajemnicy informacji, o których mowa w ust. 1, także po wygaśnięciu Umowy.
3. Wykonawca może przetwarzać dane osobowe pracowników Zamawiającego wyłącznie w celu i zakresie związanym z realizacją przedmiotu Umowy. Wykonawca zobowiązuje się do niewykorzystywania danych osobowych, z którymi będzie miał styczność, w celach innych niż zawarte w umowie.
4. Za wszelkie szkody powstałe po stronie Zamawiającego na skutek niewywiązania się przez Wykonawcę z zobowiązań, o których mowa w ust. 1-3, w tym za szkody wyrządzone osobom trzecim spowodowane działaniem lub zaniechaniem Wykonawcy, jak i przez osoby skierowane przez Wykonawcę do realizacji Umowy, odpowiada wyłącznie Wykonawca.
5. Wykonawca zobowiązany jest wykonać we własnym zakresie obowiązki informacyjne wynikające z art. 13 i 14 RODO w stosunku do osób, których dane Wykonawca przetwarza, jako ich administrator. Wykonawca zobowiązuje się do zapoznania osób uprawnionych przez

niego do kontaktu z Zamawiającym w celu realizacji umowy zgodnie z treścią załącznika nr 3 do umowy.

§ 6.

1. Wykonawca oświadcza, że z dniem podpisania protokołu odbioru części przedmiotu umowy opisanej w § 1 ust. 2 pkt 1, w ramach wynagrodzenia, o którym mowa w § 3 ust. 1, przenosi na Zamawiającego w całości, nieodwołalnie autorskie prawa majątkowe do projektu dodatku specjalnego do biuletynu, do wszystkich jego komponentów, w tym rysunków, grafik, oraz fotografii w zakresie następujących pól eksploatacji w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2025 r. poz. 24):
 - 1) utrwalania na jakimkolwiek nośniku;
 - 2) zwielokrotniania jakąkolwiek techniką w tym:, techniką zapisu komputerowego na wszystkich rodzajach nośników dostosowanych do tej formy zapisu, wytwarzania techniką: drukarską, reprograficzną;
 - 3) obrotu oryginałem albo egzemplarzami, na których prace utrwalono - wprowadzenie do obrotu, użyczenie lub najem oryginału albo egzemplarzy;
 - 4) rozpowszechniania prac w sposób inny niż określony w pkt 3 - wystawienie, wyświetlenie, odtworzenie, a także publiczne udostępnianie w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i w czasie przez siebie wybranym;
 - 5) używania prac i ich fragmentów w różnych formach wydawniczych i multimedialnych, na nośnikach papierowych, magnetycznych, optycznych i filmowych;
 - 6) wprowadzania do pamięci komputera;
 - 7) publicznego udostępniania w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym, w tym w sieci Internet.
2. Wykonawcy nie przysługuje odrębne wynagrodzenie za korzystanie z prac przez Zamawiającego i osoby, którym Zamawiający udostępnił prace, na każdym odrębnym polu eksploatacji.
3. Wykonawca zapewnia, że przenoszone majątkowe prawa autorskie nie będą w chwili ich przejścia na Zamawiającego obciążone prawami na rzecz osób trzecich, a także oświadcza, że osoby uprawnione z tytułu osobistych praw autorskich zobowiązały się do niewykonywania przysługujących im praw w stosunku do Zamawiającego lub jego następców prawnych.
4. Wraz z przeniesieniem autorskich praw majątkowych Wykonawca bez dodatkowego wynagrodzenia przenosi na Zamawiającego wyłączne prawo zezwolenia na wykonywanie autorskich praw zależnych na czas nieokreślony.
5. Zamawiający ma prawo do zmiany oraz modyfikacji prac według własnego uznania. Zamawiający może bez zgody Wykonawcy zlecić dokonanie modyfikacji podmiotowi niebędącemu stroną niniejszej umowy.
6. Wykonawca oświadcza, że efekty prac będące przedmiotem umowy będą wolne od wad i obciążeń prawnych.

§ 7.

1. Zamawiający zastrzega sobie prawo do kontrolowania sposobu wykonywania umowy przez Wykonawcę na każdym etapie realizacji przedmiotu umowy.
2. Zamawiający zobowiązuje się do udzielenia Wykonawcy na jego prośbę niezbędnych konsultacji i wyjaśnień dotyczących wykonywania prac będących przedmiotem umowy.
3. Strony wyznaczają swoich przedstawicieli do bezpośrednich kontaktów między nimi w osobach:
 - 1) ze strony Zamawiającego:
.....,
 - 2) ze strony Wykonawcy:
.....
4. Strony dokonywać będą wszelkich uzgodnień, konsultacji oraz zgłaszać będą ewentualne poprawki i zastrzeżenia za pomocą poczty elektronicznej z adresów wskazanych w ust. 3.
5. Zmiany osób lub adresów wskazanych w ust. 3 mogą nastąpić poprzez pisemne powiadomienie drugiej ze stron i nie wymagają zawarcia aneksu do umowy.

§ 8.

1. W zakresie spraw nieuregulowanych niniejszą umową stosuje się m.in. przepisy Kodeksu cywilnego i ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.
2. Wszelkie zmiany w umowie oraz odstąpienie od niej wymagają formy pisemnej pod rygorem nieważności, z zastrzeżeniem § 7 ust. 5. Strony zobowiązują się do ich doręczania za potwierdzeniem odbioru na adresy wskazane w treści umowy:
 - 1) adres korespondencyjny Zamawiającego:
Państwowa Agencja Atomistyki, ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa;
 - 2) adres korespondencyjny Wykonawcy:
.....
3. Strony zobowiązują się do wzajemnego powiadamiania o każdej zmianie adresu, o którym mowa w ust. 2. W razie zaniedbania tego obowiązku pismo przekazane pod dotychczasowy adres uważa się za skutecznie doręczone.
4. Spory mogące wyniknąć na tle niniejszej umowy strony poddają rozstrzygnięciu przez sąd właściwy miejscowo dla Zamawiającego.
5. Umowę sporządzono w dwóch jednobrzmiących egzemplarzach – po jednym dla każdej ze stron.
6. Załączniki do umowy:
 - 1) Załącznik nr 1 – opis przedmiotu zamówienia;
 - 2) Załącznik nr 2 – wzór protokołu odbioru;

- 3) Załącznik nr 3 – informacja dotycząca przetwarzania danych osobowych;
- 4) Załącznik nr 4 – System Identyfikacji Wizualnej PAA;
- 5) Załącznik nr 5 – biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”;
- 6) Załącznik nr 6 – materiał do dodatku specjalnego

Z A M A W I A J Ą C Y

W Y K O N A W C A

OPIS PRZEDMIOTU ZAMÓWIENIA

1. Przedmiotem zamówienia jest wykonanie oraz dostarczenie do siedziby Zamawiającego opracowania graficznego, składu oraz wydruku dodatku specjalnego do biuletynu „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”.

2. Zamówienie obejmuje następujące zadania:

- 1) Opracowanie layoutu do **dodatku specjalnego do biuletynu** w terminie 2 dni roboczych od przekazania materiałów niezbędnych do realizacji przedmiotu umowy w tym:
 - a) opracowanie dwóch projektów okładek, z których wybrana zostanie jedna do dalszych prac na podstawie materiału zawartego w załączniku nr 4 do umowy,
 - b) przygotowanie projektu layoutu, który powinien obejmować minimum 2 strony A4 i zawierać infografikę na podstawie danych zawartych w załączniku nr 5 do umowy, oraz przykładowy tekst wraz z nagłówkiem (tytułem, rozdziału, podrozdziału),
 - c) opracowanie graficzne 5 infografik z zakresu tematyki każdego z rozdziałów, które będą stanowiły integralną część **dodatku specjalnego do biuletynu**,
 - d) opracowanie projektu dodatku specjalnego do biuletynu,
 - e) wydruk, oprawę, zapakowanie, konfekcjonowanie oraz dostarczenie do Zamawiającego 500 egzemplarzy **dodatku specjalnego**.

3. Parametry dodatku do biuletynu:

- 1) format A4 pionowy (wymiary ok. 210 x 297 mm), kolorystyka zgodna layoutem,
- 2) okładka: kreda mat ok. 250-280g, druk 4+4, uszlachetniona folia jednostronnie,
- 3) środek: kreda mat ok. 120-170 g, druk 4+4,
- 4) objętość zawierająca cały materiał z załącznika nr 6 do umowy, nie więcej jednak niż 64 strony oraz 4 strony okładki (łącznie nie więcej niż 68 stron),
- 5) oprawa zeszytowa,
- 6) nakład 500 egz.,
- 7) opracowanie 5 tytułowych, całostronicowych grafik do 5 rozdziałów, nawiązujących tematycznie do treści tych rozdziałów,
- 8) opracowanie graficzne okładki,
- 9) kolor papieru biały.

4. Uwagi

- 1) Wykonawca umieści stopkę redakcyjną zgodnie z ustaleniami z Zamawiającym.
- 2) Projekt dodatku specjalnego do biuletynu Wykonawca prześle Zamawiającemu w formacie PDF.
- 3) Zaakceptowany projekt dodatku specjalnego do biuletynu Wykonawca prześle Zamawiającemu w formacie PDF w dwóch wersjach: przeznaczonej do wydruku i do publikacji w Internecie (w drugiej wersji wielkość pliku wyniesie maksymalnie 25 MB).
- 4) Materiały i treści do umieszczenia w dodatku do biuletynu mogą ulec nieznacznej modyfikacji na etapie akceptowania projektu zgodnie z uwagami Zamawiającego, przede wszystkim jeżeli będą wymagały aktualizacji.

WZÓR PROTOKOŁU ODBIORU

Miejsce dokonania odbioru:
Data dokonania odbioru:
Termin realizacji zamówienia wg umowy:
Ze strony Wykonawcy:*

.....
(nazwa i adres)

.....
(imię i nazwisko osoby upoważnionej)

Ze strony Zamawiającego:

.....
(nazwa i adres)

.....
(imiona i nazwiska osób upoważnionych)

Przedmiotem odbioru w ramach Umowy nr/2025/BSM z dnia 2025 r. jest:

Całkowita wartość brutto zamówienia wynosi:

Zamówienie zostało zrealizowane bez zastrzeżeń:

TAK / NIE***

Zamówienie zostało zrealizowane w terminie:

TAK / NIE ***

Uwagi i wnioski osób biorących udział w odbiorze *****

Niniejszy protokół stanowi podstawę do wystawienia faktury: TAK / NIE**

ZAMAWIAJĄCY

WYKONAWCA*

* o ile dotyczy

** wstawić numer etapu

*** należy skreślić niepotrzebne

****wypełnić w przypadku wskazania chociaż jednej odpowiedzi „nie” powyżej – należy wskazać nieprawidłowości/uwagi/wnioski wraz z terminem ich usunięcia i zastosowane kary umowne wynikające z zapisów umowy/

Informacja dotycząca przetwarzania danych osobowych

Zgodnie z art. 13 rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) (Dz. Urz. UE L 119, s. 1) Prezes Państwowej Agencji Atomistyki informuje, że:

1. Administratorem danych osobowych w rozumieniu art. 4 pkt 7 RODO jest Prezes Państwowej Agencji Atomistyki, 00-400 Warszawa, ul. Nowy Świat 6/12.
2. Kontakt do Inspektora Ochrony Danych (IOD): iod@paa.gov.pl, 00-400 Warszawa, ul. Nowy Świat 6/12
3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu zawarcia i realizacji umowy. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych jest:
 - niezbędność do wykonania umowy lub do podjęcia działań na Pani/Pana żądanie przed zawarciem umowy (art. 6 ust. 1 lit. b RODO),
 - niezbędność do celów wynikających z prawnie uzasadnionego interesu realizowanego przez administratora (art. 6 ust. 1 lit. f RODO) polegającego na działaniach związanych z ustaleniem warunków zawarcia umowy z kontrahentem oraz ułatwieniu komunikacji związanej z jej wykonaniem, a także ustaleniem osób odpowiedzialnych za realizację i uprawnionych do kontaktów w ramach wykonywania umowy – w przypadku osób uprawnionych do kontaktu w związku z realizacją umowy.
4. Państwa dane osobowe mogą być udostępniane podmiotom działającym na zlecenie administratora danych, z których usług PAA korzysta przy ich przetwarzaniu, np. podmiotom świadczącym usługi IT w zakresie wsparcia serwisowego oraz innym podmiotom zewnętrznym w przypadkach przewidzianych przepisami prawa (np. ZUS, US, organy kontroli).
5. Dane osobowe przechowywane są przez okres nie dłuższy niż jest to niezbędne do realizacji celów, dla których są przetwarzane oraz zgodnie z przepisami obowiązującymi w tym zakresie. Dokumentacja umów cywilno-prawnych przechowywana jest przez okres 10 lat licząc od końca roku kalendarzowego, w którym umowa ustała.
6. Osobie, której dane są przetwarzane przysługuje prawo:
 - 1) dostępu do treści swoich danych osobowych, żądania ich sprostowania lub usunięcia na zasadach określonych w art. 15-17 RODO,
 - 2) ograniczenia przetwarzania, w przypadkach określonych w art. 18 RODO,
 - 3) przenoszenia danych, na zasadach określonych w art. 20 RODO,
 - 4) cofnięcia zgody w dowolnym momencie bez wpływu na zgodność z prawem przetwarzania, którego dokonano na podstawie zgody przed jej cofnięciem,
 - 5) wniesienia skargi do Prezesa Urzędu Ochrony Danych Osobowych.W celu skorzystania z praw, o których mowa w pkt 6 ppkt 1-4 należy skontaktować się z administratorem lub inspektorem ochrony danych.
7. Podanie danych osobowych ma charakter dobrowolny, jednakże jest ono niezbędne do zawarcia lub realizacji umowy.



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

PAŃSTWOWA AGENCJA ATOMISTYKI

System Identyfikacji Wizualnej - aktualizacja



ŚWIAT MARKI

W ramach aktualizacji Systemu Identyfikacji Wizualnej PAA odświeżono kluczowe elementy graficzne, aby zapewnić spójny i nowoczesny wizerunek. Zaktualizowano paletę kolorów poprzez jej rozszerzenie, odświeżono key visual oraz wyróżnienia graficzne, które nadają materiałom jednolity charakter. Dostosowano projekty wizytówek, papieru firmowego, stopki mailowej i prezentacji PPTX, aby były zgodne z nowymi wytycznymi. Przygotowano nowe wzory dla rollupów, ścianek konferencyjnych oraz tabliczki na drzwi. Zmodernizowano także notatniki z okładkami oraz publikacje, w tym wzory okładek i układ treści. Wszystkie zmiany mają na celu wzmocnienie wizerunku PAA jako instytucji nowoczesnej i profesjonalnej.



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

ELEMENTY WIZERUNKOWE



ELEMENTY WIZERUNKOWE

Elementy graficzne zostały zaprojektowane tak, aby zapewnić spójny wizualnie wizerunek we wszystkich materiałach PAA, wzmacniając ich rozpoznawalność i profesjonalny charakter. Kluczowym motywem graficznym jest pionowy gradient, który harmonijnie przechodzi od jasnego błękitu do ciemnych odcieni niebieskiego. Gradient ten wykorzystywano w różnych kontekstach, takich jak tła pod logotyp, elementy graficzne Systemu Identyfikacji Wizualnej czy jako bazę dla powielania motywu wizerunkowego. Zastosowanie gradientu w tych obszarach pozwala na stworzenie materiałów wizualnych o wysokiej estetyce i spójności, które jednocześnie wyróżniają markę PAA na tle innych instytucji. Paletę kolorów zaktualizowano i wzbogacono o dodatkowy odcień, który wprowadza subtelne przetłamanie kolorystyczne, jednocześnie pełniąc funkcję charakterystycznego wyróżnika wizualnego. Kolor ten ujęto we Wzorce, który stanowi element ozdobny layout'u.

1.1 Element wizerunkowy | Tło

Tło składa się z następujących elementów

1. **Gradient** przechodzący pod kątem 30° od koloru 2a położonego 20% od początku, przez kolor 2b położony centralnie, do koloru 2c położonego 80% od początku gradientu (kolory opisane na stronie 5), z nałożonym efektem ziarna.
2. **Elementy graficzne** na bazie okręgów.

2. —



1.2 Element wizerunkowy | Wzór

Wzór, czyli dodatkowy element graficzny, służący jako minimalistyczny akcent kolorystyczny, możliwy do stosowania zarówno na białym w tle (przykład w prawym górnym rogu KIW) a także do umieszczania na tle.

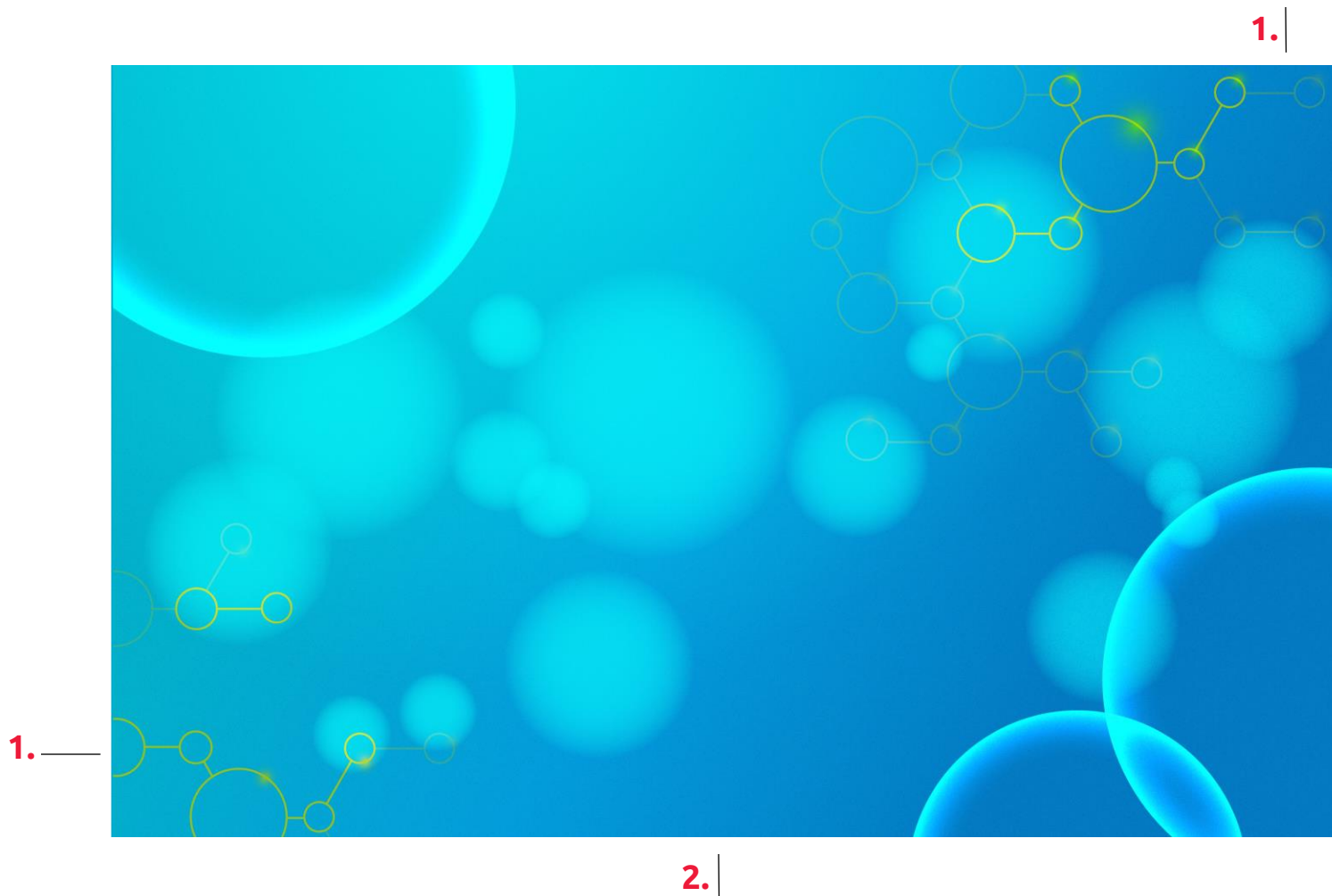
Pełni funkcję ozdobną, wprowadzając dynamikę i urozmaicenie materiałów graficznych, a dzięki zielonemu kolorowi przełamuje dominującą paletę błękitów, nadając projektom świeżości i nowoczesności.

Zaleca się stosowanie w prawym górnym rogu projektu, lewym dolnym, lub obydwu na raz.



1.3 Element wizerunkowy | Tło z nałożonym wzorem

1. Wzór.
2. Tło.



2. Paleta kolorów

Paleta kolorów Państwowej Agencji Atomistyki została zaprojektowana z myślą o zapewnieniu spójnego i nowoczesnego wizerunku instytucji. Główne kolory to różne odcienie błękitu i granatu (2a, 2b, 2c, 3), symbolizujące profesjonalizm, zaufanie i stabilność, co jest zgodne z misją agencji. Dodatkowe barwy, takie jak intensywny zielony (1) oraz czerwony (4), wprowadzają dynamikę i kontrast, pełniąc funkcję akcentów wizualnych w materiałach.

Kolory są precyzyjnie określone w modelach CMYK, RGB oraz HEX, co zapewnia ich jednolite zastosowanie w różnych nośnikach. Gradienty, tworzone na bazie odcieni błękitu (2a, 2b, 2c), służą jako tło dla logotypu i innych kluczowych elementów graficznych, natomiast zielony odcień (1) pełni rolę wyróżnika, przełamując dominującą paletę niebieskich tonów. Czerwień (4) wprowadza energię i podkreśla istotne informacje. Dzięki tej kompozycji paleta kolorów wzmacnia estetykę i funkcjonalność materiałów wizualnych PAA.



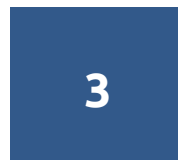
1

C:50 M:0 Y:100 K:0
R:200 G:230 B:20
#C8E614



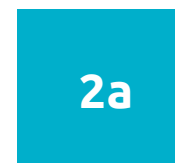
2b

C:87 M:19 Y:100 K:0
R:0 G:156 B:216
#009CDC



3

C:91 M:72 Y:28 K:0
R:50 G:89 B:138
#32598a



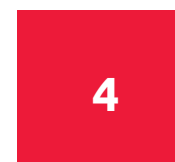
2a

C:80 M:0 Y:20 K:0
R:0 G:175 B:203
#00AFCB



2c

C:100 M:43 Y:0 K:0
R:0 G:122 B:194
#007AC2



4

C:0 M:100 Y:81 K:0
R:237 G:26 B:51
#ED1A39



2a

2b

2c

3. Typografia

W Systemie Identyfikacji Wizualnej PAA ograniczono użycie typografii wyłącznie do **rodziny fontów Ubuntu**, co zapewnia spójność i nowoczesny charakter materiałów. Czcionka Ubuntu jest stosowana we wszystkich materiałach wizerunkowych oraz informacyjnych.

Ujednolicenie typografii pozwala na zachowanie wysokiej jakości oraz spójnego wizerunku marki.

Rodzina czcionek Ubuntu oferuje różnorodne grubości - **od Light po Bold** - co umożliwia elastyczne dostosowanie do różnych potrzeb graficznych i komunikacyjnych.

Stosowanie innych czcionek w materiałach PAA nie jest przewidziane, co podkreśla znaczenie konsekwencji w komunikacji wizualnej.

Dzięki prostocie i czytelności Ubuntu, typografia **wzmacnia profesjonalny wizerunek agencji**.

UBUNTU

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
ĄŚĆŻŻóęń 0123456789

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
ĄŚĆŻŻóęń 0123456789

Ubuntu Light
abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
0123456789

Ubuntu Regular
abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
0123456789

Ubuntu Medium
abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
0123456789

Ubuntu Bold
abcdefghijklmnopqrstuvwxyz
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
0123456789

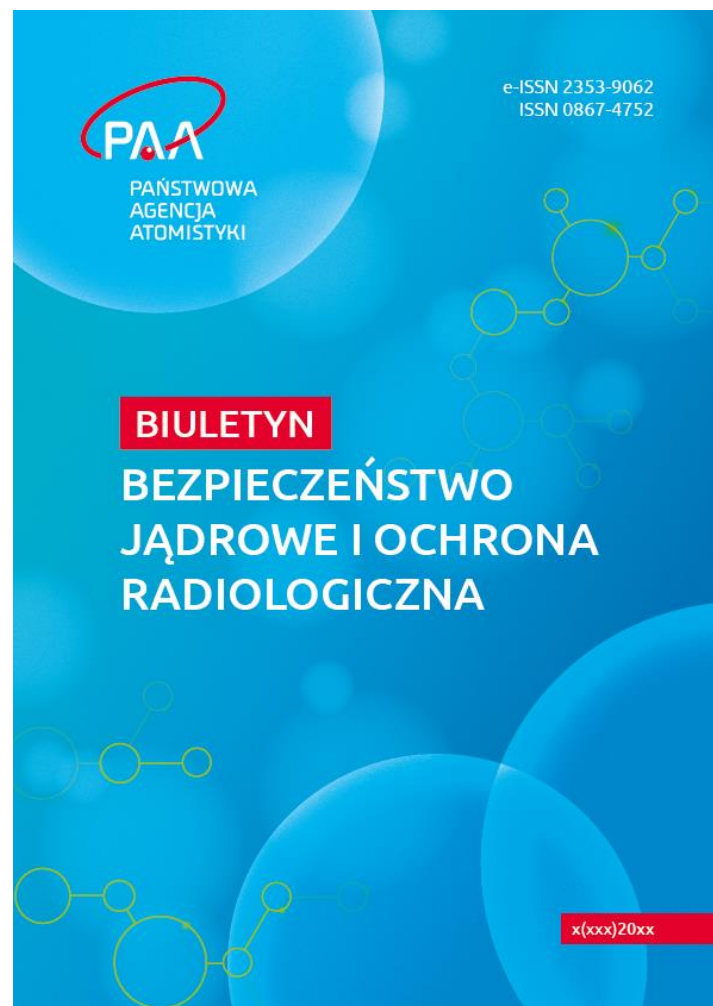
4.1 Key visual

Key visual PAA został zaprojektowany w celu podkreślenia charakteru marki i jej długofalowej strategii. Zastosowane formy graficzne odzwierciedlają nowoczesność i profesjonalizm, a jednocześnie pozostają spójne z założeniami Systemu Identyfikacji Wizualnej i paletą kolorów.

Elementy graficzne bazują na gradientach błękitu oraz dynamicznych formach geometrycznych budują wizerunek instytucji jako prestiżowej i przyjaznej.

Motyw graficzny przywodzi na myśl naukowe i technologiczne skojarzenia, nawiązując do profilu działalności PAA.

Jasne odcienie błękitu symbolizują optymizm i zaufanie, podczas gdy całość kompozycji jest przystępna wizualnie, co ułatwia pozytywny odbiór marki. Dzięki temu key visual skutecznie łączy profesjonalny charakter z przejrzystym dla odbiorców stylem.



4.2 Wyróżnienia

Dla jasnej i przejrzystej oraz uporządkowanej ekspozycji treści przewidziano kilka metod wyróżnień. Dla przejrzystości treści należy ograniczyć ilość wyróżnień do minimum.

Przykłady wyróżnień:

1. Skróty w danych teleadresowych.
2. Nagłówki prezentacji.
3. Nagłówki w publikacjach.
4. Linia dla oddzielenia elementów.
5. Czerwony prostokąt – „metka” dla wyróżnienia adresu www, części tekstu, paginy.

1. —————

PAA
PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

Jan Kowalski
STARSZY SPECJALISTA

tel. 22 123 45 67
fax 22 765 43 21
email jankowalski@paa.gov.pl
ul. Nowy Świat 6/12

tel. 22 123 45 67
fax 22 765 43 21

2

Nullam nec urna laoreet

Nullam vel augue at mi vulpate euismod. Sed mattis a nibh ullamcorper imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor non. Nam ante nisi, porttitor nec ipsum quis, vestibulum maximus dolor. Nullam vel quam vitame quam super luctus ut sed turpis. Etiam laoreet trincidunt consectetur. Nulla in massa vehicula, rhoncus magna vel, vestibulum magna. Integer rutrum trincidunt sodales. Fusce sed odio efficitur, convallis purus eget, rhoncus diam.

Tytuł wykresu

Kategoria	Seria 1	Seria 2
Kategoria 1	4.2	2.5
Kategoria 2	2.5	4.5
Kategoria 3	4.5	5.0

Nullam laoreet

**Nullam nec urna
laoreet**

Nullam vel augue at mi vulpulate
eiusmod. Sed mattis a nibh ullamcorper
imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec
efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor
non. Nam ante nisi, porttitor nec ipsum
quis, vestibulum maximus dolor. Nulla
vel quam vitae quam semper luctus
sed turpis. Etiam laoreet tincidunt
sectetur. Nulla in massa

[illegible]

4

[illegible]

5

PAA
PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

BIULETYN

**BEZPIECZEŃSTWO
JĄDROWE I OCHRONA
RADIOLOGICZNA**

web/paa

www.gov.pl/web/paa

PAA PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

4.3 Dane teleadresowe

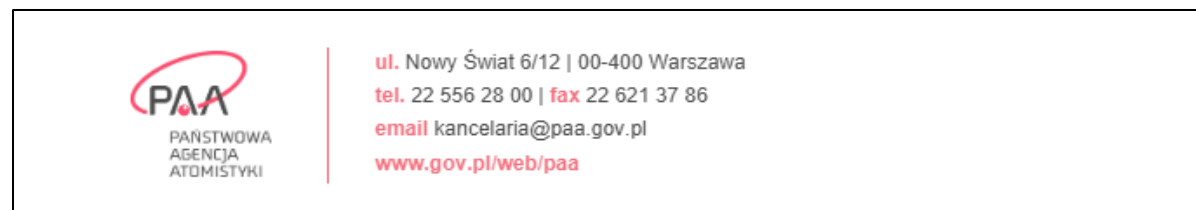
Dane teleadresowe w materiałach PAA są przedstawiane w sposób przejrzysty i estetyczny, z wyraźnym podziałem na poszczególne składowe.

Skróty takie jak „tel.”, „fax.”, „email” i „ul.” są wyróżnione w kolorze czerwonym, co zwiększa ich widoczność i czytelność. Pozostały tekst, taki jak numery telefonów, adresy e-mail i lokalizacja, jest zapisany prostą, czarną czcionką, zgodnie z jednolitą stylistyką identyfikacji wizualnej.

Układ danych teleadresowych jest logiczny i uporządkowany, z zachowaniem odpowiednich odstępów pomiędzy elementami, co ułatwia ich szybkie odnalezienie. W materiałach takich jak wizytówki, stopki mailowe, czy papier firmowy układ powinien przyjąć formę pionową (wyjątkiem jest papier firmowy w wersji ogólnej, gdzie dopuszczalny jest układ poziomy danych), zawsze z zachowaniem spójności stylistycznej. Taki format pozwala na profesjonalny i nowoczesny wizerunek PAA w komunikacji wizualnej.



Wizytówka



Papier firmowy – Prezesa PAA



Papier firmowy – wersja ogólna



Stopka e-mail



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

DRUKI FIRMOWE

5.1 Wizytówka

Format: 90x50 mm

1. Logotyp PAA w wariancie pionowym.
2. Dane osobowe i teleadresowe.
3. Tło oraz logotyp PAA w wariancie poziomym.
4. Adres www.

3.

4.



Rewers

1.

2.



Wersja ze stanowiskiem



Wersja ze stanowiskiem
i departamentem



Wersja ze stanowiskiem,
departamentem i wydziałem

5.2 Wizytówka anglojęzyczna

Format: 90x50 mm

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Dane osobowe i teleadresowe.
3. Tło oraz logotyp PAA w wariantcie poziomym.
4. Adres www.

3.

4.



Rewers

1.

2.



Wersja ze stanowiskiem



**Janina
Kowalska-Malinowska**

FUNCTION
Name of department

phone 22 123 45 67
fax 22 765 43 21
email janinakowalska@paa.gov.pl
address Nowy Świat 6/12, 00-400 Warsaw

Wersja ze stanowiskiem
i departamentem



**Janina
Kowalska-Malinowska**

FUNCTION
Name of department
Name of department

phone 22 123 45 67
fax 22 765 43 21
email janinakowalska@paa.gov.pl
address Nowy Świat 6/12, 00-400 Warsaw

Wersja ze stanowiskiem,
Departamentem i wydziałem

5.2 Papier firmowy | Wersja ogólna

Format: A4

1. Logotyp PAA w wariantcie poziomym z umieszczonymi pod czerwoną linią nazwą departamentu lub w wyjątkowych przypadkach departamentu i wydziału.
2. Numer pisma, miejsce i data.
3. Pole tekstowe.
4. Dane teleadresowe PAA.

1. —

2. —

3. —

4. —



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Departament Bezpieczeństwa Jądrowego

PAA/DEP/xxx/xxx/2013

Warszawa, 30 października 2024 r.

Sz.P. Stanisław Kowalski
Nazwa Firmy nazwa instytucji
ul. Nazwa ulicy
01-234 Miejsowość
Nazwa Kraju

Szanowny Panie,
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis id bibendum elit. Vivamus ornare lectus a mi ultrices, in dapibus dolor gravida. Sed sollicitudin euismod velit, ut tincidunt tellus vulputate pellentesque. Pellentesque vestibulum ex nec nisi porta, et sollicitudin eros suscipit. Vestibulum tempor metus et euismod faucibus. Etiam eu ex cursus, bibendum arcu quis, varius elit. Cras sit amet dolor fringilla, interdum mi non, maximus ante. Nunc nec nibh faucibus, volutpat urna id, tristique mi. Ut commodo imperdiet placerat. Integer scelerisque metus non enim auctor malesuada. Praesent consectetur, sem quis interdum ultrices, turpis nibh lacinia lacus, vel sodales dui ex ante. Aliquam quis viverra diam.
Fusce congue condimentum tortor, nec malesuada felis convallis ut. Mauris feugiat ipsum nisi, ac convallis tortor consectetur a. Aliquam ultricies venenatis leo, at tempor turpis vestibulum vel. Vivamus ultricies orci metus, a pulvinar augue ultricies ac. Vestibulum nibh nunc, fermentum sed fringilla vel, tempus imperdiet ex. Pellentesque ut justo ac risus commodo convallis sit amet porttitor mi. Vestibulum ultricies eros neque, ut hendrerit lorem finibus at. Mauris vitae orci a felis sollicitudin pharetra. Duis sit amet lorem dui. Donec diam nisi, congue ut luctus eget, consectetur eget felis. Suspendisse eget justo facilisis, aliquam ligula non, ornare velit. Donec eros metus, eleifend ac congue vitae, accumsan ut erat. Donec blandit diam non nunc euismod, in egestas purus mattis. Cras pharetra tempor hendrerit. Nunc id diam euismod, ullamcorper nulla eget, gravida sapien. Sed fermentum tellus mauris, id condimentum nisi consectetur non. Etiam turpis sem, faucibus nec felis eget, sagittis rhoncus purus. Praesent nisi magna, pretium at sapien vel, porttitor elementum tellus. Sed erat lacus, suscipit luctus placerat sit amet, ultrices vitae odio. Suspendisse potenti.

ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa | tel. 22 628 27 22 | fax 22 621 37 86 | www.gov.pl/web/paa



NATIONAL
ATOMIC ENERGY
AGENCY

Nuclear Safety Department

PAA/DEP/xxx/xxx/2013

Warsaw, October 30, 2024

Sz.P. Stanisław Kowalski
Nazwa Firmy nazwa instytucji
ul. Nazwa ulicy
01-234 Miejsowość
Nazwa Kraju

Dear Sir,
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis id bibendum elit. Vivamus ornare lectus a mi ultrices, in dapibus dolor gravida. Sed sollicitudin euismod velit, ut tincidunt tellus vulputate pellentesque. Pellentesque vestibulum ex nec nisi porta, et sollicitudin eros suscipit. Vestibulum tempor metus et euismod faucibus. Etiam eu ex cursus, bibendum arcu quis, varius elit. Cras sit amet dolor fringilla, interdum mi non, maximus ante. Nunc nec nibh faucibus, volutpat urna id, tristique mi. Ut commodo imperdiet placerat. Integer scelerisque metus non enim auctor malesuada. Praesent consectetur, sem quis interdum ultrices, turpis nibh lacinia lacus, vel sodales dui ex ante. Aliquam quis viverra diam.
Fusce congue condimentum tortor, nec malesuada felis convallis ut. Mauris feugiat ipsum nisi, ac convallis tortor consectetur a. Aliquam ultricies venenatis leo, at tempor turpis vestibulum vel. Vivamus ultricies orci metus, a pulvinar augue ultricies ac. Vestibulum nibh nunc, fermentum sed fringilla vel, tempus imperdiet ex. Pellentesque ut justo ac risus commodo convallis sit amet porttitor mi. Vestibulum ultricies eros neque, ut hendrerit lorem finibus at. Mauris vitae orci a felis sollicitudin pharetra. Duis sit amet lorem dui. Donec diam nisi, congue ut luctus eget, consectetur eget felis. Suspendisse eget justo facilisis, aliquam ligula non, ornare velit. Donec eros metus, eleifend ac congue vitae, accumsan ut erat. Donec blandit diam non nunc euismod, in egestas purus mattis. Cras pharetra tempor hendrerit. Nunc id diam euismod, ullamcorper nulla eget, gravida sapien. Sed fermentum tellus mauris, id condimentum nisi consectetur non. Etiam turpis sem, faucibus nec felis eget, sagittis rhoncus purus. Praesent nisi magna, pretium at sapien vel, porttitor elementum tellus. Sed erat lacus, suscipit luctus placerat sit amet, ultrices vitae odio. Suspendisse potenti.

address Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa | tel. 22 628 27 22 | fax 22 621 37 86 | www.gov.pl/web/paa

Wersja angiøjęzyczna

5.2 Papier firmowy Prezesa PAA

Format: A4

1. Godło państwowe.
2. Główna.
3. Numer pisma, miejsce i data.
4. Pole tekstowe.
5. Logotyp PAA w wariantach pionowych.
6. Dane teleadresowe PAA.

1. _____

3. _____

4. _____

5. _____

2. |



Prezes Państwowej Agencji Atomistyki
Andrzej Głowacki

PAA/DEP/xxx/xxx/2013

Warszawa, 30 października 2024 r.

Sz.P. Stanisław Kowalski
Nazwa Firmy nazwa instytucji
ul. Nazwa ulicy
01-234 Miejscowość
Nazwa Kraju

Szanowny Panie/Szanowna Pani,

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis id bibendum elit. Vivamus ornare lectus a mi ultrices, in dapibus dolor gravida. Sed sollicitudin euismod velit, ut tincidunt tellus vulputate pellentesque. Pellentesque vestibulum ex nec nisi porta, et sollicitudin eros suscipit. Vestibulum tempor metus et euismod faucibus. Etiam eu ex cursus, bibendum arcu quis, varius elit. Cras sit amet dolor fringilla, interdum mi non, maximus ante. Nunc nec nibh faucibus, volutpat urna id, tristique mi. Ut commodo imperdiet placerat. Integer scelerisque metus non enim auctor malesuada. Praesent consectetur, sem quis interdum ultrices, turpis nibh lacinia lacus, vel sodales dui ex ante. Aliquam quis viverra diam.

Fusce congue condimentum tortor, nec malesuada felis convallis ut. Mauris feugiat ipsum nisi, ac convallis tortor consectetur a. Aliquam ultricies venenatis leo, at tempor turpis vestibulum vel. Vivamus ultricies orci metus, a pulvinar augue ultricies ac. Vestibulum nibh nunc, fermentum sed fringilla vel, tempus imperdiet ex. Pellentesque ut justo ac risus commodo convallis sit amet porttitor mi. Vestibulum ultricies eros neque, ut hendrerit lorem finibus at. Mauris vitae orci a felis sollicitudin pharetra. Duis sit amet lorem dui. Donec diam nisi, congue ut luctus eget, consectetur eget felis. Suspendisse eget justo facilisis, aliquam ligula non, ornare velit. Donec eros metus, eleifend ac congue vitae, accumsan ut erat.

Z poważaniem,
Imię i nazwisko podpisującego
Stanowisko podpisującego
Państwowej Agencji Atomistyki
/ – podpisany cyfrowo/



PA
PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

ul. Nowy Świat 6/12 | 00-400 Warszawa
tel. 22 556 28 00 | fax 22 621 37 86
email kancelaria@paa.gov.pl
www.gov.pl/web/paa

6. |



President National Atomic Energy Agency
Andrzej Głowacki

PAA/DEP/xxx/xxx/2013

Warsaw, October 30, 2024

Sz.P. Stanisław Kowalski
Nazwa Firmy nazwa instytucji
ul. Nazwa ulicy
01-234 Miejscowość
Nazwa Kraju

Dear Sir,

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis id bibendum elit. Vivamus ornare lectus a mi ultrices, in dapibus dolor gravida. Sed sollicitudin euismod velit, ut tincidunt tellus vulputate pellentesque. Pellentesque vestibulum ex nec nisi porta, et sollicitudin eros suscipit. Vestibulum tempor metus et euismod faucibus. Etiam eu ex cursus, bibendum arcu quis, varius elit. Cras sit amet dolor fringilla, interdum mi non, maximus ante. Nunc nec nibh faucibus, volutpat urna id, tristique mi. Ut commodo imperdiet placerat. Integer scelerisque metus non enim auctor malesuada. Praesent consectetur, sem quis interdum ultrices, turpis nibh lacinia lacus, vel sodales dui ex ante. Aliquam quis viverra diam.

Fusce congue condimentum tortor, nec malesuada felis convallis ut. Mauris feugiat ipsum nisi, ac convallis tortor consectetur a. Aliquam ultricies venenatis leo, at tempor turpis vestibulum vel. Vivamus ultricies orci metus, a pulvinar augue ultricies ac. Vestibulum nibh nunc, fermentum sed fringilla vel, tempus imperdiet ex. Pellentesque ut justo ac risus commodo convallis sit amet porttitor mi. Vestibulum ultricies eros neque, ut hendrerit lorem finibus at. Mauris vitae orci a felis sollicitudin pharetra. Duis sit amet lorem dui. Donec diam nisi, congue ut luctus eget, consectetur eget felis. Suspendisse eget justo facilisis, aliquam ligula non, ornare velit. Donec eros metus, eleifend ac congue vitae, accumsan ut erat.

Z poważaniem,
Imię i nazwisko podpisującego
Stanowisko podpisującego
Państwowej Agencji Atomistyki
/ – podpisany cyfrowo/



PA
PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

ul. Nowy Świat 6/12 | 00-400 Warszawa
tel. 22 556 28 00 | fax 22 621 37 86
email kancelaria@paa.gov.pl
www.gov.pl/web/paa

Wersja angielskojęzyczna



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

DIGITAL

6.1 Stopka mailowa

1. Logotyp PAA w wariacie pionowym.
2. Separator.
3. Dane osobowe.
4. Dane teleadresowe.

1.

2.

3.

4.

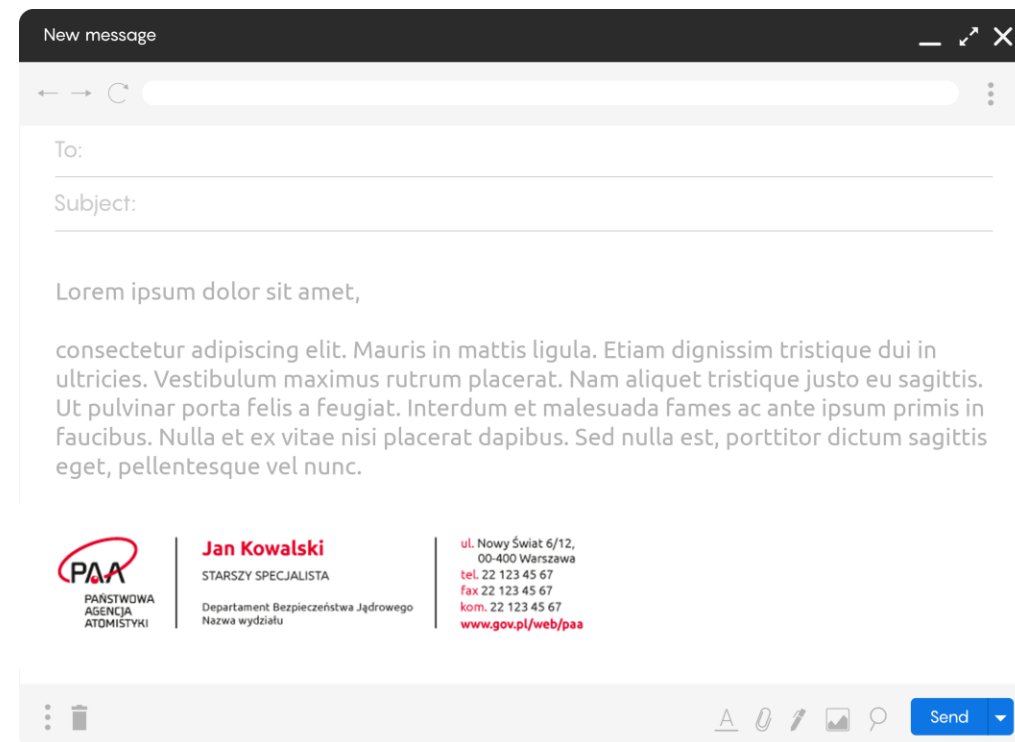


Jan Kowalski

STARSZY SPECJALISTA

Departament Bezpieczeństwa Jądrowego
Nazwa wydziału

ul. Nowy Świat 6/12,
00-400 Warszawa
tel. 22 123 45 67
fax 22 123 45 67
kom. 22 123 45 67
www.gov.pl/web/paa



6.2 Prezentacja multimedialna

Format: 16:9

Przykładowe slajdy:



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

LOREM IPSUM

Autor Prezentacji

Departament autora

Dopisek

30 października 2024, Warszawa



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Nam et vestibulum justo

In aliquet lectus vitae nibh accumsan, sit amet viverra lacus volutpat. Vestibulum et sem quis ante commodo scelerisque. Morbi blandit purus quis ipsum fermentum consectetur. Cras erat metus, ullamcorper scelerisque sagittis ac, rutrum sed risus. Phasellus sagittis, ipsum ut hendrerit sagittis, erat nunc congue nulla, in euismod eros sem nec arcu.



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Cras eu magna dui

Nunc a mi a magna lobortis fermentum. Integer ac ante fringilla, dictum nibh nec, auctor mauris. Donec efficitur at risus id euismod. Ut porttitor sapien sapien, a convallis urna sollicitudin sit amet. Aliquam cursus, erat eu pretium pellentesque, leo sem consequat urna, nec rutrum risus eros id orci. Sed sed maximus tortor. Nulla quis purus diam. Aenean ut ipsum aliquet, congue urna et, auctor orci.



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

LOREM IPSUM DOLOR SIT AMET, CONSECTETUR

Nam et vestibulum justo, nec lobortis nunc

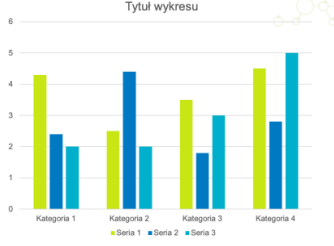


PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Nullam nec urna laoreet

Nullam vel augue at mi vulputate euismod. Sed mattis a nibh ullamcorper imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor non. Nam ante nisi, porttitor nec ipsum quis, vestibulum maximus dolor. Nullam vel quam vitae quam semper luctus ut sed turpis. Etiam laoreet tincidunt consectetur. Nulla in massa vehicula, rhoncus magna vel, vestibulum magna. Integer rutrum tincidunt sodales. Fusce sed odio efficitur, convallis purus eget, rhoncus diam.

Tytuł wykresu



Kategoria	Seria 1	Seria 2	Seria 3
Kategoria 1	4.2	2.5	2.0
Kategoria 2	2.5	4.5	2.0
Kategoria 3	3.5	1.8	3.0
Kategoria 4	4.5	2.8	5.0



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Nullam nec urna laoreet

Nullam vel augue at mi vulputate euismod. Sed mattis a nibh ullamcorper imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor non. Nam ante nisi, porttitor nec ipsum quis, vestibulum maximus dolor. Nullam vel quam vitae quam semper luctus ut sed turpis. Etiam laoreet tincidunt consectetur. Nulla in massa vehicula, rhoncus magna vel, vestibulum magna. Integer rutrum tincidunt sodales. Fusce sed odio efficitur, convallis purus eget, rhoncus diam.



Slajdy tytułowe

Slajdy z treścią na białym tle

Slajdy z treścią na gradientowym tle

6.2.1 Prezentacja multimedialna

Format: 16:9

1. Logotyp PAA – poziom.
2. Tytuł prezentacji.
3. Autor.
4. Departament autora.
5. Wzór.
6. Dopisek i data.



6.2.2 Prezentacja multimedialna

Format: 16:9

1. Nagłówek z tytułem slajdu.
2. Treść.
3. Zmniejszony logotyp PAA – poziom.
4. Wzór.
5. Gradient (opcjonalnie).
6. Grafika (opcjonalnie).
7. Pagina.

1.

4.

2.

3.

Nam et vestibulum justo

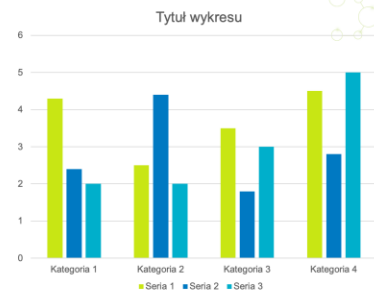
In aliquet lectus vitae nibh accumsan, sit amet viverra lacus volutpat. Vestibulum et sem quis ante commodo scelerisque. Morbi blandit purus quis ipsum fermentum consectetur. Cras erat metus, ullamcorper scelerisque sagittis ac, rutrum sed risus. Phasellus sagittis, ipsum ut hendrerit sagittis, erat nunc congue nulla, in euismod eros sem nec arcu.



2

Nullam nec urna laoreet

Nullam vel augue at mi vulputate euismod. Sed mattis a nibh ullamcorper imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor non. Nam ante nisl, porttitor nec ipsum quis, vestibulum maximus dolor. Nullam vel quam vitae quam semper luctus ut sed turpis. Etiam laoreet tincidunt consectetur. Nulla in massa vehicula, rhoncus magna vel, vestibulum magna. Integer rutrum tincidunt sodales. Fusce sed odio efficitur, convallis purus eget, rhoncus diam.



4

6.

7.

Slajdy z treścią na białym tle

Cras eu magna dui

Nunc a mi a magna lobortis fermentum. Integer ac ante fringilla, dictum nibh nec, auctor mauris. Donec efficitur at risus id euismod. Ut porttitor sapien sapien, a convallis urna sollicitudin sit amet. Aliquam cursus, erat eu pretium pellentesque, leo sem consequat urna, nec rutrum risus eros id orci. Sed sed maximus tortor. Nulla quis purus diam. Aenean ut ipsum aliquet, congue urna et, auctor orci.



3

Nullam nec urna laoreet

Nullam vel augue at mi vulputate euismod. Sed mattis a nibh ullamcorper imperdiet. In sit amet sagittis sem. Donec efficitur leo nisi, at lobortis mi porttitor non. Nam ante nisl, porttitor nec ipsum quis, vestibulum maximus dolor. Nullam vel quam vitae quam semper luctus ut sed turpis. Etiam laoreet tincidunt consectetur. Nulla in massa vehicula, rhoncus magna vel, vestibulum magna. Integer rutrum tincidunt sodales. Fusce sed odio efficitur, convallis purus eget, rhoncus diam.



5

Slajdy z treścią na gradientowym tle



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

OZNAKOWANIE

7.1 Tabliczki na drzwi

Format: A5

1. Logotyp PAA w wariantcie poziomym.
2. Imię, nazwisko, funkcja.
3. Tło.
4. Nazwa jednostki.
5. Numer pokoju.

1. —

2. —

3. —

4. —

5. —

PAA PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Jan Kowalski
PREZES PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYK

Janina Kowalska
SEKRETARIAT

GABINET PREZESA

124

PAA PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

Janina Kowalska
WICEDYREKTORKA
RZECZNICZKA PRASOWA PREZESA PAA

Jan Kowalski
SEKRETARIAT

**DEPARTAMENT
DO SPRAW ZDARZEŃ
RADIACYJNYCH**

124



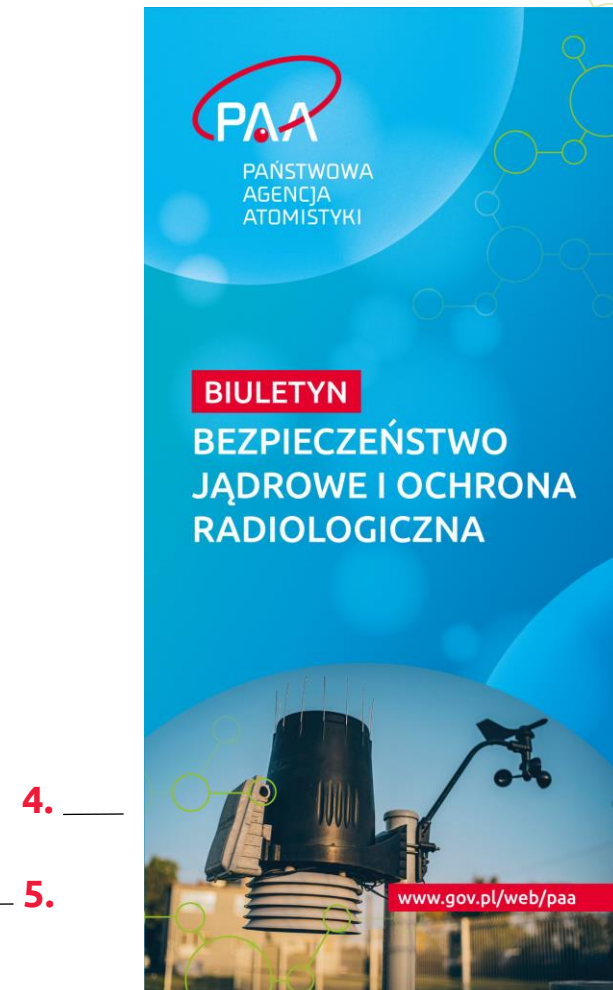
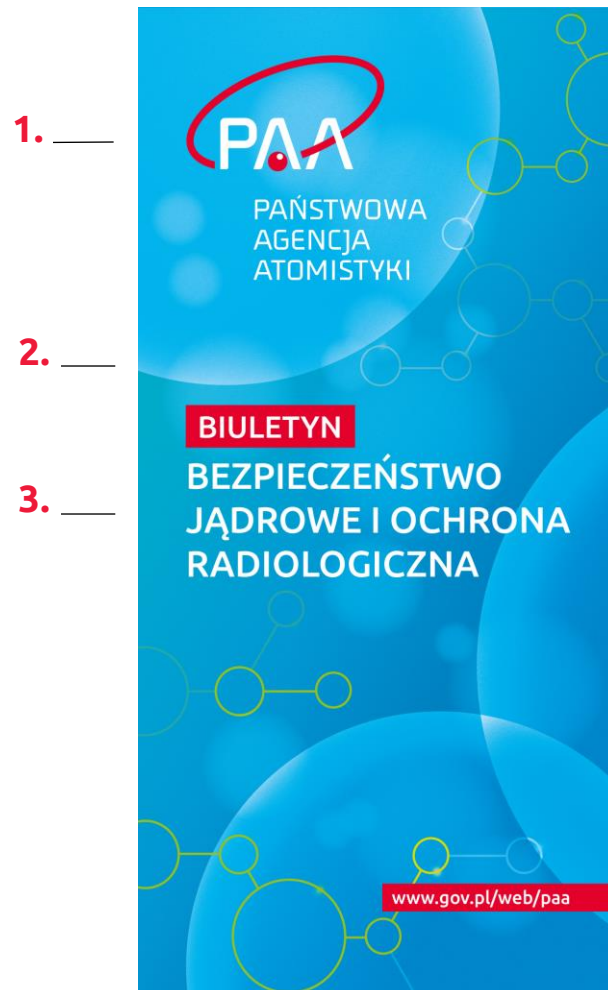
PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

MATERIAŁY REPREZENTACYJNE

8.1 Rollup

Format przykładowy: 100x200 cm

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Tło.
3. Hasło.
4. Zdjęcie (opcjonalnie).
5. Adres www.

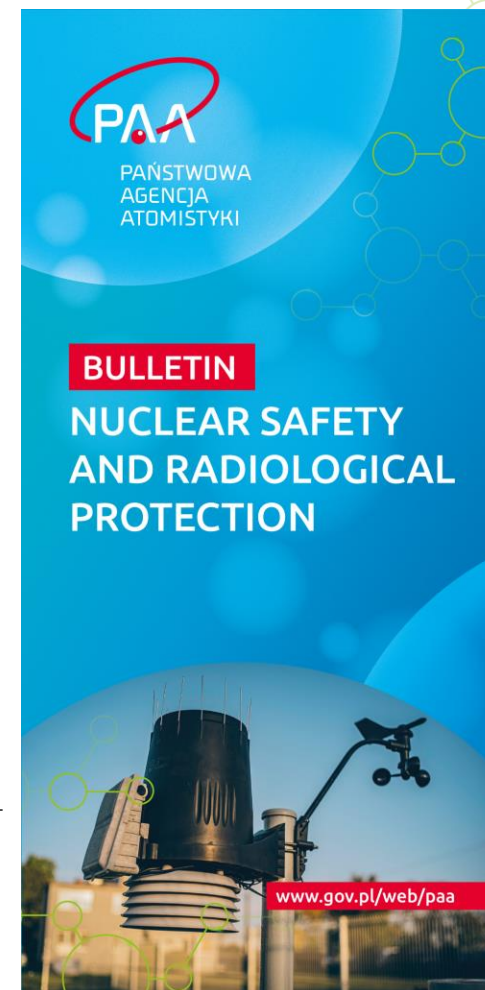
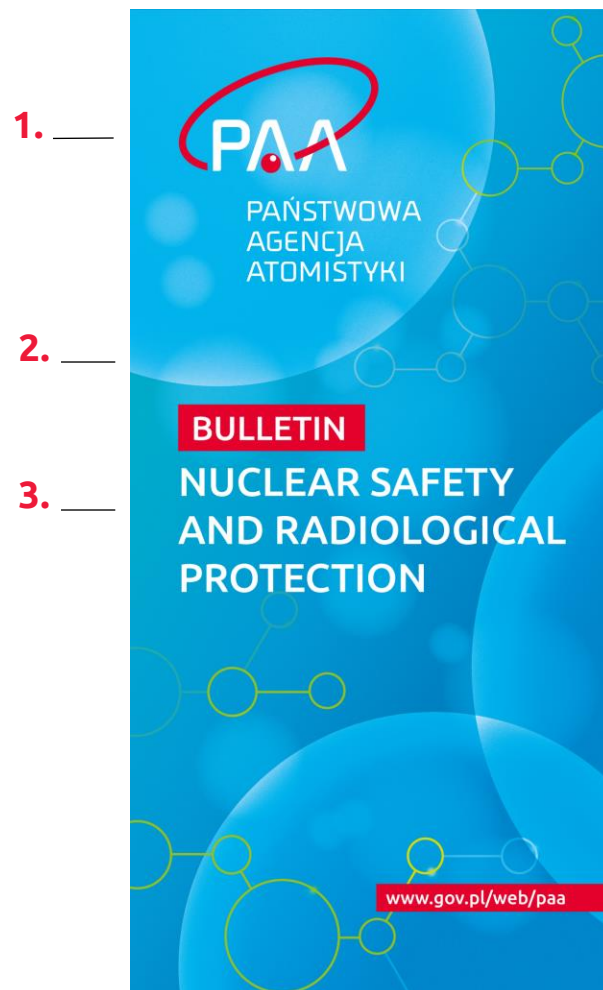


Wersja ze zdjęciem

8.2 Rollup anglojęzyczny

Format przykładowy: 100x200 cm

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Tło.
3. Hasło.
4. Zdjęcie (opcjonalnie).
5. Adres www.



Wersja ze zdjęciem

8.3 Ścianka konferencyjna z dwoma logotypami

Format przykładowy: 300x230 cm

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Angielski logotyp PAA w wariantcie pionowym.
3. Tło.
4. Adres www.

1. _____

2. _____

_____ 3.

_____ 4.



8.4 Ścianka konferencyjna z układem logotypów

Format przykładowy: 300x230 cm

1. Siatka logotypów PAA w wariantcie pionowym.
2. Tło.
3. Adres www.



8.5 Notatnik z okładką

Format: A5

1. Logotyp PAA w wariantcie poziomym.
2. Tło.
3. Adres www.

1. —

2. —



Okładka przednia

3. —



Okładka tylna



PAŃSTWOWA
AGENCJA ATOMISTYKI

PUBLIKACJE

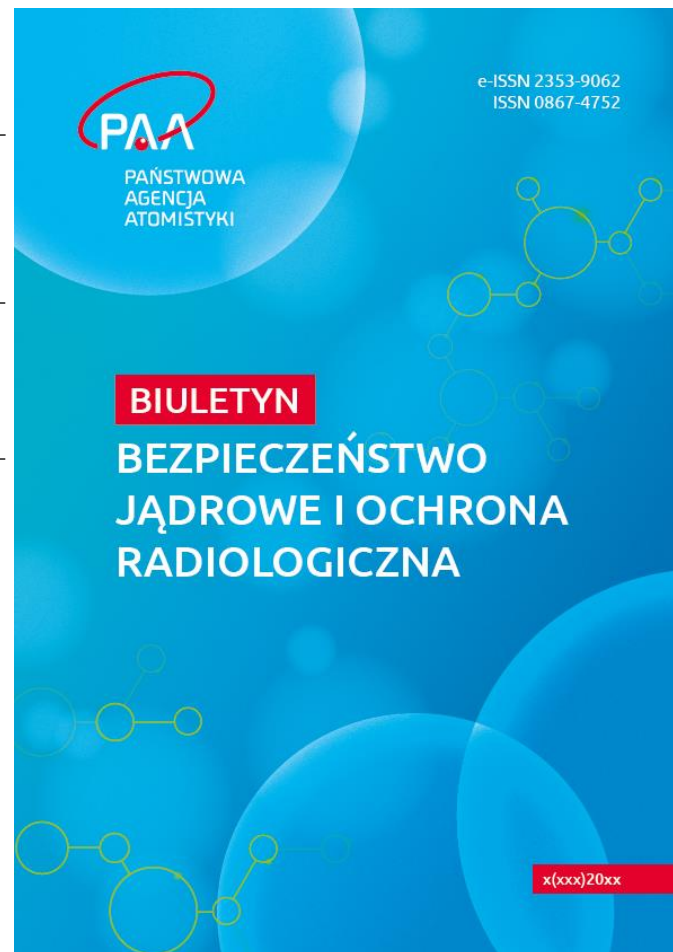
Zasady kompozycji

9.1 Okładka biuletynu – przykładowe kompozycje

Format: A4

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Tło.
3. Nazwa biuletynu.
4. Numer ISSN.
5. Oznaczenie numeru biuletynu.
6. Zdjęcie (opcjonalnie).

Margines istotnych elementów
od brzegu: 20 mm.



Wersja ze zdjęciem

9.2 Okładka A4 – przykładowe kompozycje

Format: A4

1. Logotyp PAA w wariantcie pionowym.
2. Tło.
3. Hasło.
4. Adres www.
5. Zdjęcie (opcjonalnie).

Margines istotnych elementów
od brzegu: 20 mm.

1. _____

2. _____

3. _____



4. _____

5. _____



Wersja ze zdjęciem

9.3 Okładka kwadratowa – przykładowe kompozycje

Format: 21x21 cm

1. Logotyp PAA w wariacie pionowym.
2. Hasło.
3. Tło.
4. Adres www.
5. Zdjęcie (opcjonalnie).

Margines istotnych elementów
od brzegu: 10 mm.

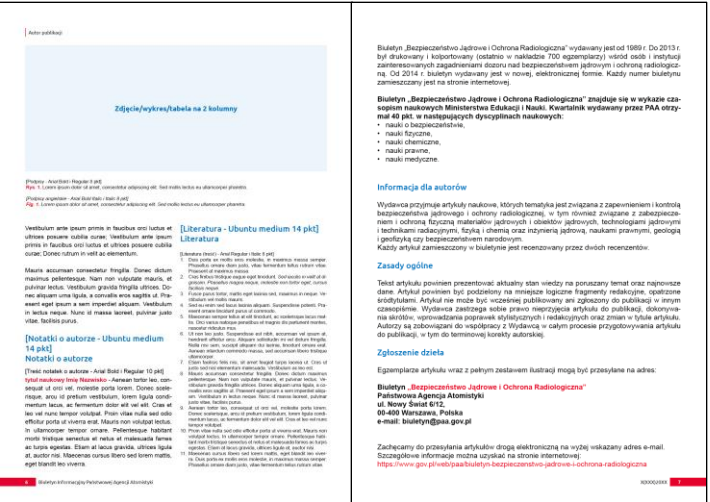
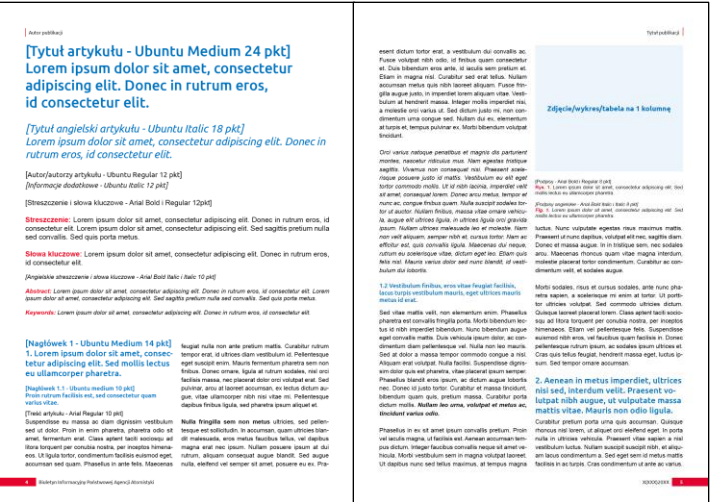
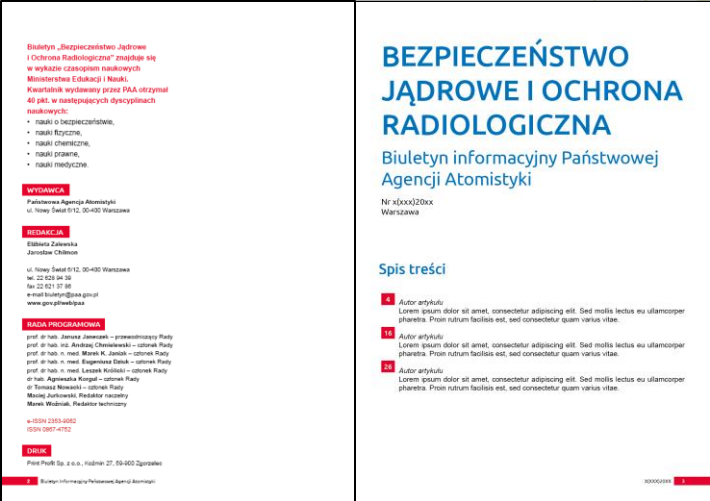


Wersja ze zdjęciem

9.4 Układ treści biuletynu – przykładowe strony

Format: A4

Marginesy: boczne wynoszą 15 mm, dolny 20 mm a górny 25 mm.
Paginy: forma „metki” wychodzącej na spód. Na stronie lewej obok paginy umieszczona jest nazwa biuletynu, na prawej stronie numer wydania.
Zastosowane fonty: Ubuntu i Arial
Kolory: zgodne z paletą kolorów zamieszczoną w tym dokumencie.



9.5 Układ treści publikacji kwadratowej – przykładowe strony

Format: 21x21 cm

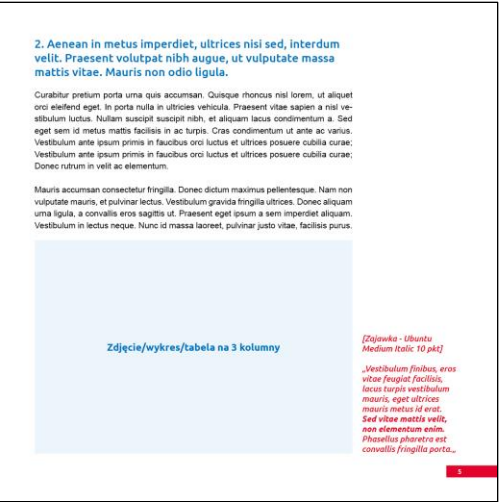
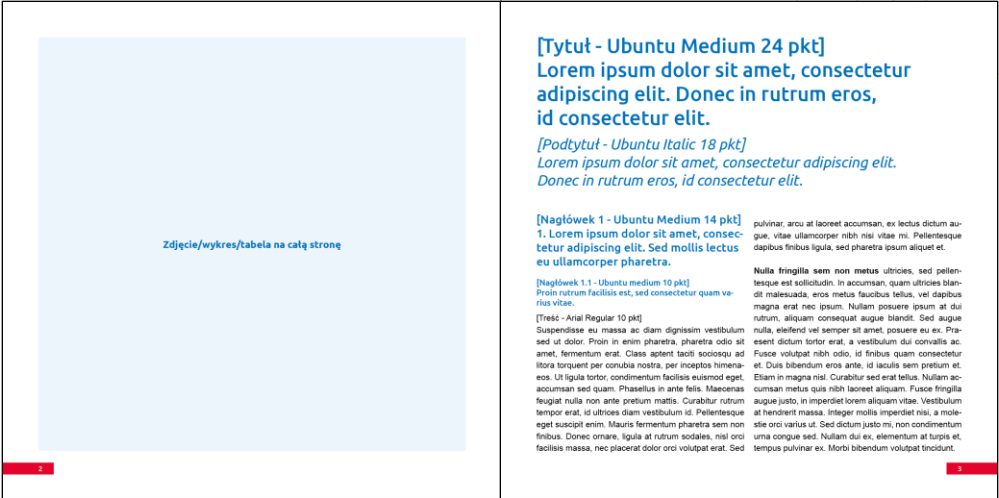
Marginesy: boczne wynoszą 15 mm, dolny 20 mm a górny 25 mm.

Paginy: forma „metki” wychodzącej na spód.

Zastosowane fonty: Ubuntu i Arial

Kolory: zgodne z paletą kolorów zamieszczoną w tym dokumencie.

Podział: na 4 kolumny z możliwością układu całostronicowego, 2x2 lub 3x1 jak w przykładzie.





Księga znaku



Logo składa się z:

1. Akronimu PAA z orbitą,
2. nazwy „Państwowa Agencja Atomistyki”.



Logo PAA występuje w kilku równorzędnych wariantach. Wariantów tych można używać wymiennie, w zależności od potrzeb kompozycji i jak najlepszej ekspozycji logo.

1. Pionowy,
2. poziomy,
3. pośredni.



1.



2.



3.

Logo PAA anglojęzyczne ma 2 równorzędne warianty układu:

1. Pionowy,
2. poziomy.

1. _____

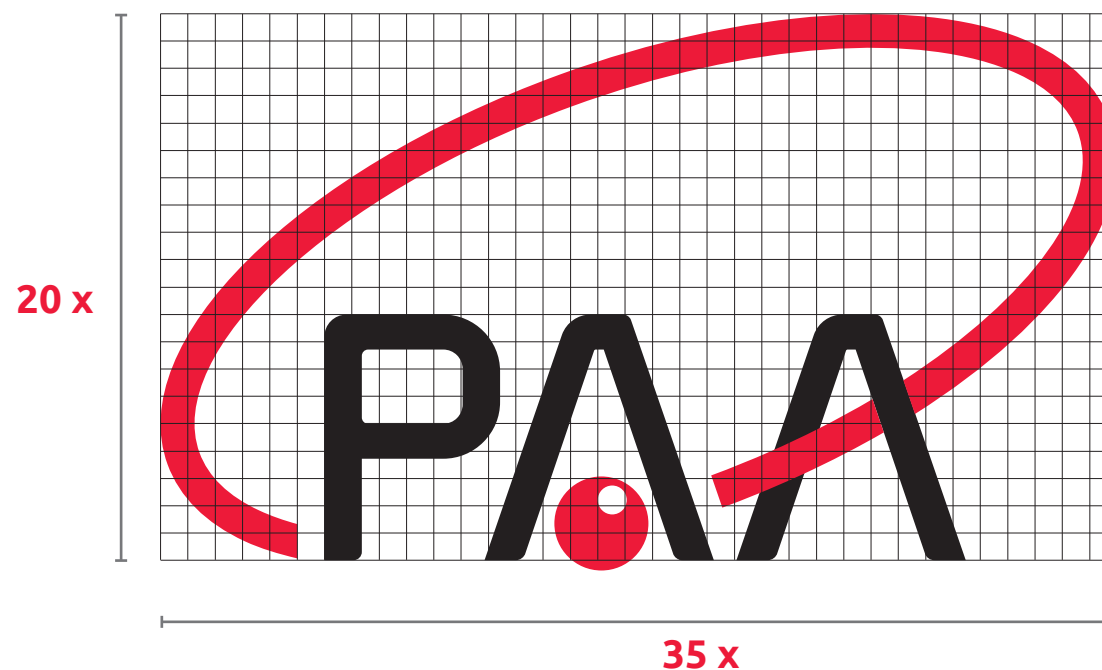


2. _____



Siatka modułowa określa podstawowe proporcje i wielkości w budowie sygnetu.

Całość sygnetu mieści się na siatce 35 x na 20 x.



Typografia logotypu oparta jest na czcionce Prime.

Zarówno w akronimie, jak i w nazwie, niektóre litery zostały zmodyfikowane.



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

Prime Regular

a b c d e f g h i j k l m n o ó p q r s t u v w x y z
A B C D E F G H I J K L Ł M N O Ó P Q R S T U V W X Y Z
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

W logo użyto 2 kolorów.

Kolorystyka określona jest odpowiednio wg palety CMYK, RGB, Pantone®, oraz RAL



	CMYK	RGB	WWW	Pantone®	RAL
1	0/100/81/0	237/26/57	#ed1a39	185 C	3020
2	0/0/0/100	0/0/0	#000000	Black C	9005

2.2 Wersja uzupełniająca

KOLORYSTYKA LOGO

Dla potrzeb ekspozycji na błękitnych tłach, zaprojektowano wersję uzupełniającą logo, w której nazwa, oraz litery akronimu są koloru białego.



2.3 Wersja monochromatyczna – skala szarości

Zaprojektowano wersję monochromatyczną w skali szarości, która składa się z dwóch odcieni szarości.

Wersja monochromatyczna logo może być stosowana w materiałach promocyjnych zamiast logo w wersji podstawowej, w przypadku technicznych ograniczeń lub gdy wymaga tego koncepcja projektu. Sytuacją taką jest np. druk w skali szarości np. na czarno-białych drukarkach biurowych.



Wersje achromatyczne logo używane są w reprodukcjach niebarwnych np. piaskowanie, grawer, tłoczenie.

Użycie takich wersji jest wskazane ze względu na ograniczenia (specyfikę) nośnika lub techniki produkcji.



Pole ochronne jest to obszar, który gwarantuje optymalną czytelność i ekspozycję logo.

W polu tym nie mogą znaleźć się żadne inne znaki, elementy itp.

Minimalna wielkość pola ochronnego wyznaczona jest przez wysokość litery P z akronimu. (Jedyny wyjątek pokazano na stronie 33 – wizytówka)



Wielkość minimalna określa dopuszczalne rozmiary logo, przy których zachowuje ono prawidłową czytelność. Minimalna szerokość logo została opisana na podstawie szerokości akronimu.

Szerokość ta wynosi:

1. 10 mm dla wszystkich podstawowych mediów drukowanych.

W niektórych technikach drukarskich (np. druk tamponowy), wyszywanych aplikacjach lub reprodukcji, logo na nietypowym podłożu, uzyskanie dobrej jakości w wersji minimalnej może okazać się niemożliwe. Należy wtedy indywidualnie z wykonawcą określić minimalną wielkość logo, pozwalającą na zachowanie prawidłowej jego czytelności.

2. 60 pikseli w mediach elektronicznych (dla wersji ekranowej).



Logo ma stałe, niezmiennie proporcje oraz układ poszczególnych elementów. Nie wolno zmieniać proporcji, ani deformować logo. Znak należy skalować proporcjonalnie, w całości, nie rozdzielając poszczególnych elementów, uwzględniając jego pole ochronne.



Nie wolno zmieniać kształtu, wyglądu i budowy logo.

Prawidłowe logo może być stosowane wyłącznie z uwzględnieniem przewidzianego pola ochronnego, w którym nie mogą znajdować się obce elementy. Prawidłowe logo ma zawsze zachowane stałe proporcje i układ wszystkich elementów, dokładnie określoną kolorystykę oraz jest używane wg właściwych zasad.

W wyjątkowych przypadkach dopuszczalne jest użycie samego akronimu.

Wyłącznie w szczególnych, przypadkach ściśle określonych, przedstawionych w tej księdze, dopuszcza się zastosowanie dopisku pod logotypem (patrz papier firmowy).

Nie wolno:



zmieniać budowy
i kolorystyki logo

PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI



używać logo z efektami

PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI



kadrować logo

PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI



zniekształcać logo

PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI



łączyć z logotypami innych
marek



3.5 Logotyp na tłach

ZASTOSOWANIE LOGO

Należy pamiętać, że kluczową kwestią jest czytelność logo.

Optymalnym i rekomendowanym tłem dla ekspozycji logo PAA w wersji podstawowej jest biel, a w wersji uzupełniającej kolory błękitu.

Uwaga! Nie wolno umieszczać logo na specjalnie w tym celu podłożonym wycinku bieli czy innego koloru.

Obok przedstawiono przykłady prawidłowej oraz nieprawidłowej ekspozycji logo na różnych tłach.

Optymalne



Dopuszczalne



≤ 25% K

Niedopuszczalne



Naczelną zasadą jest właściwa ekspozycja logo. Należy zwrócić uwagę, by było ono czytelne. Trzeba przy tym uważać, by nie przesadzić z jego wielkością - podstawą jest umiar i elegancja.

W zależności od wymogów kompozycji stosujemy logo pionowe, poziome bądź pośrednie, w odpowiedniej wersji językowej.

Jego wielkość określa szerokość czerwonej elipsy w akronimie (szerokość akronimu = a).

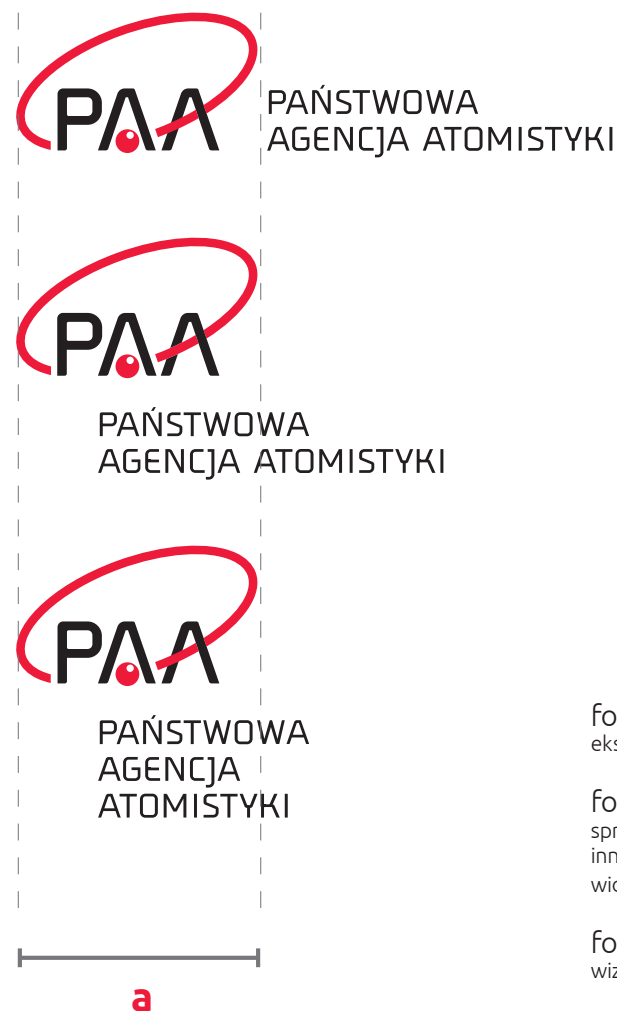
W tabeli obok podajemy rekomendowane wielkości akronimu w podstawowych materiałach. (jednakowe dla wszystkich wariantów logo)

W niektórych przypadkach, przedstawionych w tej księdze, jeśli wymaga tego logika ekspozycji, wielkość logo może ulec zmianie.

Ustawienie logotypu na visualu przedstawia poniższa tabela:

Wariant logotypu	Lewy górny róg	Lewy dolny róg	Prawy górny róg	Prawy dolny róg
Pionowy	✓	●	●	●
Poziomy	✓	●	✗	✗
Pośredni	✓	●	✗	✗

- ✓ optymalne i rekomendowane
- dopuszczalne w wyjątkowych przypadkach
- ✗ niedopuszczalne



szer. a = mm

format A4, A5 (gdy wymagana jest silna ekspozycja logo) 34,6

format A4, A5 (gdy ekspozycja logo jest sprawą drugorzędną lub gdy z uwagi na układ innych elementów mniejsze logo jest dobrze widoczne) 20,4

formaty bardzo małe (np. identyfikator, wizytówki) 22,6



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

BIULETYN

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA



3 (137) 2025

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

WYDAWCA

Państwowa Agencja Atomistyki

ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa

REDAKCJA

Maciej JURKOWSKI – redaktor naczelny

Elżbieta ZALEWSKA – redaktor prowadzący

Marek WOŹNIAK – redaktor techniczny

Jarosław CHILMON – członek redakcji

ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa

TEL. 22 628 94 39

FAX 22 621 37 86

E-MAIL biuletyn@paa.gov.pl

WWW. gov.pl/web/paa

RADA PROGRAMOWA

prof. dr hab. **Janusz JANECEK** – przewodniczący Rady

prof. dr hab. inż. **Andrzej CHMIELEWSKI** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Marek K. JANIĄK** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Eugeniusz DZIUK** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Leszek KRÓLICKI** – członek Rady

dr hab. **Agnieszka KORGUL** – członek Rady

dr **Tomasz NOWACKI** – członek Rady

e-ISSN 2353-9062

ISSN 0867-4752

DRUK

Print Profit Sp. z o.o., Koźmin 27, 59-900 Zgorzelec

Zdjęcie na okładce: Georgia Power Company

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 3 (137) 2025
Warszawa

Spis treści

- 5** Łukasz Koszuk
Problematyka wypalania prętów paliwowych z gadolinem w zestawach reaktora wodnego wrzącego – benchmark NEA OECD
- 20** Jacek Nowicki
Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami wysokoprężnymi w elektrowniach jądrowych. Część 1
- 38** Bartosz Skura
Strefy planowania awaryjnego dla jądrowej produkcji ciepła: wzorce z Chin, Finlandii i Szwajcarii a droga do dekarbonizacji polskich sieci ciepłowniczych
- 51** Michał Ochmański, Krzysztof Isajenko, Barbara Piotrowska
Radiological monitoring of the soil in the proximity of National Radioactive Waste Repository in Różan in years 2014–2023

Szanowni Państwo

W bieżącym numerze, w pierwszym z opublikowanych artykułów, **Łukasz Koszuk** omawia wyniki obliczeń, które uzyskał za pomocą pakietu kodów SCALE 6.2.2, wykonanych w ramach międzynarodowego benchmarku Agencji Energii Jądrowej NEA/OECD. Benchmark ten poświęcony jest walidacji kodów obliczeniowych do modelowania wypalania paliwa reaktora wodnego wrzącego zawierającego gadolin jako wypalającą się truciznę. Wyniki te wykazały bardzo dobrą zgodność z rezultatami innych uczestników benchmarku, poprawnie odwzorowując zarówno ogólne trendy, jak i wartości liczbowe ilustrujące zmiany współczynnika mnożenia neutronów i stężeń kluczowych izotopów gadolinu w funkcji głębokości wypalenia paliwa. Stanowi to kolejne potwierdzenie, że w Polsce dysponujemy odpowiednią wiedzą, narzędziami obliczeniowymi oraz sprawdzonymi w praktyce umiejętnościami ich zastosowania w analizach bezpieczeństwa reaktorów na najwyższym światowym poziomie.



W drugim artykule **Jacek Nowicki** podejmuje niezwykle istotny dla bezpieczeństwa elektrowni jądrowej (EJ) temat zapewnienia niezawodnych i odpowiednio wydajnych miejscowych zapasowych źródeł zasilania potrzeb własnych na wypadek poważnej awarii w systemie elektroenergetycznym, skutkującej całkowitym odcięciem zasilania elektrowni jądrowej z zewnętrznej sieci elektroenergetycznej w sytuacji odstawienia bloku, kiedy potrzeby własne nie są zasilane z własnego turbogeneratora (ang. *total blackout*). Artykuł zawiera szczegółowy, bogato ilustrowany opis techniczny agregatów prądotwórczych napędzanych silnikami wysokoprężnymi, stosowanych w elektrowniach jądrowych, które zapewniają niezawodne zasilanie prądem przemiennym kluczowych układów związanych z bezpieczeństwem jądrowym w takich sytuacjach. Autor wskazuje także odpowiednie normy bezpieczeństwa MAEA (*IAEA Safety Standards*) zawierające wymagania i wytyczne bezpieczeństwa, jak również przepisy prawne w Polsce i Stanach Zjednoczonych, regulujące te urządzenia.

Trzeci artykuł stanowi swoiste uzupełnienie informacji przedstawionych w jednym z poprzednich numerów biuletynu (nr 3(133)2024), dotyczących zasad i praktyki tworzenia stref planowania awaryjnego wokół elektrowni jądrowych w wybranych krajach z rozwiniętą energetyką jądrową. **Bartosz Skura** analizuje kwestię stref planowania awaryjnego (EPZ) wokół elektrowni jądrowych wykorzystywanych do produkcji ciepła sieciowego. Omawia trzy praktyczne modele regulacyjne: chiński, fiński i szwajcarski (wspomniany wyżej wcześniej artykuł nie dotyczył tych krajów), pokazując, jak odmienne systemy prawne łączą wymogi bezpieczeństwa radiologicznego z potrzebami miejskich sieci ciepłowniczych. Przeprowadzone studium wskazuje, iż zarówno duże bloki energetyczne, jak i małe reaktory modułowe (SMR) mogą zasilać sieci ciepłownicze bez konieczności zmiany podejścia do ustalania stref planowania awaryjnego, pod warunkiem że czynnik grzewczy pobierany jest z nieaktywnego obiegu.

Numer zamyka artykuł w wersji angielskiej, autorstwa **Michała Ochmańskiego, Krzysztofa Isajenko i Barbary Piotrowskiej**, w którym omówiono wyniki pomiarów skażeń gleby, wykonanych w latach 2014–2023 wokół Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie, w ramach systematycznego monitoringu radiacyjnego środowiska wokół tego obiektu.

Życzymy Państwu owocnej lektury,
Redaktor naczelny
Maciej Jurkowski

Problematyka wypalania prętów paliwowych z gadolinem w zestawach reaktora wodnego wrzącego – benchmark NEA OECD

On the depletion of gadolinium-bearing fuel rods in BWR assemblies: a study within the NEA/OECD benchmark

Łukasz Koszuk
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki uzyskane przez autora w ramach międzynarodowego benchmarku OECD/NEA pt. „Porównanie kodów obliczeniowych dla wypalania prętów paliwowych z gadolinem w zestawach reaktora wodnego wrzącego”, poświęconego walidacji kodów obliczeniowych do modelowania wypalania paliwa reaktora wodnego wrzącego (BWR) zawierającego gadolin jako wypalającą się truciznę. Głównym celem benchmarku była analiza zdolności różnych systemów obliczeniowych do precyzyjnego przewidywania ewolucji reaktywności, ze szczególnym uwzględnieniem tzw. piku reaktywności, który jest kluczowy dla analiz bezpieczeństwa krytycznościowego i koncepcji *burnup credit*. Obliczenia wykonano przy użyciu pakietu kodów SCALE 6.2.2 (sekwencja TRITON/NEWT) z wykorzystaniem 252-grupowej biblioteki danych jądrowych ENDF/B-VII.1. W pracy przedstawiono ewolucję współczynnika mnożenia k_{inf} , zmiany stężeń kluczowych izotopów gadolinu (Gd-155, Gd-157) oraz szczegółowe składy izotopowe aktynowców i produktów rozszczepienia dla różnych głębokości wypalania i trzech wariantów zawartości pary w wodzie (0%, 40%, 70%). Uzyskane wyniki wykazały bardzo dobrą zgodność z rezultatami innych uczestników benchmarku, poprawnie odwzorowując zarówno ogólne trendy, jak i wartości liczbowe. W podsumowaniu odniesiono się także do ogólnych wniosków z raportu OECD, wskazując na biblioteki danych jądrowych jako główne źródło rozbieżności w wynikach oraz na wciąż istniejące wyzwania w modelowaniu stężeń niektórych izotopów.

Słowa kluczowe: Reaktor BWR, gadolin, wypalająca się trucizna, wypalanie paliwa bezpieczeństwo krytycznościowe, *burnup credit*, benchmark OECD/NEA, kod SCALE.

Abstract: This paper presents the results obtained by the author within the framework of the OECD/NEA international benchmark: “Code comparison for depletion of gadolinium-bearing fuel rods in Boiling Water Reactor assemblies”, dedicated to the validation of computer codes for modelling the burnup of Boiling Water Reactor (BWR) fuel containing gadolinium as a burnable absorber. The main objective of the benchmark was to analyze the capability of various computational systems to accurately predict the evolution of reactivity, with a particular focus on the „reactivity peak” phenomenon, which is crucial for criticality safety analyses and the burnup credit concept. The calculations were performed using the SCALE 6.2.2 code package (TRITON/NEWT sequence) with the 252-group ENDF/B-VII.1 nuclear data library. The paper presents the evolution of the k_{inf} multiplication factor, changes in the concentrations of key gadolinium isotopes (Gd-155, Gd-157), and detailed isotopic compositions of actinides and fission products for various burnup depths and three different water void fractions (0%, 40%, 70%). The obtained results showed very good agreement with the results of other benchmark participants, correctly reproducing both the general trends and numerical values. The summary also refers to the general conclusions from the OECD report, identifying nuclear data libraries as the main source of discrepancies in the results and highlighting the remaining challenges in modeling the concentrations of certain isotopes.

Keywords: BWR reactor, gadolinium, burnable absorber, fuel burnup, criticality safety, burnup credit, OECD/NEA benchmark, SCALE code.

1. Wstęp

Współczesne zestawy paliwowe stosowane w reaktorach wodnych wrzących (*Boiling Water Reactor*, BWR) często wykorzystują tlenek gadolinu (Gd_2O_3) jako wypalający się absorbent neutronów (tzw. wypalająca się trucizna reaktorowa). Jego obecność prowadzi do złożonego zachowania reaktywności paliwa w trakcie eksploatacji. Gwałtowne wypalanie się silnie absorbujących izotopów gadolinu powoduje, że reaktywność zestawu paliwowego początkowo rośnie, osiągając maksimum przy relatywnie niskim wypaleniu (zazwyczaj poniżej 20 GWd/MTU), a następnie systematycznie maleje. Dokładne przewidywanie charakterystyk tego piku reaktywności jest fundamentalnym wyzwaniem w analizach bezpieczeństwa krytycznościowego, szczególnie w kontekście wdrażania koncepcji *burn-up credit*, (BUC) dla wypalonego paliwa.

W celu walidacji i porównania zdolności systemów obliczeniowych do modelowania tego typu złożonych zjawisk, Nuclear Energy Agency OECD (NEA), poprzez swoją grupę roboczą WPNCs (*Working Party on Nuclear Criticality Safety*), organizuje międzynarodowe testy porównawcze (benchmarki). Bezpośrednią motywacją do zorganizowania benchmarku Fazy IIB – „*Code Comparison for Depletion of Gadolinium-Bearing Fuel Rods in Boiling Water Reactor Assemblies*” [1] były wyniki wcześniejszej Fazy IIIC, które wykazały znaczące rozbieżności w rezultatach, wynikające z różnic w opcjach modelowania wybieranych przez uczestników. W odpowiedzi, grupy roboczej EGUNF (*Expert Group on Used Nuclear Fuel criticality*) zaprojektowała Fazę IIB z kluczowym celem: wyizolowaniem i oceną różnic wynikających bezpośrednio z zastosowanych metod obliczeniowych i bibliotek danych jądrowych. Aby to osiągnąć, w specyfikacji benchmarku, opartego na geometrii zestawu paliwowego 9x9 „STEP-3”, przyjęto rygorystyczne podejście preskryptywne. Narzucono w nim wszystkim uczestnikom ujednolicony, szczegółowy model pręta z gadolinem (podział na 10 koncentrycznych pierścieni) i zdefiniowano precyzyjne kroki wypalenia, koncentrując analizę na kluczowym dla bezpieczeństwa obszarze piku reaktywności.

Niniejszy artykuł ma na celu prezentację oraz szczegółową analizę wyników benchmarku Fazy IIB uzyskanych przez autora. Praca dokumentuje zastosowanie wybranej metodyki obliczeniowej do rozwiązania złożonego problemu wypalania paliwa BWR z gadolinem, zgodnie ze ścisłą specyfikacją OECD/NEA. Przedstawione rezultaty i wnioski stanowią wkład w dokumentację i zrozumienie zachowania tego typu modeli, a sam benchmark jest cennym narzędziem w rozwoju metod analizy bezpieczeństwa wypalonego paliwa.

2. Wypalające się trucizny reaktorowe

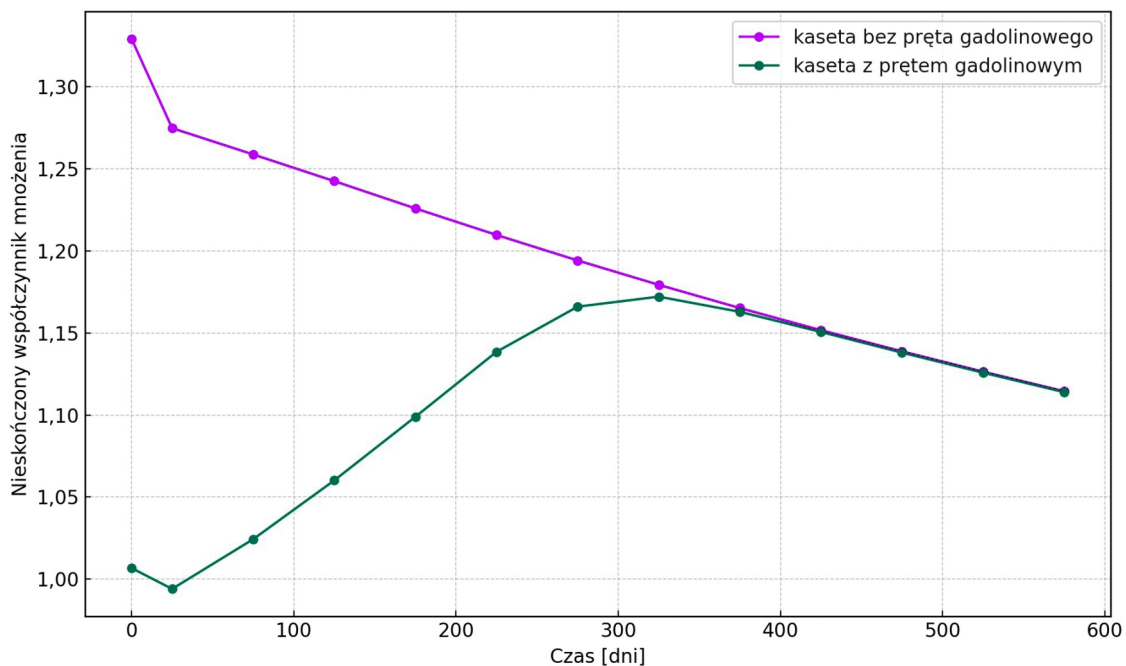
Wypalająca się trucizna reaktorowa (lub wypalający się absorbent) to materiał charakteryzujący się dużym przekrojem czynnym na absorpcję neutronów, który jest celowo wprowadzany do rdzenia reaktora jądrowego. Głównym celem stosowania wypalających się trucizn jest kompensacja nadmiarowej reaktywności świeżego paliwa na początku cyklu pracy reaktora. Pozwala to na bezpieczne załadowanie paliwa o wyższym wzbogaceniu, co z kolei umożliwia wydłużenie kampanii paliwowej (czasu pracy reaktora pomiędzy wymianami paliwa) oraz przyczynia się do bardziej równomiernego rozkładu mocy w rdzeniu.

Mechanizm działania wypalającej się trucizny polega na tym, że w trakcie pracy reaktora, pod wpływem strumienia neutronów, materiał absorbujący ulega transmutacji w izotopy o znacznie mniejszych przekrojach czynnych na absorpcję neutronów lub w izotopy stabilne. W ten sposób trucizna „wypala się”, a jej negatywny wkład do reaktywności maleje. Proces ten powoduje stopniowy wzrost reaktywności, kompensując w pewnym stopniu spadek reaktywności wynikający z wypalania się materiału rozszczepialnego i gromadzenia się absorbujących neutrony produktów rozszczepienia. Na rys. 1 pokazano ten efekt wykreślając zależność nieskończonego współczynnika mnożenia przykładowej kasety paliwowej w dwóch konfiguracjach: z oraz bez pręta gadolinowego w zależności od czasu wypalania. Rysunek ma wyłącznie ilustracyjny charakter: pokazuje jakościowy efekt obniżenia reaktywności (spadek k_{∞}) po dodaniu gadolinu do kasety paliwowej.

Do najczęściej stosowanych materiałów jako wypalające się absorbenty należą związki gadolinu (Gd_2O_3), a także erbu (Er_2O_3), dysprozu czy hafnu [2]. Wybór konkretnego materiału zależy od typu reaktora, projektu paliwa oraz pożądanej charakterystyki wypalania. W reaktorach wodnych zarówno ciśnieniowych jak i wrzących dominującym i najpowszechniej stosowanym wypalającym się absorbentem jest tlenek gadolinu, dodawany do wybranych prętów paliwowych.

3. Tlenek Gadolinu (Gd_2O_3)

Popularność tlenku gadolinu jako wypalającego się absorbenta wynika z unikalnej kombinacji jego właściwości. Kluczową cechą gadolinu są bardzo duże przekroje czynne na absorpcję neutronów termicznych dla dwóch jego naturalnych izotopów: Gd-155 i Gd-157. Wartość przekroju czynnego na wychwyt neutronu (σ_a) dla neutronów termicznych (0,0253 eV) dla Gd-157 wynosi około 254 000 barnów, a dla Gd-155 około 61 000 barnów [3]. Wartości te są o kilka rzędów wielkości wyższe niż dla materiałów rozszczepialnych (np. ~580 barnów dla U-235) czy nawet innych silnych trucizn reaktorowych. To właśnie ta właści-



Rys. 1. Zależność nieskończonego współczynnika mnożenia względem czasu wypalania dla kasety paliwowej w dwóch konfiguracjach: z oraz bez pręta gadolinowego. Widoczny jest charakterystyczny pik reaktywności powstały w obecności gadolinu w paliwie jądrowym (źródło: opracowanie własne autora).

Fig. 1. Dependence of the infinite multiplication factor on the burn-up time for the fuel assembly in two configurations: with and without a gadolinium rod. A characteristic reactivity peak is visible, caused by the presence of gadolinium in the nuclear fuel (source: author's own work).

wość sprawia, że nawet niewielkie ilości gadolinu mogą skutecznie zmniejszać lokalny strumień neutronów i kontrolować reaktywność.

Skład izotopowy gadolinu naturalnego jest istotny z punktu widzenia skuteczności absorpcji: dominują izotopy parzyste o mniejszych przekrojach czynnych (Gd-158 około 24,84%, Gd-160 około 21,86%, Gd-156 około 20,47%), natomiast główne absorbery to Gd-155 około 14,80% i Gd-157 około 15,65% (pozostałe: Gd-154 około 2,18%, Gd-152 około 0,20%) [6]. Zatem ~30% gadolinu naturalnego stanowią izotopy o bardzo dużych przekrojach czynnych, które odpowiadają za szybkie „wypalanie” dodatku gadolinowego.

Poza właściwościami jądrowymi, Gd_2O_3 posiada szereg zalet fizykochemicznych:

- W temperaturach procesu spiekania pastylek UO_2 tlenem gadolinu (Gd_2O_3) dobrze rozpuszcza się w matrycy UO_2 , dzięki czemu możliwe jest uzyskanie jednorodnego dodatku absorbera. [4].
- Tlenek gadolinu cechuje się wysoką temperaturą topnienia (około 2420°C) oraz stabilnością chemiczną i radiacyjną w warunkach pracy reaktora. Co niezwykle istotne, w wyniku absorpcji neutronów nie generuje on znaczących ilości gazowych produktów transmutacji [5]. Odbyna się to w przeciwieństwie np. do boru, którego izotop B-10 w wyniku reakcji (n, α) produkuje hel, co może prowadzić do wzrostu ciśnienia w pręcie paliwowym i pęcznienia paliwa.

Niemniej jednak, stosowanie gadolinu ma również pewne wady. Po wypaleniu głównych absorbentów (Gd-155 i Gd-157), pozostałe izotopy (zwłaszcza parzyste: Gd-154,

Gd-156, Gd-158, Gd-160) mają znacznie mniejsze przekroje czynne i pozostają w paliwie jako tzw. „trucizna resztkowa” (*residual poison*). Może to negatywnie wpływać na ekonomię neutronów pod koniec cyklu pracy paliwa, obniżając osiągalne wypalenie [4].

3.1. Wyzwania w modelowaniu wypalania paliwa z gadolinem

Symulacja procesu wypalania paliwa jądrowego jest zadaniem złożonym, wymagającym jednoczesnego rozwiązania równania transportu neutronów oraz układu równań różniczkowych opisujących ewolucję składu izotopowego paliwa w czasie. Obecność gadolinu, ze względu na jego unikalne właściwości, potęguje tę złożoność i wprowadza szereg wyzwań, które muszą być precyzyjnie uwzględnione w kodach obliczeniowych. Chociaż poniższe wyzwania są omawiane w kontekście gadolinu, wiele z nich ma charakter ogólny i dotyczy modelowania dowolnego materiału o bardzo silnych właściwościach absorpcyjnych.

Można zidentyfikować następujące problemy w przypadku modelowania wypalania paliwa z bardzo silnym absorberem neutronów, w szczególności gadolinu.

a) Bardzo duże przekroje czynne na absorpcję neutronów izotopów Gd-155 i Gd-157

Ekstremalnie wysokie przekroje czynne na wychwyt neutronów termicznych dla dwóch jego naturalnych izotopów: Gd-155 i Gd-157, których wartości podane w punkcie 3, są jedną z głównych trudności w modelowaniu paliwa z gadolinem. Dlatego, aby dokładnie śledzić szybkie

zmiany koncentracji izotopów gadolinu i wynikające z nich zmiany reaktywności (zwłaszcza w okolicy pik reaktywności), obliczenia wypaleniowe muszą być prowadzone z użyciem małych kroków czasowych (lub inaczej – kroków wypalania).

b) Silne efekty samoprzesłaniania neutronów

Bezpośrednią konsekwencją bardzo dużych przekrojów czynnych gadolinu są silne efekty samoprzesłaniania neutronów (z ang. *self-shielding*). Oznacza to, że neutrony termiczne wnikające do obszaru paliwa zawierającego gadolin są bardzo efektywnie absorbowane w jego zewnętrznych warstwach. W rezultacie, strumień neutronów docierający do wewnętrznych części pręta paliwowego jest znacznie osłabiony (przesłonięty) w porównaniu do strumienia na jego powierzchni. Efekt ten znacząco zmniejsza efektywną szybkość reakcji absorpcji w gadolinie w porównaniu do wartości, która zostałaby obliczona przy założeniu jednorodnego strumienia neutronów w całej objętości pręta. Z tego powodu [7]:

- standardowe podejścia oparte na teorii dyfuzji mogą być niewystarczające. Wymagane jest stosowanie metod transportu neutronów o wysokiej rozdzielczości, takich jak metoda charakterystyk (MOC) lub metody Monte Carlo, które są w stanie lepiej odwzorować strome gradienty strumienia w obecności silnych absorberów;
- proste uśrednianie właściwości neutronowych w obrębie komórki obliczeniowej może prowadzić do znacznych błędów, jeśli efekty samoprzesłaniania nie są jawnie uwzględnione. Zatem homogenizacja materiałów w komórce paliwowej nie ma tutaj zastosowania;
- konieczne jest stosowanie wielogrupowych bibliotek przekrojów czynnych, które uwzględniają efekty samoprzesłaniania lub metod dynamicznego generowania efektywnych przekrojów czynnych „w locie” podczas obliczeń.

c) Szybkie, niejednorodne przestrzenne wypalanie

Niejednorodne przestrzenne wypalanie się gadolinu, często określane jako efekt „cebulowy” (*onion peeling effect*), jest bezpośrednią konsekwencją silnego samoprzesłaniania. Gadolin nie wypala się równomiernie w całej objętości pręta paliwowego. Proces ten zachodzi warstwowo, rozpoczynając od zewnętrznych części pastylki, które są wystawione na największy strumień neutronów. Te zewnętrzne warstwy szybko tracą Gd-155 i Gd-157, stając się bardziej „przezroczyste” dla neutronów, co pozwala im penetrować głębiej i wypalać kolejne warstwy. W ten sposób tworzy się front wypalania, który stopniowo przesuwają się od powierzchni w kierunku centrum pręta.

Ten wysoce niejednorodny proces stawia poważne wymagania przed kodami obliczeniowymi:

- aby dokładnie odwzorować strome gradienty koncentracji izotopów gadolinu, kody obliczeniowe muszą wykorzystywać bardzo drobną dyskretyzację przestrzenną

w obszarach z gadolinem. W praktyce polega to na podziale pręta paliwowego na szereg współosiowych pierścieni (stref cylindrycznych), dla których osobno śledzone jest wypalenie [8];

- modele traktujące cały pręt gadolinowy jako jednorodną strefę mogą prowadzić do istotnych błędów, np. przeszacowania szybkości zużycia absorbera na początku cyklu. To z kolei skutkuje odchyleniami w obliczonej reaktywności – model może wskazywać pik reaktywności zbyt wcześnie, podczas gdy w rzeczywistości część absorbera wciąż pozostaje wewnątrz pręta.
- połączenie wymogu stosowania zaawansowanych metod transportu, drobnej siatki przestrzennej i małych kroków czasowych (wypalania) prowadzi do bardzo długich czasów symulacji.

d) Wrażliwość na historię napromieniania i niedobór danych walidacyjnych

Szybkość wypalania gadolinu jest wrażliwa nie tylko na projekt paliwa, ale także na szczegółową historię napromieniania i lokalne parametry pracy reaktora, takie jak temperatura paliwa, gęstość moderatora (udział pary w BWR) czy obecność prętów kontrolnych [9]. Złożone, sprzężone efekty tych parametrów dodatkowo komplikują analizy.

Największym ograniczeniem dla doskonalenia narzędzi symulacyjnych jest jednak brak wystarczającej ilości wysokiej jakości danych eksperymentalnych. Dotyczy to w szczególności składu izotopowego wypalonego paliwa BWR z gadolinem, zwłaszcza w zakresie małych głębokości wypalania, gdzie występuje pik reaktywności [10]. Istniejące dane często nie obejmują precyzyjnych pomiarów stężeń resztkowych izotopów gadolinu. Oznacza to, że nawet jeśli kody są teoretycznie wykorzystywane do modelowania złożonych zjawisk, pewność co do dokładności ich predykcji jest ograniczona przez niedobór danych do porównań i walidacji.

4. Skutki pik reaktywności i wymagania dla analiz bezpieczeństwa

Obecność gadolinu w paliwie jądrowym prowadzi do charakterystycznego, niemonotonicznego przebiegu zmian reaktywności w funkcji wypalania. W przeciwieństwie do paliwa bez wypalających się absorbentów, gdzie reaktywność generalnie maleje, tutaj obserwuje się początkowy wzrost. Dzieje się tak, ponieważ tempo transmutacji izotopów Gd-155 i Gd-157 jest początkowo znacznie szybsze niż tempo wypalania materiału rozszczepialnego. W punkcie, gdy większość efektywnych izotopów gadolinu zostanie wypalona, krzywa reaktywności osiąga maksimum, zwane „pikiem reaktywności”. Po jego osiągnięciu, dominującym efektem staje się już ubytek materiału rozszczepialnego i dalsze gromadzenie produktów rozszczepienia, co prowadzi do systematycznego spadku reaktywności.

Zjawisko piku reaktywności, choć zachodzi wyłącznie w trakcie pracy reaktora, ma fundamentalne znaczenie dla późniejszych analiz bezpieczeństwa krytycznościowego, np. dla basenów przechowawczych czy pojemników transportowych [11]. Analizy te muszą opierać się na konserwatywnym założeniu dotyczącym stanu paliwa. Ponieważ w przechowalniku mogą znaleźć się zestawy o różnym stopniu wypalenia, należy zidentyfikować najbardziej reaktywny skład izotopowy, jaki paliwo mogło osiągnąć w dowolnym momencie swojego cyklu życia w reaktorze. Dla paliwa jądrowego z gadolinem, ten najbardziej reaktywny stan nie występuje ani na początku (gdy gadolin tłumi reaktywność), ani na końcu cyklu (gdy paliwo jest mocno wypalone). Występuje on dokładnie w momencie osiągnięcia piku reaktywności. Z tego powodu, precyzyjne przewidywanie składu izotopowego paliwa w tym konkretnym punkcie jest warunkiem koniecznym dla bezpiecznego i wiarygodnego wdrożenia tzw. koncepcji *burn-up credit*, polegającej na podejściu w analizach bezpieczeństwa krytyczności, które uwzględnia zmniejszenie reaktywności wypalonego paliwa jądrowego na skutek zmian jego składu po eksploatacji reaktora. Błędne obliczenie składu nuklidów w punkcie piku – na przykład niedoszacowanie pozostałości materiału rozszczepialnego lub przeszacowanie stężenia trutyczyn – doprowadziłoby do nieprawidłowej (niekonserwatywnej) oceny współczynnika mnożenia neutronów dla systemów przechowywania i transportu [10].

Podsumowując, chociaż pik reaktywności jest zjawiskiem reaktorowym, definiuje on najbardziej ograniczający przypadek dla analiz bezpieczeństwa wypalonego paliwa. Wyzwanie nie polega na modelowaniu samego piku jako

procesu, lecz na precyzyjnym obliczeniu składu izotopowego paliwa w tym jednym, krytycznym punkcie jego historii. Wiarygodność tych obliczeń zależy bezpośrednio od jakości kodów symulacyjnych i użytych danych jądrowych [12]. Dlatego międzynarodowe benchmarki, takie jak ten omawiany w niniejszej pracy, odgrywają kluczową rolę w weryfikacji i walidacji narzędzi obliczeniowych niezbędnych do sprostania temu wyzwaniu.

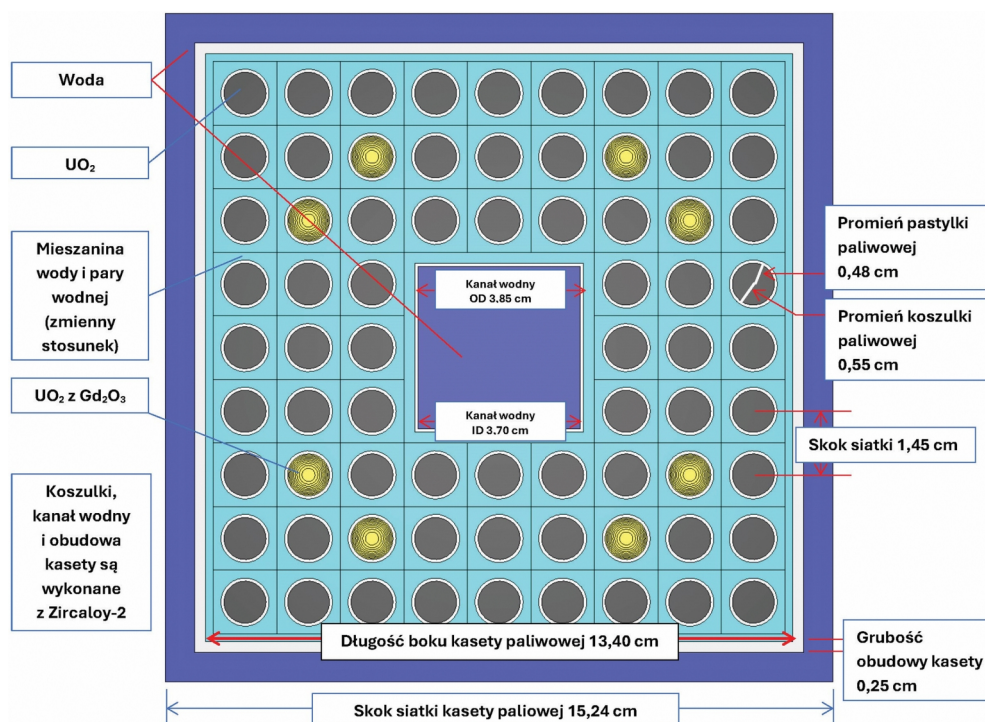
5. Specyfikacja benchmarku

Opisy specyfikacji, tabel i rysunków w niniejszym rozdziale stanowią tłumaczenie z raportu OECD/NEA [1].

A) Geometria

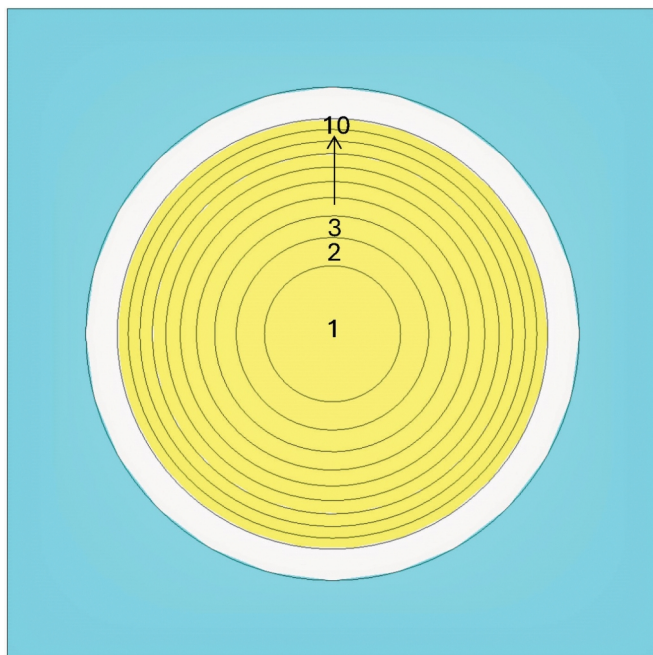
Geometrycznie układ składa się z pojedynczego zestawu paliwowego 9 9 z odbiciem, jako warunkiem brzegowym. W całym zestawie jest jednakowy skok siatki 1,45 cm. W części centralnej zestawu znajduje się kanał wodny o przekroju kwadratowym, zawierający wodę niezawierającą pary. Zarówno kanał wodny, jak i kanały prętów paliwowych są modelowane jako obszary kwadratowe o jednakowej wysokości. Geometria zestawu i pręta paliwowego pokazana jest na rysunku 2.

Podstawowym celem benchmarku jest dalsze zbadanie różnic w przewidywanych gęstościach jądrowych gadolinu w wypalonym paliwie BWR i ich wpływ na krytyczność. Benchmark narzuca sposób modelowania gadolinu, aby ograniczyć różnice wyników spowodowane różnicami



Rys. 2. Schemat 2D kasety paliwowej użytej w benchmarku.

Fig. 2. 2D diagram of the fuel assembly used in the benchmark.



Rys. 3. Szczegóły modelowania pręta Gd_2O_3 .

Fig. 3. Details of Gd_2O_3 rod modelling.

w modelowaniu przez różnych uczestników. Każdy pręt z gadolinem modelowany jest za pomocą 10 koncentrycznych pierścieni o jednakowych powierzchniach przekroju, jak pokazano na rysunku 3. Każdy z 10 obszarów w pręcie z gadolinem ma być rozważany oddzielnie przy wypalaniu, z zachowaniem numeracji jak na rysunku 3 i w tabeli 1. Pierścienie numerowane są 1÷10 od środka na zewnątrz. Rozpatrywana kasetka zawiera 8 prętów z gadolinem w pozycjach pokazanych na rysunku 2.

B) Materiały

Dla uproszczenia przyjęto, że pręty paliwowe nie zawierające gadolinu, mają jednakowe wzbogacenie 4,0 wt% U-235. Wszystkie pręty z gadolinem położone są syme-

Tabela 1. Wymiary pierścieni pręta gadolinowego [1].

Table 1. Dimensions of gadolinium rod rings.

Numer pierścienia	Zewnętrzny promień [cm]
1	0,151789
2	0,214663
3	0,262907
4	0,303579
5	0,339411
6	0,371806
7	0,401597
8	0,429325
9	0,455368
10	0,48

trycznie i mają jednakowy skład. Gęstości jądrowe dla świeżego paliwa i skład absorberów podane są w tabeli 2. Temperatura paliwa wynosi 900K. Koszulki, kanał wodny i obudowa kasety są wykonane ze stopu Zircaloy-2. Temperatura materiałów innych niż paliwo wynosi 600K i jest zgodna z temperaturami wielu bibliotek przekrojów czynnych dla ciągłego rozkładu energii. Rozpatrywane są trzy przypadki udziału przestrzeni parowych w wodzie otaczającej kanały paliwowe: 0%, 40% i 70%. Gęstości jądrowe Zircaloy'u i wody podane są w tabeli 3.

Tabela 2. Skład izotopowy paliwa i absorbera [1].

Table 2. Isotopic composition of fuel and absorber.

Materiał	Izotop/Pierwiastek	Gęstość jądrowa [atom/b-cm]
UO ₂	U-234	$8,4700 \times 10^{-6}$
	U-235	$9,4763 \times 10^{-4}$
	U-238	$2,2447 \times 10^{-2}$
	O	$4,6807 \times 10^{-2}$
UO ₂ + Gd ₂ O ₃	U-234	$6,8396 \times 10^{-6}$
	U-235	$7,6521 \times 10^{-4}$
	U-238	$2,1460 \times 10^{-2}$
	O	$4,6225 \times 10^{-2}$
	Gd-154	$2,5654 \times 10^{-5}$
	Gd-155	$1,7417 \times 10^{-4}$
	Gd-156	$2,4089 \times 10^{-4}$
	Gd-157	$1,8417 \times 10^{-4}$
	Gd-158	$2,9232 \times 10^{-4}$
	Gd-160	$2,5725 \times 10^{-4}$

Tabela 3. Skład izotopowy wody i stopu Zircaloy [1].

Table 3. Isotopic composition of water and Zircaloy.

Materiał	Pierwiastek	Gęstość jądrowa [atoms/b-cm]
Woda (0% pary wodnej)	H	$4,3417 \times 10^{-2}$
	O	$2,1708 \times 10^{-2}$
Woda z 40% zawartością pary wodnej	H	$2,7998 \times 10^{-2}$
	O	$1,3999 \times 10^{-2}$
Woda z 70% zawartością pary wodnej	H	$1,6434 \times 10^{-2}$
	O	$8,2170 \times 10^{-3}$
Zircaloy-2	Sn	$4,9797 \times 10^{-4}$
	Fe	$9,1782 \times 10^{-5}$
	Cr	$7,5861 \times 10^{-5}$
	Ni	$4,0314 \times 10^{-5}$
	Zr	$4,2465 \times 10^{-2}$

C) Warunki wypalania

Moc kasety paliwowej wynosi 25,0 MW/MTU (W/gU) przez cały czas wypalania, rozumiany jako pojedynczy okres bez okresów przerw. Kroki wypaleniowe wybrano tak, aby: spełniały następujące warunki: pierwsze dwa kroki to 0,1 i 0,4 GWd/MTU, po których następuje 39 kroków po 0,5 GWd/MTU, aby uzyskać wypalenie końcowe 20 GWd/MTU, przy czym uczestnik może dodać dodatkowe kroki, jeżeli uzna to za potrzebne dla większej dokładności.

W rezultacie do obliczeń wybrano 61 kroków (podanych w tabeli 4) tak, aby:

1. uzyskać wystarczająco dokładne wyniki dla większości obliczeń kodami,

2. uzyskać precyzyjne oszacowanie zmian reaktywności w obszarze wypalania, w którym występuje maksimum reaktywności.

Stosownie do warunków benchmarku obliczenia zostały wykonane dla następujących udziałów przestrzeni parowych w wodzie znajdującej się w kanałach prętów paliwowych 0%, 40% i 70%, używając gęstości zawartych w tabeli 3. Woda w kanale centralnym i na zewnątrz kasety paliwowej we wszystkich przypadkach nie zawiera przestrzeni parowych (0%). Przyjmuje się, że temperatury paliwa, moderatora i materiałów konstrukcyjnych są takie same we wszystkich trzech przypadkach.

Tabela 4. Kroki wypaleniowe [1].

Table 4. Depletion steps.

Nr Kroku	Długość ^a	Skumulowana głębokość wypalenia ^b	Nr Kroku	Długość ^a	Skumulowana głębokość wypalenia ^b
1	0,10	0,10	32	0,25	7,75
2	0,15	0,25	33	0,25	8,00
3	0,25	0,50	34	0,25	8,25
4	0,25	0,75	35	0,25	8,50
5	0,25	1,00	36	0,25	8,75
6	0,25	1,25	37	0,25	9,00
7	0,25	1,50	38	0,25	9,25
8	0,25	1,75	39	0,25	9,50
9	0,25	2,00	40	0,25	9,75
10	0,25	2,25	41	0,25	10,0
11	0,25	2,50	42	0,5	10,5
12	0,25	2,75	43	0,5	11,0
13	0,25	3,00	44	0,5	11,5
14	0,25	3,25	45	0,5	12,0
15	0,25	3,50	46	0,5	12,5
16	0,25	3,75	47	0,5	13,0
17	0,25	4,00	48	0,5	13,5
18	0,25	4,25	49	0,5	14,0
19	0,25	4,50	50	0,5	14,5
20	0,25	4,75	51	0,5	15,0
21	0,25	5,00	52	0,5	15,5
22	0,25	5,25	53	0,5	16,0
23	0,25	5,50	54	0,5	16,5
24	0,25	5,75	55	0,5	17,0
25	0,25	6,00	56	0,5	17,5
26	0,25	6,25	57	0,5	18,0
27	0,25	6,50	58	0,5	18,5
28	0,25	6,75	59	0,5	19,0
29	0,25	7,00	60	0,5	19,5
30	0,25	7,25	61	0,5	20,0
31	0,25	7,50			

^a Długość kroku wypaleniowego podana jest w GWd/MTU.

^b Skumulowana głębokość wypalenia podana jest w GWd/MTU.

Projekt kasety używany w benchmarku ma kilka symetrii (połówkowa, 1/4 i 1/8) i każda z nich może być zastosowana w wykonywanych obliczeniach.

D) Wymagane wyniki obliczeń

Następujące wyniki były wymagane od wszystkich uczestników benchmarku:

- Nieskończony współczynnik mnożenia k -inf dla układu 2-D dla świeżego paliwa oraz po każdym kroku wypaleniowym, bez żadnego okresu przechowywania paliwa bez naświetlania.
- Gęstości jądrowe izotopów z tabeli 5 mają być podane co 2 GWd/MTU
 - bez okresu przechowywania,
 - z 5-letnim okresem przechowywania.
- Uśrednione gęstości jądrowe aktywności i produktów rozszczepienia mają być podane we wszystkich prętach paliwowych niezawierających gadolinu. Gęstości jądrowe izotopów gadolinu mają być podane dla każdego pierścienia w prętach z gadolinem. Wymagane kombinacje wypalania i okresu składowania zebrano w tabeli 6. Wypalanie prętów z gadolinem powinno być również podane dla każdego z dziesięciu kroków z tabeli 6 w celu oszacowania potencjalnych różnic w wypalaniu, spowodowanych modelowaniem absorpcji w gadolinie.

Tabela 5. Izotopy, jakie należy zareportować [1].

Table 5. Isotopes to report.

Aktynowce	U-234,235,236,238, Np-237, Pu-238,239,240,241,242, Am-241
Produkty rozszczepienia	Tc-99, Rh-103, Xe-131, Eu-155, Cs-133, Nd-143,148, Sm-147, 149,151,152
Gd	Gd-154,155,156,157,158,160

Tabela 6. Czas wypalania i czas przechowywania do zareportowania [1].

Table 6. Burnup and decay times for reporting.

Głębokość wypalania [GWd/MTU]	Okres przechowywania [lata]
2	0 i 5
4	0 i 5
6	0 i 5
8	0 i 5
10	0 i 5
12	0 i 5
14	0 i 5
16	0 i 5
18	0 i 5
20	0 i 5

Arkusz kalkulacyjny w Excelu został dostarczony w celu ułatwienia przesyłania wyników. Uczestnicy byli proszeni o dostarczenie również ogólnych informacji m.in. informacji istotnych z punktu widzenia porównywania wyników pomiędzy uczestnikami, tj.:

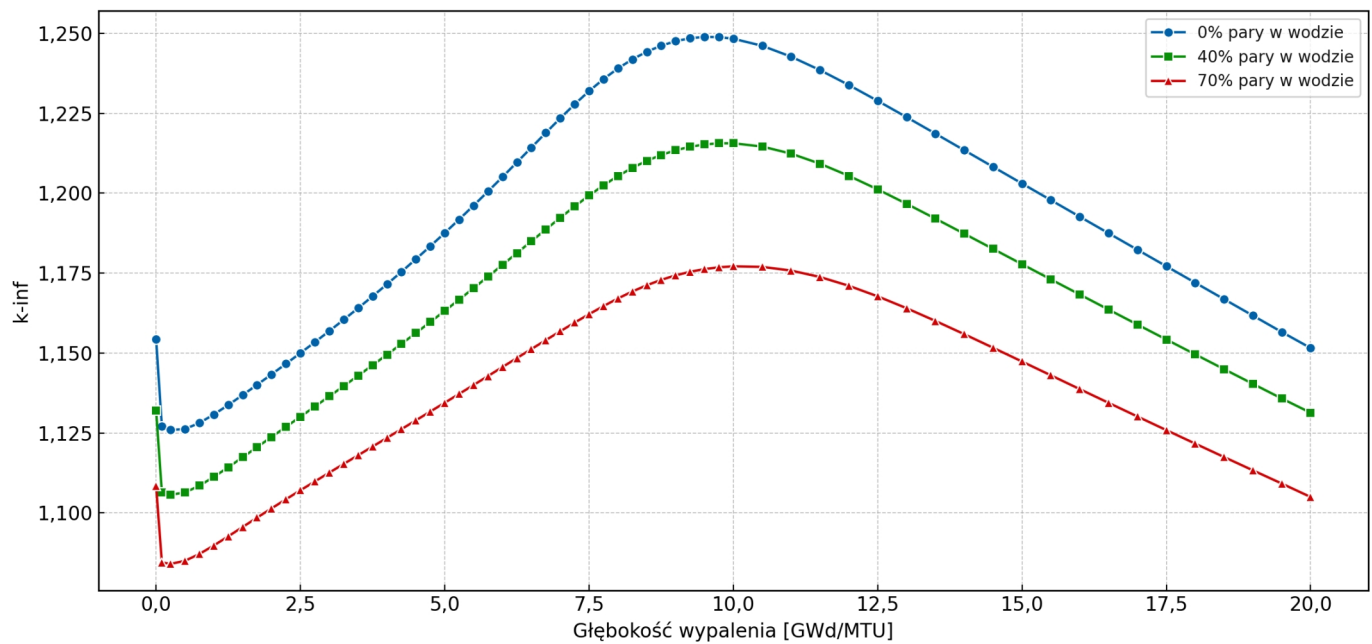
- Nazwa używanego kodu,
- Metoda obliczeń widmowych (np. Monte Carlo, S_n , MOC),
- Metoda obliczeń wypaleniowych (np. *predictor-corector*, tylko *predictor*, iteracyjna metoda *predictor-corector*, metoda punktu środkowego,
- Biblioteka danych jądrowych (np. ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1),
- Liczba grup energetycznych (lub ciągły rozkład energii strumienia neutronów),
- Jaka część kasety była modelowana (np. cała kasetka, pół kasety, itd.),
- Kryterium zbieżności (np. źródła i strumień lub k_{eff} i wartość),
- Opcjonalnie opis kodu.

Wyniki zaprezentowane w niniejszej pracy pochodzą ze zgłoszenia SC20 (Polska) w ramach benchmarku OECD/NEA.

6. Wyniki

Obliczenia wypaleniowe dla analizowanej kasety paliwowej reaktora BWR zostały przeprowadzone przy użyciu sekwencji obliczeniowej TRITON z pakietu kodów SCALE w wersji 6.2.2 [13]. Pakiet SCALE, rozwijany przez Oak Ridge National Laboratory, jest zintegrowanym zestawem narzędzi do modelowania i analizy bezpieczeństwa systemów jądrowych. W ramach sekwencji TRITON, do rozwiązania równania transportu neutronów wykorzystano dwuwymiarowy solver deterministyczny NEWT, bazujący na metodzie rzędnych dyskretnych (S_n). Sprzężenie obliczeń transportu z obliczeniami wypaleniowymi realizowano za pomocą metody predyktor-korektor.

Model obliczeniowy został opracowany zgodnie ze specyfikacją benchmarku [1]. Zamodelowano pełny układ kasety paliwowej 9 9, bez stosowania uproszczeń symetrii, co było jedną z możliwych dróg modelowania przyjętą przez uczestników. Zgodnie z założeniami benchmarku dla wyznaczenia nieskończonego współczynnika mnożenia (k -inf), na zewnętrznych granicach kasety zastosowano odbijające warunki brzegowe, symulujące nieskończoną siatkę identycznych kaset. Kluczowym elementem specyfikacji było szczegółowe modelowanie prętów paliwowych z gadolinem, które podzielono na dziesięć koncentrycznych stref o równej powierzchni w celu precyzyjnego śledzenia wypalania się truciźny. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem 252-grupowej biblioteki danych neutronowych opartej na ENDF/B-VII.1, dostarczanej z pakietem SCALE. Zestaw raportowanych wielkości (k -inf, gęstości



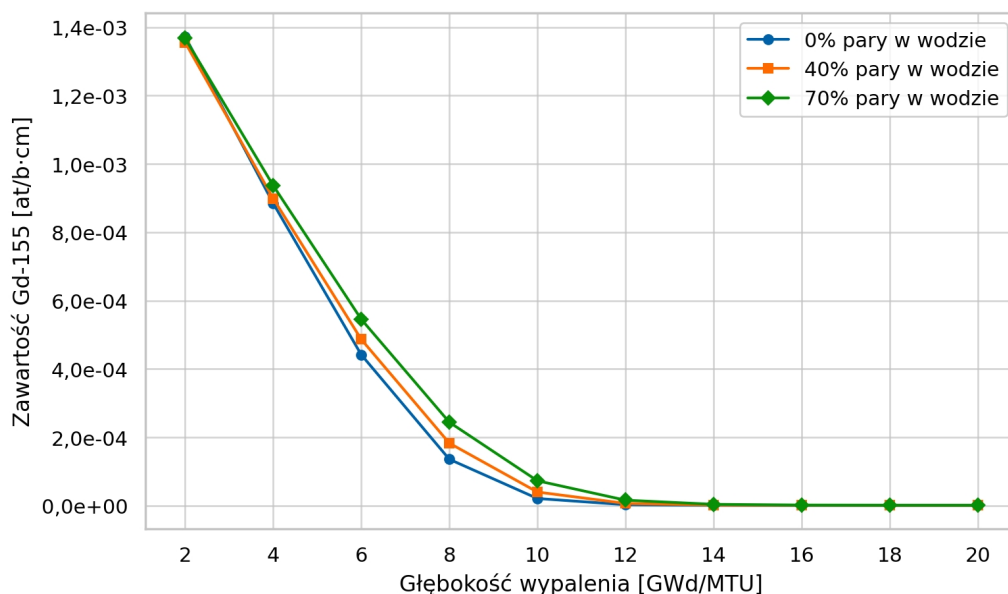
Rys. 4. Zmiany współczynnika mnożenia k_{inf} w funkcji wypalenia dla trzech analizowanych wariantów zawartości pary w wodzie.

Fig. 4. Changes in the k_{inf} multiplication factor as a function of burnup for the three analysed variants of water vapour content.

jądrowe aktywności/produktów rozszczepienia oraz izotopów Gd), poziomy wypalenia i czasy chłodzenia są zgodne z wymaganiami specyfikacji (tab. 2.5–2.6) [1].

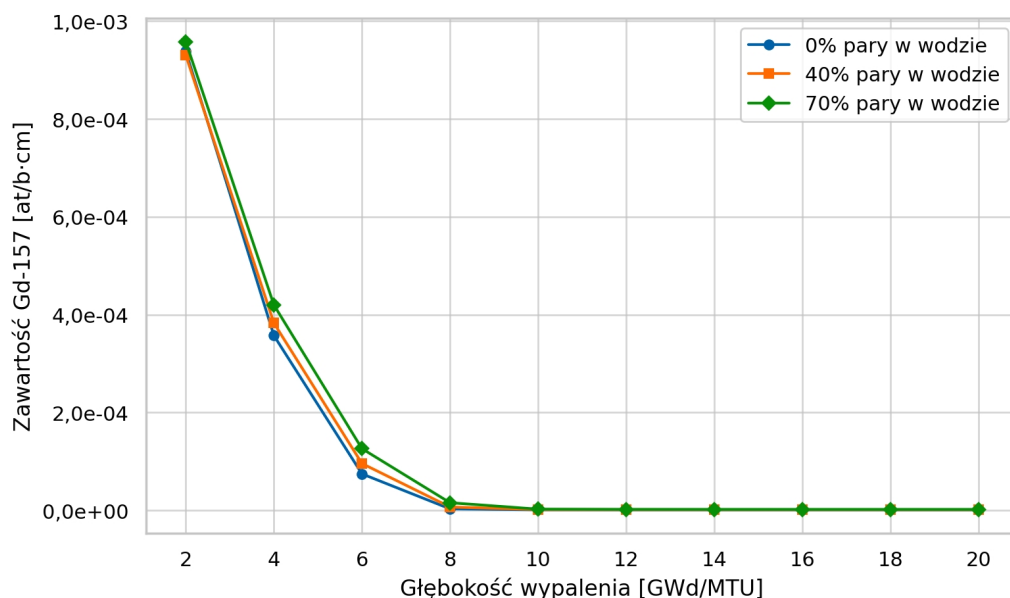
W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane wyniki w stosunku do wymagań autorów benchmarku. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany współczynnika mnożenia k_{inf} w funkcji wypalenia dla trzech analizowanych wariantów zawartości pary w wodzie. W tabelach 7 i 8 zestawiono obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności aktywności i produktów rozszczepienia, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia. Kluczowy dla benchmarku wpływ wypalenia się trucizny gadolinowej

zilustrowano na rysunkach 5 i 6, gdzie dla izotopów Gd-155 oraz Gd-157 pokazano zmiany ich zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary. Z kolei, na rysunku 7 przedstawiono zależność pomiędzy głębokością wypalenia prętów z gadolinem a głębokością wypalenia całej kasy paliwowej. Ze względu na prawa do danych nie reprodukowano tu wyników innych zespołów. Porównania zbiorcze dostępne są w Aneksie B raportu OECD/NEA, gdzie wiersze SC20 w tabelach stężeń Gd-155/Gd-157 (m.in. s. 117–122 [1]) pokazują ten sam rząd wielkości co pozostali uczestnicy; analogicznie zestawiono wyniki k_{inf} i odpowiadające im wypalenia (tab. 4.2 [1]). W raporcie



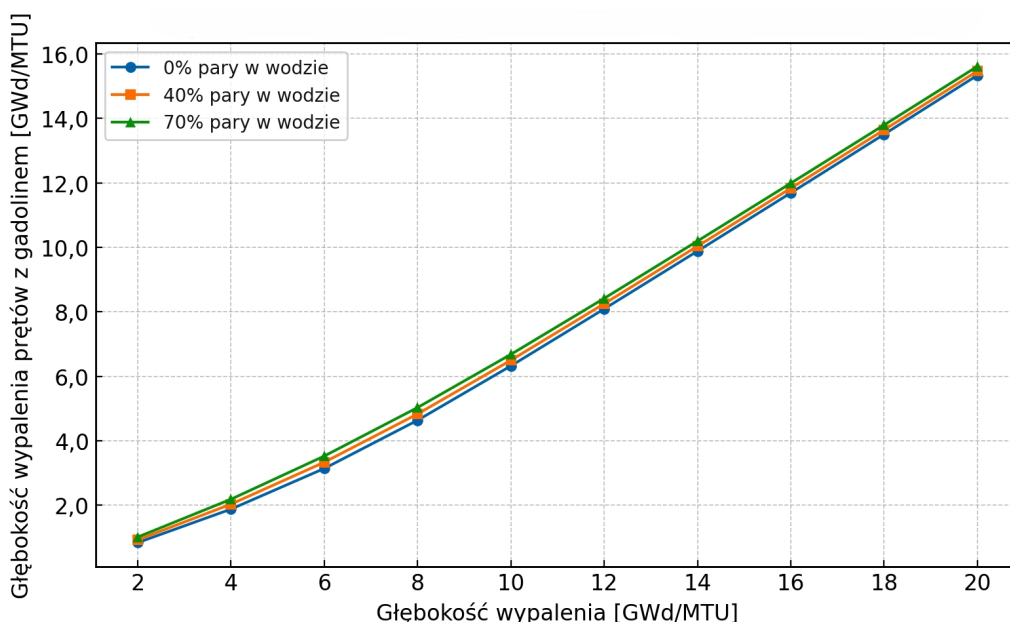
Rys. 5. Zmiany zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej Gd-155 w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary.

Fig. 5. Changes in the total Gd-155 nuclear density across all rings depending on burnup and vapour content.



Rys. 6. Zmiany zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej Gd-157 w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary.

Fig. 6. Changes in the total Gd-157 nuclear density across all rings depending on burnup and vapour content.



Rys. 7. Zależność pomiędzy głębokością wypalenia prętów z gadolinem a głębokością wypalenia całej kasety paliwowej.

Fig. 7. The relationship between the burnup of gadolinium rods and the burnup of the entire fuel assembly.

OECD/NEA [1] odnotowano, że „SC20 actinide results indicate an error in the initial uranium isotopic concentrations” i z tego powodu wyniki SC20 nie zostały włączone do analiz statystycznych aktywności. Uwaga dotyczy wyłącznie aktywności i wybranych produktów rozszczepienia – nie odnosi się do przedstawionych tu porównań gadolinu ani do przebiegów k_{inf} .

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki uzyskane przez autora w ramach międzynarodowego benchmarku OECD/NEA Fazy IIB, dotyczącego modelowania wypalania paliwa typu

BWR z prętami zawierającymi gadolin. Obliczenia wykonano przy użyciu kodu SCALE/TRITON 6.2.2, stosując metodę rzędnych dyskretnych (Sn) do rozwiązania równania transportu neutronów oraz szczegółowy model pręta z gadolinem, narzucony przez specyfikację benchmarku. Zaprezentowane wyniki jednoznacznie odzwierciedlają złożoną fizykę procesu. Wykresy współczynnika mnożenia k_{inf} (rys. 4) poprawnie obrazują charakterystyczny pik reaktywności, którego wartość maleje, a położenie przesuwa się w stronę wyższych wypaleń wraz ze wzrostem udziału pary w wodzie. Analiza gęstości jądrowych kluczowych izotopów gadolinu, Gd-155 i Gd-157 (rys. 5 i 6), pokazuje ich gwałtowny spadek, będący główną przyczyną początkowego wzrostu reaktywności. Zgodnie z oczekiwaniami,

Tabela 7. Obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności aktynowców, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia.
Table 7. Calculated nuclear densities for the most important actinides from the point of view of criticality, taking into account different burn-up, steam content and a 5-year cooling time.

Zawartość pary w wodzie [%]	Głębokość wypalenia [GWd/MTU]	Czas przechowywania [lata]	Gęstości jądrowe aktynowców [atom/barn-cm]										
			U-234	U-235	U-236	U-238	Np-237	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
0	2	0	8,0919E-06	8,7188E-04	1,0068E-05	2,2313E-02	1,4632E-07	2,2230E-09	1,8703E-05	6,8719E-07	6,0084E-08	7,8557E-10	1,5664E-10
0	2	5	8,0919E-06	8,7188E-04	1,0069E-05	2,2313E-02	1,7169E-07	2,3455E-09	1,9621E-05	6,8683E-07	4,7152E-08	7,8561E-10	1,3033E-08
0	4	0	7,9014E-06	8,1942E-04	1,9468E-05	2,2289E-02	3,8288E-07	1,2122E-08	3,4412E-05	2,4179E-06	4,0231E-07	1,1063E-08	2,1584E-09
0	4	5	7,9015E-06	8,1943E-04	1,9468E-05	2,2289E-02	4,1901E-07	1,3695E-08	3,5310E-05	2,4175E-06	3,0753E-07	1,0764E-08	9,6877E-08
0	6	0	7,7171E-06	7,6944E-04	2,8298E-05	2,2265E-02	6,7703E-07	3,2176E-08	4,6926E-05	4,7667E-06	1,0986E-06	4,7512E-08	9,0197E-09
0	6	5	7,7180E-06	7,6944E-04	2,8298E-05	2,2265E-02	7,2543E-07	4,3407E-08	4,7803E-05	4,7649E-06	8,0128E-07	4,4986E-08	3,0701E-07
0	8	0	7,5384E-06	7,2151E-04	3,6629E-05	2,2241E-02	1,0141E-06	6,4093E-08	5,6810E-05	7,4960E-06	2,0979E-06	1,2684E-07	2,3319E-08
0	8	5	7,5421E-06	7,2148E-04	3,6633E-05	2,2241E-02	1,0782E-06	1,0504E-07	5,7668E-05	7,4928E-06	1,4559E-06	1,1729E-07	6,7046E-07
0	10	0	7,3640E-06	6,7541E-04	4,4524E-05	2,2217E-02	1,3861E-06	1,0948E-07	6,4645E-05	1,0459E-05	3,3271E-06	2,6282E-07	4,6568E-08
0	10	5	7,3744E-06	6,7531E-04	4,4536E-05	2,2217E-02	1,4718E-06	2,1394E-07	6,5497E-05	1,0456E-05	2,2014E-06	2,3807E-07	1,1900E-06
0	12	0	7,1914E-06	6,3109E-04	5,2024E-05	2,2194E-02	1,7931E-06	1,7056E-07	7,0990E-05	1,3566E-05	4,7355E-06	4,6720E-07	7,9351E-08
0	12	5	7,2147E-06	6,3086E-04	5,2052E-05	2,2193E-02	1,9082E-06	3,8641E-07	7,1852E-05	1,3566E-05	3,0021E-06	4,1578E-07	1,8558E-06
0	14	0	7,0196E-06	5,8851E-04	5,9151E-05	2,2169E-02	2,2349E-06	2,4986E-07	7,6181E-05	1,6763E-05	6,2754E-06	7,5010E-07	1,2158E-07
0	14	5	7,0650E-06	5,8810E-04	5,9202E-05	2,2169E-02	2,3877E-06	6,3824E-07	7,7061E-05	1,6770E-05	3,8319E-06	6,5769E-07	2,6499E-06
0	16	0	6,8484E-06	5,4762E-04	6,5916E-05	2,2144E-02	2,7082E-06	3,4981E-07	8,0401E-05	2,0010E-05	7,8963E-06	1,1196E-06	1,7259E-07
0	16	5	6,9285E-06	5,4695E-04	6,6000E-05	2,2144E-02	2,9074E-06	9,8308E-07	8,1303E-05	2,0031E-05	4,6668E-06	9,6951E-07	3,5488E-06
0	18	0	6,6776E-06	5,0837E-04	7,2328E-05	2,2119E-02	3,2089E-06	4,7272E-07	8,3779E-05	2,3276E-05	9,5543E-06	1,5818E-06	2,3120E-07
0	18	5	6,8091E-06	5,0738E-04	7,2454E-05	2,2118E-02	3,4639E-06	1,4321E-06	8,4709E-05	2,3320E-05	5,4907E-06	1,3557E-06	4,5261E-06
0	20	0	6,5072E-06	4,7074E-04	7,8394E-05	2,2092E-02	3,7334E-06	6,2081E-07	8,6430E-05	2,6536E-05	1,1213E-05	2,1413E-06	2,9591E-07
0	20	5	6,7108E-06	4,6936E-04	7,8571E-05	2,2092E-02	4,0536E-06	1,9937E-06	8,7393E-05	2,6611E-05	6,2945E-06	1,8199E-06	5,5550E-06
40	2	0	8,0696E-06	8,7230E-04	1,0398E-05	2,2309E-02	1,7064E-07	2,8752E-09	2,1276E-05	7,7949E-07	7,9735E-08	1,0286E-09	2,0881E-10
40	2	5	8,0697E-06	8,7231E-04	1,0398E-05	2,2309E-02	2,0051E-07	3,0344E-09	2,2319E-05	7,7909E-07	6,2573E-08	1,0287E-09	1,7297E-08
40	4	0	7,8592E-06	8,2065E-04	2,0028E-05	2,2282E-02	4,4888E-07	1,5723E-08	3,9153E-05	2,6886E-06	5,2000E-07	1,4049E-08	2,8102E-09
40	4	5	7,8594E-06	8,2066E-04	2,0027E-05	2,2282E-02	4,9188E-07	1,7889E-08	4,0172E-05	2,6881E-06	3,9711E-07	1,3686E-08	1,2539E-07
40	6	0	7,6568E-06	7,7174E-04	2,9012E-05	2,2255E-02	7,9499E-07	4,1758E-08	5,3485E-05	5,2301E-06	1,3908E-06	5,8830E-08	1,1521E-08
40	6	5	7,6580E-06	7,7175E-04	2,9011E-05	2,2255E-02	8,5321E-07	5,6885E-08	5,4480E-05	5,2282E-06	1,0120E-06	5,5845E-08	3,8970E-07
40	8	0	7,4617E-06	7,2512E-04	3,7438E-05	2,2227E-02	1,1913E-06	8,3155E-08	6,4943E-05	8,1504E-06	2,6150E-06	1,5378E-07	2,9336E-08
40	8	5	7,4666E-06	7,2509E-04	3,7440E-05	2,2227E-02	1,2691E-06	1,3712E-07	6,5917E-05	8,1476E-06	1,8077E-06	1,4272E-07	8,3802E-07

40	10	0	7,2724E-06	6,8050E-04	4,5376E-05	2,2201E-02	1,6270E-06	1,4181E-07	7,4146E-05	1,1300E-05	4,0946E-06	3,1281E-07	5,7881E-08
40	10	5	7,2859E-06	6,8039E-04	4,5386E-05	2,2201E-02	1,7314E-06	2,7690E-07	7,5112E-05	1,1298E-05	2,6937E-06	2,8462E-07	1,4682E-06
40	12	0	7,0868E-06	6,3776E-04	5,2879E-05	2,2173E-02	2,0998E-06	2,2019E-07	8,1691E-05	1,4585E-05	5,7617E-06	5,4648E-07	9,7641E-08
40	12	5	7,1167E-06	6,3751E-04	5,2905E-05	2,2173E-02	2,2397E-06	4,9452E-07	8,2667E-05	1,4589E-05	3,6234E-06	4,8876E-07	2,2636E-06
40	14	0	6,9034E-06	5,9685E-04	5,9976E-05	2,2146E-02	2,6087E-06	3,2111E-07	8,7978E-05	1,7951E-05	7,5634E-06	8,6308E-07	1,4834E-07
40	14	5	6,9612E-06	5,9639E-04	6,0027E-05	2,2146E-02	2,7941E-06	8,0697E-07	8,8975E-05	1,7965E-05	4,5708E-06	7,6072E-07	3,2002E-06
40	16	0	6,7219E-06	5,5770E-04	6,6685E-05	2,2118E-02	3,1503E-06	4,4728E-07	9,3223E-05	2,1358E-05	9,4477E-06	1,2686E-06	2,0915E-07
40	16	5	6,8231E-06	5,5696E-04	6,6770E-05	2,2118E-02	3,3913E-06	1,2283E-06	9,4248E-05	2,1391E-05	5,5135E-06	1,1044E-06	4,2503E-06
40	18	0	6,5422E-06	5,2025E-04	7,3019E-05	2,2089E-02	3,7198E-06	6,0116E-07	9,7570E-05	2,4778E-05	1,1369E-05	1,7671E-06	2,7876E-07
40	18	5	6,7066E-06	5,1917E-04	7,3147E-05	2,2089E-02	4,0270E-06	1,7691E-06	9,8631E-05	2,4840E-05	6,4361E-06	1,5224E-06	5,3845E-06
40	20	0	6,3644E-06	4,8444E-04	7,8989E-05	2,2060E-02	4,3127E-06	7,8500E-07	1,0114E-04	2,8187E-05	1,3289E-05	2,3606E-06	3,5557E-07
40	20	5	6,6166E-06	4,8295E-04	7,9168E-05	2,2059E-02	4,6967E-06	2,4367E-06	1,0224E-04	2,8288E-05	7,3301E-06	2,0161E-06	6,5742E-06
70	2	0	8,0473E-06	8,7273E-04	1,0746E-05	2,2306E-02	1,9567E-07	3,6415E-09	2,3881E-05	8,6431E-07	1,0168E-07	1,2875E-09	2,6767E-10
70	2	5	8,0473E-06	8,7274E-04	1,0746E-05	2,2306E-02	2,3033E-07	3,8457E-09	2,5048E-05	8,6381E-07	7,9791E-08	1,2875E-09	2,2058E-08
70	4	0	7,8169E-06	8,2186E-04	2,0631E-05	2,2275E-02	5,1674E-07	1,9969E-08	4,4033E-05	2,9250E-06	6,4508E-07	1,7023E-08	3,5145E-09
70	4	5	7,8171E-06	8,2187E-04	2,0630E-05	2,2275E-02	5,6716E-07	2,2831E-08	4,5174E-05	2,9242E-06	4,9205E-07	1,6602E-08	1,5579E-07
70	6	0	7,5963E-06	7,7398E-04	2,9802E-05	2,2244E-02	9,1548E-07	5,3060E-08	6,0366E-05	5,6255E-06	1,6900E-06	6,9436E-08	1,4133E-08
70	6	5	7,5978E-06	7,7399E-04	2,9800E-05	2,2244E-02	9,8446E-07	7,2505E-08	6,1482E-05	5,6233E-06	1,2264E-06	6,6092E-08	4,7485E-07
70	8	0	7,3846E-06	7,2859E-04	3,8360E-05	2,2214E-02	1,3710E-06	1,0561E-07	7,3638E-05	8,7070E-06	3,1310E-06	1,7765E-07	3,5458E-08
70	8	5	7,3907E-06	7,2856E-04	3,8360E-05	2,2213E-02	1,4640E-06	1,7347E-07	7,4733E-05	8,7043E-06	2,1552E-06	1,6554E-07	1,0061E-06
70	10	0	7,1805E-06	6,8536E-04	4,6384E-05	2,2183E-02	1,8696E-06	1,7982E-07	8,4487E-05	1,2023E-05	4,8474E-06	3,5486E-07	6,9177E-08
70	10	5	7,1971E-06	6,8524E-04	4,6390E-05	2,2183E-02	1,9945E-06	3,4662E-07	8,5575E-05	1,2022E-05	3,1699E-06	3,2449E-07	1,7419E-06
70	12	0	6,9818E-06	6,4410E-04	5,3934E-05	2,2153E-02	2,4062E-06	2,7823E-07	9,3522E-05	1,5478E-05	6,7558E-06	6,0977E-07	1,1567E-07
70	12	5	7,0186E-06	6,4383E-04	5,3955E-05	2,2153E-02	2,5730E-06	6,1149E-07	9,4622E-05	1,5485E-05	4,2140E-06	5,4845E-07	2,6587E-06
70	14	0	6,7870E-06	6,0473E-04	6,1048E-05	2,2122E-02	2,9783E-06	4,0384E-07	1,0119E-04	1,9016E-05	8,7986E-06	9,4833E-07	1,7451E-07
70	14	5	6,8576E-06	6,0425E-04	6,1094E-05	2,2122E-02	3,1983E-06	9,8541E-07	1,0231E-04	1,9037E-05	5,2616E-06	8,4087E-07	3,7270E-06
70	16	0	6,5955E-06	5,6718E-04	6,7752E-05	2,2090E-02	3,5825E-06	5,5953E-07	1,0774E-04	2,2596E-05	1,0926E-05	1,3742E-06	2,4470E-07
70	16	5	6,7181E-06	5,6642E-04	6,7831E-05	2,2090E-02	3,8672E-06	1,4821E-06	1,0891E-04	2,2642E-05	6,2947E-06	1,2037E-06	4,9157E-06
70	18	0	6,4072E-06	5,3136E-04	7,4061E-05	2,2059E-02	4,2139E-06	7,4783E-07	1,1336E-04	2,6190E-05	1,3093E-05	1,8891E-06	3,2490E-07
70	18	5	6,6049E-06	5,3025E-04	7,4182E-05	2,2058E-02	4,5748E-06	2,1114E-06	1,1457E-04	2,6272E-05	7,3004E-06	1,6375E-06	6,1939E-06
70	20	0	6,2221E-06	4,9721E-04	7,9990E-05	2,2026E-02	4,8674E-06	9,7094E-07	1,1814E-04	2,9776E-05	1,5264E-05	2,4933E-06	4,1347E-07
70	20	5	6,5230E-06	4,9568E-04	8,0162E-05	2,2025E-02	5,3160E-06	2,8790E-06	1,1942E-04	2,9907E-05	8,2716E-06	2,1419E-06	7,5324E-06

Tabela 8. Obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności produktów rozszczepienia, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia.

Table 8. Calculated nuclear densities for the most important fission products from the point of view of criticality, taking into account different burn-up, steam content and a 5-year cooling time.

Zawartość pary w wodzie [%]	Głębokość wypalenia [GWD/MTU]	Czas przechowywania [lata]	Gęstości jądrowe produktów rozszczepienia [atom/barn-cm]										
			Tc-99	Rh-103	Xe-131	Cs-133	Nd-143	Nd-148	Sm-147	Sm-149	Sm-151	Sm-152	Eu-155
0	2	0	2,8460E-06	7,3955E-07	1,2166E-06	2,9378E-06	2,1011E-06	8,4670E-07	2,0953E-08	7,9082E-08	1,5038E-07	2,0197E-07	1,3566E-08
0	2	5	3,0077E-06	1,6208E-06	1,4374E-06	3,3096E-06	2,8635E-06	8,4673E-07	7,9810E-07	1,0224E-07	1,4934E-07	2,0200E-07	6,5494E-09
0	4	0	5,8255E-06	2,1418E-06	2,6265E-06	6,2104E-06	4,8391E-06	1,6931E-06	9,5949E-08	8,2212E-08	2,2802E-07	4,7831E-07	2,1982E-08
0	4	5	5,9871E-06	3,2678E-06	2,8499E-06	6,5830E-06	5,6011E-06	1,6910E-06	1,7697E-06	1,0368E-07	2,2164E-07	4,7583E-07	9,2503E-09
0	6	0	8,7798E-06	3,7180E-06	4,0116E-06	9,4491E-06	7,4729E-06	2,5379E-06	2,1926E-07	7,9684E-08	2,6982E-07	7,8193E-07	2,9207E-08
0	6	5	8,9410E-06	4,9253E-06	4,2369E-06	9,8227E-06	8,2241E-06	2,5337E-06	2,7589E-06	9,9179E-08	2,5943E-07	7,7477E-07	1,1423E-08
0	8	0	1,1711E-05	5,3406E-06	5,3714E-06	1,2656E-05	9,9972E-06	3,3817E-06	3,8398E-07	7,7184E-08	2,9296E-07	1,0940E-06	3,6831E-08
0	8	5	1,1872E-05	6,5828E-06	5,5983E-06	1,3031E-05	1,0739E-05	3,3753E-06	3,7312E-06	9,5049E-08	2,7971E-07	1,0806E-06	1,3671E-08
0	10	0	1,4620E-05	6,9706E-06	6,7040E-06	1,5830E-05	1,2414E-05	4,2246E-06	5,8411E-07	7,6224E-08	3,0555E-07	1,4055E-06	4,5417E-08
0	10	5	1,4779E-05	8,2311E-06	6,9319E-06	1,6205E-05	1,3147E-05	4,2159E-06	4,6784E-06	9,2682E-08	2,9022E-07	1,3845E-06	1,6084E-08
0	12	0	1,7499E-05	8,5907E-06	8,0046E-06	1,8965E-05	1,4720E-05	5,0660E-06	8,1398E-07	7,5660E-08	3,1337E-07	1,7092E-06	5,5170E-08
0	12	5	1,7657E-05	9,8616E-06	8,2330E-06	1,9339E-05	1,5443E-05	5,0549E-06	5,5962E-06	9,0805E-08	2,9627E-07	1,6797E-06	1,8712E-08
0	14	0	2,0347E-05	1,0192E-05	9,2699E-06	2,2055E-05	1,6912E-05	5,9058E-06	1,0682E-06	7,4990E-08	3,1930E-07	2,0015E-06	6,6316E-08
0	14	5	2,0502E-05	1,1468E-05	9,4982E-06	2,2429E-05	1,7625E-05	5,8920E-06	6,4820E-06	8,8949E-08	3,0045E-07	1,9624E-06	2,1635E-08
0	16	0	2,3162E-05	1,1768E-05	1,0498E-05	2,5100E-05	1,8988E-05	6,7439E-06	1,3420E-06	7,4098E-08	3,2414E-07	2,2819E-06	7,9036E-08
0	16	5	2,3314E-05	1,3045E-05	1,0726E-05	2,5471E-05	1,9689E-05	6,7272E-06	7,3350E-06	8,7028E-08	3,0341E-07	2,2321E-06	2,4908E-08
0	18	0	2,5943E-05	1,3317E-05	1,1688E-05	2,8097E-05	2,0947E-05	7,5804E-06	1,6308E-06	7,3000E-08	3,2817E-07	2,5506E-06	9,3399E-08
0	18	5	2,6090E-05	1,4590E-05	1,1914E-05	2,8465E-05	2,1634E-05	7,5605E-06	8,1545E-06	8,5055E-08	3,0542E-07	2,4887E-06	2,8556E-08
0	20	0	2,8689E-05	1,4834E-05	1,2839E-05	3,1045E-05	2,2786E-05	8,4155E-06	1,9307E-06	7,1731E-08	3,3153E-07	2,8079E-06	1,0939E-07
0	20	5	2,8830E-05	1,6099E-05	1,3062E-05	3,1408E-05	2,3457E-05	8,3919E-06	8,9400E-06	8,3049E-08	3,0664E-07	2,7322E-06	3,2594E-08
40	2	0	2,8391E-06	7,4610E-07	1,2151E-06	2,9307E-06	2,0914E-06	8,4721E-07	2,0850E-08	8,6716E-08	1,5491E-07	1,9947E-07	1,3649E-08
40	2	5	3,0005E-06	1,6384E-06	1,4362E-06	3,3019E-06	2,8494E-06	8,4724E-07	7,9478E-07	1,1001E-07	1,5375E-07	1,9950E-07	6,5894E-09
40	4	0	5,8070E-06	2,1625E-06	2,6192E-06	6,1901E-06	4,8149E-06	1,6937E-06	9,5048E-08	9,1415E-08	2,3970E-07	4,6909E-07	2,2002E-08
40	4	5	5,9682E-06	3,3055E-06	2,8432E-06	6,5621E-06	5,5715E-06	1,6915E-06	1,7565E-06	1,1263E-07	2,3273E-07	4,6670E-07	9,3423E-09
40	6	0	8,7455E-06	3,7555E-06	3,9943E-06	9,4101E-06	7,4346E-06	2,5381E-06	2,1628E-07	8,9372E-08	2,8839E-07	7,6386E-07	2,9330E-08
40	6	5	8,9062E-06	4,9829E-06	4,2203E-06	9,7829E-06	8,1796E-06	2,5338E-06	2,7303E-06	1,0817E-07	2,7675E-07	7,5688E-07	1,1634E-08
40	8	0	1,1657E-05	5,3949E-06	5,3398E-06	1,2593E-05	9,9464E-06	3,3810E-06	3,7725E-07	8,6747E-08	3,1756E-07	1,0654E-06	3,7251E-08

40	8	5	1,1817E-05	6,6587E-06	5,5673E-06	1,2966E-05	1,0682E-05	3,3745E-06	3,6824E-06	1,0358E-07	3,0232E-07	1,0521E-06	1,4040E-08
40	10	0	1,4542E-05	7,0410E-06	6,6545E-06	1,5737E-05	1,2355E-05	4,2228E-06	5,7170E-07	8,5891E-08	3,3518E-07	1,3649E-06	4,6330E-08
40	10	5	1,4700E-05	8,3235E-06	6,8830E-06	1,6111E-05	1,3081E-05	4,2139E-06	4,6055E-06	1,0106E-07	3,1712E-07	1,3440E-06	1,6643E-08
40	12	0	1,7396E-05	8,6761E-06	7,9346E-06	1,8839E-05	1,4658E-05	5,0629E-06	7,9387E-07	8,5719E-08	3,4699E-07	1,6556E-06	5,6739E-08
40	12	5	1,7552E-05	9,9688E-06	8,1635E-06	1,9212E-05	1,5375E-05	5,0516E-06	5,4960E-06	9,9358E-08	3,2649E-07	1,6259E-06	1,9472E-08
40	14	0	2,0217E-05	1,0291E-05	9,1769E-06	2,1893E-05	1,6856E-05	5,9013E-06	1,0384E-06	8,5571E-08	3,5644E-07	1,9334E-06	6,8636E-08
40	14	5	2,0369E-05	1,1588E-05	9,4055E-06	2,2265E-05	1,7562E-05	5,8873E-06	6,3517E-06	9,7802E-08	3,3355E-07	1,8938E-06	2,2588E-08
40	16	0	2,3002E-05	1,1880E-05	1,0380E-05	2,4898E-05	1,8948E-05	6,7379E-06	1,3003E-06	8,5200E-08	3,6466E-07	2,1976E-06	8,2172E-08
40	16	5	2,3150E-05	1,3177E-05	1,0607E-05	2,5267E-05	1,9642E-05	6,7209E-06	7,1716E-06	9,6188E-08	3,3928E-07	2,1469E-06	2,6041E-08
40	18	0	2,5751E-05	1,3440E-05	1,1543E-05	2,7852E-05	2,0933E-05	7,5728E-06	1,5753E-06	8,4586E-08	3,7199E-07	2,4487E-06	9,7403E-08
40	18	5	2,5893E-05	1,4732E-05	1,1768E-05	2,8216E-05	2,1614E-05	7,5524E-06	7,9555E-06	9,4505E-08	3,4396E-07	2,3853E-06	2,9849E-08
40	20	0	2,8464E-05	1,4967E-05	1,2665E-05	3,0754E-05	2,2811E-05	8,4060E-06	1,8596E-06	8,3766E-08	3,7855E-07	2,6872E-06	1,1429E-07
40	20	5	2,8599E-05	1,6250E-05	1,2887E-05	3,1112E-05	2,3476E-05	8,3819E-06	8,7032E-06	9,2772E-08	3,4774E-07	2,6095E-06	3,4013E-08
70	2	0	2,8319E-06	7,5287E-07	1,2133E-06	2,9234E-06	2,0813E-06	8,4785E-07	2,0744E-08	9,5842E-08	1,5964E-07	1,9677E-07	1,3742E-08
70	2	5	2,9931E-06	1,6564E-06	1,4349E-06	3,2941E-06	2,8349E-06	8,4789E-07	7,9152E-07	1,1927E-07	1,5836E-07	1,9680E-07	6,6349E-09
70	4	0	5,7880E-06	2,1828E-06	2,6109E-06	6,1693E-06	4,7900E-06	1,6945E-06	9,4138E-08	1,0267E-07	2,5206E-07	4,5881E-07	2,2035E-08
70	4	5	5,9488E-06	3,3424E-06	2,8354E-06	6,5406E-06	5,5411E-06	1,6923E-06	1,7432E-06	1,2356E-07	2,4446E-07	4,5653E-07	9,4332E-09
70	6	0	8,7104E-06	3,7905E-06	3,9745E-06	9,3698E-06	7,3953E-06	2,5386E-06	2,1329E-07	1,0150E-07	3,0844E-07	7,4335E-07	2,9469E-08
70	6	5	8,8706E-06	5,0368E-06	4,2011E-06	9,7417E-06	8,1342E-06	2,5342E-06	2,7011E-06	1,1946E-07	2,9544E-07	7,3660E-07	1,1835E-08
70	8	0	1,1602E-05	5,4433E-06	5,3042E-06	1,2527E-05	9,8947E-06	3,3808E-06	3,7049E-07	9,8819E-08	3,4470E-07	1,0326E-06	3,7687E-08
70	8	5	1,1761E-05	6,7270E-06	5,5323E-06	1,2899E-05	1,0623E-05	3,3742E-06	3,6322E-06	1,1440E-07	3,2724E-07	1,0196E-06	1,4394E-08
70	10	0	1,4463E-05	7,1009E-06	6,5995E-06	1,5641E-05	1,2294E-05	4,2214E-06	5,5927E-07	9,7909E-08	3,6855E-07	1,3183E-06	4,7265E-08
70	10	5	1,4620E-05	8,4036E-06	6,8285E-06	1,6013E-05	1,3013E-05	4,2125E-06	4,5300E-06	1,1155E-07	3,4739E-07	1,2977E-06	1,7187E-08
70	12	0	1,7292E-05	8,7462E-06	7,8578E-06	1,8708E-05	1,4595E-05	5,0603E-06	7,7378E-07	9,8086E-08	3,8545E-07	1,5946E-06	5,8345E-08
70	12	5	1,7446E-05	1,0059E-05	8,0871E-06	1,9080E-05	1,5304E-05	5,0489E-06	5,3919E-06	1,0995E-07	3,6101E-07	1,5650E-06	2,0220E-08
70	14	0	2,0085E-05	1,0369E-05	9,0763E-06	2,1725E-05	1,6797E-05	5,8973E-06	1,0086E-06	9,8503E-08	3,9923E-07	1,8572E-06	7,1018E-08
70	14	5	2,0235E-05	1,1686E-05	9,3051E-06	2,2095E-05	1,7496E-05	5,8831E-06	6,2160E-06	1,0873E-07	3,7163E-07	1,8174E-06	2,3533E-08
70	16	0	2,2841E-05	1,1965E-05	1,0254E-05	2,4689E-05	1,8902E-05	6,7324E-06	1,2590E-06	9,8776E-08	4,1156E-07	2,1050E-06	8,5381E-08
70	16	5	2,2985E-05	1,3281E-05	1,0481E-05	2,5055E-05	1,9590E-05	6,7151E-06	7,0015E-06	1,0752E-07	3,8071E-07	2,0536E-06	2,7162E-08
70	18	0	2,5559E-05	1,3530E-05	1,1390E-05	2,7600E-05	2,0910E-05	7,5656E-06	1,5206E-06	9,8799E-08	4,2292E-07	2,3385E-06	1,0147E-07
70	18	5	2,5696E-05	1,4840E-05	1,1614E-05	2,7960E-05	2,1585E-05	7,5449E-06	7,7483E-06	1,0624E-07	3,8868E-07	2,2740E-06	3,1121E-08
70	20	0	2,8240E-05	1,5062E-05	1,2484E-05	3,0456E-05	2,2823E-05	8,3970E-06	1,7897E-06	9,8584E-08	4,3349E-07	2,5585E-06	1,1922E-07
70	20	5	2,8368E-05	1,6363E-05	1,2704E-05	3,0808E-05	2,3482E-05	8,3724E-06	8,4567E-06	1,0490E-07	3,9572E-07	2,4795E-06	3,5401E-08

proces ten przebiega najszybciej dla przypadku 0% pary, gdzie strumień neutronów termicznych jest największy. Zależność wypalania prętów z gadolinem od wypalania całej kasy (rys. 7) wskazuje na mniejsze tempo wypalania truciźny w stosunku do średniej dla całego zestawu, co jest wynikiem lokalnego tłumienia strumienia neutronów. Szczegółowe dane dotyczące składu izotopowego aktywności i produktów rozszczepienia (tab. 7 i 8) stanowią kompletną bazę danych dla dalszych, szczegółowych analiz bezpieczeństwa, np. w ramach koncepcji burnup credit.

Porównanie z wynikami zbiorczymi opublikowanymi w raporcie OECD/NEA wskazuje, że kształt krzywych k-inf oraz rząd wielkości stężeń Gd-155/Gd-157 dla zgłoszenia SC20 są spójne z trendami i zakresem rozrzutu prezentowanym w publikacji. Wartości piku reaktywności dla analizowanych wariantów zawartości pary (ok. 1,250 dla 0% pary; 1,216 dla 40% pary; 1,177 dla 70% pary) mieszczą się w zakresie raportowanym. Jednocześnie, zgodnie z uwagą redakcyjną raportu OECD/NEA, wyniki SC20 dla aktywności wskazują na prawdopodobny błąd w początkowym składzie izotopowym uranu, przez co nie były uwzględniane w analizach statystycznych aktywności. Z tego względu w niniejszym tekście nie formułowane są wnioski porównawcze dla szczegółowych koncentracji aktywności. Prezentowane tabele traktowane są jako materiał uzupełniający do dalszych analiz.

Ogólne wnioski płynące z benchmarku Fazy IIB, sformułowane w raporcie OECD [1], wskazują na kilka kluczowych aspektów. Po pierwsze, największym źródłem rozbieżności w wynikach między uczestnikami okazały się zastosowane biblioteki danych jądrowych, a w mniejszym stopniu sam kod obliczeniowy czy metoda rozwiązania równania transportu. Zaobserwowano, że wykluczenie wyników opartych na starszych generacjach bibliotek (np. ENDF/B-V) znacząco zmniejszało całkowity rozrzut wyników k-inf. Benchmark wykazał również, że o ile stężenia głównych izotopów, jak U-238, są obliczane z bardzo dużą zgodnością (odchylenie poniżej 0,07%), to istnieją znaczne niepewności w predykcji gęstości jądrowych kluczowych izotopów gadolinu (2 do 44% dla Gd-155) oraz niektórych produktów rozszczepienia, zwłaszcza Sm-149, Sm-151 i Eu-155 (2 rzędu 10–26%). Wyniki te podkreślają wagę dalszych prac nad doskonaleniem danych jądrowych i walidacją kodów obliczeniowych, które są niezbędne do wiarygodnych analiz bezpieczeństwa wypalonego paliwa jądrowego.

Notka o autorze

mgr Łukasz Koszuk – fizyk jądrowy, absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, obecnie pracownik Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, współzałożyciel i prezes Fundacji Forum Atomowe, prowadzi także własną firmę doradczą „AI and Nuclear”. Jest także delegatem do grupy roboczej NEA/OECD *Working Party on Nuclear Criticality Safety*.

Literatura

1. NEA (2022), Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIID: Burnup Calculations of Gadolinium- Bearing Fuel Rods in Boiling Water Reactor Assemblies for Storage and Transportation, OECD Publishing, Paris.
2. Galahom, A. A., et al. (2016). Investigation of different burnable absorbers effects on the neutronic characteristics of PWR assembly. *Journal of Taibah University for Science*, 10(6), 872–882.
3. Rauscher, T., et al. (2019). Cross section measurements of $^{155,157}\text{Gd}(n, \gamma)$ induced by thermal and epithermal neutrons. *The European Physical Journal A*, 55(1), 9.
4. Bolukbasi, M., et al. (2017). Performance and economic assessment of enriched gadolinia burnable absorbers. *Nuclear Engineering and Design*, 313, 329–336.
5. Kim, H., et al. (2022). Development of a high performance burnable absorber for soluble-boron-free SMR. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(7), 2545–2555.
6. NIST, Atomic Weights and Isotopic Compositions – Gadolinium (Gd), [online].
7. Noguere, G., Leconte, P., Bernard, D., Pottier, M., Paradela, C., Kopecky, S., & Schillebeeckx, P. (2024). Generation of particle self-shielded neutron cross-sections for the Monte-Carlo code TRIPOLI-4®. *EPJ Nuclear Sciences and Technologies*, 10, Article 18.
8. Radaideh, M. I., et al. (2019). Advanced BWR criticality safety part II: Cask criticality burnup credit sensitivity and uncertainty analyses. *Annals of Nuclear Energy*, 132, 506–520.
9. Ahn, V. V., et al. (2018). Compound effects of operating parameters on burnup credit in boiling water reactor spent fuel assemblies. *Journal of the Korean Physical Society*, 72(10), 1229–1238.
10. Clarity, J. B., & Twardowski, T. (2016). An Overview of NRC's BWR Burnup Credit Research Project. PATRAM 2016.
11. Ghayeb, S., & Wilson, V. (2016). Regulatory research on use of burnup credit for criticality safety in BWR spent fuel transportation packages. In *Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2016)* (Paper No. 2023). U.S. Nuclear Regulatory Commission.
12. International Atomic Energy Agency. (2007). Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management Systems. IAEA-TEC-DOC-1547. Vienna: IAEA.
13. Rearden, Bradley T., & Jessee, Matthew Anderson (2017). SCALE Code System 6.2.2.

Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami wysokoprężnymi w elektrowniach jądrowych. Część 1

Emergency Diesel Generators in Nuclear Power Plants. Part 1

Jacek Nowicki

Państwowa Agencja Atomistyki, Departament Bezpieczeństwa Jądrowego, Wydział Oceny i Zezwoleń

Streszczenie: Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami Diesla są kluczowymi rezerwowymi źródłami zasilania w elektrowniach jądrowych, przede wszystkim w celu zapewnienia bezpiecznego wyłączenia reaktora w przypadku utraty zasilania zewnętrznego. Dostarczają one zasilanie do kluczowych systemów bezpieczeństwa, takich jak systemy chłodzenia rdzenia i systemy sterowania, zapobiegając uwolnieniu materiałów radioaktywnych. Zapasowe agregaty prądotwórcze są projektowane i testowane w taki sposób, aby były odporne na wstrząsy sejsmiczne i inne zakłócenia, zapewniając ich prawidłowe działanie w sytuacjach awaryjnych. W istocie urządzenia te stanowią jedną z ostatnich linii obrony w elektrowni jądrowej, chroniąc przed potencjalnymi zagrożeniami poprzez utrzymanie kluczowych systemów bezpieczeństwa w przypadku awarii innych źródeł zasilania.

Słowa kluczowe: Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami Diesla, spalinowe silniki wysokoprężne, zasilanie zewnętrzne i miejscowe urządzeń energetycznego bloku jądrowego, bezpieczeństwo zasilania urządzeń elektrycznych klasy 1E.

Abstract: Emergency Diesel Generators (EDGs) are crucial backup power sources in nuclear power plants, primarily to ensure safe reactor shutdown in the event of a loss of external power. They provide power to key safety systems, such as reactor core cooling and control systems, preventing the release of radioactive materials. Backup generators are designed and tested to withstand seismic events and other disruptions, ensuring their proper operation in emergency situations. In essence, these devices constitute one of the last lines of defense in a nuclear power plant, protecting against potential threats by maintaining critical safety systems in the event of a failure of other power sources.

Keywords: Emergency Diesel Generators in nuclear power plants, internal combustion engines, offsite and onsite power supply of nuclear power plants, safety of power supply of Class 1E electrical equipment.

1. Wprowadzenie

Specyfika pracy elektrowni jądrowej wymaga zapewnienia potężnych **źródeł zasilania zapasowego** potrzeb własnych w celu spełnienia surowych rygorów bezpieczeństwa jądrowego. Podstawowym źródłem zasilania, z którego elektrownia jądrowa korzysta w sytuacji odstawienia bloku – gdy potrzeby własne nie są zasilane z własnego turbo-generatora, jest oczywiście **sieć energetyki zawodowej** wysokich i najwyższych napięć zapewniająca w normalnych warunkach dostęp do pewnego i stabilnego źródła zasilania [12]. Należy jednak uwzględnić przypadki, w których

zasilanie z tejże sieci może być niedostępne, na przykład na skutek poważnej awarii w systemie elektroenergetycznym. W takiej sytuacji konieczne jest korzystanie z miejscowych źródeł zasilania – tj. znajdujących się na terenie bloku energetycznego. Wśród nich wyróżnić można: **agregaty prądotwórcze prądu przemiennego** napędzane silnikami spalinowymi oraz **baterie akumulatorów prądu stałego**. Począwszy od pierwszej generacji elektrowni jądrowych w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, rolę podstawowych źródeł zasilania zapasowego prądu przemiennego odgrywają agregaty

prądowców napędzane spalinowymi silnikami wysokoprężnymi, które w sytuacji awaryjnego wyłączenia bloku energetycznego są w stanie zapewnić dostępność energii elektrycznej przede wszystkim dla pracy systemów odbierających ciepło powyłączeniowe z reaktora jądrowego.

Agregaty zasilania zapasowego w elektrowniach jądrowych są w istocie mniejszymi, kompletnymi i autonomicznymi elektrowniami. Pewność rozruchu i pracy zapasowych agregatów prądowców są czynnikami o podstawowym znaczeniu dla energetycznych bloków jądrowych II generacji, stanowiących większość eksploatowanych obecnie elektrowni jądrowych na świecie. Zapewniają one zasilanie prądem przemiennym kluczowych układów związanych z bezpieczeństwem jądrowym w sytuacji zaniku zasilania z głównego generatora blokowego oraz niedostępności zasilania z zewnętrznej sieci energetyki zawodowej.

Warto tu zwrócić uwagę, że w elektrowniach jądrowych I i II generacji wyposażonych w aktywne układy bezpieczeństwa zapewnienie pewności zasilania prądu przemiennego z agregatów prądowców stanowiło wymaganie o absolutnie pierwszoplanowym znaczeniu. W części spośród dużych energetycznych bloków jądrowych generacji III i III+, których projekty uwzględniają postulaty bezpieczeństwa pasywnego, dla działania układów odbioru ciepła powyłączeniowego z reaktora dostępność zasilania z zewnętrznych lub miejscowych źródeł zasilania elektrycznego o dużej mocy nie jest już warunkiem koniecznym. Przykładami takich rozwiązań są np. duże bloki energetyczne AP1000 i ESBWR (o mocy rzędu 1–1,5 GW) i bloki bazujące na małych reaktorach modułowych SMR (<300 MW) – np. BWRX-300. Inne rozwiązania generacji III/III+, jak np. EPR opierają się na aktywnych systemach bezpieczeństwa i wymagają w sytuacjach awaryjnych wielokrotnionego zasilania elektrycznego dużej mocy z agregatów prądowców. W każdym jednak przypadku rezerwowe agregaty prądowców są i będą w przewidywalnej przyszłości nadal nieodłącznymi elementami wyposażenia każdego obiektu energetyki jądrowej.

2. Dlaczego agregaty dieslowskie?

Agregaty prądowców stosowane w elektrowniach jądrowych są *de facto* same w sobie sporymi elektrowniami złożonymi z silników napędowych, generatorów elektrycznych, układów rozruchowych, paliwowych, rozdzielczych i zabezpieczeniowych, przeznaczonych do specyficznego zastosowania zapewnienia zasilania zapasowego niezbędnych systemów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego w sytuacji awaryjnej. Choć możliwe bywa tu zastosowanie innych źródeł zasilania zapasowego o dużej mocy – np. hydrogeneratorów lub generatorów napędzanych turbinami gazowymi (o czym będzie jeszcze mowa w drugiej części tego artykułu), to jednak agregaty napędzane silnikami wysokoprężnymi stały się dominującym

rozwiązaniem technicznym [11, 13]. Zadecydowała o tym przede wszystkim dojrzałość techniczna napędu dieslowskiego bazująca na doświadczeniach zdobytych od przełomu XIX i XX stulecia w cywilnych i wojskowych zastosowaniach w pojazdach lądowych oraz napędach morskich, a także stacjonarnych elektrowniach. Pierwsze morskie reaktory napędowe dla okrętów podwodnych powstawały w Stanach Zjednoczonych na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych w środowiskach konstruktorów, którym morskie układy napędów diesel-elektrycznych były doskonale znane. Z wysoką dozą pewności można uznać, że wyjątkowa pozycja agregatów z silnikami wysokoprężnymi w wojskowej i cywilnej energetyce jądrowej miała swoje korzenie właśnie w tym czasie i miejscu.

Dwa podstawowe czynniki zdecydowały o powszechnym użyciu agregatów z silnikami Diesla w układach zasilania awaryjnego elektrowni jądrowych, jeszcze w początkowym okresie rozwoju energetyki jądrowej w USA:

1. Na podstawie możliwych scenariuszy awarii określono, jak szybko musi być dostarczone zasilanie elektryczne dla układu zapasowego chłodzenia rdzenia reaktora (ang. *Emergency Core Cooling System* – ECCS), aby uniknąć jego przegrzania. Wiele spośród wczesnych reaktorów jądrowych wymagało włączenia zasilania dla układu zapasowego chłodzenia rdzenia w ciągu zaledwie 15 do 30 sekund. W celu zachowania marginesu bezpieczeństwa przyjęto wówczas, że maksymalne opóźnienie w dostarczeniu napięcia z rezerwowego źródła zasilania dla odbiorników energii elektrycznej, jakie muszą zostać zasilone w pierwszej kolejności, nie może przekraczać 10 sekund. Dalsze odbiory podłączane były do zapasowego źródła zasilania stopniowo, zgodnie z ustaloną sekwencją.
2. Uznano, że agregaty dieslowskie są dostatecznie niezawodnymi źródłami energii elektrycznej zdolnymi do bardzo szybkiego rozruchu i szybkiego przejścia dużego obciążenia. Dodatkowym argumentem było zastosowanie analogicznego układu w pierwszych siłowniach jądrowych budowanych na potrzeby wojskowych napędów okrętowych.

W porównaniu z innymi silnikami spalinowymi silnik wysokoprężny oferuje szereg zalet, w tym [11, 13]:

- wysoką niezawodność działania i niskie ryzyko pożaru;
- możliwość pracy ciągłej przez długi czas;
- względnie niskie koszty paliwa, wysoką sprawność i niskie zużycie paliwa na jednostkę czasu;
- wysoką osiąganą moc na jednostkę masy silnika dzięki czemu stosunek gabarytów do masy tych urządzeń jest bardzo korzystny;
- wysoki stały moment obrotowy;
- możliwość bardzo szybkiego rozruchu: w zależności od mocy i konfiguracji jednostki jest to od kilku-kilkunastu sekund do 1–2 minut;
- względnie niewielkie wymagania dotyczące układów chłodzenia.

3. Wysokoprężny silnik spalinowy

Silniki cieplne, tłokowe o spalaniu wewnętrznym i zapłonie samoczynnym, w których ciśnienie maksymalne czynnika jest znacznie wyższe niż w silnikach niskoprężnych (np. o zapłonie iskrowym), nazywane są silnikami wysokoprężnymi lub silnikami Diesla, od nazwiska swego wynalazcy: **Rudolfa Diesla** (1858–1913) – patrz rysunek 1. Diesel rozpoczął prace nad swoim silnikiem już w 1889 roku i złożył w Cesarskim Urzędzie Patentowym w Berlinie odpowiedni wniosek w lutym 1892 roku. Rezultaty jego rozważań inżynierskich zostały przedstawione w wydanej w 1893 roku książce zatytułowanej „Teoria i konstrukcja racjonalnych silników cieplnych mogących zastąpić silniki parowe i znane obecnie silniki spalinowe” (niem. *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren*). W latach 1893–1897 w zakładach Maschinenfabrik Augsburg AG należących do Heinricha Buza powstał prototyp silnika wysokoprężnego. Prace nad nim sfinansowało przedsiębiorstwo Kruppa. Silnik konstrukcji Rudolfa Diesla nie tylko przyniósł swemu twórcy ogromną sławę i bogactwo, ale przede wszystkim zrewolucjonizował w kolejnych dziesięcioleciach wiele dziedzin transportu i energetyki. Nazwa „diesel” (pisana małą lub wielką literą) weszła do większości języków świata jako określenie



Rys. 1. Rudolf Diesel (1858–1913) – twórca spalinowego silnika wysokoprężnego (fot. domena publiczna).

Fig. 1. Rudolf Diesel (1858–1913) – inventor of the internal combustion compression-ignition engine engine (source: public domain).

spalinowego silnika wysokoprężnego i stosowanego w nim paliwa: oleju napędowego będącego mieszaniną węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych uzyskiwaną w procesie destylacji surowej ropy naftowej.

W silniku Diesla energia chemiczna zawarta w oleju napędowym jest przekształcana w energię cieplną w procesie spalania. Energia cieplna zawarta w gorących gazach spalinowych jest przekształcana w energię mechaniczną poprzez ich rozprężanie i chłodzenie. W ten sposób powstają siły działające na tłoki, korbowody i wał korbowy. Te podzespoły przekształcają liniowy, posuwisto-zwrotny ruch tłoków na ruch obrotowy wału korbowego. Spalanie w silniku wysokoprężnym jest reakcją chemiczną pomiędzy wodorem oraz węglem (wchodzącymi w skład paliwa węglowodorowego) a tlenem (dostarczany wraz z powietrzem atmosferycznym), w wyniku której uwalniana jest energia w postaci ciepła. Dla skutecznego zapłonu muszą być obecne trzy kluczowe elementy: paliwo, tlen oraz wysokie ciśnienie i wysoka temperatura wewnątrz cylindra. Wyeliminowanie któregośkolwiek z nich uniemożliwia proces spalania.

- **Paliwo** – olej napędowy, dostarcza energię dla reakcji chemicznej spalania. W cylindrach silnika energia chemiczna paliwa jest przekształcana w energię cieplną. Średnio olej napędowy odznacza się wartością opałową od 42 do 44 MJ/kg.
- **Tlen** z powietrza atmosferycznego jest drugim kluczowym elementem procesu spalania. Łączy się on z węglem i wodorem zawartym w paliwie, wytwarzając gazy spalinowe i ciepło.
- Zasadą działania tłokowego silnika wysokoprężnego jest sprężanie powietrza wewnątrz cylindrów do **wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury**, przekraczającej temperaturę zapłonu paliwa. Nie ma tu ryzyka samozapłonu, ponieważ sprężaniu podlega samo powietrze, zaś rozpylona mieszanka paliwowa dostarczana jest dopiero w chwili, kiedy ma się rozpocząć jej spalanie. Zapłon następuje zatem samoczynnie, bez inicjowania go za pomocą iskry elektrycznej, jak to ma miejsce w klasycznych silnikach Otto (np. w benzynowym silniku gaźnikowym). Paliwo wtryskiwane do silnika powinno odznaczać się szybkim i łatwym zapłonem w temperaturze, jaka panuje po sprężeniu powietrza [13].

Współcześnie spalinowe silniki wysokoprężne osiągają moce od kilkudziesięciu koni mechanicznych ($1 \text{ kW} = 1,36 \text{ KM}$) w przypadku konstrukcji czterocylindrowych stosowanych do napędu mniejszych samochodów osobowych do ponad 100 tysięcy KM (ponad 80 MW) w przypadku największych, kilkunastocylindrowych jednostek przeznaczonych dla układów napędowych dużych statków morskich, np. tankowców lub kontenerowców.

Silniki Diesla stosowane w zapasowych układach zasilania elektrowni jądrowych pozwalają na uzyskiwanie mocy rzędu od kilku do kilkunastu megawatów. Pod

względem osiąganych mocy, rozmiarów i większości rozwiązań konstrukcyjnych są one zatem zbliżone do silników spalinowych stosowanych w okrętach podwodnych o napędzie konwencjonalnym (diesel-elektrycznym), a także w dużych lokomotywach spalinowych.

Typowym rozwiązaniem jest tu silnik widlasty, wielocylindrowy rzędowy, w którym cylindry umieszczone są w dwóch rzędach pod określonym kątem wobec siebie. Tłoki w obu rzędach cylindrów połączone są korbami z wspólnym wałem korbowym. Układ widlasty silnika oprócz zwartej konstrukcji pozwala na duże pojemności skokowe cylindrów i tym samym uzyskanie wysokiej mocy. Stosowane są konfiguracje 12-, 14-, 16-, 18-, 20-cylindrowe. Znamionowa prędkość obrotowa, w zależności od typu silnika, wynosi od 600 do 1000 obr./min.

Stosowane są dwa typowe rozwiązania konstrukcyjne silników wysokoprężnych: dwusuwowe i czterosuwowe. Silniki Diesla czterosuwowe są najbardziej rozpowszechnione w większości zastosowań od najmniejszych do największych mocy znamionowych, począwszy od napędów samochodowych, a skończywszy na wielkich napędach morskich i przemysłowych agregatach prądowórczych. Wysokoprężne silniki dwusuwowe, w porównaniu do czterosuwowych, mają tendencję do generowania większej ilości zanieczyszczeń, co ogranicza ich zastosowanie w aplikacjach o mniejszej mocy znamionowej, np. w napędach samochodowych, gdzie obowiązują surowe normy emisji spalin. Odznaczają się one wysoką mocą na jednostkę masy i prostszą konstrukcją.

W czterosuwowym silniku wysokoprężnym wszystkie zdarzenia zachodzą podczas czterech suwów tłoka lub dwóch obrotów wału korbowego. Zaczynając od tłoka w górnym punkcie suwu i otwartego zaworu dolotowego powietrza, tłok przesuwa się w dół, zasysając powietrze do cylindra. Krótko po osiągnięciu przez tłok dolnego punktu suwu zawór dolotowy powietrza zamyka się. Gdy tłok porusza się w górę, cylinder zostaje uszczelniony, a powietrze sprężone. Temperatura powietrza wzrasta w miarę sprężania, a paliwo jest wtryskiwane na krótko przed osiągnięciem przez tłok górnego punktu suwu. Paliwo jest natychmiast zapalane przez gorące powietrze i rozpoczyna się jego spalanie. Pod wpływem ciepła spalania gazy rozprężają się i dociskają tłok w dół podczas suwu pracy. Tuż przed końcem suwu otwiera się zawór wydechowy, który pozostaje otwarty przez cały suw wydechu. Zawory dolotowe powietrza otwierają się pod koniec suwu wydechu, umożliwiając napływającemu powietrzu oczyszczenie cylindra ze spalin i wspomaganie chłodzenia.

Cykl dwusuwowy składa się z suwu w dół i suwu w górę. Każdy suw w dół obejmuje fazę pracy, a każdy suw w górę fazę sprężania. W dwusuwowym silniku wysokoprężnym oba zawory w górnej części cylindra są zaworami wydechowymi. Kanały dolotowe powietrza (otwory) w dolnej ścianie cylindra są otwierane lub zamykane

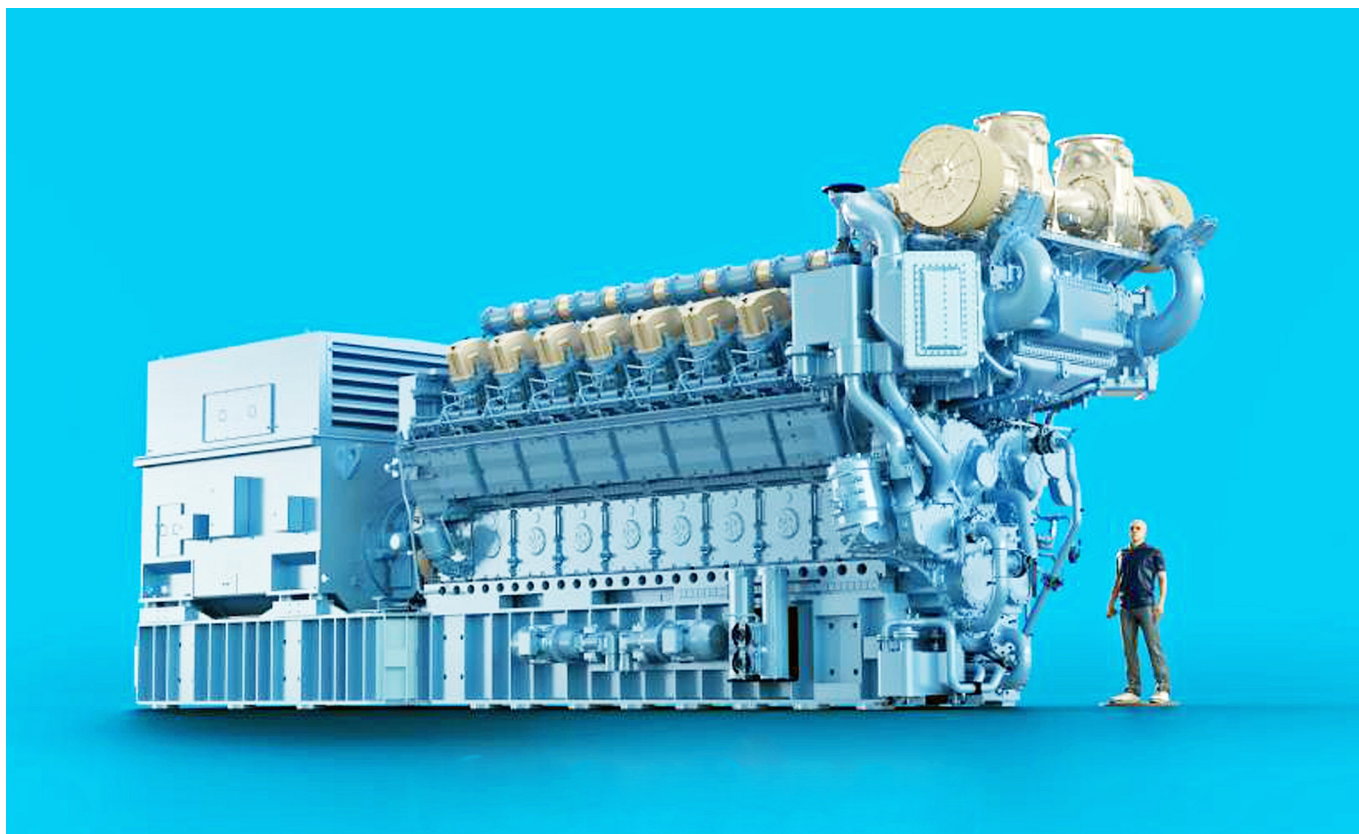
w zależności od położenia tłoka w cylindrze. Gdy tłok znajduje się blisko dna między suwami, kanały dolotowe są otwarte, a powietrze jest wtłaczane do cylindra przez dmuchawę (pompę powietrza). Świeże powietrze wpadające do cylindra wypycha (przedmucha) resztkowe gazy spalinowe z jego wnętrza przez otwarte zawory wydechowe. Zatem cykl dwusuwowy łączy funkcję przedmuchu spalin i dolotu powietrza wokół dolnego martwego punktu cyklu. W miarę jak tłok unosi się, zawory wydechowe zamykają się, a dmuchawa tłoczy dodatkowe powietrze przez kanały dolotowe, powodując wzrost ciśnienia powietrza w cylindrze powyżej ciśnienia atmosferycznego (doładowanie). W miarę jak tłok unosi się, kanały dolotowe zamykają się, a ciągły ruch tłoka w górę spręża powietrze w cylindrze. Gdy tłok zbliża się do górnej części suwu w górę, wtryskiwacz wtryskuje paliwo do cylindra. Mieszanka paliwowo-powietrzna zapala się pod wpływem ciepła wytworzonego podczas sprężania powietrza. Proces spalania powoduje gwałtowny wzrost temperatury i ciśnienia gazu w cylindrze, co powoduje popychanie tłoka w dół. Rozprężający się gaz działa na tłok, wytwarzając moc mechaniczną.

4. Zabudowa, układy i podzespoły agregatu prądowórczego

W energetycznym bloku jądrowym agregaty prądowórcze instalowane są na ogół w oddzielnych budynkach znajdujących się w bezpośredniej bliskości zabudowań wysp jądrowej i turbinowej. Takie odseparowanie pozytywnie wpływa na podwyższenie bezpieczeństwa i ułatwia dostęp do agregatów w sytuacjach awaryjnych. Jeżeli w budynku zabudowane są dwie jednostki prądowórcze, wówczas oddziela się je tzw. ścianą ogniową (ang. *firewall*), chroniącą przed rozprzestrzenieniem się ognia na drugą jednostkę w przypadku pożaru pierwszej. Budynki mieszczące agregaty są niejednokrotnie rozmieszczane po przeciwnych stronach wyspy jądrowej, tak aby zapewnić dodatkową redundancję na wypadek uderzenia statku powietrznego.

Wysokoprężny silnik spalinowy zabudowany jest na ogół na wspólnej konstrukcji wsporczej z napędzanym przez niego generatorem elektrycznym wraz z łączącym je sprzęgłem na wale oraz kołem zamachowym (patrz rysunek 2). Większość spośród układów i podzespołów niezbędnych do działania agregatu znajduje się wewnątrz budynku, w którym jest on zainstalowany.

Konfiguracja układów zasilania awaryjnego w elektrowni jądrowej zapewniać musi niezbędną redundancję. Z zasady powinny być stosowane co najmniej dwa wzajemnie rezerwujące się układy, choć bywa stosowane zwielokrotnienie trzy- lub czterokrotne. W blokach z reaktorami wodno-ciśnieniowymi typu EPR i APR-1400 zastosowano aż cztery duże jednostki agregatów prądo-



Rys. 2. Agregat prądowórczy zasilania zapasowego dla elektrowni jądrowej: zespół silnika wysokoprężnego i generatora synchronicznego zabudowany na wspólnej konstrukcji wsporczej (rys. Électricité de France / Eiffage / SPIESPIE Nucléaire).

Fig. 2. Emergency Diesel Generator for a nuclear power plant: a diesel engine and synchronous generator assembly mounted on a common support structure (source: Électricité de France / Eiffage / SPIESPIE Nucléaire).

twórczych o mocy kilku megawatów każdy uzupełnione o dwie mniejsze jednostki (razem aż 6 agregatów). W przypadku bloku EPR cztery większe jednostki mają moc znamionową po 7,8 MW każda, a dwie mniejsze po 3 MW każda. W bloku AP1000, którego konstrukcja w pełnijszy sposób spełnia postulaty dla pasywnego chłodzenia reaktora, zastosowano tylko dwa duże agregaty prądowórcze o mocy „megawatowej” uzupełnione dwoma małymi agregatami pomocniczymi. Są one zainstalowane w przeznaczonym do tego celu budynku (patrz rysunek 3) na zewnątrz głównych zabudowań bloku jądrowego na dwóch stanowiskach rozdzielonych ścianą o wysokiej odporności ogniowej. W blokach typu AP1000 Vogtle 3 i 4 zastosowano agregaty ESDG (ang. *Emergency Standby Diesel Generator*) firmy Caterpillar-Milton typu CAT C280-16 z 16-cylindrowymi silnikami wysokoprężnymi (patrz rysunek 4). Moc znamionowa ciągu zespołu prądowórczego wynosi 5200 kW, moc maksymalna dysponowana 5720 kW, znamionowa prędkość obrotowa 900 obr./min. Generator synchroniczny Kato/Emerson wytwarza prąd przemienny trójfazowy o napięciu 6900 V (6,9 kV) i częstotliwości 60 Hz.

Warto tu zauważyć, że w blokach jądrowych II generacji o podobnej mocy znamionowej jak współczesne AP1000 stosowano w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. znacznie mocniejsze agregaty prądowórcze, ze

względu na realizowane przez nie funkcje bezpieczeństwa jądrowego. Na przykład w sąsiednich blokach Vogtle 1 i 2 zainstalowane są jednostki Delaval Entreprise o jednostkowej mocy elektrycznej aż 7,7 MW. Są to jedne z największych agregatów prądowórczych w amerykańskiej energetyce jądrowej.

Oprócz dużych agregatów klasy „megawatowej” współczesny blok jądrowy wyposażony jest w pomocnicze zespoły prądowórcze. Na przykład w blokach Vogtle 3 i 4 w budynku gospodarki odpadami promieniotwórczymi (ang. *Radwaste Building*) znajdują się dwa agregaty ADGU (ang. *Ancillary Diesel Generator Unit*) o mocy 80 kW każdy, produkcji Caterpillar-Milton, 480 V/60 Hz przeznaczone w razie konieczności do dostarczania energii przez czas do 72 h do odbiorców nie związanych z bezpieczeństwem (*non-Class 1E*) – patrz rysunek 5.

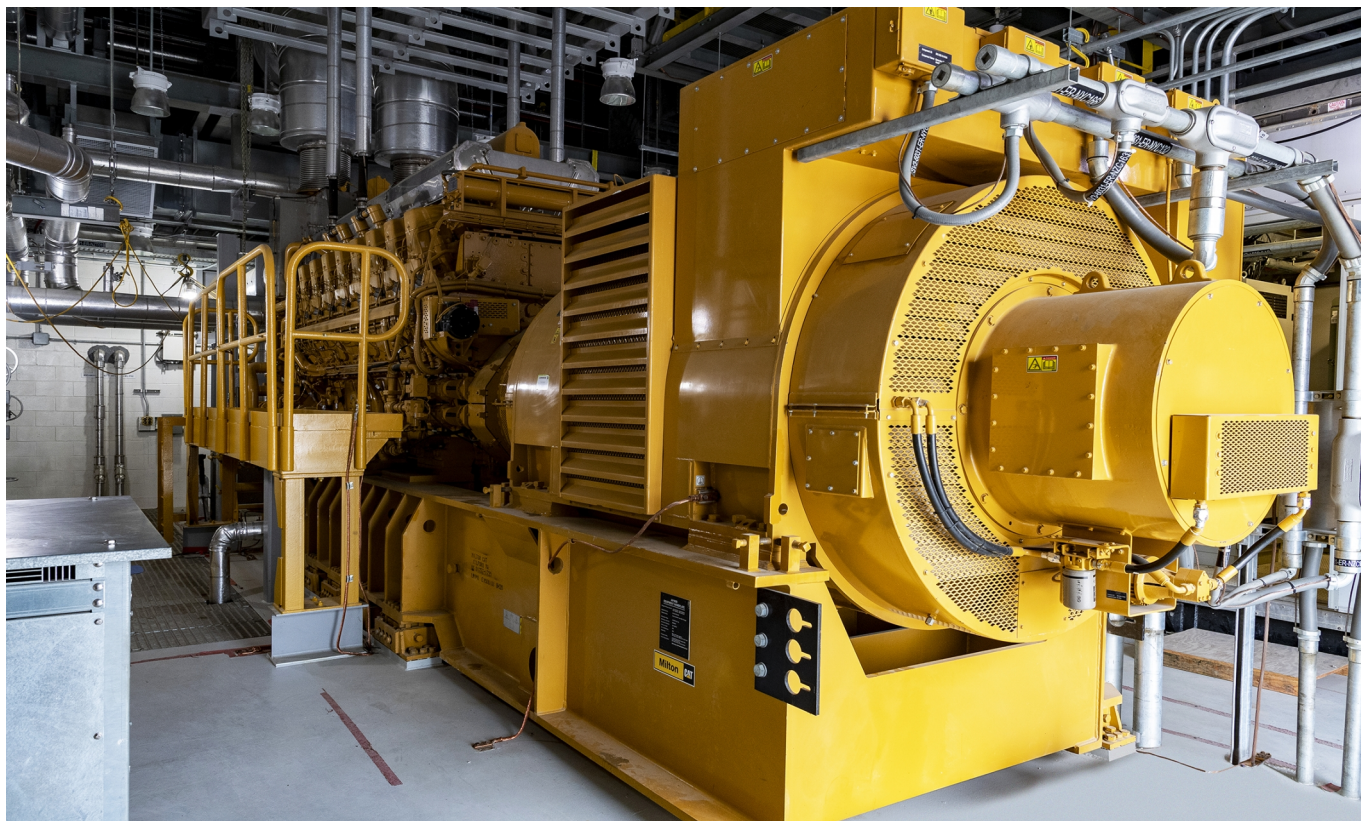
Doświadczenia wynikłe z katastrofy w Fukushima spowodowały wprowadzenie nowych wymagań dla wyprowadzenia przyłączy do głównych szyn rozdzielnic zasilających potrzeby własne na zewnątrz budynków bloku elektrowni. Tego rodzaju zewnętrzne przyłącza elektryczne pozwalają na podłączenie przewoźnych agregatów prądowórczych, jakie w sytuacji awaryjnej mogłyby zostać dostarczone spoza terenu elektrowni.

W kolejnych punktach poniżej omówione zostaną poszczególne układy pomocnicze zapasowych agregatów



Rys. 3. Budynek zapasowych agregatów prądowłórczych bloku jądrowego Vogtle 4 podczas budowy w marcu 2022 r. (fot. Georgia Power Company).

Fig. 3. Diesel generators building in the Vogtle 4 nuclear power unit during construction in March 2022 (source: Georgia Power Company).



Rys. 4. Agregat prądowłórczy Caterpillar-Milton typu CAT C280-16 z 16-cylindrowym silnikiem wysokoprężnym zainstalowany w energetycznym bloku jądrowym Vogtle 3 (fot. Georgia Power Company).

Fig. 4. Caterpillar-Milton CAT C280-16 genset unit with a 16-cylinder diesel engine installed in a nuclear power plant Vogtle 3 (source: Georgia Power Company).



Rys. 5. Ogólny widok energetycznych bloków jądrowych nr 3 (z lewej) i 4 (z prawej) w elektrowni Alvin W. Vogtle Electric Generating Plant w Waynesboro w Georgii – najnowszych w energetyce amerykańskiej: A – budynki agregatów prądotwórczych – w każdym zainstalowane są dwie jednostki ESDG, każda o mocy 5,72 MW; B – główne zewnętrzne zbiorniki paliwa do agregatów – każdy o pojemności 227 100 dm³, C – miejsce zainstalowania mniejszych agregatów ADGU – w każdym bloku 2 jednostki, każda o mocy 80 kW (fot. Georgia Power Company, odnośniki autora).

Fig. 5. General view of Units 3 (left) and 4 (right) at the Alvin W. Vogtle Electric Generating Plant in Waynesboro, Georgia – the newest plant in the U.S. nuclear power inventory: A – generator buildings – each with two ESDG units installed, each with a capacity of 5.72 MW; B – main external fuel tanks for the generators – each with a capacity of 227 100 liters; C – installation location for smaller ADGU generators – each unit with two units, each with a capacity of 80 kW (source: Georgia Power Company, author's references).

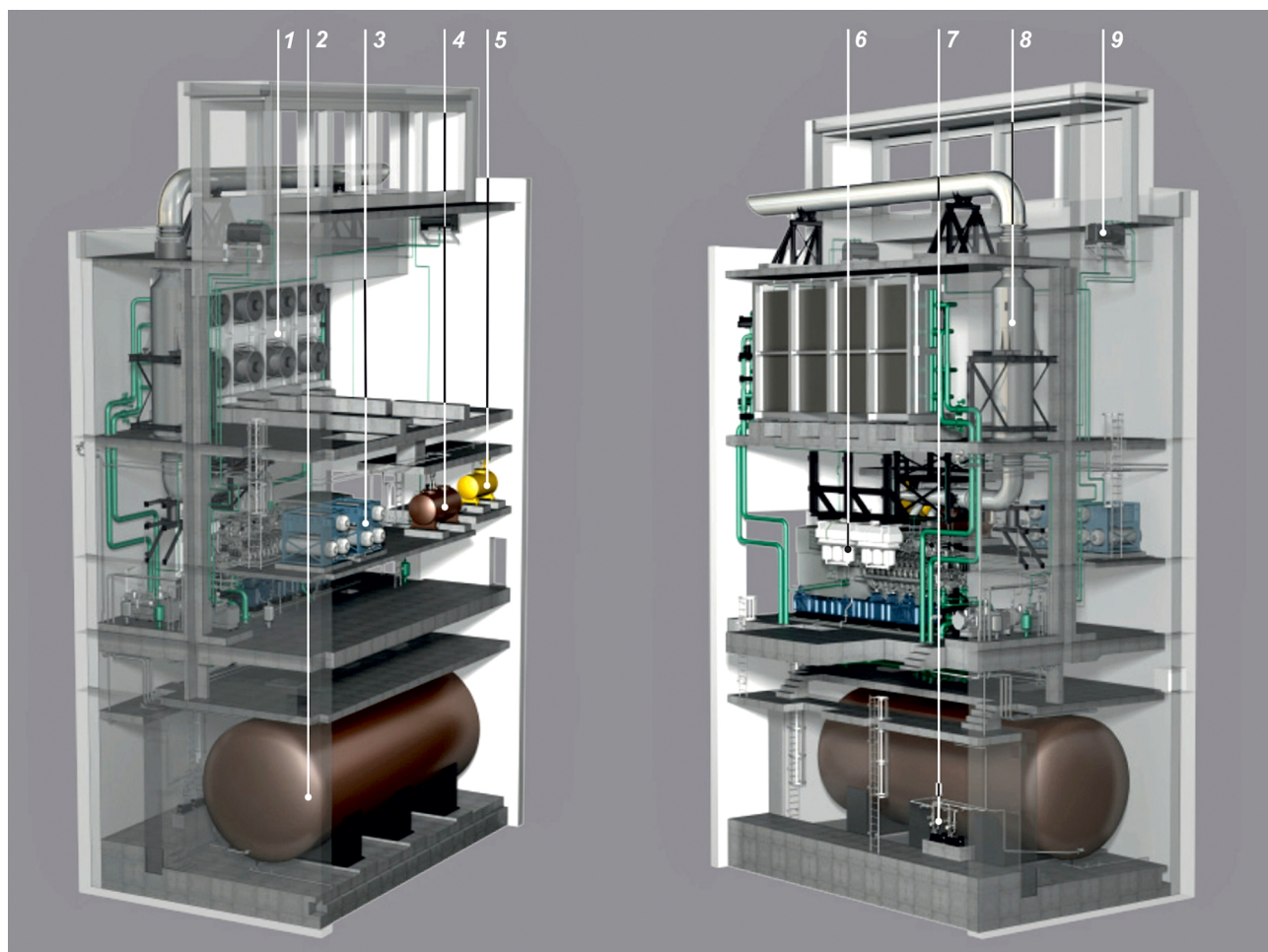
prądotwórczych stosowanych w elektrowniach jądrowych. Na rysunku 6 pokazany jest przykład zabudowy dużego agregatu prądotwórczego bloku jądrowego firmy MTU wraz z instalacjami towarzyszącymi. Z kolei na rysunku 7 pokazany jest schemat blokowy podstawowych systemów zapasowego agregatu prądotwórczego dla energetycznego bloku jądrowego.

4.1. Układ rozruchowy

Zadaniem układu rozruchowego jest zainicjowanie pracy agregatu poprzez zapewnienie odpowiednich warunków wewnątrz cylindrów silnika spalinowego celu zapoczątkowania spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Rozruch silnika dokonuje się poprzez wielokrotne obrócenie wału korbowego silnika i nadanie mu odpowiedniej prędkości obrotowej, przy której może on rozpocząć samodzielną pracę. Wykonanie kilku – kilkunastu obrotów pozwala na osiągnięcie wymaganej prędkości obrotowej, przy której wewnątrz cylindrów podczas suwu sprężania powstaje ciśnienie konieczne do samozapłonu mieszanki paliwowej. W większości agregatów prądotwórczych stosowanych w aplikacjach jądrowych wykorzystuje się układy sprężonego powietrza zmagazynowanego w zbiornikach ciśnieniowych. Źródłem energii elektrycznej dla układu sterowania oraz układu wzbudzenia generatora synchronicznego w fazie rozruchu jest bateria akumulatorów. Do zapewnienia wysokich kryteriów niezawodnościowych

objętość zbiorników sprężonego powietrza powinna być wystarczająca dla przeprowadzenia kilku rozruchów bez doładowywania (w przypadku agregatów zastosowanych w blokach Vogtle 3 i 4 są to trzy próby rozruchu).

Najszerzej stosowanym systemem rozruchu pneumatycznego w awaryjnych generatorach diesla elektrowni jądrowych jest **układ doprowadzający sprężone powietrze bezpośrednio do cylindrów**. W tej metodzie rozruchu zawory rozdzielcze wysyłają strumienie sprężonego powietrza do cylindrów silnika w kolejności, w jakiej podczas pracy ciągłej silnika następują kolejne zapłony mieszanki paliwowo-powietrznej. Sprężone powietrze popycha tłoki w odpowiedniej kolejności, powodując obrót wału korbowego. Odmiany tej metody obejmują pojedyncze zawory rozdzielcze wielodrożne oraz pojedyncze zawory zasilające poszczególne cylindry, których otwieranie i zamykanie jest sterowane przez przekładnię zębatą sprzężoną z wałem korbowym silnika. Efektem końcowym obu metod jest szybki obrót wału korbowego i wytworzenie odpowiedniego ciśnienia i temperatury w cylindrach, aby zapalić paliwo po jego dostarczeniu. Stosowane w tych układach elektrozawory (zamykane i otwierane za pomocą elektromagnesów) sterują dopływem sprężonego powietrza i zasilane są z baterii akumulatorów. Odpowiednia redundancja w systemie zapewniona jest poprzez zwielokrotnienie zbiorników sprężonego powietrza i układów zasilania prądem stałym. W sytuacji, w której wszystkie układy są sprawne, do uruchomienia silnika wysoko-



Rys. 6. Zabudowa agregatu prądotwórczego, wraz instalacjami towarzyszącymi, w dużym energetycznym bloku jądrowym: 1 – wentylatory układu chłodzenia; 2 – główny zbiornik paliwa; 3 – zbiorniki sprężonego powietrza dla układów rozruchu; 4 – pomocniczy zbiornik paliwa; 5 – zbiornik oleju układu smarowania; 6 – silnik wysokoprężny i generator; 7 – pompa paliwowa; 8 – tłumik gazów spalinowych układu wydechowego; 9 – zbiornik wyrównawczy układu chłodzenia (rys. MTU Onsite Energy, Rolls-Royce Power Systems).

Fig. 6. Generator installation, along with associated installations, in a large nuclear power unit: 1 – cooling system fans; 2 – main fuel tank; 3 – compressed air tanks for Diesel engine starting systems; 4 – auxiliary fuel tank; 5 – lubrication system oil tank; 6 – Diesel engine and generator; 7 – fuel pump; 8 – exhaust gas silencer; 9 – cooling system expansion tank (source: MTU Onsite Energy, Rolls-Royce Power Systems).

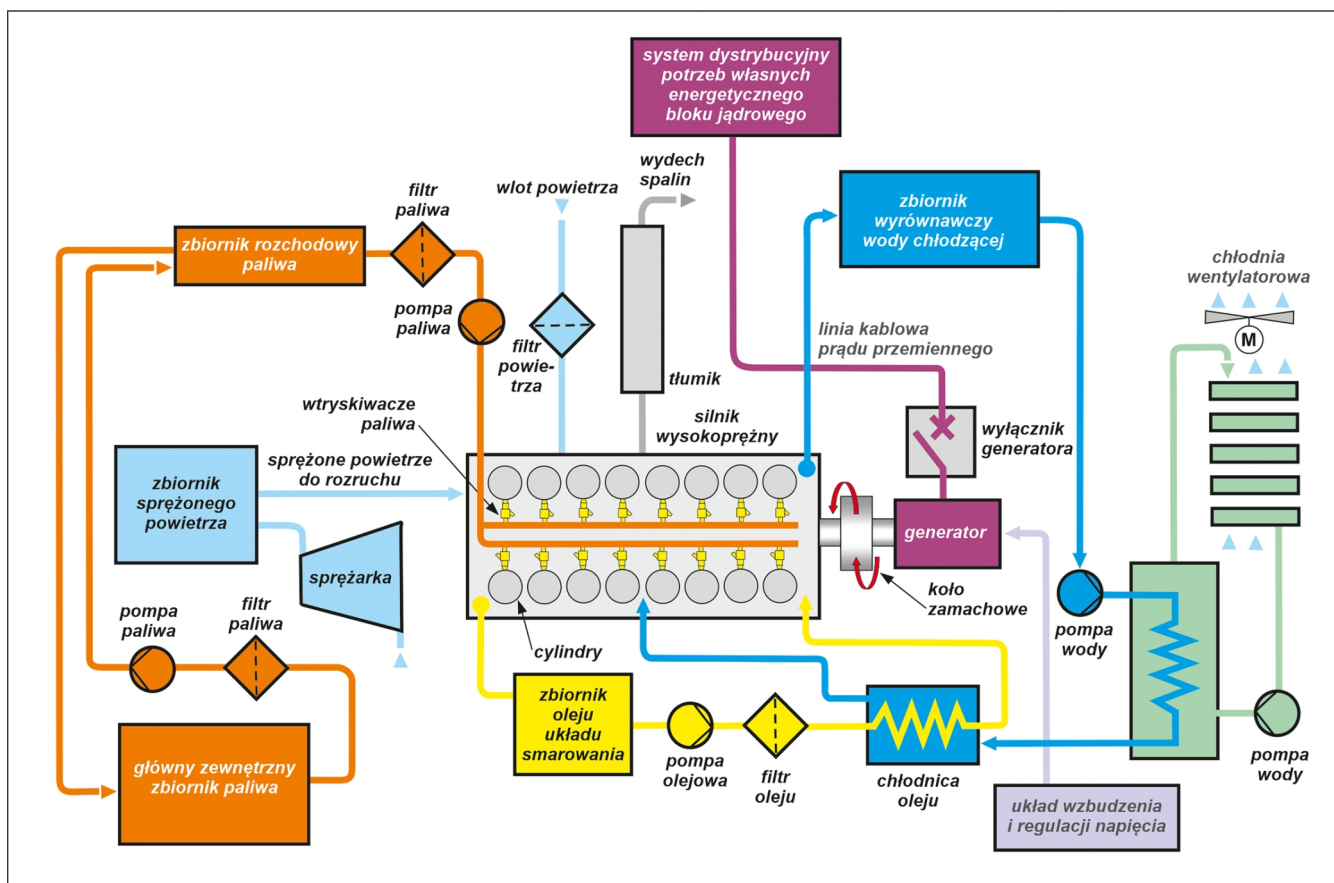
prężnego potrzebna jest zaledwie połowa dostępnej mocy układu rozruchu pneumatycznego.

W niektórych typach agregatów stosuje się **układy rozruchowe z silnikami pneumatycznymi**. Pod względem zasady działania są one podobne do typowych pneumatycznych napędów przemysłowych używanych np. do napędu wiertarek, kluczy do połączeń śrubowych, podnośników itp. Po doprowadzeniu powietrza do silnika pneumatycznego jego wirnik zaczyna się obracać. Oś silnika pneumatycznego łączy się wówczas poprzez przekładnię zębatą z wałem silnika wysokoprężnego. Gdy prędkość obrotowa przekroczy określony punkt (od około 200 do 250 obr./min), koło zębate silnika pneumatycznego zostaje odłączone, dopływ powietrza do silnika rozrusznika odcięty, a jednocześnie otwarty dopływ paliwa do silnika wysokoprężnego. Do rozpędzenia dużego silnika wysokoprężnego mogą być wykorzystywane układy rozruchowe złożone nawet z ośmiu pracujących równolegle silników pneumatycznych. W przypadku agregatów wykorzystanych w blokach Vogtle 3 i 4 rozruch wykonują dwa silniki pneumatyczne.

W mniejszych agregatach prądotwórczych instalowanych w elektrowniach jądrowych stosuje się **elektryczne układy rozruchowe** wykorzystujące do obrotu wału korbowego silniki prądu stałego – podobnie jak w samochodowych układach rozruchowych. Sekwencja rozruchu następuje tu podobnie jak w przypadku silnika pneumatycznego. Po otrzymaniu sygnału do rozruchu elektromagnes uruchamia mechanizm załączający, który wciska koło zębate napędu elektrycznego w zazębienie z wieńcem zębatym koła zamachowego silnika spalinowego. Po osiągnięciu odpowiedniej prędkości wału korbowego (a tym samym wystarczającego ciśnienia i temperatury powietrza w cylindrach) podawana jest mieszanka paliwowo-powietrzna, a elektryczny silnik rozruchowy jest odłączany.

4.2. Układ paliwowy

Zapas oleju napędowego przeznaczonego dla zapasowego agregatu prądotwórczego w elektrowni jądrowej zgromadzony jest w zbiorniku/zbiornikach poza budynkiem i wystarcza na co najmniej 7 dni nieprzerwanej pracy



Rys. 7. Schemat blokowy podstawowych systemów zapasowego agregatu prądotwórczego dla energetycznego bloku jądrowego (rys. autora).
Fig. 7. Block diagram of the basic systems of the emergency Diesel generator for a nuclear power unit (source: author's own work).

z pełną mocą. Paliwo pompowane jest podziemnymi przewodami ze zbiornika zewnętrznego do budynku agregatu, gdzie dostarczane jest do zbiornika rozchodowego (ang. *day tank*) poprzez układ filtrów wychytujących potencjalne zanieczyszczenia. W przypadku zapasowych agregatów prądotwórczych bloków Vogtle 3 i 4 zastosowano zbiorniki rozchodowe o pojemności 4920 dm³ (na 1 agregat) z zapasem paliwa wystarczającym na 4-godzinną pracę z pełną mocą. Zapas paliwa w oddzielnym zbiorniku na zewnątrz budynku ma objętość 227 100 dm³ (na 1 agregat), co wystarcza na ponad tygodniową, nieprzerwaną pracę.

Finalnym etapem pracy układu paliwowego jest dostarczenie oleju napędowego do cylindrów silnika za pomocą układu wtrysku wysokociśnieniowego. Jego zadaniem jest dozowanie ilości paliwa niezbędnej do każdego cyklu pracy oraz wytworzenie wysokiego ciśnienia koniecznego do wtrysnięcia paliwa do danego cylindra w odpowiedniej chwili. Układ kontroluje prędkość wtryskiwanego strumienia paliwa, rozpyla mieszkankę paliwowo-powietrzną i rozprowadza ją we wnętrzu cylindra będącego komorą spalania. Powyższe zadania realizowane są przez złożony i bardzo precyzyjny układ raptownie włączający i wyłączający dopływ paliwa w krótkich odstępach czasu. Stopień sprężania w układzie wtrysku wynosi około 15/1. Niektóre z systemów sprężania osiągają ciśnienia przekraczające

30 MPa (!) przy znamionowym obciążeniu i znamionowej prędkości obrotowej agregatu.

Dozowanie paliwa przez układ rozrządu zaworowego musi być precyzyjne: taka sama ilość paliwa musi być dostarczana do każdego cylindra na każdy suw pracy. Jeśli ilość paliwa zmieni się w różnych cylindrach, zmieni się również moc przypadająca na cylinder, co doprowadzi do nierównej pracy silnika i nadmiernych drgań. Paliwo musi być wtryskiwane w odpowiednim momencie. Zbyt wczesny lub późny wtrysk powoduje utratę mocy. Jeśli paliwo zostanie wtrysknięte zbyt wcześnie, gdy sprężanie nie osiągnie maksimum, temperatura sprężonego powietrza będzie zbyt niska, a zapłon opóźniony. Jeśli wtrysk jest opóźniony, tłok może przekroczyć górny martwy punkt, a moc będzie niższa, ponieważ nie nastąpi maksymalne rozprężenie mieszanki paliwowo-powietrznej. Wtrysk musi się rozpocząć natychmiast, trwać przez określony czas, a następnie gwałtownie się zatrzymać, aby uzyskać maksymalną możliwą wydajność.

Szybkość wtryskiwania paliwa różni się w zależności od typu silnika i w dużej mierze zależy od rodzaju i kształtu komór spalania, a także od prędkości obrotowej silnika i charakterystyki zastosowanego paliwa. Wtrysk paliwa musi być odpowiednio ustawiony w czasie. Zbyt szybkie wtrysknięcie paliwa przynosi podobny skutek, jak zbyt wczesny wtrysk. Podobnie, zbyt wolny i rozciągnięty w czasie wtrysk daje efekt podobny do wtrysku opóźnionego.

Paliwo trafia do cylindra silnika w postaci drobinek oleju napędowego rozpylonych w powietrzu. Prawidłowe rozpylenie mieszanki paliwowo-powietrznej zwiększa powierzchnię paliwa wystawionego na działanie tlenu, dając w efekcie skuteczniejsze spalanie i większą moc silnika. Początkowa część strumienia mieszanki musi się składać ze stosunkowo drobnych kropelek do zainicjowania spalania, a następnie większych kropelek potrzebnych podczas głównej części procesu. Stopień rozpylenia paliwa sterowany jest dzięki odpowiedniej średnicy i kształtowi dyszy, ciśnienia wtrysku oraz gęstości sprężonego powietrza w cylindrze, do którego następuje wtrysnięcie mieszanki.

We współczesnych silnikach wysokoprężnych stosowane są cztery rodzaje mechanicznego wtrysku paliwa: układ pompowtryskiwaczy (ang. *unit injector system* lub *cylinder injector system*), układ *common rail*, układ z pompą wporową (ang. *jerk pump*) oraz układ rozdzielacza. W przypadku silników wysokoprężnych stosowanych w zapasowych agregatach prądotwórczych w elektrowniach jądrowych najpowszechniej stosowany jest układ pompowtryskiwaczy. Pompa wporowa i wtryskiwacz tworzą tu pojedynczy zespół dla każdego cylindra. Dzięki temu rozwiązaniu nie ma potrzeby stosowania wysokociśnieniowych przewodów paliwowych prowadzonych wzdłuż silnika spalinowego. Tłoczek pompowtryskiwacza napędzany jest za pomocą systemu dźwigni i popychaczy z wałka rozrządu napędzanego od wału korbowego silnika. Gdy tłoczek przesuwa się w górę – tj. od dyszy wtryskiwacza, odsłania się otwór wlotowy paliwa, co powoduje wpuszczenie oleju napędowego do przestrzeni pod tłoczkiem. Gdy tłoczek pompy przesuwa się w dół, w trakcie suwu tłoczenia, paliwo jest sprężane do ciśnienia wystarczającego do pokonania siły sprężynowego zaworu w dyszy wtryskiwacza. Po otwarciu zaworu paliwo jest wtryskiwane do cylindra. Cały tłoczek może się obracać w korpusie pompy wtryskowej. Im dalej obraca się tłoczek, tym dłuższy jest suw sprężania, zanim dopływ paliwa do cylindra ustanie. Dłuższy efektywny suw sprężania oznacza, że do cylindra wtryskiwana jest większa ilość paliwa. Obrót tłoczka w korpusie pompy wtryskowej jest sterowany przez regulator silnika.

4.3. Układ smarowania

Zadaniem układu smarowania jest zapewnienie ciągłego przepływu oleju smarowego do wszystkich powierzchni trących w elementach ruchomych silnika wysokoprężnego w celu zapewnienia właściwego poślizgu, a dodatkowo do odbioru ciepła z tłoków poruszających się w cylindrach. Cyrkulację oleju zapewniają zwykle dwie pracujące równolegle pompy. Pompa napędzana silnikiem elektrycznym prądu stałego działa przez cały czas – niezależnie od tego, czy silnik spalinowy agregatu pracuje, czy nie. Olej tłoczony przez pompę elektryczną przechodzi przez filtry oraz grzałkę rezystancyjną. Druga, główna pompa olejowa

napędzana od wału silnika jest czynna tylko podczas pracy agregatu. Pompuje ona olej przez zawór sterowany termostaticznie, filtr i wymiennik ciepła układu chłodzenia.

Rezystancyjna grzałka oleju smarowego w obiegu pompy elektrycznej włącza się automatycznie poniżej temperatury oleju 59°C i prędkości obrotowej 125 obr./min. Podczas pracy silnika chłodnica oleju smarowego i termostaticznie sterowany zawór obejściowy regulują temperaturę oleju w zakresie od 63 do 71°C.

Układ zaworów cylindrów i powiązanych z nim dźwigienek zaworowych wyposażony jest w indywidualny system smarowania do ochrony oleju w skrzyni korbowej przed zanieczyszczeniem wodą chłodzącą lub wyciekami paliwa. Układ ten składa się z pompy olejowej napędzanej od wału silnika, która zasysa olej ze zbiornika oleju zaworowego zamontowanego na silniku i pompuje go w celu smarowania układu rozrządu. Olej smarowy spływa następnie z głowic cylindrów z powrotem do zbiornika oleju zaworowego. Układ zawiera również napędzaną silnikiem pompę wstępnego smarowania, która zapewnia dopływ oleju podczas rozruchu i wyłączenia silnika.

4.4. Układ chłodzenia wodnego

Ciepło wytwarzane podczas spalania paliwa w cylindrach oraz ciepło powstające na skutek tarcia elementów mechanicznych jest odprowadzane przez układ chłodzenia wodnego. Zamknięty obieg wody chłodzącej z płaszczem wokół cylindrów wewnątrz bloku silnika usuwa nadmiar ciepła powstającego podczas pracy. Oddzielny, zamknięty obieg wody chłodzącej zapewnia chłodzenie oleju, który odbiera ciepło z powierzchni trących się wzajemnie elementów mechanicznych. Do chłodzenia wykorzystywana jest woda użytkowa (ang. *service water* lub *nuclear service water*) cyrkulująca w instalacji wyposażonej w wymienniki pozwalające na oddanie nadmiaru ciepła do powietrza atmosferycznego.

Większość silników wysokoprężnych agregatów zasilania zapasowego wyposażona jest w turbosprężarkę z chłodnicą międzystopniową z wymiennikiem ciepła. Wymiennik ciepła chłodnicy międzystopniowej, wymiennik ciepła płaszcza wodnego i chłodnica oleju smarowego są chłodzone wodą użytkową. Układ płaszcza wodnego otaczającego cylindry przeznaczony jest do odprowadzania ciepła powstającego w nich podczas spalania. Podczas pracy silnika płaszcz wodny jest zasilany przepływem wody chłodzącej z pompy napędzanej od wału głównego. Temperatura układu chłodzenia wodnego jest utrzymywana przez zawór sterowany termostaticznie, który omija część przepływu zwrotnego wokół wymiennika ciepła. System ten utrzymuje temperaturę wody poza wymiennikiem ciepła w zakresie od 74 do 84°C. Po wyłączeniu silnika wysokoprężnego automatycznie uruchamia się elektryczna pompa wodna, aby utrzymać przepływ przez płaszcz wodny cylindrów. Gdy temperatura płaszcza

wodnego spadnie, zostają uruchomione podgrzewacze wody, aby stale utrzymywać wyłączony silnik spalinowy w temperaturze od 63 do 68°C.

Chłodnia wentylatorowa wody montowana jest zwykle na dachu budynku mieszczącego agregaty prądotwórcze. Woda przepływa przez radiatory, które z kolei mają zapewnione chłodzenie powietrzne wymuszone przez wentylatory elektryczne pracujące w płaszczyźnie poziomej (patrz rysunek 8).

4.5. Układy przedmuchu, odprowadzania spalin, doładowania i turbodoładowania

Spaliny pochodzące z procesu spalania są usuwane z cylindra, czyli **przedmuchiwane**, przez powietrze o ciśnieniu nieznacznie wyższym od atmosferycznego, dostarczane przez odpowiednie dmuchawy.

Doładowanie to dostarczanie powietrza dolotowego o ciśnieniu wyższym od atmosferycznego w celu poprawienia procesu spalania. W niektórych mniejszych agregatach dieslowskich doładowanie zapewnia dmuchawa napędzana wałkiem pomocniczym od wału głównego silnika. Agregaty o większej mocy wykorzystują doładowanie z turbosprężarkami. Gorące spaliny z silnika napędzają turbinę, która z kolei napędza przymocowaną do niej dmuchawę doładowującą.

Spaliny odprowadzane są do atmosfery poprzez układ tłumików – zmniejszających poziom generowanego przez silnik spalinowy hałasu.

4.6. Systemy sterowania

Systemy sterowania regulują strumień paliwa dostarczanego do silnika wysokoprężnego w celu utrzymania zadanej prędkości obrotowej, ustalania tempa przyspieszania przy rozruchu, prędkości obrotowej biegu jałowego i przeciwdziałania zmianom obciążenia.

Hydrauliczne regulatory obrotów zastąpiły regulatory mechaniczne w ewolucji układów sterowania silnikami. Zapewniają one odpowiednią czułość, prędkość działania i sterowanie izochroniczne. Układ steruje przepływem oleju hydraulicznego do i z serwomechanizmu sterującego dopływem paliwa. Kontrola stabilności i spadku prędkości może być wbudowana w hydrauliczny regulator obrotów poprzez mechanizm sprzężenia zwrotnego. Stosuje się przy tym układ kompensujący, aby zapobiec ciągłym wahaniom i nadmiernej korekcie ustawień dopływu paliwa. Hydrauliczne regulatory obrotów są bardziej czułe niż stosowane dawniej regulatory mechaniczne i lepiej nadają się do większych silników wymagających dokładniejszej regulacji paliwa.

Regulacja prędkości obrotowej silnika wysokoprężnego z zachowaniem ścisłych tolerancji wymaganych do utrzymania precyzyjnej częstotliwości generatora synchronicznego jest zazwyczaj możliwa jedynie w układzie z **regulatorem elektronicznym**. Nowoczesne sterowniki współczesnych agregatów prądotwórczych są złożonymi układami elektronicznymi zbudowanymi na bazie techniki mikroprocesorowej. Obwody elektroniczne regulatora umożliwiają precyzyjną pracę w trzech trybach: regulacji obciążenia, regulacji prędkości obrotowej i regulacji



Rys. 8. Chłodnia wentylatorowa na budynku agregatów prądotwórczych obsługujących dwa starsze bloki 1 i 2 Elektrowni Jądrowej Olkiluoto w Finlandii (Fot. TVO).

Fig. 8. Fan cooling system on the Diesel generator building serving two older units 1 and 2 of the Olkiluoto Nuclear Power Plant in Finland (source: TVO).



Rys. 9. Dostawa używanego silnika wysokoprężnego do Elektrowni Jądrowej Loviisa w Finlandii. Agregat prądotwórczy został zakupiony z likwidowanej EJ Krümmel w Niemczech (fot. Vattenfall).

Fig. 9. Delivery of a used diesel engine to the Loviisa Nuclear Power Plant in Finland. The genset was purchased from the decommissioned Krümmel NPP in Germany (source: Vattenfall).

rozruchu (przyspieszania). Bardziej szczegółowe omówienie regulacji pracy agregatu w zależności od konfiguracji, w jakiej pracuje (praca samodzielna, praca równoległa) podane zostanie w drugiej części artykułu.

4.7. Generator i układy elektryczne

W zapasowych agregatach prądotwórczych zazwyczaj wykorzystywane są synchroniczne generatory prądu przemiennego (zwane również alternatorami). Zadaniem generatora jest przekształcenie energii mechanicznej silnika Diesla w energię elektryczną przekazywaną za pośrednictwem trójfazowego prądu przemiennego. Generator synchroniczny składa się z części obrotowej (wirnika) i części nieruchomej (stojana). Ten typ generatora jest preferowany ze względu na wysoką stabilność pracy i niezawodność. Trójfazowy prąd przemienny generowany jest w uzwojeniach stojana.

Obwód wzbudzenia generatora ma za zadanie wytworzenie pola magnetycznego powstającego w wyniku przepływu prądu stałego przez uzwojenia wirnika. W starszych rozwiązaniach prąd stały uzyskiwany był z prostownika zasilanego z oddzielnej prądnicy wzbudzenia. Obecnie zasilanie stałoprądowe wzbudzenia uzyskiwane jest z urządzeń energoelektronicznych zbudowanych na bazie elementów półprzewodnikowych.

Linia zasilająca z zapasowego generatora agregatu prądotwórczego połączona jest linią kablową z jedną z rozdzielni znajdującą się w budynkach energetycznego bloku jądrowego. Pole generatorowe rozdzielni wyposażone jest w wyłącznik.

5. Specyfika, wymagania projektowe i eksploatacyjne dla zapasowych agregatów prądotwórczych w energetyce jądrowej – przepisy prawne i wytyczne

Specyfika eksploatacji zapasowych agregatów prądotwórczych w elektrowni jądrowej polega na tym, że przez ogromną większość czasu normalnej pracy elektrowni agregaty pozostają wyłączone. Jednocześnie muszą one zachowywać pełną gotowość do natychmiastowego uruchomienia na wypadek sytuacji awaryjnej, kiedy muszą przejąć rolę źródeł zasilania istotnych układów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego, w sytuacji gdy niedostępne są preferowane źródła zasilania: przede wszystkim z własnego generatora turbozespołu, a także z sieci energetyki zawodowej poprzez układy rozdzielni przezelektrownianej. Jest to zatem rodzaj pracy o odmiennej specyfice niż w innych aplikacjach dużych silników wysokoprężnych – np. napędach okrętowych, odznaczających się długotrwałymi okresami pracy ciągłej.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania niezwykle istotne jest, aby agregaty prądotwórcze w elektrowni jądrowej poddawane były okresowym sprawdzeniom i próbom w celu zachowania najwyższego poziomu gotowości do pracy w przypadku powstania sytuacji awaryjnej. Zagadnienia te powinny stanowić przedmiot szczególnej troski zarówno operatora elektrowni jądrowej, jak i właściwego dla danego kraju urzędu dozoru jądrowego.

Bazę do sformułowania wymagań dla zapasowych agregatów prądotwórczych na szczeblu międzynarodowym tworzą standardy i dokumenty doradcze wydawane przez

Międzynarodową Agencję Energii Atomowej z siedzibą w Wiedniu. W tym kontekście należy wymienić tu następujące publikacje:

- Szczegółowe Wymagania Bezpieczeństwa nr **SSR-2/1** (ang. *Specific Safety Requirements No. SSR-2/1*), „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych: Projektowanie” (ang. *Safety of Nuclear Power Plants: Design*) [1].
- Szczegółowe Wymagania Bezpieczeństwa nr **SSR-2/2** (ang. *Specific Safety Requirements No. SSR-2/2*) „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych: Uruchomienie i eksploatacja” (ang. *Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation*) [2].
- Szczegółowe wytyczne dotyczące bezpieczeństwa nr **SSG-30** (ang. *Specific Safety Guide No. SSG-30*) „Klasyfikacja bezpieczeństwa, struktur, systemów i komponentów w elektrowniach jądrowych” (ang. *Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*) [3].
- Szczegółowe wytyczne dotyczące bezpieczeństwa nr **SSG-34** (ang. *Specific Safety Guide No. SSG-34*) „Projektowanie układów zasilania elektrycznego potrzeb własnych elektrowni jądrowych” (ang. *Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants*) [4].

Powyższe wymagania i wytyczne mają charakter bardzo ogólny i uniwersalny. Format i styl, w jaki są one sformułowane, mają w założeniu ułatwić ich stosowanie przez państwa członkowskie MAEA do ustanawiania, w zharmonizowany sposób, własnych regulacji i przepisów.

5.1. Polskie przepisy prawne

Podstawowe wymagania dla zapasowych źródeł zasilania elektrycznego w obiektach jądrowych określone są w przepisach polskich w tzw. **Rozporządzeniu projektowym** do Prawa atomowego (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 roku w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego [14]). W dokumencie tym wymagania dla miejscowych systemów zasilania elektrycznego sprecyzowane są w **Dziale IV, Rozdziale 5 pt. „Systemy zasilania elektrycznego obiektu jądrowego”**. Określają one zasady projektowania i budowy systemów zasilania elektrycznego dla „niezawodnego funkcjonowania systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej”. Przepisy polskie są zgodne z zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (patrz powyżej), a także z analogicznymi przepisami amerykańskimi i przepisami krajów europejskich. Ze względu na łatwość dostępu do rzeczonoego rozporządzenia jego szczegółowe zapisy nie będą tu cytowane. Najważniejsze części tekstu dotyczące agregatów prądotwórczych zasilania zapasowego w Rozporządzeniu projektowym to (w streszczeniu):

§ **93.1.** – zapewnienie zasilania elektrycznego obiektu jądrowego ze źródeł wewnętrznych i zewnętrznych;

§ **93.2.** – zapewnienie wystarczającej mocy i energii ze źródeł wewnętrznych;

§ **94.** – wymóg niezależności, redundancji i możliwości testowania źródeł wewnętrznych;

§ **97.** – zapewnienie możliwości okresowych kontroli i prób;

§ **99.1.** – zapewnienie niezawodnego działania po wystąpieniu przewidzianych zdarzeń eksploatacyjnych;

§ **99.2.** – zapewnienie zasilania przez czas min. 7 dób ze źródeł wewnętrznych;

§ **99.4.** – wymóg uwzględnienia w projekcie alternatywnych źródeł zasilania prądem przemiennym – tj. np. przenośnych lub przewoźnych agregatów prądotwórczych;

§ **100.1.1.** – wymóg niezawodności i spójności z wymaganiami ze strony zasilanych systemów bezpieczeństwa;

§ **100.1.2.** – wymóg realizacji funkcji przy założeniu wystąpienia pojedynczego uszkodzenia;

§ **100.2.2.** – wymóg możliwości testowania sprawności funkcjonalnej;

§ **101.** – wymóg określenia w założeniach projektowych: 1. pojemności zbiorników oleju napędowego i wydajności systemów zasilania w paliwo; 2. zdolności do uruchomienia i działania; 3. rodzajów systemów pomocniczych.

5.2. Amerykańskie przepisy prawne

Stany Zjednoczone rozwijające technikę jądrową, a w szczególności energetykę jądrową, od ponad siedmiu dekad posiadają imponujący dorobek w zakresie przepisów prawnych i wytycznych dozoru jądrowego dotyczących zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi.

Na szczególną uwagę zasługują tu regulacje zawarte w **ogólnym kryterium projektowym** (ang. *General Design Criterion – GDC*) **nr 17 pt. „Systemy zasilania elektrycznego”** podane w Załączniku A, „Ogólne kryteria projektowe dla elektrowni jądrowych” do przepisów federalnych 10 CFR Część 50 „Krajowe licencjonowanie obiektów produkcyjnych i użytkowych”. Geneza tego dokumentu wywodzi się z Ogólnych Kryteriów Projektowych z dnia 10 lipca 1967 roku, opracowanych przez Komisję Energii Atomowej (ang. *Atomic Energy Commission – AEC*), na których podstawie licencjonowane było wiele wczesnych amerykańskich elektrowni jądrowych należących do generacji II, których budowa rozpoczęła się jeszcze przed 1972 rokiem.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami 10 CFR Część 50, według których licencjonowano większość amerykańskich energetycznych bloków jądrowych od 1972 roku wymaga się, aby: „miejscowe systemy zasilania elektrycz-

nego miały wystarczającą niezależność, moc, sprawność, redundancję i testowalność dla zapewnienia, że:

1. określone dopuszczalne ograniczenia projektowe dla paliwa jądrowego i warunki projektowe granicy ciśnienia chłodziwa reaktora nie zostaną przekroczone w wyniku przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych oraz

2. rdzeń (reaktora) jest chłodzony, a integralność obudowy i inne istotne funkcje są zachowane w przypadku przewidywanych awarii, przy założeniu wystąpienia pojedynczego uszkodzenia.”

Istotne znaczenie ma tu również **ogólne kryterium projektowe nr 18, „Inspekcja i testowanie systemów elektroenergetycznych”** (wchodzące również w skład wspomnianego powyżej Załącznika A) wymagające, aby: „systemy zasilania elektrycznego ważne dla bezpieczeństwa były zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwiać odpowiednią okresową inspekcję i testowanie ważnych obszarów i cech, takich jak okablowanie, izolacja, połączenia i rozdzielnice, w celu oceny ciągłości systemów i stanu ich podzespołów. Systemy muszą być zaprojektowane z możliwością do okresowego testowania (1) sprawności i wydajności funkcjonalnej komponentów systemów, takich jak lokalne źródła zasilania, przekładniki, przełączniki i szyny zbiorcze, oraz (2) sprawności systemów jako całości i, w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do projektowych, pełnej sekwencji operacyjnej, która uruchamia systemy, w tym działanie odpowiednich części systemu zabezpieczeń i przesyłanie mocy między blokiem jądrowym, zewnętrznym systemem zasilania i miejscowym systemem zasilania.”

Kryteria nr 33, 34, 35, 38, 41 i 44: ustalają zasady odnoszące się do poszczególnych systemów bezpieczeństwa (tj. systemów uzupełniania chłodziwa, odprowadzania ciepła powyłączeniowego, awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora), aby mogły one wykonywać wymagane funkcje, nawet zakładając utratę zasilania zewnętrznego (LOOP – ang. *Loss Of Offsite Power*) i pojedynczą awarię źródła zasilania miejscowego.

Poza powyższych przepisów szczegółowych zastosowanie znajdują tu nadrzędne regulacje prawa federalnego USA odnoszące się do licencjonowania, budowy, uruchomienia oraz eksploatacji elektrowni jądrowych. Są to:

10 CFR 50.10 – „Wymagane licencje; zezwolenie na wstępne roboty budowlane” (ang. *License required; limited work authorization*).

10 CFR 50.23 – „Zezwolenia na budowę” (ang. *Construction permits*);

10 CFR 50.34 – „Zawartość wniosku; informacje techniczne” (ang. *Contents of applications; technical information*). Przepis ten określa m.in. zawartość raportów bezpieczeństwa: wstępnego oraz końcowego, ważną z punktu widzenia właściwego doboru zapasowych agregatów prądowców;

10 CFR 50.36 – „Specyfikacje techniczne” (ang. *Technical specifications*);

10 CFR 50.54 – „Warunki licencji” (ang. *Conditions of licenses*);

10 CFR 50.55a – „Dokumenty normalizacyjne” (ang. *Codes and standards*);

10 CFR 50.56 – „Przekształcenie pozwolenia na budowę na licencję; lub zmiana licencji” (ang. *Conversion of construction permit to license; or amendment of license*);

10 CFR 50.57 – „Wydanie licencji eksploatacyjnej” (ang. *Issuance of operating license*);

10 CFR 50.63 – „Całkowita utrata zasilania prądem przemiennym” (ang. *Loss of all alternating current power – Station Blackout*). Przepisy te są dodatkowym źródłem funkcjonalnych wymogów regulacyjnych dotyczących zapasowych agregatów prądowców. Docelowa niezawodność agregatów jest wykorzystywana do określania zdolności energetycznego bloku jądrowego do radzenia sobie z przerwami w dostawie prądu z sieci energetyki zawodowej.

5.3. Wytyczne – przewodniki regulacyjne amerykańskiego dozoru jądrowego U.S. NRC

Przewodniki regulacyjne U.S. Nuclear Regulatory Commission są dokumentami zawierającymi wytyczne uznawane za akceptowalne przez dozór jądrowy w zakresie wdrażania przepisów, oceny konkretnych kwestii i rozpatrywania wniosków. Same w sobie nie są one przepisami (jak regulacje 10 CFR opisane powyżej), a ich przestrzeganie nie jest obowiązkowe, jednakże oferują one ścieżkę do spełnienia wymogów regulacyjnych. Częścią wytycznych podanych w RG są uznane przez nie normy krajowe i międzynarodowe (ANSI – Amerykańskiego Krajowego Instytutu ds. Standaryzacji – ang. *American National Standards Institute*; IEEE – Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników – ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*; NFPA – Krajowego Stowarzyszenia Ochrony Przeciwpowodziowej – ang. *National Fire Protection Association*). Przykładowe zestawienie obowiązujących wytycznych U.S. NRC z uwzględnieniem włączeń (ang. *endorsements*) norm IEEE dla energetycznego bloku jądrowego AP1000 podane jest w publikacji [12].

Poniżej przedstawione zostaną publikacje z wytycznymi U.S. NRC odnoszące się do zapasowych agregatów prądowców dla energetycznych bloków jądrowych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.6 – Regulatory Guide 1.6, „Niezależność między redundantnymi źródłami zasilania rezerwowego (miejscowego) a ich systemami dystrybucji (Przewodnik bezpieczeństwa 6)”**, (ang. *Regulatory Guide 1.6, Independence Between Redundant Standby (Onsite) Power Sources and Between Their Distribution Systems (Safety Guide 6)*), wydany 10 sierpnia 1971 roku [16]. Zgodnie z tym dokumentem każde źródło zasilania (np. agregat prądowcowy) musi mieć „...zdolność do działania jako redundantna jednostka będąca zapasowym źródłem zasilania”. Dlatego też, pod względem mechanicznym i elektrycznym, agregat

prądotwórczy zasilania zapasowego musi być w stanie działać podczas i po każdym zdarzeniu projektowym bez wsparcia preferowanego źródła zasilania (tj. np. sieci energetyki zawodowej). Pomimo to, że ostatnia rewizja RG 1.6 miała miejsce w 1971 roku, U.S. NRC twierdzi, że same wytyczne są nadal aktualne, technicznie poprawne, a ich język jest jasny i zrozumiały.

• Przewodnik regulacyjny 1.9 – Regulatory Guide 1.9

„Wybór, projektowanie, kwalifikacja i testowanie zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi używanych jako systemy miejscowego zasilania elektrycznego klasy 1E w elektrowniach jądrowych” (ang. *Selection, Design, Qualification and Testing of Emergency Diesel Generator Units Used as Class 1E Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants*; dawniej Przewodnik bezpieczeństwa AEC 9); najnowsze wydanie: *Revision 4* z marca 2007 roku [17].

Regulatory Guide 1.9 ustanawia trzy następujące wymagania dotyczące osiągow zapasowego agregatu prądotwórczego, które musi spełnić, aby wykonywać funkcję projektową w systemach elektrowni jądrowej:

1. Agregat musi być w stanie „...wykonać rozruch i przejąć szereg dużych obciążeń silnikowych w szybkiej sekwencji włączeń, utrzymując przy tym napięcie i częstotliwość w dopuszczalnych granicach...”.
2. Agregat musi być również w stanie „...zapewnić natychmiastowe zasilanie do realizacji funkcji bezpieczeństwa, jeśli równocześnie nastąpi awaria i utrata zasilania zewnętrznego.”
3. Agregat musi „...nieprzerwanie dostarczać zasilanie do urządzeń potrzebnych do utrzymania elektrowni w stanie bezpiecznym...”.

Regulatory Guide 1.9 powołuje się na wspomniane wcześniej przepisy ogólnego kryterium projektowego **GDC 17** – „Systemy zasilania elektrycznego” i **GDC 18** – „Inspekcja i testowanie systemów zasilania elektrycznego”. Dokument odwołuje się również do zapisów norm:

- **IEEE 308** (kolejne wydania: 1970, 1971, 1974, 1978, 1980, 1991, 2001, 2012, 2020) – „Standardowe kryteria dla systemów zasilania klasy 1E dla elektrowni jądrowych” (ang. *IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations*) [5].
- **IEEE 387** (kolejne wydania: 1972, 1977, 1984, 1995, 2017, 2024) – „Standardowe kryteria IEEE dla agregatów prądotwórczych stosowanych jako zapasowe źródła zasilania dla elektrowni jądrowych” (ang. *IEEE Standard for Criteria for Diesel Generator Units Applied as Standby Power Supplies for Nuclear Power Generating Stations*) [7], [9]. Normą nadrzędną dla IEEE 387 jest wspomniana wcześniej norma IEEE 308 [5]. Norma IEEE 387 rozszerza zakres normy IEEE 308 o rozdział 6.2.4, „Układy zasilania zapasowego” w odniesieniu do zastosowania agregatów prądotwórczych z silnikiem Diesla. W najnowszej

edycji z 2024 roku dokument ten został uwspólniony dla porządków normalizacyjnych IEEE (typowego dla USA i krajów podążających za normalizacją amerykańską) i IEC (ang. *International Electrotechnical Commission* – typowego dla krajów europejskich i dużej części pozostałych obszarów świata). Norma otrzymała „podwójne” oznaczenie: **IEC/IEEE 6332-387:2024** [9]. Norma dotyczy zarówno nowych, jak i modernizowanych elektrowni jądrowych. Określa ona główne kryteria projektowe, cechy konstrukcyjne, wymagania dotyczące testowania i kwalifikacji agregatów prądotwórczych, tak aby spełniały one swoje funkcje w warunkach awaryjnych. Ma ona kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych poprzez standaryzację wymagań dla systemów zasilania zapasowego. Norma ta w powiązaniu z Regulatory Guide 1.9 zawiera precyzyjny i kompleksowy zestaw wymagań dotyczących projektowania, testowania i kwalifikacji zapasowych agregatów z silnikami Diesla stosowanych w energetyce jądrowej. Nie wszystkie spośród elektrowni jądrowych w USA zobowiązane są do stosowania normy IEEE 387. W szczególności dotyczy to najstarszych obiektów, które otrzymały licencję przed 1972 roku. Norma ta popiera również kilka innych zbiorów zaleceń i norm, w tym przewodnik Stowarzyszenia Producentów Silników Diesla (DEMA – ang. *Diesel Engine Manufacturer's Association*) pt. „Standardowe praktyki dla silników Diesla i silników gazowych o niskiej i średniej prędkości”, ostatnio edytowany w 1972 roku DEMA nie jest już obecnie aktywnym stowarzyszeniem, ale zdaniem U.S. NRC wytyczne te są nadal istotne dla kryteriów projektowych stosowanych w odniesieniu do zapasowych agregatów prądotwórczych instalowanych w większości amerykańskich elektrowni jądrowych. Wersje normy IEEE 387 wydane po 1977 roku określają również kryteria wstępnych testów kwalifikacyjnych „pierwszej jednostki” danego typu agregatu prądotwórczego przeznaczonego do wykorzystania w zapasowych systemach zasilania dla elektrowni jądrowych. Norma IEEE 387 w edycji z 1995 roku podała podstawę projektową dla zapasowych agregatów prądotwórczych dla elektrowni jądrowych, tj. 4000 rozruchów i 6000 godzin pracy, w określonym okresie eksploatacji wynoszącym 40 lat. Jak już wspomniano wcześniej, taka właśnie specyfika eksploatacji agregatu prądotwórczego z silnikiem Diesla, z ogromną liczbą uruchomień i zatrzymań oraz długich przestojów, bardzo różni się od typowej eksploatacji silników wysokoprężnych podobnej mocy w innych obszarach zastosowań komercyjnych.

- **IEC/IEEE 60780-323** (wydanie 2016) „Norma międzynarodowa – Obiekty jądrowe – Wyposażenie elektryczne ważne dla bezpieczeństwa – Kwalifikacja”

(ang. *International Standard – Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety – Qualification*) [8]. Norma ta zastąpiła wcześniejszy standard IEEE 323 (ang. *Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations*). Pierwotny standard opublikowano w 1971 roku, a jego kolejne wersje edytowano w latach 1974, 1983 i 2003. Norma określa podstawowe wymagania dotyczące kwalifikacji urządzeń elektrycznych o kluczowym znaczeniu dla bezpieczeństwa oraz ich interfejsów (elektrycznych i mechanicznych) w obiektach jądrowych. Koncentruje się ona na wykazaniu i udokumentowaniu zdolności urządzenia do wykonywania funkcji bezpieczeństwa w różnych warunkach eksploatacji, w tym podczas okresów normalnego użytkowania oraz zdarzeń projektowych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.32 – Regulatory Guide 1.32** „Kryteria dotyczące systemów zasilania elektrycznego związanych z bezpieczeństwem elektrowni jądrowych” (ang. *Criteria for Safety-Related Electric Power Systems for Nuclear Power Plants*); najnowsze wydanie: *Revision 3*, marzec 2004 roku [18]. Wytyczne 1.32 mają na celu wdrożenie zgodności wymagań U.S. NRC z następującymi dokumentami:

- Ogólne kryterium projektowe **GDC 17** (patrz powyżej).
- Norma **IEEE 308** (patrz powyżej). Wytyczne RG 1.32 powołują się na wymagania IEEE 308 w kontekście możliwości zasilania zapasowego (np. z agregatu prądotwórczego) wykorzystywanego jako niezależna/redundantna jednostka (lub zespół jednostek).

- **Przewodnik regulacyjny 1.75 – Regulatory Guide 1.75** „Kryteria dla niezależności elektrycznych systemów bezpieczeństwa” (ang. *Criteria for Independence of Electrical Safety Systems*), najnowsze wydanie: *Revision 3*, luty 2005 roku [19]. Przewodnik 1.75 zawiera wskazówki dla posiadaczy licencji na elektrownie jądrowe i potencjalnych wnioskodawców odnoszące się do sposobu spełnienia wymagań dotyczących fizycznego rozdzielania i separacji elektrycznej obwodów i urządzeń wchodzących w skład systemów bezpieczeństwa. Zasadniczo przedstawia on dopuszczalne metody utrzymania niezależności tych systemów, zapewniając ich prawidłowe funkcjonowanie w trakcie i po wystąpieniu zdarzeń projektowych. RG 1.75 powołuje się również na normę:

- **IEEE 384:2018** – „Standardowe kryteria niezależności urządzeń i obwodów klasy 1E” (ang. *IEEE Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits*) [6]. W normie opisano wymagania dotyczące niezależności obwodów i urządzeń wchodzących w skład systemów klasy 1E lub z nimi powiązanych. Przedstawiono kryteria niezależności, jaką można osiągnąć poprzez fizyczną separację i izolację elektryczną obwodów i urządzeń redundantnych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.93 – Regulatory Guide 1.93** „Dostępność źródeł energii elektrycznej” (ang.

Availability of Electric Power Sources); najnowsze wydanie: *Revision 1*, marzec 2012 roku [20]. Przewodnik RG 1.93 zawiera wytyczne dla posiadaczy licencji na elektrownie jądrowe dotyczące dopuszczalnych działań w przypadku, gdy liczba dostępnych źródeł energii elektrycznej spadnie poniżej minimum wymaganego przez specyfikacje techniczne. W szczególności dotyczy on sytuacji, w których graniczne warunki eksploatacji (ang. *Limiting Conditions for Operation* – LCO) elektrowni nie są spełnione z powodu zmniejszenia liczby dostępnych źródeł energii wymaganych przez ogólne kryterium projektowe GDC 17.

- **Przewodnik regulacyjny 1.108 – Regulatory Guide 1.108** „Okresowe testy agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla wykorzystywanych jako miejscowe systemy zasilania w elektrowniach jądrowych” (ang. *Periodic Testing of Diesel Generator Units Used as Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants*). Dokument ten został wycofany przez U.S. NRC w 1993 roku i zastąpiony przez Regulatory Guide 1.9, *Revision 3* (patrz powyżej). W niektórych starszych amerykańskich elektrowniach jądrowych, w przypadku których licencjodawcy zobowiązali się do przestrzegania RG 1.108, przyjęto następnie RG 1.9 tylko częściowo.

- **Przewodnik regulacyjny 1.137 – Regulatory Guide 1.137** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych” (ang. *Fuel-Oil Systems for Standby Diesel Generators*); najnowsze wydanie: *Revision 2* z czerwca 2013 roku [21]. RG 1.137 przedstawia metody uznane za dopuszczone przez U.S. NRC w celu zapewnienia jakości i niezawodności dostawy oleju napędowego do zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla. Obejmuje on wytyczne dotyczące przechowywania, postępowania z olejem napędowym i jego testowania w celu zapobiegania degradacji oraz zapewnienia sprawności systemów oleju napędowego w sytuacjach awaryjnych. RG 1.137 ma również na celu wdrożenie zgodności z częściami przepisów ogólnego kryterium projektowego GDC 17, a także popiera normy:

- **ANSI N195** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla” (ang. *Fuel Oil Systems for Standby Diesel Generators*) – norma z 1976 roku; ostatnio publikowana w 2013 roku i wycofana w 2022 roku.

- **ANSI/ANS-59.51-1997 (R2015)** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych związanych z bezpieczeństwem” (ang. *Fuel Oil Systems for Safety-Related Emergency Diesel Generators*) – norma pierwotnie wydana w 1997 roku i potwierdzona w latach: 2007 i 2015. Określa ona wymagania funkcjonalne, wydajnościowe i projektowe dla układu oleju napędowego dla agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi, zapewniającymi miejscowe zasilanie zapasowe istotne dla bezpie-

czeństwa w energetycznych blokach jądrowych z reaktorami lekkowodnymi. Dotyczy ona wyposażenia mechanicznego związanego z układem oleju napędowego, z wyjątkiem elementów montowanych na samej konstrukcji silnika Diesla, a także wymagania funkcjonalne dotyczące oprzyrządowania i sterowania.

- **Przewodnik regulacyjny 1.155 – Regulatory Guide 1.155** „Utrata zasilania bloku energetycznego” (ang. *Station Blackout – SBO*); wydany w 1988 roku RG 1.155 zawiera wytyczne dla operatorów elektrowni jądrowych dotyczące radzenia sobie z awarią zasilania prądem przemiennym (zarówno miejscowego, jak i zewnętrznego) energetycznego bloku jądrowego.

W przewodniku opisano konieczność wytrzymania awarii zasilania bloku przez określony czas, na bazie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii SBO oraz zdolność bloku do przywrócenia zasilania. Przewodnik odwołuje się do innych dokumentów, takich jak norma IEEE 387 (patrz powyżej), a także uwzględnia kwestie niezależności źródeł zasilania i możliwości doprowadzenia elektrowni do bezpiecznego stanu wyłączenia podczas awarii SBO. Uwzględnia również wpływ awarii zasilania na inne systemy elektrowni oraz potrzebę zapewnienia odpowiedniej wydajności i niezawodności alternatywnych źródeł zasilania prądem przemiennym.

RG 1.155 ma na celu zapewnienie zgodności z wymaganiami przepisów 10 CFR 50.63, „Utrata całego zasilania prądem przemiennym...”. „Określony czas trwania przerwy w dostawie energii elektrycznej powinien być oparty na następujących czynnikach: (i) Nadmiarowość lokalnych zapasowych źródeł zasilania prądem przemiennym; (ii) Niezawodność lokalnych zapasowych źródeł zasilania prądem przemiennym...”

RG 1.155 powołuje się również na dokument NUMARC 8700: Wytyczne i podstawy techniczne dla inicjatyw NUMARC dotyczących przerw w dostawie energii elektrycznej w energetycznych blokach jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (ang. *Guidelines and Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactors*).

5.4. Wytyczne fińskiego dozoru jądrowego STUK

Fiński urząd dozoru jądrowego STUK (fiń. *Säteilyturvakeskus*; ang. *Radiation and Nuclear Safety Authority*) opracował przewodnik **YVL E.10**, zatytułowany „Układy zasilania zapasowego w obiekcie jądrowym” (fiń. *Ydinlaitoksen varavoiimalähteet*; ang. *Emergency power supplies of a nuclear facility*), najnowsza edycja: 2020 rok [15]. określający wymagania dotyczące projektowania, produkcji, instalacji, uruchomienia, eksploatacji, monitorowania stanu i konserwacji systemów zasilania zapasowego w obiektach jądrowych. Opisuje on również nadzór regulacyjny stosowany przez STUK oraz upoważnione organy inspekcyjne w celu zapewnienia zgodności z obowiązującymi regulacjami.

Przewodnik dotyczy układów zasilania zapasowego dla klas bezpieczeństwa 2 i 3.

W szczególności wytyczne YVL E.10 obejmują zespoły prądotwórcze zarówno z silnikami dieslowskimi, jak i z turbinami gazowymi. Oprócz tego omówione są powiązane z nimi podzespoły i urządzenia niezbędne do wytwarzania energii w obiekcie jądrowym w stanach przejściowych i awaryjnych. W przewodniku szczegółowo opisano środki regulacyjne stosowane przez STUK i upoważnione organy inspekcyjne w celu weryfikacji spełnienia wymagań w całym cyklu użytkowania zapasowych systemów zasilania: począwszy od wyprodukowania, montażu i uruchomienia, eksploatacji, konserwacji i remontów, aż do wycofania. W przewodniku podkreślono, że wymagania są wiążące dla licencjohioborców i producentów podzespołów stosowanych w układach zasilania zapasowego. Podkreślono również odpowiedzialność licencjohioborcy za zapewnienie niezawodności układów zasilania zapasowego i możliwości realizacji przez nie funkcji bezpieczeństwa przez cały okres eksploatacji obiektu.

W dokumencie YVL E.10 w odniesieniu do projektowania agregatów prądotwórczych z silnikami wysoko- i średnio- i niskoprężnymi dokumentem odniesienia jest niemiecka norma jądrowa (niem. *Kerntechnischer Ausschuss*) **KTA 3702** „Zapasowe urządzenia do wytwarzania energii z agregatami prądotwórczymi z silnikami Diesla w elektrowniach jądrowych” (niem. *Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken*; ang. *Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants*) [10].



W drugiej części artykułu, który zostanie opublikowany w następnym numerze Biuletynu „BJOR”, omówione zostaną m.in. zagadnienia rozruchu agregatu w warunkach awaryjnych, obciążania sekwencyjnego agregatu odbiornikami energii elektrycznej systemów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego, wpływu zmian napięcia i częstotliwości na pracę systemu zasilania zapasowego, wymagania projektowe, kwalifikacja urządzeń i ich testowanie.

O autorze

Dr inż. Jacek Nowicki – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z 1988 roku. W tej uczelni w 1996 roku obronił doktorat w pod kierunkiem prof. Zbigniewa Cioka. Zawodowo związany był z polskimi i międzynarodowymi firmami przemysłu elektrotechnicznego i budownictwa elektroenergetycznego: ZWAR, ABB, Schneider Electric, VA Tech, Elektrobudowa i Erbud International, pracując na rynku krajowym oraz rynkach zagranicznych, m.in. w Królestwie Arabii Saudyjskiej. W latach 2017–2023 pełnił funkcję Sekretarza Generalnego Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Obecnie jest ekspertem ds. zagadnień elektrycznych w Departamencie Bezpieczeństwa Jądrowego Państwowej Agencji Atomistyki. Jest autorem wielu publikacji z dziedziny energetyki jądrowej, energetyki odnawialnej i magazynowania energii. Wspólnie z prof. Janem Maksymiukiem napisał podręcznik akademicki „Aparaty elektryczne i rozdzielnice wysokich i średnich napięć” (2014 rok).

Literatura

1. IAEA Safety Standards, *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements*, No. SSR-2/1 (Rev. 1).
2. IAEA Safety Standards, *Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation*, Specific Safety Requirements No. SSR-2/2 (Rev. 1).
3. IAEA Safety Standards, *Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*, Specific Safety Guide No. SSG-30.
4. IAEA Safety Standards, *Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants*, Specific Safety Guide No. SSG-34.
5. IEEE 308:2020. *IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations*.
6. IEEE 384:2018. *IEEE Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits*.
7. IEEE 387:2024. *IEEE Standard for Criteria for Diesel Generator Units Applied as Standby Power Supplies for Nuclear Power Generating Stations*.
8. IEEE/IEC 60780-323:2016. *International Standard – Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety – Qualification*.
9. IEC/IEEE 63332-387:2024. *International Standard for Nuclear facilities – Electrical power systems – Diesel generator units applied as standby power sources*.
10. KTA 3702:2022-11, *Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken (Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants)*.
11. Mazzoni O.S., *Electrical Systems for Nuclear Power Plants*, IEEE Press / John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2019.
12. Nowicki J., *Część elektryczna i AKPiA elektrowni jądrowej: budowa, działanie, wymagania normalizacyjne i jakościowe, wytyczne i zalecenia dla dostawców i wykonawców*, Ministerstwo Przemysłu, Katowice 2024 r.
13. Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, wyd. VII, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014 r.
14. *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego*, Dziennik Ustaw, 20 września 2012 r. poz. 1048.
15. STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority), Guide YVL E.10 *Emergency power supplies of a nuclear facility*, Vantaa, Finland, January 20, 2020.
16. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.6, *Independence Between Redundant Standby (Onsite) Power Sources and Between Their Distribution Systems* (Safety Guide 6), Aug. 10, 1971.
17. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.9 *Application and Testing of Safety-Related Diesel Generators in Nuclear Power Plants*, Revision 4, March 2007.
18. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.32 *Criteria for Safety-Related Electric Power Systems for Nuclear Power Plants*; Revision 3, March 2004.
19. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.75, *Criteria for Independence of Electrical Safety Systems*, Revision 3, February 2005.
20. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.93, *Availability of Electric Power Sources*, Revision 1, March 2012.
21. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.137, *Fuel-Oil Systems for Standby Diesel Generators*, Revision 2, June 2013.

Strefy planowania awaryjnego dla jądrowej produkcji ciepła: wzorce z Chin, Finlandii i Szwajcarii a droga do dekarbonizacji polskich sieci ciepłowniczych

Emergency planning zones for nuclear heat generation: models from China, Finland, and Switzerland, and the road to decarbonization of Polish district heating networks

Bartosz Skura
Politechnika Warszawska

Streszczenie: Artykuł analizuje kwestię stref planowania awaryjnego (EPZ) wokół elektrowni jądrowych wykorzystywanych do produkcji ciepła sieciowego. Omawiane są trzy praktyczne modele regulacyjne: chiński, fiński i szwajcarski. Zestawienie tych przykładów pokazuje, jak odmienne systemy prawne łączą wymogi bezpieczeństwa radiologicznego z potrzebami miejskich sieci ciepłowniczych. Studium wybranych przypadków wskazuje, iż zarówno duże bloki energetyczne, jak i małe reaktory modułowe (SMR) mogą zasilać sieci ciepłownicze, nie powodując konieczności zmiany w podejściu do ustalania stref planowania awaryjnego, jeśli czynnik grzewczy pobierany jest z nieaktywnego obiegu. W odniesieniu do Polski autor wskazuje, że planowana elektrownia jądrowa na wybrzeżu, wsparta odpowiednią magistralą przesyłową, mogłaby zasilić ciepłem aglomerację Trójmiasta, a równoległy program SMR-ów otworzyłby drogę do niskoemisyjnego ogrzewania miast śródlądowych. Wykorzystanie energii jądrowej w ciepłownictwie może się stać jednym z najszybszych i najbezpieczniejszych sposobów głębokiej dekarbonizacji polskich sieci ciepłowniczych.

Słowa kluczowe: Bezpieczeństwo jądrowe, ciepłownictwo, dekarbonizacja, kogeneracja, SMR, strefy planowania awaryjnego.

Abstract: The article examines the issue of emergency planning zones (EPZs) around nuclear power plants used for district heating. It discusses three practical regulatory models: Chinese, Finnish, and Swiss. A comparison of these examples shows how different legal frameworks reconcile radiological safety requirements with the needs of urban heating networks. Case studies show that both large power reactors and small modular reactors (SMRs) can supply district heating networks without requiring changes to the way EPZs are set, provided the heat carrier is drawn from a non-radioactive secondary circuit. Concerning Poland, the author points out that the planned coastal nuclear power plant supported by an appropriate transmission pipeline could heat the Tri-City area and that a parallel SMR programme would pave the way for low-emission heating in inland cities. The use of nuclear power in district heating could become one of the fastest and safest ways to deeply decarbonize Poland's district heating networks.

Keywords: Nuclear safety, district heating, decarbonization, cogeneration, SMR, emergency planning zones.

1. Wstęp

Wraz z przyspieszeniem dekarbonizacji światowej energetyki uwaga przesuwana się z samej produkcji energii elektrycznej na ogrzewanie miast, które w wielu krajach, w tym także w Polsce, wciąż zależy od węgla i gazu [1]. **Jądrowa produkcja ciepła oraz kogeneracja** (jednoczesne wytwarzanie ciepła sieciowego i energii elektrycznej w reaktorach jądrowych) mogą tu odegrać kluczową rolę, gdyż są w stanie zapewnić **stabilne i bezemisyjne źródło energii** nawet w pobliżu gęstej zabudowy miejskiej. Aby wizja jądrowych ciepłowni mogła zyskać społeczną akceptację, musi jej towarzyszyć gwarancja najwyższych standardów bezpieczeństwa. Kluczową rolę odgrywają tu **strefy planowania awaryjnego** (ang. *Emergency Planning Zones*, EPZ). Są to wyznaczone obszary wokół obiektu jądrowego, w których w razie najpoważniejszej awarii można szybko wdrożyć środki ochronne ludności. Doświadczenia z wykorzystaniem energii jądrowej do celów ciepłowniczych nie są już wyłącznie koncepcją akademicką. Na świecie działa dziś kilkanaście obiektów, które dostarczają ciepło sieciowe mieszkańcom miast. W niniejszym artykule przeanalizowano przypadki trzech państw: Chin, Finlandii oraz Szwajcarii, ponieważ reprezentują one odmienne modele regulacyjne, skalę projektów oraz poziom dojrzałości technologicznej, dostarczając zarazem najbardziej kompletne dane operacyjne potrzebne do oceny ryzyka radiologicznego. Analiza zagranicznych doświadczeń pozwala odpowiedzieć na dwa kluczowe pytania z polskiej perspektywy. Po pierwsze, czy wdrożenie jądrowych źródeł ciepła, zarówno w formie kogeneracji, jak i dedykowanych ciepłowni jądrowych, wymaga zmiany podejścia do wyznaczania stref planowania awaryjnego. Po drugie, jakie korzyści systemowe odniesie krajowe ciepłownictwo, gdy wyeksploatowane elektrociepłownie węglowe zostaną zastąpione niskoemisyjnymi reaktorami.

2. Zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego w Chinach

2.1. Podstawy prawne i techniczne

Ustalanie stref planowania awaryjnego w Chinach odbywa się na podstawie krajowego prawa i norm technicznych. Najważniejsze regulacje to m.in. Ustawa o bezpieczeństwie jądrowym [2], która nakłada obowiązek przygotowania planów awaryjnych oraz powołania krajowych i lokalnych komisji ds. awaryjnego reagowania. Dopełnieniem są normy państwowe, zwłaszcza GB 6249-2025 [3] oraz GB/T 17680.1-2008 [4], które precyzują wymagania ochrony radiologicznej na etapie projektowania i eksploatacji elektrowni jądrowych. Dokumenty te zobowiązują operatora i władze do opracowania planów awaryjnych, wyznaczenia stref ochronnych i określenia limitów dawek, a także definiują pojęcie stref planowania awaryjnego wraz z metodami ich wyznaczania, tworząc podstawę do przygo-

towania planów reagowania kryzysowego przy elektrowniach jądrowych. Ponadto funkcjonuje Krajowy plan reagowania na awarie jądrowe [5], który określa ogólnokrajowy system organizacyjny i zasady postępowania w sytuacjach awaryjnych.

2.2. Podział stref planowania awaryjnego

Chiński system planowania awaryjnego dzieli otoczenie elektrowni na strefy planowania awaryjnego ze względu na potencjalne drogi narażenia. Wyróżnia się przede wszystkim: **strefę narażenia na chmurę radioaktywną** (z dalszym podziałem na strefę wewnętrzną i zewnętrzną) oraz **strefę ograniczonego spożycia**, związaną z ryzykiem narażenia przez skażoną żywność i wodę pitną [4, 6]. Poniżej przedstawiono charakterystykę tych stref.

2.2.1. Strefa narażenia na chmurę radioaktywną

Dla chińskich reaktorów zaleca się, aby całkowity promień strefy narażenia na chmurę radioaktywną mieścił się w zakresie około **7–10 km** od elektrowni. Strefa ta dzielona jest na część **wewnętrzną** (bliższą elektrowni) o promieniu typowo **3–5 km** oraz **zewnętrzną** sięgającą do wspomnianych 7–10 km. W tym obszarze planuje się natychmiastowe działania ochronne na wypadek awarii: przede wszystkim ewakuację lub schronienie ludności, dystrybucję jodu, a także kontrolę spożycia żywności i wody pochodzącej z obszaru skażenia. Celem jest ochrona ludności przed ostrą ekspozycją z chmury w pierwszych godzinach i dniach po zdarzeniu. Podział na strefę wewnętrzną i zewnętrzną wynika z różnicy w zalecanych działaniach: w wewnętrznej części przewiduje się najbardziej zdecydowane środki (np. szybką ewakuację), w zewnętrznej zaś dodatkowe środki ostrożności zależne od skali uwolnienia (np. schronienie, przygotowanie do ewakuacji w razie pogorszenia sytuacji).

2.2.2. Strefa ograniczonego spożycia

Strefa ograniczonego spożycia obejmuje obszar położony dalej od elektrowni; najczęściej wyznacza się ją w promieniu **30–50 km**, a dokładny zasięg określa się na podstawie lokalnych warunków i szczegółowych analiz. Strefa ta służy zapewnieniu ochrony ludności przed długotrwałym narażeniem wskutek spożycia skażonych produktów rolnych, żywności, wody pitnej czy pasz, które mogą ulec zanieczyszczeniu opadem promieniotwórczym po awarii. Planuje się w niej środki takie jak kontrola i zakaz wprowadzania do spożycia żywności i wody pochodzących z obszaru skażonego, monitoring radiologiczny żywności oraz, w razie przekroczenia wartości bezpiecznych, ewentualne przesiedlenie ludności lub zakaz upraw.

2.2.3. Wyznaczanie granic stref planowania awaryjnego

Definicja zasięgu stref jest ściśle powiązana z progami dawek, przy których w sytuacji awaryjnej podejmowane są działania ochrony ludności. Zarówno standardy krajowe,

jak i wytyczne Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej [7] przewidują ogólne poziomy interwencji radiologicznej, których przekroczenie uzasadnia m.in. ewakuację, ukrycie się czy podanie preparatów z jodem. W Chinach odwołano się do tych wartości w normie GB 18871–2002 [8] przy wyznaczaniu EPZ. Obliczone dawki porównuje się z ogólnymi poziomami interwencji określonymi w tym standardzie. Zasada jest następująca: promień EPZ powinien być tak dobrany, by poza nim, nawet w razie najcięższej awarii, dawki nie przekroczyły poziomów wymagających interwencji [9].

Wyznaczenie granic EPZ opiera się na teoretycznych analizach rozprzestrzeniania radionuklidów w atmosferze oraz ocenie potencjalnych konsekwencji radiologicznych. Przy określaniu zasięgu stref planowania awaryjnego chińskie przepisy wymagają przeanalizowania zarówno awarii projektowych, jak i ciężkich awarii zgodnie z normą [4] oraz praktyką analiz probabilistycznych. W praktyce oznacza to rozważenie całego spektrum potencjalnych zdarzeń, od typowych awarii przewidywanych w projekcie po najcięższe możliwe wypadki z poważnym uszkodzeniem rdzenia, stopieniem paliwa i uszkodzeniem obudowy bezpieczeństwa. Celem jest ocena maksymalnych możliwych skutków radiologicznych, nawet jeśli prawdopodobieństwo takich zdarzeń jest bardzo małe.

Przy wyznaczaniu stref planowania awaryjnego w Chinach uwzględnia się również czynniki meteorologiczne, geograficzne i demograficzne. Kształt strefy należy dostosować do rzeźby terenu i dominujących kierunków wiatru: można ją na przykład zwęzić tam, gdzie pasma górskie stanowią naturalną osłonę, oraz poszerzyć w sektorach, w których wiatr sprzyja przenoszeniu zanieczyszczeń na większe odległości. W kierunku dużych miast czy obszarów przemysłowych strefę planowania awaryjnego poszerza się tak, by uwzględnić potencjalnie większą liczbę mieszkańców, natomiast nad obszarami słabo zaludnionymi, takimi jak morze czy pustynia, strefę można zawęzić. Logistyka ewakuacji (drogi, mosty, możliwości przemieszczania ludności) także wpływa na korektę obszaru. EPZ często dopasowuje się do granic administracyjnych lub naturalnych barier tak, by umożliwić sprawną organizację akcji. W praktyce więc strefy przybierają nieraz nieregularny kształt dostosowany do otoczenia [6, 10].

2.3. Dodatkowe strefy wokół elektrowni jądrowej

Oprócz wspomnianych stref planowania awaryjnego chińskie regulacje wyróżniają także strefy dotyczące planowania przestrzennego i bezpieczeństwa fizycznego wokół elektrowni jądrowych. Ich celem jest ograniczenie dostępu do obiektu oraz gęstości zabudowy i zaludnienia w jego sąsiedztwie, jeszcze zanim zajdzie potrzeba uruchomienia działań awaryjnych. Należą do nich **strefa wykluczenia** oraz **strefa ograniczonego planowania** [3, 6, 10].

2.3.1. Strefa wykluczenia

Strefa wykluczenia to obszar bezpośrednio otaczający reaktor, na którym zabroniona jest stała obecność ludności cywilnej. W Chinach wymagane jest, aby promień tej strefy wynosił **co najmniej 500 metrów od reaktora**. Celem strefy wykluczenia jest zapewnienie, że nikt z przypadkowej ludności nie przebywa w bezpośrednim sąsiedztwie reaktora, co podnosi bezpieczeństwo w dwóch wymiarach: podczas normalnej eksploatacji umożliwia skuteczną kontrolę dostępu i minimalizuje narażenie osób postronnych nawet na śladowe emisje, natomiast w razie awarii gwarantuje, że najwyższe dawki promieniowania pojawiają się wyłącznie na terenie kontrolowanym przez operatora, a nie w przestrzeni publicznej. Innymi słowy, przy prawidłowym zaprojektowaniu elektrowni żadna osoba poza terenem zakładu (poza strefą wykluczenia) nie powinna otrzymać dawki przekraczającej dopuszczalne limity podczas najpoważniejszej analizowanej awarii projektowej. Strefa ta pełni również funkcję bufora dla służb; w razie incydentu działania wewnątrz jej granic podejmuje wyłącznie upoważniony personel.

2.3.2. Strefa ograniczonego planowania

Strefa ograniczonego planowania służy ograniczeniu gęstości zaludnienia i działalności w otoczeniu elektrowni, aby ułatwić ewentualną ewakuację oraz zminimalizować skutki radiologiczne awarii. Innymi słowy, jest to obszar podlegający kontroli planistycznej, gdzie nie lokuje się nowych osiedli ani dużych obiektów publicznych mogących skupić znaczną populację. Jej celem jest zapewnienie, że w razie poważnego wypadku liczba osób wymagających ochrony będzie stosunkowo niewielka, a prowadzenie działań ratunkowych wykonalne. Jej promień wynosi **co najmniej 5 km od reaktora**. Dodatkowo, wewnątrz strefy ograniczonego planowania nie mogą się znajdować miasteczka o ludności przekraczającej 10 tys. mieszkańców, a w promieniu do 10 km nie powinno być miast powyżej 100 tys. mieszkańców [3].

2.3.3. Granice dodatkowych stref

Dokładne granice stref wykluczenia i ograniczonego planowania wyznacza się tak, by nawet podczas **awarii projektowych** (o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 10^{-4} – 10^{-2} /rok) oraz **rozszerzonych warunków projektowych** (o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 10^{-6} – 10^{-4} /rok) dawki nie przekroczyły poniższych progów:

- Awaria projektowa (może prowadzić do niewielkich uszkodzeń elementów paliwowych, ale pojedyncza awaria nie spowodowałaby utraty funkcjonalności systemów wymaganych do reagowania na awarię) – na granicy strefy wykluczenia dawka efektywna w pierwszych 2 h nie może przekroczyć **5 mSv**; na granicy strefy ograniczonego planowania ta sama wartość 5 mSv nie może zostać przekroczona w czasie trwania wypadku (domyślnie 30 dni).

- Rozszerzone warunki projektowe (zbiór sekwencji awarii poważniejszych niż awarie projektowe, mogący prowadzić do dużych uwolnień materiałów radioaktywnych, ale pojedyncza awaria nie spowodowałaby utraty funkcjonalności systemów wymaganych do reagowania na awarię) – kryteria rosną do **100 mSv** w czasie 2 h dla strefy wykluczenia i 30 dni dla strefy ograniczonego planowania.

3. Kogeneracyjna elektrownia Haiyang

3.1. Lokalizacja geograficzna i administracyjna obiektu

Elektrownia jądrowa Haiyang znajduje się we wschodnich Chinach, w prowincji Shandong, na wybrzeżu Morza Żółtego. Administracyjnie podlega miastu powiatowemu Haiyang w prefekturze Yantai. Obiekt zlokalizowano na nadmorskim półwyspie: reaktory stoją na cyplu otoczonym z trzech stron morzem, co sprzyja bezpieczeństwu i ogranicza liczbę ludności w bezpośrednim sąsiedztwie. Elektrownia znajduje się w odległości **22 km** od centrum miasta Haiyang oraz około **93 km** od dużego miasta Yantai i **107 km** od metropolii Qingdao. Najbliższą niewielką miejscowością jest Liugezhuang, oddalona o około 10 km od elektrowni. Spełniono tym samym rygorystyczne krajowe wymogi lokalizacyjne, które zalecają budowę elektrowni jądrowych z dala od gęsto zaludnionych obszarów. Rzeczywista gęstość zaludnienia w promieniu kilkunastu kilometrów od elektrowni jądrowej Haiyang jest niska, dominują tereny rolnicze i rybackie, bez większych skupisk miejskich [11, 12]. Rysunek 1 przedstawia lokalizację elektrowni Haiyang i pozostałych chińskich elektrowni jądrowych na mapie Chin.

3.2. Struktura i charakterystyka obiektu

Elektrownia Haiyang została zaprojektowana jako duży kompleks energetyczny obejmujący docelowo sześć bloków jądrowych wodno-ciśnieniowych (ang. *Pressurized Water Reactor*, PWR) o mocy rzędu 1000 MWe każdy. Aktualnie eksploatowane są dwa bloki energetyczne w ramach pierwszej fazy inwestycji. Blok 1 i 2 to reaktory AP1000, stanowiące jednostki demonstracyjne amerykańskiej technologii Westinghouse wdrożonej w Chinach. Każdy z tych bloków ma moc netto około 1170 MWe (moc cieplna około 3415 MW). Budowa bloków AP1000 w Haiyang rozpoczęła się pod koniec 2009 roku (blok 1) oraz w połowie 2010 roku (blok 2). Blok 1 osiągnął stan krytyczny w sierpniu 2018 roku. Obecnie trwa faza druga inwestycji. Budowę bloku Haiyang 3 rozpoczęto w lipcu 2022 roku, a bloku Haiyang 4 w kwietniu 2023 roku. Oba te reaktory będą jednostkami typu CAP1000, czyli ulepszoną, lokalną odmianą technologii AP1000 opracowaną przez chińskie instytuty we współpracy z firmą Westinghouse i dostosowaną do krajowego łańcucha dostaw. Kolejnym etapem rozwoju ma być trzecia faza inwestycji, obejmująca budowę bloków Haiyang 5 i 6, również planowanych jako reaktory typu CAP1000. Zgodnie z dostępnymi danymi projektowymi ich realizacja ma się rozpocząć około 2028 roku [12].

3.3. Jądrowy system kogeneracji elektryczności i ciepła

Elektrownia Haiyang to pierwszy w Chinach komercyjny projekt ogrzewania sieciowego za pomocą ciepła z pracy elektrowni jądrowej. W grudniu 2019 roku uruchomiono pilotażowo ogrzewanie około 700 tysięcy m² powierzchni



Rys. 1. Mapa Chin z zaznaczonymi elektrowniami jądrowymi (źródło: World Nuclear Association).

Fig. 1. Map of China with nuclear power plants marked (source: World Nuclear Association).

mieszkalnej [13]. W listopadzie 2020 roku, po udanych próbach, elektrownia rozpoczęła regularne dostawy ciepła do całego miasta Haiyang [14]. Projekt nazwany Warm Nuclear No. 1 był sukcesywnie rozbudowywany w kolejnych latach, na przykład w 2023 roku uruchomiono **23-kilometrowy rurociąg** dostarczający ciepło również do miasta Rushan. W sezonie zimowym 2024/2025 system ogrzewania o mocy cieplnej **1134 MW** pokrywał już **13 mln m²** powierzchni grzewczej, a docelowo moc ma wystarczyć na ogrzanie nawet do **200 mln m²** powierzchni w rejonie Półwyspu Shandong [15, 16].

Ciepło z elektrowni pobierane jest w postaci upustu pary wtórnego obiegu, czyli nieaktywnej pary wytworzonej w wytwornicach pary przez gorącą wodę z obiegu pierwotnego reaktora [17, 18]. Taka para nie zawiera substancji promieniotwórczych, gdyż jest odseparowana od wody reaktorowej barierą wytwornicy pary. Para upuszczana z wtórnego obiegu trafia następnie do specjalnego węzła cieplnego na terenie elektrowni, gdzie stopniowo oddaje ciepło wodzie krążącej w zamkniętym obiegu pośrednim. Ciepło z elektrowni przekazywane jest następnie długim rurociągiem do miasta. Gorąca woda obiegu pośredniego płynie magistralą ciepłowniczą do zewnętrznej stacji wymiany ciepła, zlokalizowanej bliżej odbiorców i będącej już w gestii lokalnego przedsiębiorstwa ciepłowniczego. Tam ciepło może być już przekazane dalej do miejskiego systemu dystrybucji [15].

3.4. Strefy planowania awaryjnego

Zgodnie z decyzją Regionalnego komitetu ds. reagowania awaryjnego w Shandong z 2012 roku strefę narażenia na chmurę radioaktywną przyjęto jako obszar o promieniu **10 km** (w tym wewnętrzną podstrefę **5 km**), a strefę ograniczonego spożycia wyznaczono jako obszar w kształcie koła o promieniu **50 km** od reaktora. Ponadto funkcjonuje strefa wykluczenia (granica lądowa została wyznaczona zgodnie z granicą terenu zakładu, a na morzu przyjęto promień **0,8 km** od reaktora) oraz strefa ograniczonego planowania o promieniu **5 km**. Wewnętrzna strefa narażenia na chmurę radioaktywną, jak i strefa ograniczonego planowania, obejmują jedynie niewielkie wioski i osiedla, natomiast zewnętrzna strefa obejmuje już fragmenty większych skupisk ludności: części miasteczek i dzielnic miasta Haiyang, a także obszarów przemysłowych. Strefa ograniczonego spożycia obejmuje znaczną część północno-wschodniego Shandong. W jej granicach znajduje się prawie całe miasto powiatowe Haiyang, a także obrzeża innych dużych miast [12].

3.5. Porównanie z elektrownią Sanmen

Spośród kilkudziesięciu bloków jądrowych pracujących w Chinach tylko dwa ośrodki eksploatują reaktory typu AP1000. Są to Haiyang w prowincji Shandong oraz San-

men w prowincji Zhejiang [19]. Powstały niemal równolegle, mają identyczną architekturę reaktora oraz podobne poziomy mocy, co czyni je idealną parą do badania wpływu czynników pozareaktorowych na bezpieczeństwo i oddziaływanie elektrowni. Różni je jednak kluczowy element użytkowy: Haiyang od sezonu 2019/2020 wykorzystuje część ciepła odpadowego z obiegów turbiny do zasilania największego w Chinach systemu ciepłowniczego.

Elektrownia Sanmen znajduje się w prowincji Zhejiang, w nadmorskiej części powiatu Sanmen (prefektura Taizhou). Od zachodu chroniona jest przez masyw górski, a od wschodu otacza ją zatoka Sanmen. Granice stref planowania awaryjnego w Sanmen są dokładnie takie same jak dla elektrowni Haiyang, tj. 5 km dla wewnętrznej i 10 km dla zewnętrznej strefy narażenia na chmurę radioaktywną oraz 50 km dla strefy ograniczonego spożycia. Strefa ograniczonego planowania elektrowni Sanmen to również okrąg o promieniu 5 km, natomiast strefa wykluczenia ma nieregularny kształt, a odległość jej granicy od centrum reaktora waha się od 800 do 1500 metrów. Mimo że obie lokalizacje dzieli ponad 800 km w linii prostej, gęstość zaludnienia w ich bezpośrednim sąsiedztwie jest do siebie zbliżona. Tabela 1 przedstawia szczegółową liczbę ludności zamieszkującej poszczególne strefy wyznaczone na podstawie promienia odległości od danej elektrowni.

Zestawienie danych dla elektrowni Haiyang i Sanmen pozwala sformułować kluczowe wnioski dotyczące rzeczywistego wpływu gęstości zaludnienia na projektowanie stref planowania awaryjnego dla obiektów jądrowych. Analiza porównawcza, a zwłaszcza dane demograficzne z tabeli 1, wyraźnie pokazują, że to nie funkcja kogeneracyjna decyduje o wielkości stref planowania awaryjnego. Co więcej, elektrownia Sanmen, która nie dostarcza ciepła sieciowego, jest zlokalizowana na obszarze o większej gęstości zaludnienia, w promieniu 5 km i 10 km, niż kogeneracyjna elektrownia Haiyang.

Obie elektrownie, posiadające identyczne strefy planowania awaryjnego, spełniają te same, rygorystyczne chińskie wymogi lokalizacyjne, które ograniczają gęstość zaludnienia w najbliższym otoczeniu siłowni jądrowej. Obiekt w Haiyang ulokowano w bezpiecznej odległości od dużych aglomeracji, takich jak Yantai i Qingdao, na

Tabela 1. Liczba ludności zamieszkująca poszczególne strefy wyznaczone na podstawie promienia odległości od elektrowni [12, 19].

Table 1. The number of people living in individual zones determined by the radius of distance from the power plant [12, 19].

Elektrownia	Odległość od elektrowni (km)			
	5	10	20	50
Haiyang (2020 r.)	6382	38450	206479	1071789
Sanmen (2014 r.)	12700	47899	248704	2229823

terenie o małej gęstości zaludnienia, co było warunkiem koniecznym do uzyskania licencji.

Wniosek z chińskiego studium przypadku jest zatem następujący: kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i akceptowalności projektu jądrowo-ciepłowniczego ma wybór lokalizacji o odpowiednio małej gęstości zaludnienia, który umożliwia wyznaczenie stref planowania awaryjnego zgodnych z krajowymi regulacjami. Sama funkcja kogeneracyjna, jeśli jest realizowana, tak jak w Haiyang, poprzez bezpieczny, wielostopniowy system wymiany ciepła z obiegu wtórnego, nie stanowi czynnika, który wymuszałby zmianę podejścia do planowania awaryjnego. Jest to argument pomocniczy, potwierdzający, że przy zachowaniu podstawowych zasad bezpieczeństwa jądrowego ciepłownicza rola elektrowni nie generuje dodatkowego ryzyka radiologicznego dla otoczenia.

4. Fińskie podejście do stref planowania awaryjnego i jądrowej generacji ciepła

4.1. Zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego w Finlandii

W Finlandii kwestie planowania awaryjnego dla elektrowni jądrowych są uregulowane w kilku aktach prawnych i przepisach niższego rzędu. Do najważniejszych z nich można zaliczyć Ustawę o energii jądrowej [20] oraz Dekret w sprawie energii jądrowej [21]. Określają one ogólne obowiązki w zakresie bezpieczeństwa oraz precyzują wymogi dotyczące planów awaryjnych.

Fińskie przepisy definiują dwie główne strefy planowania na wypadek awarii radiologicznej wokół elektrowni jądrowej: **wewnętrzną strefę działań zapobiegawczych** oraz **zewnętrzną strefę planowania awaryjnego**. W celu zachowania spójności terminologicznej i uniknięcia niejednoznaczności w dalszej części artykułu druga strefa będzie określana jako **strefa zewnętrzna**.

Obowiązująca od 2024 roku regulacja fińskiego Urzędu ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego (fiń. *Säteilyturvakeskus*, STUK) [22] wskazuje, że wewnętrzną strefę działań zapobiegawczych należy wyznaczać tak, aby w razie awarii niemal na pewno nie trzeba było ewakuować mieszkańców spoza jej granic, a wszystkie konieczne działania ewakuacyjne dało się przeprowadzić wewnątrz niej, chroniąc ludność przed poważnymi skutkami deterministycznymi promieniowania jonizującego lub ograniczając ich skalę. Z tego względu w obrębie tej strefy obowiązują ograniczenia dotyczące zagospodarowania terenu. Jej promień ustala się dopiero po wykazaniu, że przy najgorszym scenariuszu dawka, jaką mogłaby otrzymać nieosłonięta osoba znajdująca się tuż poza strefą, nie przekroczy **1 Sv w ciągu pierwszych 10 godzin** od początku narażenia na promieniowanie. Strefę zewnętrzną wyznacza się natomiast w taki sposób, aby w razie wypadku istniało wysokie prawdopodobieństwo, że nie będzie

potrzeby, aby ludność schroniła się w pomieszczeniach poza jej granicami. Podczas ustalania zasięgu tej strefy należy wykazać, że w najbardziej niekorzystnym scenariuszu dawka, jaką mogłaby otrzymać nieosłonięta osoba tuż poza strefą, nie przekroczy **10 mSv w ciągu 48 godzin** od początku narażenia na promieniowanie. Zgodnie z przepisami obszar ten nie powinien przekraczać około **20 km** od elektrowni jądrowej.

Dla kontekstu historycznego warto dodać, że do niedawna fińskie przepisy określały orientacyjne promienie tych stref: około **5 km dla strefy działań zapobiegawczych** oraz około **20 km dla strefy zewnętrznej** wokół wszystkich elektrowni jądrowych. Najnowsza regulacja z 2024 roku usunęła jednak sztywne wartości 5 i 20 km z definicji stref, zastępując je kryteriami związanymi z dawką promieniowania. Obecnie rozmiar stref wyznacza się na podstawie analiz przebiegu potencjalnych awarii i ich skutków radiologicznych. W praktyce oznacza to, że dla dużych konwencjonalnych elektrowni jądrowych strefy te prawdopodobnie pozostaną zbliżone do dotychczasowych, jednak dla mniejszych reaktorów czy nowych projektów mogą zostać zaproponowane mniejsze promienie, jeśli analizy bezpieczeństwa wykażą dotrzymanie powyższych kryteriów.

4.2. Plany ciepłowniczej elektrowni jądrowej w Helsinkach

Helsinki przygotowują się do budowy pierwszej w Finlandii małej elektrowni jądrowej wytwarzającej ciepło sieciowe. Inwestycja opiera się na technologii małych modułowych reaktorów jądrowych (ang. *Small Modular Reactor*, SMR). Projekt ten ma pomóc w realizacji celów dekarbonizacji ciepłownictwa, zastępując wyłączone elektrociepłownie węglowe bezemisyjnym źródłem ciepła, a także przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego miasta. Planowana elektrownia ma wykorzystywać SMR zaprojektowany specjalnie do produkcji ciepła dla sieci miejskiej. Fińska firma **Steady Energy** opracowała koncepcję reaktora **LDR-50**, niewielkiego ciśnieniowego reaktora wodnego o mocy cieplnej 50 MW [23]. Reaktor ten pracuje w stosunkowo łagodnych warunkach: temperatura około 150°C i ciśnienie poniżej 10 barów. Dzięki temu możliwe było uproszczenie konstrukcji i spełnienie rygorystycznych norm bezpieczeństwa przy mniejszej skali przedsięwzięcia. Kluczowym inicjatorem projektu jest miejska spółka energetyczna **Helen**, która dostarcza ciepło sieciowe i energię elektryczną na terenie Helsinek. Helen postawiła sobie ambitny cel osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2030 roku i eliminacji spalania paliw kopalnych do 2040 roku [24]. W związku z tym spółka aktywnie poszukuje czystych technologii zastępujących węgiel, gaz czy biomasę. We wrześniu 2024 roku Helen oficjalnie uruchomiła program energetyki jądrowej, którego celem jest przygotowanie gruntu pod budowę małego reaktora

do zasilania miejskiej sieci ciepłowniczej [25]. Za część technologiczną odpowiada **Steady Energy**, startup założony latem 2023 roku w celu komercjalizacji fińskiego konceptu jądrowej ciepłowni. W październiku 2023 roku Helen jako pierwszy operator ciepłowniczy podpisała list intencyjny ze Steady Energy, zakładający wspólne działania na rzecz budowy w Helsinkach małej elektrowni jądrowej do produkcji ciepła. Porozumienie (ważne do 2027 roku) obejmuje m.in. współpracę w procesie legislacyjnym (reforma prawa jądrowego), uzyskanie zgody lokalizacyjnej i wstępnej certyfikacji technologii oraz ustalenie ram cenowych dla przyszłej inwestycji [24]. Dzięki temu, że STUK zniósł wymóg stref bezpieczeństwa opartych wyłącznie na dystansie od reaktora, otworzyła się droga na lokalizację małych reaktorów w pobliżu gęstej zabudowy.

Projekt znajduje się obecnie w fazie planowania i demonstracji technologii. Faza pierwsza programu jądrowego Helen, rozpoczęta jesienią 2024 roku, potrwa do roku 2026 i obejmuje negocjacje z potencjalnymi partnerami, wybór dostawcy reaktora oraz analizę możliwych lokalizacji [24]. W maju 2025 roku ogłoszono przełomową wiadomość: Steady Energy we współpracy z firmą Helen uruchomi pilotażową instalację SMR w Helsinkach w celu przetestowania wszystkich kluczowych rozwiązań przed rozpoczęciem docelowej budowy. Będzie to pełnowymiarowy model reaktora LDR-50 zainstalowany w istniejącym budynku dawnej elektrociepłowni, jednak **bez użycia paliwa jądrowego**. Ciepło będzie wytwarzane za pomocą grzałek elektrycznych, które będą symulować pracę rdzenia reaktora. Taki obiekt demonstracyjny pozwoli sprawdzić w praktyce działanie systemów oraz przećwiczyć proces montażu i integracji z miejską siecią ciepłowniczą [26, 27]. Steady Energy zakłada, że budowa pierwszego właściwego reaktora LDR-50 rozpocznie się do 2028 roku, tak aby oddanie do eksploatacji nastąpiło około 2030 roku.

Projekt znajduje się dopiero w początkowej fazie, dlatego ostateczne miejsce instalacji małego modułowego reaktora dla sieci ciepłowniczej Helsinek nie zostało jeszcze wyznaczone. W związku z tym niemożliwe jest dzisiaj precyzyjne określenie, jak będą wyglądać granice stref planowania awaryjnego dla tego obiektu. Mimo to przypadek fiński został uwzględniony w analizie, ponieważ jest to nowatorskie, aktywnie rozwijane przedsięwzięcie, które może się stać ważnym wzorcem. Warto śledzić, jakie w praktyce będzie podejście fińskiego dozoru jądrowego do wyznaczenia tych stref dla reaktora zlokalizowanego w pobliżu dużej aglomeracji, zwłaszcza w kontekście niedawnej nowelizacji przepisów, która odeszła od sztywnych promieni na rzecz kryteriów opartych na dawkach.

5. Szwajcaria – 40 lat doświadczenia w jądrowej kogeneracji i planowaniu awaryjnym

5.1. Wyznaczanie stref planowania awaryjnego wokół szwajcarskich elektrowni jądrowych

Wyznaczenie stref planowania awaryjnego opiera się na szwajcarskim prawie jądrowym i przepisach o ochronie ludności. Głównym aktem jest Ustawa o Energii Jądrowej [28], a szczegółowe wymagania zawiera Rozporządzenie w Sprawie Ochrony w Sprawach Awaryjnych w Poblżu Instalacji Jądrowych [29].

Zgodnie z rozporządzeniem [29] wokół każdej elektrowni ustanawia się dwie strefy planowania awaryjnego: wewnętrzną i zewnętrzną. Strefa wewnętrzna obejmuje obszar, na którym może powstać zagrożenie dla ludności w przypadku poważnego incydentu i gdzie natychmiast wymagane są środki ochronne. Jej promień zależy od instalacji i zazwyczaj wynosi **od 3 do 5 km**. Strefa zewnętrzna przylega do strefy wewnętrznej i obejmuje obszar, na którym w przypadku poważnego zdarzenia może powstać zagrożenie dla ludności wymagające środków ochronnych, a jej promień wynosi około **20 km**. Strefa zewnętrzna jest podzielona na sześć nakładających się na siebie sektorów o kącie nachylenia 120° każdy. Granice sektorów pokrywają się z granicami gmin, co ułatwia koordynację z władzami lokalnymi. Podział na sektory umożliwia prowadzenie działań, takich jak ewakuacja czy ostrzeganie mieszkańców, wyłącznie w tych obszarach, które znajdują się na drodze rozprzestrzeniania się chmury radioaktywnej [30]. Granice stref ustala się na podstawie symulacji awarii. Przyjmuje się bardzo konserwatywne scenariusze uwalniania radionuklidów (np. pełne stopienie rdzenia reaktora), analizowane dla niekorzystnych warunków meteorologicznych. Historycznie przyjęto, że strefa wewnętrzna obejmuje teren, na którym przebywająca w radioaktywnej chmurze osoba bez ochrony mogłaby otrzymać dawkę **większą niż 1 Sv** w czasie przemierzania się chmury nad tym terenem. Strefa zewnętrzna obejmuje obszar, gdzie dawka bezpośrednia nie jest już zagrażająca życiu, ale opad radioaktywny może spowodować dodatkowe skażenie (np. żywności) [31].

5.2. Kogeneracyjna elektrownia Beznau

Elektrownia jądrowa Beznau jest najstarszą działającą elektrownią jądrową w Szwajcarii i jedną z najstarszych na świecie. Znajduje się na sztucznej wyspie na rzece Aare w gminie Döttingen w kantonie Aargau. Elektrownię tworzą dwa identyczne bloki oparte na reaktorach wodno-ciśnieniowych wyprodukowanych przez Westinghouse. Każdy blok ma moc elektryczną netto 365 MWe. Blok Beznau 1 podłączono do sieci pod koniec 1969 roku, a blok 2 w roku 1971 [32]. Od zimy 1983/1984 elektrownia jądrowa Beznau przekazuje część swojego ciepła odpadowego

do regionalnej sieci ciepłowniczej **REFUNA**. Przegrzana para o temperaturze około 127°C, odprowadzana z pośrednich stopni turbin, trafia do wymiennika ciepła, w którym podgrzewa wodę sieciową do około 120°C. Magistrala REFUNA liczy łącznie około 134 km, a z dostarczanego ciepła korzystają budynki w jedenastu gminach doliny Aare. Rocznie system zapewnia średnio około 170 GWh energii cieplnej [33].

5.2.1. Strefy planowania awaryjnego Beznau–Leibstadt

Elektrownia Beznau znajduje się w rejonie o wysokiej koncentracji obiektów jądrowych, dlatego jej strefy planowania awaryjnego tworzą w praktyce wspólny system z sąsiednimi instalacjami. Dla Beznau i położonej około 6 km na północny zachód elektrowni jądrowej Leibstadt wyznaczono **jedną wspólną strefę wewnętrzną** oraz **jedną strefę zewnętrzną**. Ich granice nie mają formy idealnych okręgów o promieniach 5 i 20 kilometrów, ponieważ rozporządzenie [29] nakazuje, aby przebiegały one możliwie dokładnie wzdłuż granic administracyjnych gmin. W efekcie strefy te przyjmują kształt nieregularnych wieloboków. Wewnętrzna strefa obejmuje również instytut badawczy Paul Scherrer Institute oraz magazyn odpadów promieniotwórczych ZWILAG. Dzięki wspólnemu przebiegowi granic możliwe było jednak zastosowanie jednolitych zasad ochrony dla całego obszaru.

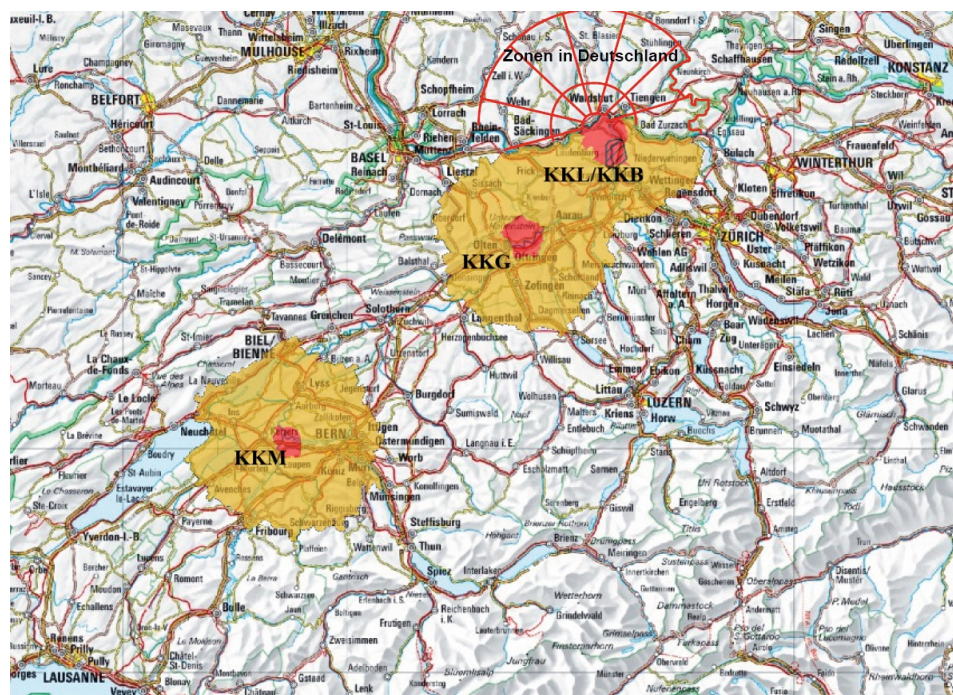
Strefa zewnętrzna wyznaczona dla elektrowni Beznau i Leibstadt nachodzi od zachodu na strefę zewnętrzną elektrowni jądrowej Gösgen, a gminy położone w rejonie nakładania się stref zostały ujęte w obu planach awaryj-

nych. Zasięg tej strefy przekracza również Ren, obejmując kilka miejscowości kraju związkowego Badenii-Wirtembergii, m.in. Waldshut-Tiengen, Laufenburg i Dogern. Szwajcarzy i Niemcy od lat ćwiczą wspólne reagowanie na ewentualną awarię bloków Beznau i Leibstadt. Działania po obu stronach granicy opierają się na tych samych zasadach; organy Badenii-Wirtembergii i szwajcarskie służby pozostają w stałym kontakcie i ściśle ze sobą współpracują. Formalne granice stref każdy kraj określa jednak według własnych przepisów: po niemieckiej stronie Renu opracowano odrębną koncepcję stref planowania awaryjnego, nieco różniącą się kształtem i zasięgiem od przyjętej w Szwajcarii [30, 34, 35]. Przebieg wszystkich stref planowania awaryjnego w Szwajcarii przedstawiono na rysunku 2.

Warto podkreślić, że system kogeneracyjny REFUNA nie wpłynął na wyznaczanie stref awaryjnych. Rurociąg ciepłowniczy odbiera ciepło z niskociśnieniowego, nieaktywnego obiegu wtórnego elektrowni, dlatego nie zmienia potencjalnych scenariuszy emisji promieniotwórczych.

5.3. Procedura ewakuacji na przykładzie Szwajcarii

Ochrona w sytuacjach awaryjnych ma na celu zabezpieczenie ludności narażonej na zwiększone natężenie promieniowania jonizującego, zapewnienie jej wsparcia w fazie przejściowej, dostarczenie niezbędnych środków oraz możliwie szybkie przywrócenie warunków normalnego funkcjonowania. W razie potrzeby należy wdrożyć



Rys. 2. Strefy planowania awaryjnego wokół elektrowni jądrowych w Szwajcarii. Strefa 1 – kolor czerwony, Strefa 2 – kolor pomarańczowy. Oznaczenia elektrowni: KKM – Mühleberg, KKG – Gösgen, KKL/KKB – Leibstadt/Beznau (źródło: <https://ensi.admin.ch/de/notfallschutz/notfallschu>).

Fig. 2. Emergency planning zones around nuclear power plants in Switzerland. Zone 1 – red color, Zone 2 – orange color. Power plant designations: KKM – Mühleberg, KKG – Gösgen, KKL/KKB – Leibstadt/Beznau (source: <https://ensi.admin.ch/de/notfallschutz/notfallschu>).

odpowiednie środki ochronne, uwzględniając uwarunkowania ekonomiczne i społeczne. Najpoważniejszym wyzwaniem jest jednak sprawna ewakuacja ludności z gęsto zaludnionych obszarów.

Skoordynowana i jednolita komunikacja jest jednym z kluczowych czynników sukcesu w przypadku ewakuacji na dużą skalę: przekaz musi być prosty, przejrzysty, punktualny, zrozumiały i wiarygodny. Umożliwia to większości mieszkańców podjęcie samodzielnych działań zmierzających do zapewnienia sobie bezpieczeństwa. Przekazywane komunikaty muszą obejmować przede wszystkim zalecenia dotyczące odpowiedniego zachowania i niezbędnego wyposażenia, numery alarmowe, wyznaczone trasy ewakuacyjne oraz lokalizacje punktów przyjęć. Na centralnych platformach informacyjnych krajowych i kantonalnych dane są konsolidowane i przekazywane społeczeństwu za pośrednictwem radia, telewizji, wiadomości SMS, rządowych stron internetowych oraz mediów społecznościowych. W sytuacji ewakuacji na pierwszy plan wysuwają się działania związane z kierowaniem ruchem, utrzymywaniem porządku publicznego, zapewnieniem bezpieczeństwa oraz ochroną wybranych grup ludności.

Założenia planu ewakuacyjnego koncentrują się wokół trzech kluczowych kwestii: liczby osób przebywających w danym obszarze, czasu potrzebnego na jego opuszczenie oraz prognozowanych reakcji społecznych. Populację objętą ewakuacją dzieli się orientacyjnie na trzy grupy: stałych mieszkańców (około 80%), osoby czasowo przebywające w strefach ochronnych podczas sytuacji kryzysowych (około 15%) oraz turystów (około 5%). W regionie Beznau/Leibstadt żyje około 23700 i 255 800 osób odpowiednio w strefie pierwszej i drugiej (dane na 2015 rok) [36].

Po ogłoszeniu ewakuacji około dwie trzecie mieszkańców opuszcza zagrożony obszar samodzielnie, najczęściej korzystając z prywatnych samochodów. Wspólne przejazdy organizowane są głównie wśród osób, które się znają. Zwykle członkowie rodziny spotykają się najpierw w swoim domu położonym w strefie ewakuacyjnej, a następnie wyjeżdżają razem. Każdy musi samodzielnie wybrać trasę, zdecydować, czy skorzysta z transportu prywatnego, czy publicznego i znaleźć schronienie poza obszarem ewakuacji. Około jedna trzecia mieszkańców to osoby zależne, niezdolne do opuszczenia strefy ewakuacyjnej własnym samochodem. W ich przypadku można wyróżnić trzy sytuacje: część osób potrzebuje transportu publicznego, ale potrafi samodzielnie dotrzeć do przystanku; inni, przebywający we własnych domach, wymagają pomocy opiekunów lub służb już przy wyjściu z mieszkania; pozostali mieszkają w placówkach zamkniętych, takich jak szpitale, domy opieki czy zakłady karne muszą być ewakuowani w asyście personelu, często z wykorzystaniem specjalistycznych pojazdów. Mimo wydania decyzji o ewakuacji w zagrożonym obszarze zawsze pozostaje pewien odsetek ludności. Zazwyczaj należą do nich osoby

świadomie ignorujące wezwania do opuszczenia strefy, podopieczni wymagający stałej opieki domowej, których nie udało się ewakuować prewencyjnie z powodu braku czasu lub dostępnych miejsc, a także personel odpowiedzialny za utrzymanie krytycznej infrastruktury oraz służby ratunkowe prowadzące działania ochronne.

Ewakuacja wszystkich osób chcących opuścić strefę wewnętrzną zajmuje przeciętnie około sześciu godzin od chwili wydania nakazu. Strefa zewnętrzna nie jest ewakuowana w całości, lecz sektorami, zależnie od kierunku wiatru. Przyjmuje się, że w ciągu dwunastu godzin można wyprowadzić z niej zdecydowaną większość chętnych. Znacznie dłużej, bo ponad 30 godzin, trwa ewakuacja placówek wymagających specjalnej organizacji, takich jak szpitale, zakłady karne czy ogrody zoologiczne. Rozmiar obszaru odgrywa tu rolę drugorzędną; głównym ograniczeniem nie jest przepustowość transportu, lecz sposób, w jaki zachowują się sami ewakuowani [36].

Po awarii w elektrowni jądrowej wyróżnia się zasadniczo dwa typy ewakuacji. **Ewakuacja prewencyjna** nakazuje opuszczenie terenu jeszcze przed przewidywanym uwolnieniem substancji promieniotwórczych; obejmuje strefę wewnętrzną, a w razie potrzeby także całość lub część strefy zewnętrznej, jeśli w porównaniu z innymi środkami ochrony zapewnia najlepszą ochronę przed promieniowaniem jonizującym. O decyzji przesądzają przede wszystkim: przebieg zdarzeń w elektrowni, prognozowane dawki, czas dostępny na działania oraz warunki pogodowe. **Późniejsza ewakuacja** ma miejsce już po uwolnieniu materiałów radioaktywnych i dotyczy obszarów, gdzie ludność byłaby narażona na podwyższone dawki promieniowania przez dłuższy czas, od kilku dni aż do kilku lat. W przypadku obszarów o niskim poziomie skażenia bezpieczniejszym rozwiązaniem może być pozostanie na miejscu, jeśli wdrożone zostaną odpowiednie środki ochronne.

W ciągu pierwszych godzin po zdarzeniu w elektrowni jądrowej kluczową rolę odgrywa Krajowe Centrum Alarmowe (niem. *Nationale Alarmzentrale*, NAZ), które koordynuje cały przepływ informacji. O samym nakazie ewakuacji społeczeństwo informuje bezpośrednio prezydent Szwajcarii lub inny członek Rady Federalnej, korzystając z radia i telewizji. Jeśli ogłasza się ewakuację prewencyjną, transport publiczny na obszarze objętym akcją zostaje wstrzymany nie później niż godzinę przed przewidywanym uwolnieniem materiałów promieniotwórczych.

Organizacja Zarządzająca Kantonem (niem. *Kantonale Führungsorganisation*, KFO) kieruje ruchem tak, aby ewakuacja przebiegała możliwie najsprawniej. Zapobiega korkom i wypadkom, zwiększa przepustowość dróg i linii kolejowych, korzysta ze zintegrowanych systemów sterowania, takich jak sygnalizacja świetlna, tablice informacyjne i oznakowanie, a także wspiera się środkami zabezpieczającymi i bieżącym nadzorem policji, straży pożarnej,

obrony cywilnej oraz wojska. Całość jest koordynowana z użyciem sieci radiowych i innych kanałów łączności. Podczas szeroko zakrojonej ewakuacji siły kantonalne odpowiadają za utrzymanie porządku i bezpieczeństwa. KFO prowadzi też rejestr osób, których nie udało się wywieźć z powodu ograniczeń czasu lub przepustowości; ustala ich potrzeby, zapewnia doraźną opiekę i organizuje późniejsze przemieszczenie w bezpieczne miejsce. W razie ogłoszenia ewakuacji wykorzystuje się całą dostępną infrastrukturę transportową. Za wspólne działania KFO i operatorów komunikacji publicznej odpowiada osoba odpowiedzialna za transport w sztabie KFO, która wraz z kryzysowymi menedżerami kolei i przedsiębiorstw autobusowych koordynuje niezbędne kroki. Gdy Rada Federalna zarządza ewakuację prewencyjną, federalni i kantonalni zarządcy dróg oraz przewoźnicy kolejowi, w porozumieniu z KFO, zwiększają liczbę kursów i przepustowość szlaków. Braki taboru w obszarze ewakuacji uzupełniają się pojazdami ściągniętymi spoza strefy, korzystając z zasobów prywatnych firm autobusowych oraz transportu wojskowego.

Obszar przyjęcia znajduje się około 10 km poza granicami zewnętrznej strefy; to właśnie tam trafiają i są zakwaterowywani ewakuowani. W razie awarii jądrowej kantony działające w tej strefie muszą w ciągu kilku godzin uruchomić sprawny system przyjęcia ludności. Doświadczenie pokazuje, że mniej więcej jedna trzecia ewakuowanych wymaga krótkotrwałego noclegu i zaopatrzenia; odsetek ten dość szybko spada do około 10%, ponieważ większość osób wkrótce organizuje sobie zakwaterowanie we własnym zakresie. Pozostali potrzebują schronienia przez dłuższy czas, od kilku tygodni do nawet kilku miesięcy. Za organizację całego systemu przyjęcia odpowiada KFO [36].

Podstawowy układ podmiotów, platform i kanałów komunikacyjnych pozostaje taki sam przy ewakuacji późniejszej, jak przy ewakuacji prewencyjnej. Trzeba jednak rozesłać kilka dodatkowych instrukcji: osoby bez własnego samochodu, które nie są w stanie samodzielnie dotrzeć do punktów zbiórki, powinny zgłosić się na infolinię; tam ich potrzeby zostaną zapisane, aby można było zaplanować transport. KFO wraz z władzami gmin mają obowiązek informować o lokalizacji miejsc zbiórki w obszarze przyjęcia. Podczas ewakuacji późniejszej ruch publiczny ogranicza się do wyznaczonych obszarów, aby zmniejszyć wtórne skażenie. Zależnie od poziomu promieniowania akcja rozpoczyna się z dwóch różnych punktów wyjścia. Przy umiarkowanych dawkach każda gmina wyznacza jedno lub kilka dobrze osłoniętych miejsc zbiórki, skąd ludność jest szybko wywożona. Jeżeli poziom promieniowania jest zbyt wysoki, ewakuacja odbywa się bezpośrednio z miejsc schronienia, takich jak mieszkania, biura, piwnice czy schrony i prowadzona jest stopniowo ulicami. Operatorzy infrastruktury krytycznej wymieniają personel we współpracy z KFO, a częstotliwość rotacji

zależy od natężenia promieniowania jonizującego. Osoby, które dobrowolnie pozostaną w strefie, muszą samodzielnie zapewnić sobie żywność i ochronę. Po wydaniu decyzji o ewakuacji późniejszej wstrzymany transport publiczny zostaje przywrócony w dostosowanym kształcie: przewoźnicy zwiększają przepustowość, wprowadzają dodatkowy tabor i zapasy paliwa, organizują zmiany kierowców, a luki w obsadzie wypełnia wojsko. Równocześnie uruchamia się Punkt Doradczy ds. Radioaktywności (niem. *Beratungsstelle Radioaktivität*), który przeprowadza ocenę dawek, segregację medyczną i udziela pomocy psychosomatycznej, odciążając system opieki zdrowotnej. Rząd federalny odpowiada za ochronę radiologiczną: kieruje ekspertów, sprzęt pomiarowy i personel medyczny do centrum, natomiast kantony zapewniają infrastrukturę, zespoły operacyjne i opiekę nad ewakuowanymi.

Po ustąpieniu zagrożenia zwiększonym poziomem promieniowania władze uchylają dotychczasowe środki ochronne, co pozwala mieszkańcom wrócić i ponownie osiedlić opuszczone tereny. Jeśli te obszary z powodu kontaminacji nie będą się nadawały do zamieszkania przez dłuższy czas (miesiące do lat), konieczne będzie zorganizowanie długoterminowego przesiedlenia dotkniętej ludności oraz ewentualnie rozpoczęcie dekontaminacji skażonych obszarów [36].

Studium przypadku Szwajcarii wyróżnia się na tle pozostałych, oferując ponad czterdzieści lat praktycznych doświadczeń zarówno w zakresie jądrowej kogeneracji, jak i planowania awaryjnego. Z jednej strony, długoletnia i bezproblemowa praca systemu ciepłowniczego REFUNA, zasilanego z elektrowni Beznau od 1983 roku, stanowi dowód na to, że kogeneracja nie wpływa na zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego. Z drugiej strony, szwajcarski model pokazuje niezwykle pragmatyczne podejście do samego kształtu stref; dostosowanie ich granic do podziału administracyjnego gmin oraz podział strefy zewnętrznej na sektory znacząco ułatwia zarządzanie kryzysowe i pozwala na prowadzenie działań w sposób precyzyjny, a nie masowy.

Najcenniejszym elementem szwajcarskich doświadczeń jest jednak szczegółowo opracowany i przetestowany system ochrony ludności. Przedstawione w artykule procedury ewakuacji, obejmujące komunikację, logistykę, podział ról między instytucjami oraz szacowane czasy działania, tworzą gotowy wzorzec, który może posłużyć jako fundament do budowy polskich planów awaryjnych. To nie tylko teoria, ale sprawdzony w ćwiczeniach model, uwzględniający realne wyzwania, takie jak ewakuacja placówek medycznych czy zachowania społeczne. Szwajcaria dysponuje kompleksowym doświadczeniem i rozwiązaniami, które mogą znacząco skrócić i usprawnić proces przygotowań do wdrożenia energetyki jądrowej w Polsce, zwłaszcza w jej najbardziej wymagającym wymiarze społecznym.

6. Szansa dla Polski

Polski sektor ciepłowniczy zachowuje najwyższy udział paliw kopalnych wśród wszystkich gałęzi krajowej energetyki, a tempo jego dekarbonizacji pozostaje znacząco wolniejsze niż w elektroenergetyce [37,38]. Zgodnie z wymogami pakietu Fit-for-55 [39] oraz krajowego Programu polskiej energetyki jądrowej [40], systemy ciepła sieciowego muszą w ciągu najbliższej dekady przejść jakościową transformację: od źródeł opartych głównie na węglu i gazie w kierunku bezemisyjnych lub niskoemisyjnych technologii. Jedną z najbardziej perspektywicznych opcji jest wykorzystanie dużych reaktorów typu PWR oraz małych reaktorów modułowych do produkcji energii ciepłej dla sieci miejskich. W tym kontekście szczególnie obiecująca jest **lokalizacja Lubiatowo-Kopalino**, wskazana dla pierwszej krajowej elektrowni jądrowej. Już w latach 80. Biuro Studiów i Projektów Energetycznych Energoprojekt w Warszawie opracowało koncepcję wykorzystania ciepła odpadowego z planowanego wtedy bloku PWR do zasilania sieci Trójmiasta. Studium przewidywało przesył około **900 MWt** rurociągiem o długości około **40 km** do Gdyni, Sopotu i Gdańska, z możliwością włączenia po drodze lokalnych węzłów w Wejherowie lub Gdyni [41]. Wykonano wówczas wstępne obliczenia termohydrauliczne, analizę wariantów trasowania magistrali oraz ocenę strat ciepła, wskazując, że projekt może być konkurencyjny kosztowo względem klasycznych źródeł węglowych. Pomimo zawieszenia programu jądrowego w 1990 roku profil zapotrzebowania na ciepło w aglomeracji trójmiejskiej nadal pozwala na efektywne wykorzystanie pojedynczego bloku klasy AP1000. Aktualizacja historycznych danych mogłaby skrócić etap studialny pierwszego krajowego projektu kogeneracji jądrowej o kilka lat i radykalnie obniżyć ryzyko inwestycyjne.

Ponadto Ministerstwo Przemysłu ogłosiło 25 marca 2025 roku podczas Polskiego Kongresu Klimatycznego, że opracuje **mapę drogową SMR** i przedłoży ją Radzie Ministrów do końca 2025 roku. Dokument ten ma wyznaczyć jasne, technologicznie neutralne zasady dla inwestorów budujących SMRy w Polsce. Projekt powstaje równolegle z **białą księgą**, kompendium wiedzy o SMR, i ma skoordynować procedury administracyjne, modele finansowania, rozwój kadr, a także wspierać już rozpoczęte inicjatywy [42]. Dla kogeneracyjnych/grzewczych SMR-ów jest to szczególnie szansa, ponieważ ich niewielka moc cieplna i pasywne systemy bezpieczeństwa pozwalają lokować je znacznie bliżej odbiorców niż klasyczne duże bloki jądrowe. Takie podejście umożliwiłoby rozmieszczenie SMR-ów w pobliżu zabudowy miejskiej, a tym samym dekarbonizację dużych aglomeracji bez potrzeby budowy długich magistral przesyłowych.

7. Podsumowanie

Niniejszy artykuł pokazuje, że jądrowe ciepłownictwo może współistnieć z rygorystycznymi strefami planowania awaryjnego bez konieczności ich rozszerzania. Studium trzech państw stanowi punkt wyjścia. W Chinach dwublokowa elektrownia AP1000 Haiyang, która od 2019 roku ogrzewa miasto w ramach programu Warm Nuclear No. 1, zasila już 13 mln m² powierzchni, a mimo to zachowała klasyczny model stref; czynnik grzewczy pobierany jest z nieaktywnego obiegu wtórnego, więc nie zwiększa scenariuszy emisji. Finlandia poszła krok dalej: nowelizacja wytycznych STUK z 2024 roku usunęła sztywne promienie 5 km i 20 km, zastępując je kryterium dawki; dzięki temu pilotażowy SMR LDR-50 o mocy 50 MW, planowany przez spółkę Helen w Helsinkach, może zostać wzniesiony na terenie istniejącej ciepłowni miejskiej. Z kolei Szwajcaria od czterech dekad przesyła rocznie 170 GWh energii z elektrowni Beznau do jedenastu gmin systemem REFUNA; magistrala liczy 134 km i przecina nieregularne strefy awaryjne, których granice poprowadzono wzdłuż linii gminnych, co ułatwia organizację ewakuacji. Ten czterdziestoletni dorobek operacyjny obejmujący praktykę ochrony ludności i przeprowadzania ewakuacji może służyć Polsce jako gotowy wzorzec do adaptacji przy projektowaniu własnych planów dla polskich reaktorów jądrowych.

Doświadczenia te przekładają się bezpośrednio na polskie realia. Historyczne analizy dowodzą, że z planowanej lokalizacji Lubiatowo-Kopalino można rurociągiem długości około 40 km dostarczyć energię cieplną do regionu Trójmiasta; zaktualizowanie tych studiów skróciłoby fazę projektowania i pozwoliłoby wykorzystać pojedynczy blok AP1000 do zastąpienia większości węglowych źródeł ciepła w regionie. Co więcej, Ministerstwo Przemysłu przygotowuje mapę drogową SMR, co może się okazać pomocne w kwestii lokalizacji kogeneracyjnych SMR-ów w pobliżu dużych miast bez konieczności budowy odległych magistral.

Wspólny wniosek z analiz chińskich, fińskich i szwajcarskich jest zatem jednoznaczny: prawidłowo zaprojektowana kogeneracja jądrowa nie wymaga zmian podejścia w ustalaniu stref planowania awaryjnego, a w przypadku małych reaktorów można nawet ograniczyć strefę planowania awaryjnego do granic ogrodzenia zakładu, pod warunkiem że analiza bezpieczeństwa potwierdzi niskie dawki na jego terenie dla najczęściej rozpatrywanej awarii. Otwiera to drogę do lokalizowania kogeneracyjnych SMR-ów w pobliżu gęstej zabudowy miejskiej bez potrzeby budowy długich magistral przesyłowych. Przyjęcie tej logiki w Polsce pozwoli jednocześnie zrealizować cele Fit-for-55 w ciepłownictwie, ograniczyć emisję CO₂ oraz zbudować nowy segment przemysłu jądrowego.

Notka o autorze

Bartosz Skura – mgr inż. fizyki technicznej, absolwent Wydziału Fizyki PW. Doktorant na Wydziale Fizyki PW.
E-mail: bartosz.skura.dokt@pw.edu.pl

Literatura

- Kerekes L., Horváth G., Loskot-Strachota A., Oravcová, V., Sklenář O., Kotek P., & Takácsné Tóth B. (2023). *Decarbonisation of the Household Heating Sector in the Visegrad Countries* (V4ETTP Working Paper). REKK Foundation.
- Nuclear Safety Law of the People's Republic of China [Ustawa o bezpieczeństwie jądrowym Chińskiej Republiki Ludowej], Pub. L. No. 73 (01.09.2017).
- Regulations on Environmental Radiation Protection in Nuclear Power Plants [Regulacje ochrony radiologicznej środowiska elektrowni jądrowych] (GB 6249-2025). (24.01.2025). Ministerstwo Ekologii i Środowiska; Państwowa Administracja ds. Regulacji Rynku; Administracja Normalizacyjna Chin.
- Emergency planning and preparedness guidelines for nuclear power plants Part 1: Division of emergency planning areas [Kryteria planowania i gotowości awaryjnej elektrowni jądrowych – Część 1: Podział stref planowania awaryjnego] (GB/T 17680.1-2008). (02.07.2008). Państwowa Administracja Nadzoru Jakości, Inspekcji i Kwarantanny; Administracja Normalizacyjna Chin.
- China's Nuclear Emergency [Krajowy plan reagowania na awarie jądrowe]. (27.01.2016). Biuro Informacji Rady Państwa Chińskiej Republiki Ludowej.
- Nandutu M., Mahal J., Genco F., Tokuhiko A. & Zeliang C. (2024). Initial review of methods used to determine the size of the Emergency Planning Zone. *atw – International Journal for Nuclear Power*, 69(2), 44–59.
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2015). *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency* (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7).
- Basic standards for ionizing radiation protection and radiation source safety [Podstawowe normy ochrony przed promieniowaniem jonizującym i bezpieczeństwa źródeł promieniowania] (GB 18871-2002). (02.12.2002). Państwowa Administracja Nadzoru Jakości, Inspekcji i Kwarantanny; Administracja Normalizacyjna Chin.
- Cao Q., Qiu L. (2023). Research on Atmospheric Dispersion Factor Used in the Calculation of Emergency Planning Zone. *Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference, Volume 1*, 257–269.
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2018). *SMR Regulators' Forum Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors*.
- Haiyang NPP_National Nuclear Safety Administration. https://nnsa.mee.gov.cn/english/npps/list/201805/t20180517_440500.html [dostęp: 17.07.2025]
- Shandong Nuclear Power Co., Ltd. (17.10.2023). Shandong Haiyang Nuclear Power Project Units 5 and 6 Environmental Impact Report [Raport oddziaływania na środowisko dla bloków 5 i 6 elektrowni jądrowej Haiyang].
- Chen J., Zheng, W., Kong Y., Yang X., Liu Z., Xia, J. (2021). Case study on combined heat and water system for nuclear district heating in Jiaodong Peninsula. *Energy*, 218, 119546.
- Chinese long-distance nuclear heating project begins operation—*World Nuclear News*. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-long-distance-nuclear-heating-project-begi> [dostęp: 17.07.2025]
- China's first commercial nuclear district heating scheme expands—*World Nuclear News*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/chinas-first-commercial-nuclear-district-heating-scheme-expands> [dostęp: 17.07.2025]
- The heating capacity of a single unit has tripled! State Power Investment Corporation's „Nuanhe No. 1” project has started its sixth heating season. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzyx/202411/t20241125_1096605.html [dostęp: 17.07.2025]
- Electric Power Research Institute. (2022). *Current and Past Use of District Energy Using Nuclear Power: A Review of Nuclear District Energy Facilities* (Technical Brief — Nuclear Beyond Electricity, Report No. 3002023462).
- Lingkai Z., Zhong Z., Wang Q., Liang K., Gong Z., Guo J., Zheng W., Shang P. (2023). Analysis of Heating Transformation of Nuclear Power Units. *E3S Web of Conferences*, 416(01010).
- Sanmen Nuclear Power Company Ltd. (2022). Environmental Impact Report for Units 3 and 4 of the Sanmen Nuclear Power Project [Raport oddziaływania na środowisko dla bloków 3 i 4 elektrowni jądrowej Sanmen].
- Ydinenergialaki (990/1987) [Ustawa o energii jądrowej] (11.12.1987).
- Ydinenergia-asetus (161/1988) [Dekret w sprawie energii jądrowej] (12.02.1988).
- Säteilyturvakeskus [Urząd ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego]. (01.02.2024). *Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelyistä* (STUK Y/2/2024) [Rozporządzenie Urzędu ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego w sprawie usteleń awaryjnych dotyczących elektrowni jądrowej].
- Sokka L., Kirpp H., Leppänen J. (2024). Evaluation of Life Cycle CO₂ Emissions for the LDR-50 Nuclear District Heating Reactor. *Energies*, 17(13), 3250.
- Finnish energy firm Helen launches nuclear programme—*World Nuclear News*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/finnish-energy-firm-helen-launches-nuclear-programme> [dostęp: 17.07.2025]
- Steady Energy | Steady Energy to build small nuclear pilot plant inside a former coal plant in central Helsinki. <https://www.steadyenergy.com/news-article/steady-energy-to-build-small-nuclear-pilot-plant-inside-a-former> [dostęp: 17.07.2025]
- modular reactors pave the way | VTT News. <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/small-modular-reactors-pave-way-nuclear-district-heating-finnish> [dostęp: 17.07.2025]
- Helen rents out the decommissioned Salmisaari B coal-fired power plant for the construction of a SMR pilot plant | Helen. <https://www.helen.fi/en/news/2025/helen-vuokraa-kaytosta-poistuneen-salmisaari-b-kivihiilivoimalai> [dostęp: 17.07.2025]
- Bundesgesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie (Kernenergiegesetz, KEG), SR 732.1 [Ustawa o Energii Jądrowej] (21.03.2003).
- Verordnung über den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen (Notfallschutzverordnung [NFSV]), SR 732.33 [Rozporządzenie w Sprawie Ochrony w Sprawach Awaryjnych w Poblizu Instalacji Jądrowych] (14.11.2018).
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). (19.11.2020). *Minimales Geodatenmodell «Zonenpläne für die Notfallplanung» (GeoIV Identifikator 178): Umgebung Kernkraftwerke Beznau/Leibstadt, Gösgen, Mühleberg sowie spezielle Zone PSI/ZWILAG. (GeoIV 178 – V1.1).*
- Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. (02.10.2006). *Referenzszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke (HSK-AN 6073).*
- Beznau nuclear power plant, Döttingen, Switzerland. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/beznau-nuclear-power-plant/> [dostęp: 17.07.2025]
- Axpo Power AG. (2021). *Beznau nuclear power plant – reliable, environmentally compatible electricity production.*
- Pohl-Meuthen, U., Schäfer, S., Blatt, P., & Steyer, F. (2018). *Konzept zur grenzüberschreitenden großräumigen Evakuierungsplanung am Beispiel Deutschland – Schweiz.* Technische Hochschule Köln – Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr.
- Regierungspräsidium Freiburg – Referat 14 F, Feuerwehr und Katastrophenschutz. (2012). *Notfallschutz: Ein Ratgeber für die*

- Bevölkerung in der deutschen Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt.*
36. Bundesamt für Bevölkerungsschutz. (2016). *Nationales Planungs- und Massnahmenkonzept Grossräumige Evakuierung bei einem KKW-Unfall* (10014098018/01). Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport.
37. Czyżak P. (07.02.2024). *Zmiana kursu: Polska energetyka w 2023 r.* Ember.
38. Urząd Regulacji Energetyki. (27.01.2025). *Energetyka ciepła w liczbach – 2023*.ping 8.8.8.
39. Komisja Europejska. (14.07.2021). *“Fit for 55”: Delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality* (COM(2021) 550 final).
40. Program polskiej energetyki jądrowej (aktualizacja 2020) – uchwała nr 141 Rady Ministrów z 2 października 2020 r., M.P. 2020 poz. 946.
41. Minkiewicz T., Reński A. (2014). The Possibility to Use a Nuclear Power Plant as a Source of Electrical Energy and Heat. *Acta Energetica*, 20(3), 114–118.
42. *Do końca roku ma powstać mapa drogowa dla SMR-ów—MP | Biznes PAP.*
<https://biznes.pap.pl/wiadomosci/firmy/do-konca-roku-ma-powsta-c-mapa-drogowa-dla-smr-ow-mp> [dostęp: 17.07.2025]

Radiological monitoring of the soil in the proximity of National Radioactive Waste Repository in Różan in years 2014–2023

Radiologiczny monitoring gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie w latach 2014-2023

Michał Ochmański¹, Krzysztof Isajenko², Barbara Piotrowska²

¹ Warsaw University of Technology, Faculty of Physics, Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland

² Central Laboratory for Radiological Protection, Konwaliowa 7, 03-194 Warsaw, Poland

Summary: Although Poland does not operate any nuclear power plants, there are two facilities connected to the processing or storing of radioactive substances, which must be under radiological supervision and control. These facilities are the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) in Świerk and the National Radioactive Waste Repository (KSOP) in Różan. Both of these facilities are monitored by independent laboratories. The concentrations of radionuclides in soil, vegetation, aerosols from the ground layer of air, groundwater and springwater are all assessed in those studies. For a long time, such research was conducted by CLOR. This work compiles the results of such studies from the last 10 years.

Thanks to constant radiological monitoring of the proximity of the KSOP it is possible to determine, whether nuclear waste stockpiled there has an effect on the immediate environment.

This work focuses on the analysis of the radiological measurements of soil samples from years 2014–2023 by comparing the concentration of the natural radionuclides, such as ²²⁶Ra, ²²⁸Ac and ⁴⁰K to mean concentration in Poland and Mazowieckie Voivodeship in which KSOP is situated.

Additionally, the deposition of ¹³⁷Cs, which is an artificial radionuclide left in soil as an aftermath of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident, is also measured.

Keywords: Radioactivity of soil, caesium ¹³⁷Cs, radium ²²⁶Ra, potassium ⁴⁰K.

Streszczenie: W Polsce pomimo braku elektrowni jądrowych istnieją dwa miejsca związane z przetwarzaniem lub przechowywaniem substancji promieniotwórczych, które podlegają nadzorowi oraz kontroli radiologicznej w otoczeniu tu wymienionych ośrodków, tj.: Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku oraz Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie. Obydwa te ośrodki są monitorowane przez niezależne laboratoria. Badane są m.in. gleba, roślinność, aerozole z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego oraz wody źródłane i gruntowe. Przez długi okres takie badania prowadziło Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). W pracy zamieszczono wyniki badań gleby z ostatnich 10 lat.

Dzięki stałemu monitoringowi radiologicznemu otoczenia KSOP można określić, czy składowane tam odpady wpływają na skażenie promieniotwórcze otoczenia.

Praca skupiła się na analizie badań gleby z lat 2014–2023 poprzez porównanie stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych, takich jak: rad ²²⁶Ra, aktyn ²²⁸Ac oraz potas ⁴⁰K, do średnich stężeń w Polsce oraz w woj. mazowieckim, w którym KSOP jest umiejscowiony.

Dodatkowo, zbadana została depozycja cezu ¹³⁷Cs, który jest sztucznym izotopem promieniotwórczym pozostałym jeszcze z czasów awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu.

Słowa kluczowe: Promieniotwórczość gleby, cez ¹³⁷Cs, rad ²²⁶Ra, potas ⁴⁰K.

Introduction

The National Radioactive Waste Repository (KSOP) in Rózan is the only facility in Poland designed for the disposal of short-lived low- and intermediate-level radioactive waste, as well as for the interim storage of long-lived waste. In addition, short-lived low-level or intermediate-level disused sealed radioactive sources are also disposed at KSOP.

The primary barrier preventing the release of waste into the environment, e.g. into groundwater and soil, is a system of concrete layers separating the waste from its surroundings. Short-lived waste is placed in metal drums, which are subsequently arranged in designated storage places and backfilled with concrete. Additional protection against precipitation is provided to prevent water from penetrating the concrete, which could otherwise cause corrosion of the structures and lead to the migration of radionuclides into the soil.

According to the applicable Polish and European legal regulations on radioactive waste storage, nuclear facilities such as the National Radioactive Waste Repository must be subject to radiation monitoring. This monitoring covers both the repository site itself and its immediate vicinity.

On request of the Polish National Atomic Energy Agency, the Central Laboratory for Radiological Protection (CLOR) carries out comprehensive measurements aimed at assessing the radiation situation around KSOP. These measurements include samples of soil, grass, aerosols from the near-ground atmospheric layer, as well as spring and groundwater. This paper presents the results of soil measurements conducted in the surroundings of KSOP in the years 2014–2023.

Soil analysis

As part of the radiological assessment of the environment around KSOP, soil samples were collected. Sampling locations were selected in such a way as to allow assessment of the repository's impact on the environment from all sides (Fig. 1) Sampling took place twice a year, resulting in a total of ten soil samples annually. In the samples,



Fig. 1. Soil sampling points in the vicinity of the KSOP in Rózan (source: <http://www.google.pl/maps>).

radioactive gamma isotopes of natural origin were recorded, i.e. from two natural radioactive decay series and potassium ^{40}K , as well as artificial radioactive gamma isotopes. Among the artificial radionuclides, caesium ^{137}Cs was mainly detected, and in one year the presence of americium ^{241}Am and cerium ^{141}Ce was also observed.

Sampling procedure

Soil samples were collected in accordance with Fig. 1 from the topsoil layer (10 cm) using metal samplers. One of the seven subsamples (from one sampler) was located at the centre of a circle with a radius of 1 m, while the remaining six subsamples were taken along the circumference of that circle. The collected subsamples were then mixed in a bag and properly labelled. This sampling method is recommended by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in Vienna [1].

Sample preparation

Before the measurements were carried out, the collected samples had to be properly prepared. In the first step, the samples were crushed and cleaned of impurities. The prepared soil was then dried in an oven at 105°C for 16 hours, after which it was cooled to room temperature. After determining the total mass of the sample and further crushing, they were sieved through a 2 mm sieve and poured into 0.5 dm^3 Marinelli beakers.

Measurement procedure

The measurements were performed using gamma ray spectrometry with a HPGe semiconductor detector of approximately 40% relative efficiency, operated with GENIE-2000 software. The counting time for each sample was 80,000 seconds, at which the minimum detectable activity in soil samples was 0.05 Bq/kg for caesium ^{137}Cs and 1 Bq/kg for potassium ^{40}K , radium ^{226}Ra and actinium ^{228}Ac .

Measurement results

The gamma radiation spectrum of each sample was analysed using the GENIE-2000 software, taking into account both the efficiency calibration and the previously measured background.

Tables 1–3 present the activity concentrations of natural radionuclides ^{226}Ra , ^{228}Ac and ^{40}K together with associated uncertainties, as well as the mean values of these concentrations for the five sampling points in the years 2014–2023, expressed in Bq/kg .

Table 1. Activity concentration of ^{226}Ra in soil samples measured in 2014–2023 expressed in Bq/kg.

Radium ^{226}Ra	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Collection date
2014	18.1±0.7 20.4±0.7	14.9±0.6 18.3±0.7	10.6±0.4 11.9±0.5	13±0.4 14.6±0.6	15.9±0.6 16.1±0.6	21-05-2014 09-09-2014
2015	21.9±0.8 33.4±1.3	31.0±0.9 30.6±1.2	28.5±0.8 22.9±1.0	17.0±0.7 27.6±0.9	38.6±1.0 30.2±0.9	26-05-2015 09-09-2015
2016	18.7±0.5 21.9±0.8	16.4±0.5 18.1±0.7	11.5±0.5 16.7±0.6	15.4±0.5 16.3±0.7	21.0±0.5 18.2±0.7	12-05-2016 06-09-2016
2017	23.3±1.9 22.4±1.9	22.7±0.8 21.9±1.0	21.3±1.0 11.1±0.7	18.8±1.5 20.0±1.0	28.3±1.2 22.6±1.0	30-05-2017 27-09-2017
2018	24.4±1.0 21.4±1.0	19.6±0.9 19.7±0.9	11.9±0.6 13.9±0.7	21.0±0.9 17.1±0.8	18.4±1.5 12.1±0.6	26-06-2018 18-10-2018
2019	22.6±1.8 27.3±1.2	22.7±1.8 22.5±1.0	13.6±0.7 20.1±0.9	19.0±1.6 20.9±0.9	15.4±0.8 14.2±0.8	04-06-2019 17-09-2019
2020	43.0±3.5 23.1±1.9	40.8±3.3 21.9±1.8	20.1±1.7 17.0±1.4	15.8±1.3 18.5±1.5	20.8±1.7 14.6±1.2	05-05-2020 09-09-2020
2021	21.4±1.1 20.8±1.0	18.6±1.0 19.9±1.0	10.8±0.6 10.8±0.6	18.2±1.0 17.8±0.9	14.0±0.8 14.8±0.8	13-08-2021 11-09-2021
2022	22.1±0.9 22.8±1.0	18.4±0.8 18.1±0.8	9.0±0.4 9.1±0.5	18.0±0.7 15.3±0.7	13.0±0.6 13.5±0.6	24-06-2022 14-09-2022
2023	36.1±1.8 20.5±1.0	32.4±1.6 18.8±0.9	30.3±1.6 17.2±0.8	18.6±0.8 16.0±0.8	24.1±1.3 13.3±0.7	04-08-2023 13-09-2023
Mean concentration	24.3±1.3	22.4±1.1	15.9±0.8	18.0±0.9	19.0±0.9	–

Table 2. Activity concentration of ^{228}Ac in soil samples measured in 2014–2023 expressed in Bq/kg.

Actinium ^{228}Ac	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Collection date
2014	23.5±0.6 23.7±0.6	18.0±0.5 20.2±0.5	10.5±0.3 14.1±0.4	16.5±0.4 16.1±0.5	15.4±0.4 16.6±0.5	21-05-2014 09-09-2014
2015	25.5±0.6 22.1±0.8	20.7±0.6 20.3±0.7	18.7±0.6 14.3±0.5	19.2±0.5 18±0.6	20.7±0.6 18.5±0.6	26-05-2015 09-09-2015
2016	23.2±0.5 24.5±0.6	20.1±0.4 21.3±0.5	13.4±0.4 18.6±0.5	18.1±0.4 19.2±0.6	21.9±0.5 18.4±0.5	12-05-2016 06-09-2016
2017	24.3±0.6 23.9±0.7	21.7±0.6 21.0±0.6	16.8±0.5 10.7±0.3	17.4±0.5 19.4±0.5	21.8±0.6 20.3±0.6	30-05-2017 27-09-2017
2018	23.9±0.6 24.1±0.6	20.5±0.6 19.0±0.5	11.1±0.3 13.1±0.4	18.6±0.5 15.9±0.4	18.3±0.5 11.9±0.4	26-06-2018 18-10-2018
2019	23.6±0.6 25.3±0.7	21.0±0.6 21.3±0.6	12.9±0.4 19.5±0.5	17.3±0.5 17.9±0.5	14.0±0.4 13.9±0.4	04-06-2019 17-09-2019
2020	23.6±0.9 23.9±0.6	20.1±0.7 20.9±0.6	11.8±0.5 16.0±0.4	13.3±0.4 16.4±0.5	18.6±0.5 13.7±0.4	05-05-2020 09-09-2020
2021	24.4±0.6 25.1±0.6	21.1±0.8 21.5±0.5	11.7±0.3 11.2±0.3	18.4±0.6 17.1±0.4	13.7±0.4 13.4±0.4	13-08-2021 11-09-2021
2022	23.8±0.6 24.7±0.8	20.3±0.5 18.6±0.6	8.4±0.2 9.4±0.3	17.3±0.4 13.6±0.4	12.3±0.3 11.9±0.4	24-06-2022 14-09-2022
2023	23.1±0.8 24.0±0.6	20.0±0.7 19.5±0.5	17.9±0.6 17.0±0.4	18.1±0.5 16.2±0.4	12.5±0.4 13.1±0.3	04-08-2023 13-09-2023
Mean concentration	24.0±0.7	20.4±0.6	13.9±0.4	17.2±0.5	16.0±0.5	-

Table 3. Activity concentration of ^{40}K in soil samples measured in 2014-2023 expressed in Bq/kg.

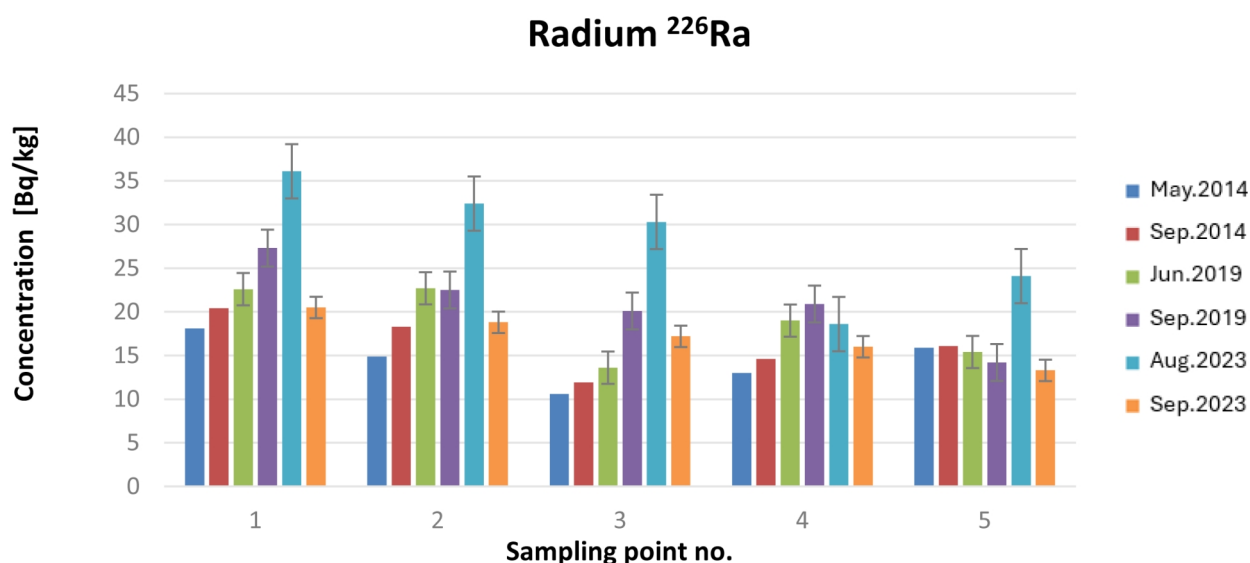
Potassium ^{40}K	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Collection date
2014	588±13 618±14	506±13 562±13	383±9 426±10	453±12 475±11	388±9 424±10	21-05-2014 09-09-2014
2015	598±13 533±12	535±7 495±11	488±6 402±9	491±11 434±7	394±5 387±5	26-05-2015 09-09-2015
2016	547±7 569±13	504±7 534±12	381±9 421±11	462±6 483±13	400±5 406±9	12-05-2016 06-09-2016
2017	596±34 569±34	538±20 528±20	411±16 343±13	461±26 477±18	401±15 442±17	30-05-2017 27-09-2017
2018	578±21 567±21	491±19 460±17	336±13 387±15	468±18 404±15	444±26 358±14	26-06-2018 18-10-2018
2019	573±33 596±23	538±31 533±20	371±14 411±16	456±26 453±17	390±15 398±15	04-06-2019 17-09-2019
2020	587±33 572±33	543±31 546±31	363±21 410±23	398±23 430±25	478±27 388±22	05-05-2020 09-09-2020
2021	517±13 572±13	526±15 535±12	362±8 329±7	469±13 430±10	392±11 386±9	13-08-2021 11-09-2021
2022	541±11 566±16	497±10 481±12	280±6 301±7	417±9 360±9	338±7 345±8	24-06-2022 14-09-2022
2023	551±12 557±12	497±11 509±11	473±10 433±9	458±9 421±9	370±8 380±8	04-08-2023 13-09-2023
Mean concentration	570±19	518±16	386±12	445±14	395±12	-

Fig. 2–5 show the graphs of ^{226}Ra , ^{228}Ac , ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations depending on the sampling point. Data for the graphs were taken from three randomly selected years.

In Fig. 2–4, the activity concentrations of natural isotopes do not show significant variations between the individual sampling points (particularly ^{228}Ac and ^{40}K). Slight fluctuations can be observed in the activity concentrations of ^{226}Ra ; however, when considering a 10-year dataset, mean activity concentrations can be

determined by averaging the results from the five sampling points. For ^{137}Cs , the situation is somewhat different. Its activity concentrations may vary significantly depending on the sampling location; therefore, in this case, successive data series correspond to different measurement points.

Since caesium is present in the environment as a result of human activities, this study presents the deposition of caesium in the 10 cm soil layer for the analysed sampling points D-1 to D-5.


Fig. 2. Activity concentration of radium ^{226}Ra in individual soil sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023.

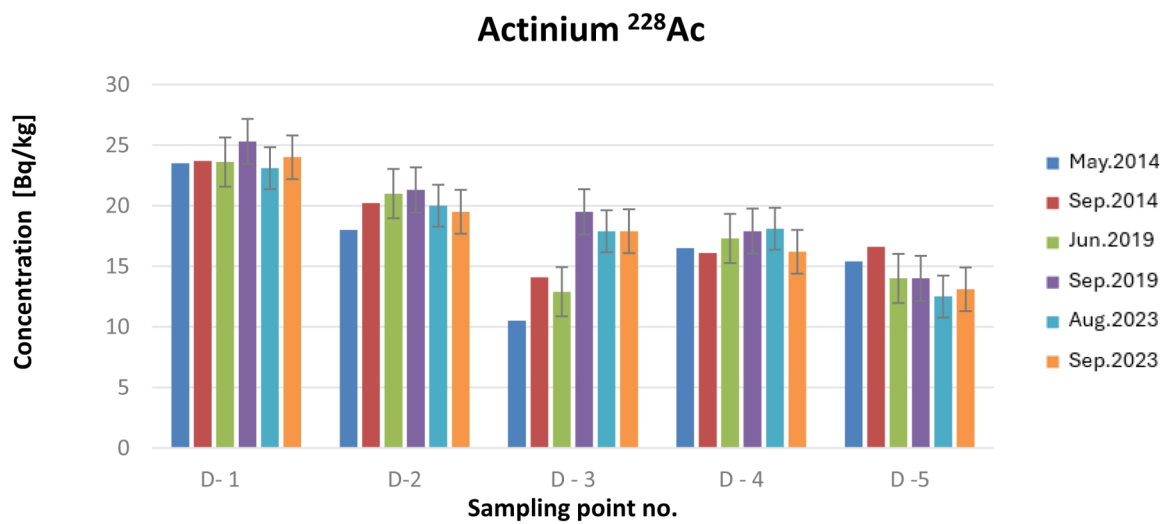


Fig. 3. Activity concentration of actinium ^{228}Ac in individual soil sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023.

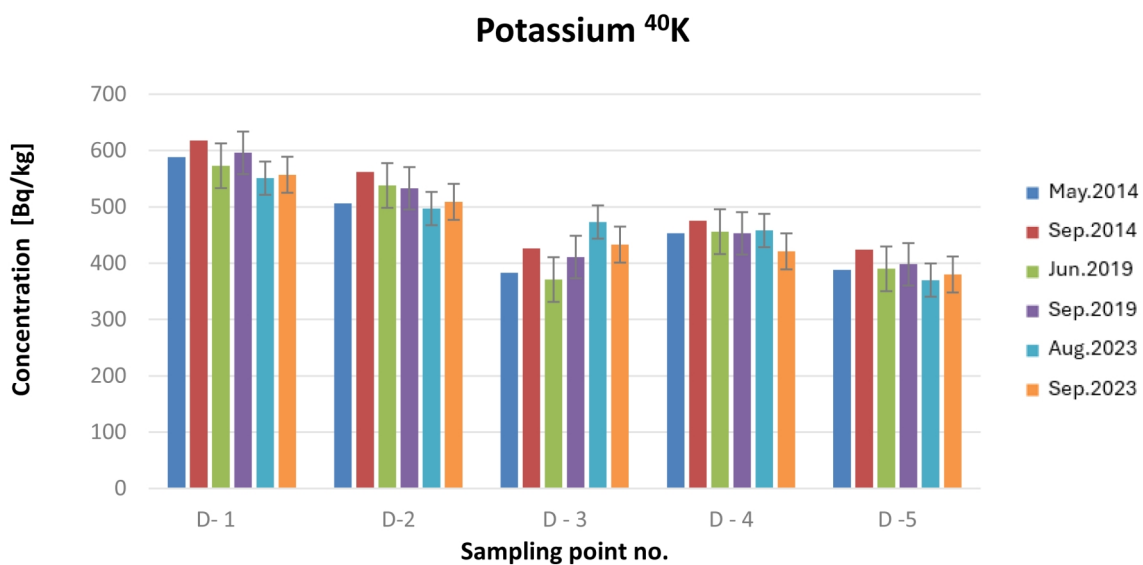


Fig. 4. Activity concentration of potassium ^{40}K in individual soil sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023.

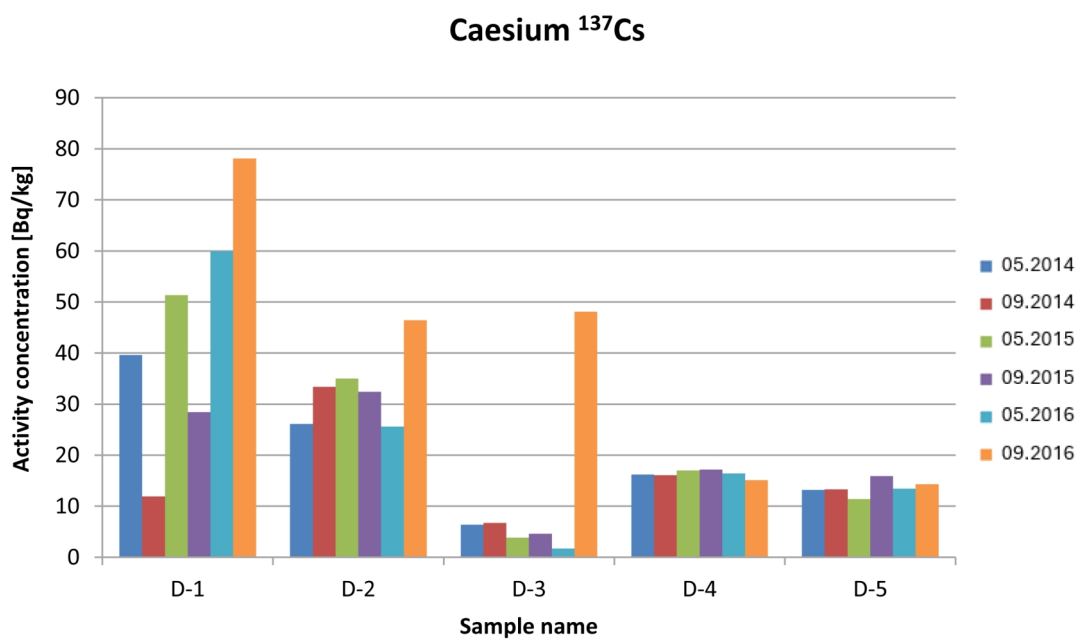


Fig. 5. Activity concentration of caesium ^{137}Cs in individual soil sampling points in the years 2014–2016.

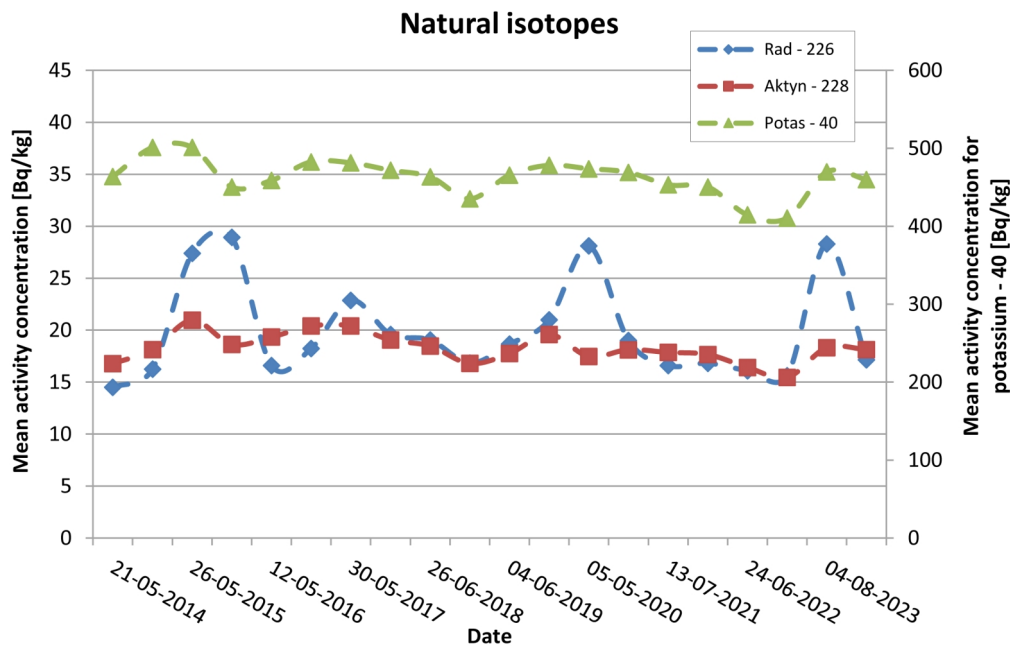


Fig. 6. Mean activity concentration of potassium ^{40}K , radium ^{226}Ra and actinium ^{228}Ac in soil samples in the years 2014–2023.

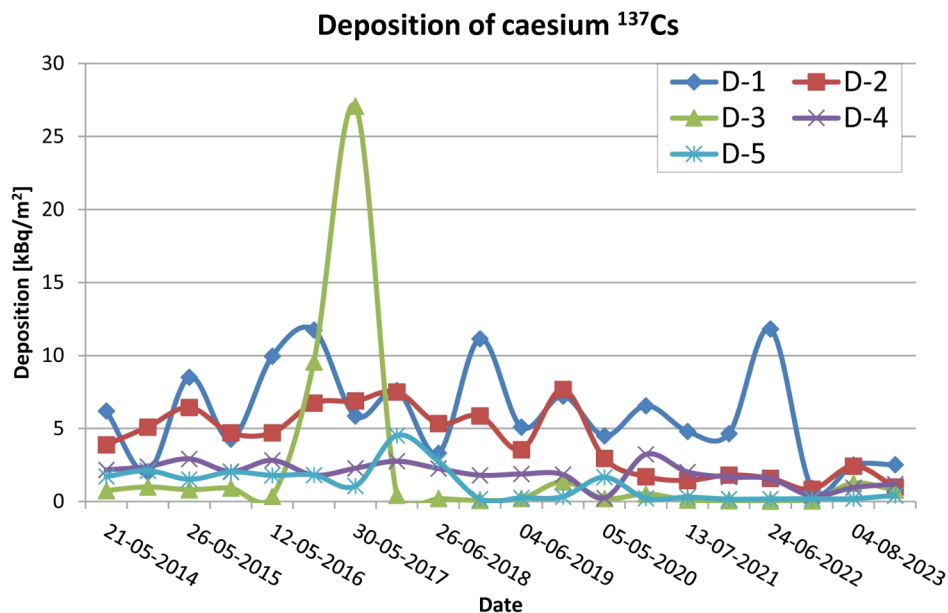


Fig. 7. Deposition of caesium ^{137}Cs in the years 2014–2023 in subsequent sampling points.

The activity concentration of ^{137}Cs was converted to deposition, expressed in kBq/m^2 , using the following formula:

$$Dep \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2} = \frac{S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}}{1000} \cdot \frac{M[\text{kg}]}{7 \frac{\text{P}[\text{m}^2]}} \cdot \frac{S}{1750} \cdot \frac{M}{D^2} \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2}$$

where: $S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ is the activity concentration of caesium

^{137}Cs ,

$M[\text{kg}]$ is the total mass of the sample collected, and

$P = \frac{D^2}{4}$ is surface area from which soil is collected

using a sampler of diameter D .

In 2022, two additional artificial radioactive isotopes were detected, namely americium ^{241}Am and cerium ^{141}Ce .

Americium was detected only in the sample collected from point D-1. Its activity concentration was $0.88 \pm 0.22 \text{ Bq/kg}$ in the sample taken on 24 June 2022, whereas in the sample collected on 14 September 2022 its activity concentration was below the detection limit of 0.58 Bq/kg .

The artificial isotope cerium ^{141}Ce was detected in samples from points D-2, D-3 and D-4. Its activity concentrations are presented in Table 5.

Table 4. Deposition of caesium ^{137}Cs in soil samples from subsequent sampling points, expressed in kBq/m^2 .

Caesium ^{137}Cs	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Collection date
2014	6.20±0.11 2.02±0.03	3.89±0.10 5.10±0.09	0.76±0.01 1.00±0.02	2.17±0.05 2.40±0.04	1.71±0.03 2.11±0.05	21-05-2014 09-09-2014
2015	8.53±0.15 4.27±0.08	6.45±0.04 4.70±0.09	0.81±0.01 0.91±0.02	2.92±0.05 2.06±0.01	1.52±0.01 2.02±0.01	26-05-2015 09-09-2015
2016	9.95±0.05 11.76±0.20	4.71±0.04 6.74±0.12	0.36±0.01 9.56±0.20	2.82±0.02 1.81±0.05	1.79±0.01 1.82±0.04	12-05-2016 06-09-2016
2017	5.86±0.13 7.60±0.20	6.89±0.14 7.52±0.15	27.07±0.47 0.43±0.02	2.28±0.06 2.76±0.07	1.06±0.02 4.52±0.08	30-05-2017 27-09-2017
2018	3.31±0.07 11.15±0.22	5.34±0.11 5.87±0.11	0.21±0.01 0.09±0.01	2.26±0.05 1.80±0.03	2.76±0.07 0.18±0.07	26-06-2018 18-10-2018
2019	5.10±0.12 7.23±0.14	3.55±0.08 7.69±0.15	0.21±0.01 1.36±0.03	1.89±0.05 1.85±0.04	0.25±0.01 0.33±0.01	04-06-2019 17-09-2019
2020	4.50±0.10 6.56±0.15	2.95±0.07 1.71±0.04	0.21±0.01 0.52±0.01	0.25±0.01 3.23±0.07	1.66±0.04 0.22±0.01	05-05-2020 09-09-2020
2021	4.81±0.10 4.66±0.08	1.44±0.04 1.82±0.04	0.11±0.01 0.05±0.01	2.03±0.05 1.68±0.04	0.30±0.01 0.17±0.01	13-08-2021 11-09-2021
2022	11.82±0.17 0.90±0.02	1.59±0.03 0.84±0.02	0.03±0.01 0.04±0.01	1.56±0.02 0.40±0.02	0.18±0.01 0.19±0.01	24-06-2022 14-09-2022
2023	2.50±0.05 2.52±0.05	2.44±0.04 0.99±0.02	1.25±0.02 0.79±0.02	0.95±0.02 1.19±0.02	0.20±0.01 0.42±0.01	04-08-2023 13-09-2023

Table 5. Activity concentration of cerium ^{141}Ce in soil samples measured in 2022 expressed in Bq/kg .

Cerium ^{141}Ce	D-2	D-3	D-4
24-06-2022	0.32±0.06	0.15±0.04	0.38±0.06
14-09-2022	0.79±0.13	0.20	0.25

Results analysis

The activity concentration of potassium ^{40}K in 2014–2023 ranged from 280 Bq/kg recorded in 2022 for point D-3 to 618 Bq/kg obtained in 2014 in point D-1. The activity concentration of radium ^{226}Ra ranged from 9 Bq/kg recorded in 2022 at point D-3 to 43 Bq/kg in 2020 at point D-1, while in the case of actinium ^{228}Ac the activity concentration ranged from approx. 8.4 Bq/kg in 2022 in point D-3 to 25.5 Bq/kg in 2015 in point D-1.

The level of activity concentration of natural isotopes remains fairly constant, however, some peaks can be seen on the graph of radium ^{226}Ra . However, these variations fall within the typical range for this radium isotope, and therefore no particular attention was devoted to them.

The levels of activity concentrations of natural isotopes do not differ significantly from the mean values for Poland. The mean concentration of radium ^{226}Ra in Poland is: 31 ± 1.6 Bq/kg in the range from 6.4 to 154.7 Bq/kg , while in the Mazowieckie Voivodeship, where the KSOP is located, it is 15.9 Bq/kg . In the case of actinium ^{228}Ac , in Poland the mean concentration is

30.5 Bq/kg in the range from 6 to 129.2 Bq/kg , and in the Mazowieckie Voivodeship the mean concentration is 15.9 Bq/kg . The mean activity concentrations for the Mazowieckie Voivodeship are exceeded in certain places, but due to the fact that the concentration levels oscillate around certain mean values, the same point where the measurements were carried out exceeds this mean level once, and in the following year it is below the mean value. Such variations are typical for soil, as radioactive isotopes migrate with soil material and their levels fluctuate over time.

In the case of potassium ^{40}K , the mean activity concentration in Poland is 497 ± 15 Bq/kg in the range from 138 to 1046 Bq/kg , where in the Mazowieckie Voivodeship the mean concentration is 382 Bq/kg . It is the only isotope that exceeds the mean concentration in the Mazowieckie Voivodeship for each measurement point; however, it exceeds it by values that can be attributed to a different soil structure.

The mean activity concentration of natural isotopes in the Mazowieckie Voivodeship is lower than the mean concentration for the whole of Poland, which can also be

seen in the measured mean concentrations of radium and actinium, which were lower than the mean concentrations in Poland. The exception here is potassium, the concentration of which is close to national concentrations and exceeded the mean concentrations in the Mazowieckie Voivodeship.

In the case of caesium ^{137}Cs deposition, significant fluctuations in time and a large dependence of the deposition value on the examined point are visible. This suggests that in some points, i.e. those where this level is quite constant, the caesium content in the soil is the result of older events, e.g. the accident at the Chernobyl nuclear power plant, while the points where the deposition is greater (point D-1) and variable over time (point D-3) may suggest that „excess“ caesium comes from a repository.

The mean value of caesium ^{137}Cs deposition in Poland is $1.96 \pm 0.19 \text{ kBq/m}^2$ in the range from 0.20 to 16.63 kBq/m^2 , while in the Mazowieckie Voivodeship the mean deposition is $1.58 \pm 0.39 \text{ kBq/m}^2$ in the range from 0.25 to 7.09 kBq/m^2 , so the mean value is lower for the Mazowieckie Voivodeship than that from the whole country. Considering that this isotope of caesium does not occur naturally, we can expect higher values of deposition in concentrated areas, which may be caused, for example, by local rainfall from clouds contaminated after the Chernobyl nuclear power plant accident or contamination resulting, for example, from a damaged caesium source. The values of deposition in the KSOP environment are generally greater than the mean values for both Poland and the Mazowieckie Voivodeship, however, these are still values that do not have a significant negative impact on people and the environment.

Summary

Radiological monitoring of the soil in the proximity of the National Radioactive Waste Repository in Rózan showed the presence of natural isotopes in all five samples, i.e. potassium ^{40}K , radium ^{226}Ra and actinium ^{228}Ac and one isotope of artificial origin – caesium ^{137}Cs . The activity concentrations of natural isotopes remain constant and are related to the geological structure of the area. However, the presence of caesium ^{137}Cs deposition caused by human activity remains low. The calculated deposition of ^{137}Cs in

the analysed soil samples is comparable to the deposition of this isotope obtained for the soil of the Mazowieckie Voivodeship (with the exception of point D-1), which proves the possibility of its origin at the time of the Chernobyl nuclear power plant accident [2].

Taking into account the above tests, the presence of the Radioactive Waste Repository in Rózan does not adversely affect the surroundings of the said location in terms of radioactive gamma.

About authors

Krzysztof Isajenko – Head of the Dosimetry Department of the Central Laboratory for Radiological Protection (CLOR) in Warsaw, Deputy Director of CLOR in the years 2006–2019, Head of the accredited Laboratory for Natural Radioactivity Measurements, Graduate of the Faculty of Technical Physics and Applied Mathematics of the Warsaw University of Technology, long-time member of the Sea Research Commission of the Polish Academy of Sciences, lecturer at the Faculty of Physics of the Warsaw University of Technology, participant of numerous training courses on radiological protection and nuclear safety (both domestic and foreign), author or co-author of numerous publications related to this subject.

Michał Ochmański – 3rd year student (first cycle) of the Warsaw University of Technology, Faculty of PHYSICS, majoring in Technical Physics, specializing in Computer Physics.

Barbara Piotrowska – a graduate of the Faculty of Physics at the University of Warsaw (specializing in nuclear physics). She worked at the Military Institute of Chemistry and Radiometry from 1996 to 2009. Since 2009, she has been an employee of the Central Laboratory for Radiological Protection, deputy head of the Dosimetry Department, and technical manager at the accredited Laboratory for Measurements of Natural Radioactivity (CLOR). She has been involved in gamma spectrometry for many years. She conducts research and training in the measurement of natural radioactivity in raw materials and construction materials, and conducts radiological expertise.

References

1. Measurement of Radionuclides In Food and the Environment, A Guidebook IAEA, Technical Reports Series No. 295, 1989.
2. Monitoring of ionizing radiation within the framework of the national environmental monitoring programme in the years 2022–2024, Task 3: Monitoring of caesium-137 concentration in soil [Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach państwowego monitoringu środowiska w latach 2022–2024, Zadanie 3: Monitoring stężenia ceszu-137 w glebie] – K. Isajenko, O. Stawarz, B. Piotrowska, K. Wojtkowski, report for the Chief Inspectorate of Environmental Protection (GIOŚ), February–March 2024.
3. <https://www.gov.pl/web/polski-atom/krajowe-skladowisko-odpadow-promieniotworczych> accessed on 12.08.2024.

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” wydawany jest od 1989 r. Do 2013 r. był drukowany i kolportowany (ostatnio w nakładzie 700 egzemplarzy) wśród osób i instytucji zainteresowanych zagadnieniami dozoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. Od 2014 r. biuletyn wydawany jest w nowej, elektronicznej formie. Każdy numer biuletynu zamieszczany jest na stronie internetowej.

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

Informacja dla autorów

Wydawca przyjmuje artykuły naukowe, których tematyka jest związana z zapewnieniem i kontrolą bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, w tym również związane z zabezpieczeniem i ochroną fizyczną materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, technologiami jądrowymi i technikami radiacyjnymi, fizyką i chemią oraz inżynierią jądrową, naukami prawnymi, geologią i geofizyką czy bezpieczeństwem narodowym.

Każdy artykuł zamieszczony w biuletynie jest recenzowany przez dwóch recenzentów.

Zasady ogólne

Tekst artykułu powinien prezentować aktualny stan wiedzy na poruszany temat oraz najnowsze dane. Artykuł powinien być podzielony na mniejsze logiczne fragmenty redakcyjne, opatrzone śródtytułami. Artykuł nie może być wcześniej publikowany ani zgłoszony do publikacji w innym czasopiśmie. Wydawca zastrzega sobie prawo nieprzyjęcia artykułu do publikacji, dokonywania skrótów, wprowadzania poprawek stylistycznych i redakcyjnych oraz zmian w tytule artykułu. Autorzy są zobowiązani do współpracy z Wydawcą w całym procesie przygotowywania artykułu do publikacji, w tym do terminowej korekty autorskiej.

Zgłoszenie dzieła

Egzemplarze artykułu wraz z pełnym zestawem ilustracji mogą być przesyłane na adres:

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”

Państwowa Agencja Atomistyki

ul. Nowy Świat 6/12,

00-400 Warszawa, Polska

E-mail: biuletyn@paa.gov.pl

Zachęcamy do przysyłania artykułów drogą elektroniczną na wyżej wskazany adres e-mail. Szczegółowe informacje można uzyskać na stronie internetowej:

<https://www.gov.pl/web/paa/biuletyn-bezpieczenstwo-jadrowe-i-ochrona-radiologiczna>



Państwowa Agencja Atomistyki
ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa
www.gov.pl/web/paa



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

RADON W BUDYNKACH

*Materiał informacyjno-edukacyjny przygotowany
został przez Państwową Agencję Atomistyki*

Warszawa 2025

www.gov.pl/web/paa

Opracowanie:

Łukasz Koszuk

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

© Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 2025

Spis treści

Rozdział 1 Wprowadzenie do problematyki radonu	6
1.1 Zadania i działalność Państwowej Agencji Atomistyki w zakresie radonu.....	7
1.2 Naturalne źródła promieniowania jonizującego	7
1.3 Czym jest radon i dlaczego nim się zajmujemy?.....	11
1.4 Naturalne źródła radonu	13
1.5 Jak radon przenika do wnętrza budynków i co wpływa na jego koncentrację?	17
Rozdział 2 Metody detekcji i monitorowania radonu	19
2.1 Metody pomiaru radonu	19
2.1.1 Metody pasywne	19
2.1.2 Metody aktywne.....	20
2.1.3 Specjalistyczne pomiary	20
2.1.4 Kryteria wyboru metody pomiarowej	20
2.2 Zasada działania detektorów pasywnych i aktywnych.....	21
2.2.1 Detektory pasywne.....	21
2.2.2 Detektory aktywne	24
2.3 Inne techniki pomiarowe	25
2.3.1 Metody pomiaru stężenia radonu w powietrzu glebowym	25
2.3.2 Metody pomiaru stężenia aktywności radonu w wodzie	26
2.4 Techniki monitorowania poziomu radonu w nowych budynkach	26
2.4.1 Projektowanie prewencyjne i monitorowanie na etapie budowy.....	26
2.4.2 Pierwsze pomiary w nowych budynkach.....	26
2.4.3 Długoterminowe monitorowanie poziomu radonu	27
2.4.4 Specjalistyczne techniki monitorowania.....	27
2.5. Częstotliwość i metody prowadzenia pomiarów	27
2.5.1 Obowiązki wynikające z ustawy – Prawa atomowego	27
2.5.2 Zalecana częstotliwość pomiarów	28
2.5.3 Metody prowadzenia pomiarów	28
2.6 Jak odczytywać i interpretować wyniki pomiarów?.....	29
2.6.1 Jednostki i zakres wyników pomiarów	29
2.6.2. Czynniki wpływające na odczyt i interpretację wyników	29
2.6.3 Dawka skuteczna od radonu	29
2.6.4 Interpretacja wyników pomiarów w kontekście zdrowotnym oraz procedura postępowania.....	30
2.6.5 Znaczenie dokumentacji wyników.....	30

2.7 Identyfikacja potencjalnych zagrożeń	31
2.8 Znaczenie akredytacji	31
Rozdział 3 Metody minimalizacji ryzyka związanego z radonem.....	33
3.1 Nowe budynki.....	34
3.1.1 Projektowanie budynków w strefach o wysokim poziomie radonu	34
3.1.2 Inżynierskie rozwiązania przeciwradonowe w nowym budownictwie.....	35
3.1.4 Monitorowanie poziomu radonu w nowych budynkach.....	39
3.2 Zmniejszanie radonu w budynkach z podwyższonym poziomem radonu	40
3.2.1 Identyfikacja źródeł radonu i ocena problemu.....	40
3.2.2 Uszczelnianie budynków	42
3.2.3 Wentylacja w istniejących budynkach	43
3.2.4 Systemy aktywnego odprowadzania radonu.....	44
3.2.4 Inne techniki redukcji radonu	46
3.2.5 Monitorowanie długoterminowe po wdrożeniu działań	46
Rozdział 4 Akty prawne dotyczące radonu – krajowe i międzynarodowe regulacje.....	48
4.1 Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom	48
4.2 Zalecenia Światowej Organizacji Zdrowia dotyczące radonu.....	49
4.2.1 WHO Handbook on Indoor Radon	50
4.2.2 Global Health Observatory (GHO).....	50
4.3. Zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej dotyczące ochrony przed promieniowaniem w kontekście radonu	51
4.4 Przepisy krajowe – ustawa – Prawo atomowe.....	53
4.4.1 Artykuły ustawy – Prawo atomowe dotyczące radonu	53
4.5 Krajowe przepisy wdrażające międzynarodowe regulacje dotyczące radonu.....	54
4.5.1 Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy.....	54
4.5.2 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi	55
4.5.3 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139).....	55
4.6 Ogólne zobowiązania państwowe wynikające z omówionych regulacji.....	55
Rozdział 5 Szczegółowe regulacje prawne dotyczące radonu – obowiązki i konsekwencje... 57	
5.1 Poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu (art. 23b P.a.).....	57

5.1.1 Poziom odniesienia	58
5.1.2 Pomiary średniorocznego stężenia radonu w powietrzu.....	58
5.1.3 Miejsce pracy	59
5.1.4 Pomieszczenia.....	59
5.1.5 Pomieszczenia przeznaczone na pobyt ludzi	59
5.2 Obowiązki kierowników jednostek o charakterze powszechnym	60
5.2.1 Obowiązek pomiaru stężenia radonu	60
5.2.2 Obowiązki optymalizacyjno-informacyjne kierowników jednostek	62
5.2.3 Powszechność obowiązków z art. 23c ust. 1 i 2 P.a.....	63
5.3 Następstwa przekroczenia poziomu odniesienia	63
5.3.1 Kwalifikacja pracowników jako pracowników kategorii B.....	63
5.3.2 Kwalifikacja pracowników jako pracowników kategorii A.....	65
5.3.3 Powiadomienie w zakresie ochrony radiologicznej.....	66
5.4 Radon a jednostki systemu oświaty	67

Rozdział 1 Wprowadzenie do problematyki radonu

Radon to naturalny, radioaktywny gaz szlachetny, który w szczególnych warunkach może stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka. Choć otacza nas wiele źródeł promieniowania jonizującego – od przestrzeni kosmicznej, przez glebę, po nasze własne ciała – większość z nich nie wpływa negatywnie na nasze życie. Radon jest jednak wyjątkiem. Powstaje w wyniku naturalnych procesów zachodzących w skorupie ziemskiej i może przedostawać się do wnętrza budynków, gromadząc się w powietrzu, którym oddychamy.

Najważniejsze informacje o radonie:

- ☐ Radon to naturalny, radioaktywny gaz szlachetny, powstający w wyniku rozpadu uranu i toru w skorupie ziemskiej. Jest bezbarwny, bezwonny i bez smaku, co czyni go trudnym do wykrycia bez specjalistycznych narzędzi.
- ☐ Najważniejszym izotopem jest radon-222, którego okres połowicznego rozpadu wynosi 3,824 dnia. Powstaje w łańcuchu rozpadu uranu-238.
- ☐ Radon emituje promieniowanie alfa, które charakteryzuje się dużą zdolnością jonizacji, ale krótkim zasięgiem. Produkty rozpadu radonu, takie jak polon, bizmut i ołów, również są promieniotwórcze.
- ☐ Radon uwalnia się z podłoża (gleba, skały, woda gruntowa) oraz materiałów budowlanych zawierających śladowe ilości uranu i toru.
- ☐ Radon odpowiada za 3–14% przypadków raka płuc na świecie. Jest drugim po paleniu tytoniu czynnikiem ryzyka.
- ☐ Radon przedostaje się przez szczeliny w fundamentach, nieszczelności instalacyjne, a także przez materiały budowlane i wodę gruntową.
- ☐ Na otwartej przestrzeni stężenie radonu wynosi 5–15 Bq/m³, ale w zamkniętych pomieszczeniach może osiągać setki Bq/m³.
- ☐ Czynniki wpływające na stężenie radonu to: geologia podłoża, stan techniczny fundamentów, konstrukcja budynku, materiały budowlane i warunki atmosferyczne.
- ☐ Najwyższe stężenia radonu występują zimą i wiosną, a najniższe latem i jesienią, co wynika z różnic w wymianie powietrza i warunków geologicznych.
- ☐ W Polsce istnieją regiony o podwyższonym potencjale radonowym, szczególnie w Sudetach, na Podkarpaciu i w województwie dolnośląskim.
- ☐ Państwowa Agencja Atomistyki monitoruje, prowadzi działania edukacyjne i promuje dobre praktyki budowlane, aby ograniczyć ryzyko związane z radonem.

1.1 Zadania i działalność Państwowej Agencji Atomistyki w zakresie radonu

Państwowa Agencja Atomistyki (PAA) jest centralnym organem administracji publicznej, którego nadrzędnym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce. Działania PAA obejmują szeroki zakres obowiązków – od nadzoru nad wykorzystaniem promieniowania jonizującego, po prowadzenie działań edukacyjnych i kontrolnych związanych z ochroną zdrowia i środowiska przed skutkami promieniowania. Agencja działa na podstawie ustawy Prawo atomowe¹, która szczegółowo reguluje zakres jej kompetencji i odpowiedzialności.

W kontekście radonu, PAA pełni kluczową rolę w realizacji polityki państwa mającej na celu ograniczenie zagrożeń związanych z tym gazem. Zgodnie z zapisami ustawy Prawo atomowe (art. 23g), do zadań Agencji należy między innymi organizacja kampanii informacyjnych promujących stosowanie rozwiązań technicznych, które zapobiegają przenikaniu radonu do budynków. PAA prowadzi również działania edukacyjne i szkoleniowe, których celem jest zwiększenie świadomości społecznej na temat dostępnych środków zapobiegawczych.

Ponadto Agencja monitoruje wdrażanie praktyk budowlanych minimalizujących ryzyko związane z radonem, opracowuje dobre praktyki w tej dziedzinie i upowszechnia je wśród projektantów, specjalistów branży budowlanej oraz inwestorów.

Aktywności te wpisują się w Krajowy plan działania w przypadku narażenia na radon², którego realizacja ma na celu ograniczenie narażenia na radon, szczególnie w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy. Współpraca PAA z innymi instytucjami, zarówno naukowymi, jak i administracyjnymi, pozwala na skuteczniejsze monitorowanie i redukcję tego zagrożenia. Dzięki tym inicjatywom Polska systematycznie dąży do poprawy ochrony zdrowia mieszkańców przed negatywnymi skutkami radonu.

1.2 Naturalne źródła promieniowania jonizującego

Promieniowanie jonizujące jest wszechobecnym zjawiskiem, którego źródła możemy podzielić na naturalne i sztuczne. W niniejszym opracowaniu skoncentrujemy się na naturalnych źródłach promieniowania, które otaczają nas od zarania dziejów. Główne źródła naturalnego promieniowania jonizującego to: przestrzeń kosmiczna, radionuklidy w skorupie ziemskiej oraz organizm człowieka i żywność.

Promieniowanie kosmiczne docierające do Ziemi to zjawisko o fascynującej historii odkryć. Jego istnienie zostało potwierdzone w 1912 roku przez Viktora Hessa podczas słynnych eksperymentów balonowych³. Dziś wiemy, że to promieniowanie pochodzi zarówno z naszego Słońca, jak i z bardziej odległych obszarów przestrzeni kosmicznej. Pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów (87%), jąder helu (11%) oraz niewielkich ilości

¹ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277)

² Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia „Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy”.

³ American Physical Society. "Physics History". APS News, April 2010.

<https://www.aps.org/archives/publications/apsnews/201004/physicshistory.cfm> (dostęp: grudzień 2024)

cięższych jąder. Kiedy dociera ono do atmosfery ziemskiej, w wyniku zderzeń z cząstkami atmosferycznymi powstają nowe formy promieniowania, określane jako promieniowanie kosmiczne wtórne. Z tego powodu na powierzchnię Ziemi docierają m.in. elektrony, miony, promieniowanie gamma oraz neutrony (choć ich udział przy powierzchni Ziemi jest już znikomy). Promieniowanie kosmiczne jest istotnym źródłem naturalnej dawki promieniowania, której wielkość zależy od wysokości nad poziomem morza.

W skorupie ziemskiej oraz w wodach oceanów znajdują się naturalne izotopy promieniotwórcze, które są pozostałością po procesach formowania się naszej planety. Do najważniejszych z nich należą izotopy potasu (K-40), uranu (U-235, U-238) i toru (Th-232). Te izotopy, dzięki swoim niezwykle długim czasom połowicznego rozpadu, wciąż są źródłem promieniowania alfa, beta i gamma. Izotopy uranu czy toru rozpadają się w złożonych łańcuchach promieniotwórczych (tzw. szeregach promieniotwórczych), które ostatecznie kończą się stabilnym ołowiem.

Szczególnie istotnym izotopem w kontekście promieniowania naturalnego jest potas-40, którego niewielkie ilości znajdują się w naszych organizmach. Aktywność tego izotopu w ciele przeciętnego człowieka (osoba o masie 60 kg) wynosi około 3700 Bq (Bq – bekerel;), co oznacza, że w każdej sekundzie zachodzi w nim tyle rozpadów promieniotwórczych.

Warto wiedzieć!

Aktywność promieniotwórcza wyraża liczbę przemian promieniotwórczych zachodzących w jednostce czasu. Dawniej jednostką aktywności był kiur (Ci), odpowiadający $3,7 \cdot 10^{10}$ rozpadom promieniotwórczym w ciągu sekundy. Obecnie jednostką aktywności w układzie SI jest odwrotność jednostki czasu (1/s), którą nazwano bekerelem (Bq), czyli 1 Bq to 1 rozpad promieniotwórczy w ciągu jednej sekundy.

Naturalne promieniowanie jest również emitowane przez skały i minerały. Skały magmowe, takie jak granit, promieniują znacznie mocniej niż skały osadowe. Na poziom promieniowania wpływa zawartość uranu, toru i potasu w podłożu. Co ciekawe, materiały budowlane, takie jak ceramika czy szkło barwione uranem, również mogą emitować promieniowanie jonizujące.

Ważną składową naturalnego promieniowania jonizującego jest radon – gaz powstający w wyniku rozpadu uranu-238 obecnego w skorupie ziemskiej. Radon-222, będący jego najistotniejszym izotopem, przenika do atmosfery przez szczeliny w podłożu i fundamentach budynków, kumulując się w zamkniętych pomieszczeniach. W efekcie radon odpowiada za około 47% całkowitej dawki promieniowania dla mieszkańca Polski ze źródeł naturalnych.

Całkowita dawka promieniowania jonizującego od źródeł naturalnych otrzymywana przez statystycznego mieszkańca Polski w 2023 roku wyniosła 2,55 mSv⁴. W szczególności radon i jego produkty rozpadu przyczyniły się do dawki na poziomie 1,2 mSv. Szczegóły dotyczące wszystkich składowych przedstawiono w Tabeli 1.

⁴ „Raport roczny Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki za 2023 rok”. Państwowa Agencja Atomistyki, 2023

Tabela 1 Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej w Polsce⁴

Składowa	Średnia roczna dawka skuteczna [mSv]	Udział w całkowitej rocznej dawce skutecznej od źródeł naturalnych
Radon	1,2	47%
Promieniowanie gamma	0,67	26%
Promieniowanie kosmiczne	0,32	13%
Ciało człowieka	0,26	10%
Toron	0,1	4%

Warto wiedzieć!

O „dawce” mówimy wówczas, gdy promieniowanie jonizujące oddziałuje na jakiś materiał oraz gdy pragnie się wykryć i opisać rodzaj i skutki tego działania. Na początku należy zatem koniecznie określić ilość energii oddanej materiałowi podczas napromieniowania – dawkę pochłoniętą.

Dawka pochłonięta D to zatem:

$$A = \frac{\text{pochłonięta energia promieniowania jonizującego}}{\text{masa napromieniowanego materiału}}$$

Jej jednostką jest džul/kg; fizycy nadali jej określenie grej (Gy). Dawka pochłonięta określa tylko, jaka ilość energii zostaje przekazana podczas napromieniowania materiału. A jak działa promieniowanie na ludzkie ciało?

Aby przy pomocy wzorów i liczb wyrazić, jak bardzo niebezpieczne jest dane promieniowanie jonizujące oraz jaką promienioczułość mają różne organy i tkanki, Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) wprowadziła w 1991 roku tzw. „współczynniki skuteczności”: dla różnych rodzajów promieniowania – „współczynnik skuteczności promieniowania” i dla różnych tkanek biologicznych – „współczynnik względnej skuteczności biologicznej”.

Aby określić skutek działania promieniowania jonizującego typu A na organ B, należy pomnożyć dawkę pochłoniętą tego promieniowania przez współczynnik skuteczności promieniowania dla promieniowania typu A, a następnie przez współczynnik względnej skuteczności biologicznej dla organu B.

Przy pomocy następujących współczynników skuteczności promieniowania⁵ można wyliczyć **dawkę równoważną H_T** (dawka, która deponuje się w organach) z dawki pochłoniętej D :

Rodzaj promieniowania i zakres energii	Współczynnik wagowy promieniowania jonizującego W_R
fotony, wszystkie energie	1
elektrony, miony, wszystkie energie	1
neutrony o energii 1 keV	2,5
neutrony o energii 1 MeV	20,7
protony i piony naładowane	2
cząstki alfa, fragmenty rozszczepienia, ciężkie jony	20

Wzór na dawkę równoważną H_T jest następujący:

$$H_T = W_R \cdot D_R$$

czyli dawka D_R promieniowania typu R działa na tkankę T.

A co w przypadku, gdy chodzi o większą ilość rodzajów promieniowania? Wtedy sumuje się iloczyny poszczególnych dawek pochłoniętych i współczynniki skuteczności promieniowania.

Teraz wybieramy się w głąb ciała: w poniższej tabeli pokazano, ile wynoszą współczynniki wagowe, wyrażające stosunek prawdopodobieństwa skutków wywołanych napromieniowaniem narządu lub tkanki T do prawdopodobieństwa takich skutków, gdzie całe ciało napromieniowane jest równomiernie przy takiej samej wartości dawki, tzw. współczynniki wagowe tkanki⁶.

Tkanki lub organy	Współczynnik wagowy tkanki lub narządu W_T
gruczoły piersiowe	0,12
płuca	0,12
szpik (czerwony)	0,12
okrężnica	0,12
żołądek	0,12

⁵ Współczynniki wagowe promieniowania określone są w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. z 2021 r. poz. 1657)

⁶ Współczynniki wagowe tkanki określone są w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. z 2021 r. poz. 1657)

gonady	0,08
pęcherz moczowy	0,04
wątroba	0,04
tarczycyca	0,04
przełyk	0,04
mózg	0,01
skóra	0,01
powierzchnia kości	0,01
inne organy lub tkanki	0,12

Współczynniki te służą do wyliczenia **dawki skutecznej E** . Wzór przedstawia się następująco:

$$E = \sum_T W_T H_T$$

- sumowanie odbywa się po wszystkich tkankach T.

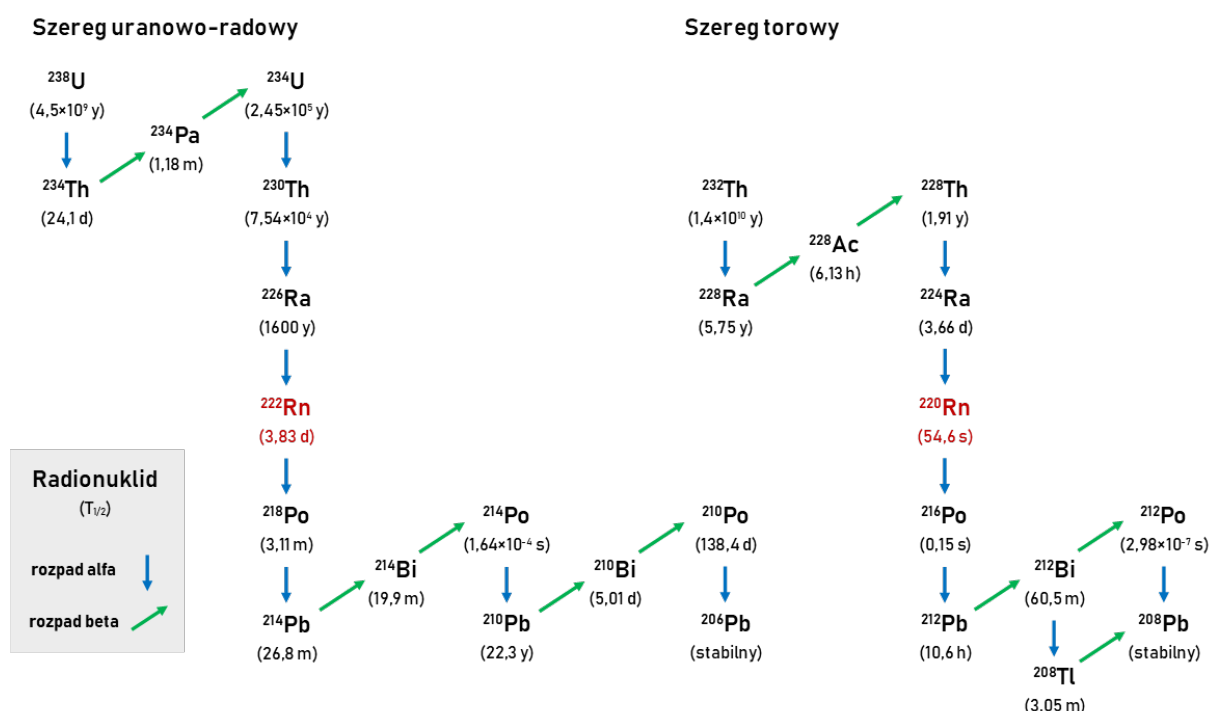
Jednostką dawki skutecznej jest siwert (Sv). Jeden siwert odpowiada jednemu dżulowi na kilogram: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Najczęściej stosuje się jednostkę – milisiwert – $1000 \text{ mSv} = 1 \text{ Sv}$.

1.3 Czym jest radon i dlaczego nim się zajmujemy?

Radon to naturalnie występujący, radioaktywny gaz szlachetny o symbolu chemicznym Rn i liczbie atomowej 86. W układzie okresowym pierwiastków znajduje się w grupie gazów szlachetnych, co oznacza, że jest chemicznie obojętny i praktycznie nie tworzy związków chemicznych z innymi substancjami. Jest bezbarwny, bezwonny i bez smaku, co sprawia, że nie można go wykryć zmysłami. Radon został odkryty w 1900 roku przez niemieckiego fizyka Friedricha Ernsta Dorna, który początkowo nazwał go „emanacją”⁷.

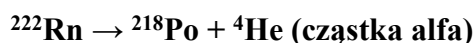
Radon występuje w postaci izotopu Rn-222, który powstaje w łańcuchu rozpadów uranu (tzw. szereg uranowo-radowy) oraz w postaci izotopu Rn-220, powstającego w łańcuchu rozpadu toru (rys. 1). Radon-222 jest znaczący, ponieważ jego okres połowicznego rozpadu wynosi 3,83 dnia i jest najdłuższy w porównaniu do pozostałych izotopów radonu, dla których czas ten jest liczony w sekundach. Gaz ten może uwalniać się z podłoża, przenikać przez szczeliny w fundamentach budynków i kumulować się wewnątrz pomieszczeń. Następnie rozpada się lub może być wchłaniany w czasie oddychania.

⁷ Ł. Koszuc, „Historia odkrycia radonu i badań nad jego wpływem na zdrowie”. *Biuletyn Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, Vol. 4/2021, Państwowa Agencja Atomistyki, 2021



Rys. 1 Szeregi promieniotwórcze uranowo-radowy i szereg promieniotwórczy torowy (ozn. $T_{1/2}$ – czas połowicznego rozpadu izotopu), źródło: opracowanie własne autora

W wyniku promieniotwórczego rozpadu radonu-222 emitowane jest promieniowanie alfa (jądro atomu helu-4) i powstają niebezpieczne dla organizmu człowieka produkty rozpadu radonu stanowiące metale ciężkie takie jak: polon, bizmut i ołów. Poniżej przedstawiono schemat rozpadu radonu-222 (Rn-222):



Cząstka alfa-słada się z dwóch protonów i dwóch neutronów i ma dużą zdolność jonizacji materii przy jednocześnie bardzo małym zasięgu, co daje największą skuteczność biologiczną spośród wszystkich cząstek jonizujących. Emisja wysoce jonizującej cząstki alfa w połączeniu z produktami jego rozpadu, którymi są izotopy metali ciężkich (to także są izotopy promieniotwórcze), a dodatkowo uwzględniając stan skupienia radonu, umożliwiającą jego łatwe przemieszczanie się, powoduje, że radon stanowi potencjalne zagrożenie dla ludzkiego organizmu.

Najbardziej narażone są drogi oddechowe, ponieważ powietrze z radonem jest wdychane do płuc i wydychane. Szczególnie niebezpieczne jest osadzanie się w drogach układu oddechowego radioaktywnych produktów rozpadu radonu, które ulegają kolejnym procesom rozpadów, w tym alfapromieniotwórczych.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (ang. World Health Organization, WHO) radon stanowi 3–14% przypadków zachorowań na nowotwór płuc i zaraz po paleniu papierosów jest głównym czynnikiem narażenia⁸.

Radon występuje wszędzie wokół nas, zarówno na zewnątrz, jak i w pomieszczeniach. Na otwartej przestrzeni jego stężenie jest zazwyczaj niskie (około 5–15 Bq/m³), ale w zamkniętych pomieszczeniach, szczególnie w piwnicach czy budynkach z ograniczoną wentylacją, może osiągać wartości nawet kilkaset razy wyższe. Zrozumienie właściwości radonu oraz sposobów ograniczenia jego stężenia w powietrzu to kluczowe elementy ochrony zdrowia.

1.4 Naturalne źródła radonu

Jak wspomniano już powyżej, radon pochodzi z naturalnych procesów zachodzących w skorupie ziemskiej. Jest produktem rozpadu uranu i toru, które występują w skałach, glebie i wodzie. Te pierwiastki są powszechnie obecne w skorupie ziemskiej, co oznacza, że radon może uwalniać się z praktycznie każdego rodzaju podłoża. Najwięcej radonu powstaje w skałach granitowych, piaskowcach oraz glebach gliniastych, gdzie zawartość uranu i toru jest relatywnie wysoka.

Radon wydostaje się z gleby w wyniku procesów dyfuzji i przepływu gazów przez pory i szczeliny. Na intensywność jego uwalniania wpływają czynniki geologiczne, takie jak porowatość gleby, jej wilgotność oraz obecność barier, takich jak warstwy gliny, które mogą ograniczać emisję gazu na powierzchnię. Ponadto radon może być transportowany w roztworze wodnym lub wraz z gazami glebowymi bardziej przepuszczalnymi drogami, np. poprzez szczeliny, uskoki czy warstwy żwiru. Może to prowadzić do miejscowego wzrostu stężenia radonu w glebie w szczelinach, w obszarze osiadań górskich lub na granicy dwóch rodzajów skał.

Kiedy radon uwalnia się z gleby, miesza się z powietrzem atmosferycznym. Na otwartej przestrzeni jego stężenie jest zazwyczaj bardzo niskie, ponieważ szybko ulega rozcieńczeniu. Problem pojawia się jednak w zamkniętych przestrzeniach, takich jak domy, szkoły czy miejsca pracy. Radon może przenikać do budynków przez szczeliny w fundamentach, rury, przewody instalacyjne czy nawet przez materiały budowlane.

Radon jako produkt rozpadu radu, który występuje we wszystkich kamieniach i ziemi, jest stale wytwarzany w mineralnych materiałach budowlanych, uwalniany z powierzchni i przyczynia się do zwiększenia koncentracji radonu w pomieszczeniach. Jednak ilość tak uwalnianego radonu jest niewielka. W normalnych warunkach obecne materiały budowlane otaczające pomieszczenie przyczyniają się do zwiększenia stężenia radonu w powietrzu pomieszczenia o maksymalnie 15 Bq/m³. Często odsetek ten jest znacznie niższy^{9,10}.

⁸ World Health Organization. "Radon and Health". <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> (dostęp: grudzień 2024)

⁹ "Guidelines for drinking-water quality". 4th ed. Geneva, World Health Organization, 2011

¹⁰ Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., Wichterey, K. "Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition". Bundesamt für Strahlenschutz, 2012

Zawartość substancji promieniotwórczych w materiałach budowlanych zależy przede wszystkim od źródła ich pochodzenia i jest znacznie wyższa dla materiałów pochodzących z krajów skandynawskich, w których podłoże geologiczne jest znacznie bogatsze w naturalnie występujące izotopy promieniotwórcze niż podłoże w Polsce. Struktura geologiczna Polski nie jest jednorodna i zauważalne są znaczne różnice w jej budowie. Rejony górskie, zwłaszcza południowo-zachodniej Polski, czyli tereny Sudetów, stanowią duże źródło naturalnie występujących substancji promieniotwórczych, które mają jednocześnie wpływ na zwiększoną obecność radonu w powietrzu w porównaniu do rejonów centralnej czy północnej Polski. Zgodnie z polskim prawem, stężenie naturalnych izotopów promieniotwórczych w materiałach budowlanych podlega kontroli przed wprowadzeniem ich do obrotu, a wszelkie przekroczenia od norm są niezwłocznie przekazywane organom nadzoru budowlanego¹¹.

W niektórych krajach głównym źródłem radonu okazały się wybrane materiały budowlane. Na przykład w Szwecji stosowano gazobeton z łupków ałunu, który uwalniał wielokrotnie więcej radonu niż konwencjonalne materiały budowlane¹². Produkcja została zakazana ze względu na wysoki poziom radioaktywności.

Radon może również występować w wodach gruntowych, szczególnie tych pochodzących z głębszych warstw ziemi. Woda z dużą zawartością radonu, używana do celów domowych, może uwalniać gaz do powietrza podczas gotowania, prania czy kąpieli. Z reguły dodaje to tylko kilka Bq/m³ do średniej rocznej stężenia radonu w pomieszczeniach. W szczególnych warunkach geologicznych, m.in. na terenach granitowych lub terenach ze złożami rudy uranu wykorzystanie wody z poszczególnych studni może przyczynić się do podwyższenia stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych.

W Polsce stężenie radonu w powietrzu wewnątrz budynków jest zróżnicowane i zależy od lokalnych warunków geologicznych. Aby zidentyfikować obszary o podwyższonym ryzyku przekroczenia dopuszczalnych poziomów radonu, Minister Zdrowia wydał 18 czerwca 2020 r. rozporządzenie określające takie tereny¹³. Zgodnie z tym aktem prawnym do terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (300 Bq/m³), o którym mowa w art. 23b ustawy Prawo atomowe należą (rys. 2):

- w województwie dolnośląskim – powiaty: dzierzoniowski, karkonoski, kamiennogórski, kłodzki, lubański, lwówecki, polkowicki, trzebnicki, wałbrzyski, ząbkowicki, zgorzelecki i złotoryjski oraz dwa miasta na prawach powiatu: Jelenia Góra i Wałbrzych;
- w województwie lubelskim – powiat tomaszowski;
- w województwie opolskim – powiaty: nyski i prudnicki;
- w województwie podkarpackim – powiaty: bieszczadzki, jasielski, krośnieński, leski, mielecki i sanocki;

¹¹ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe. Dz.U. 2023 poz. 1234.

¹² Clavensjö, B., Akerblom, G. "The Radon Book". Ljunglöfs Offset AB, Stockholm, 1994.

¹³ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórczego radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia. Dz. U. 2020, poz. 1139.

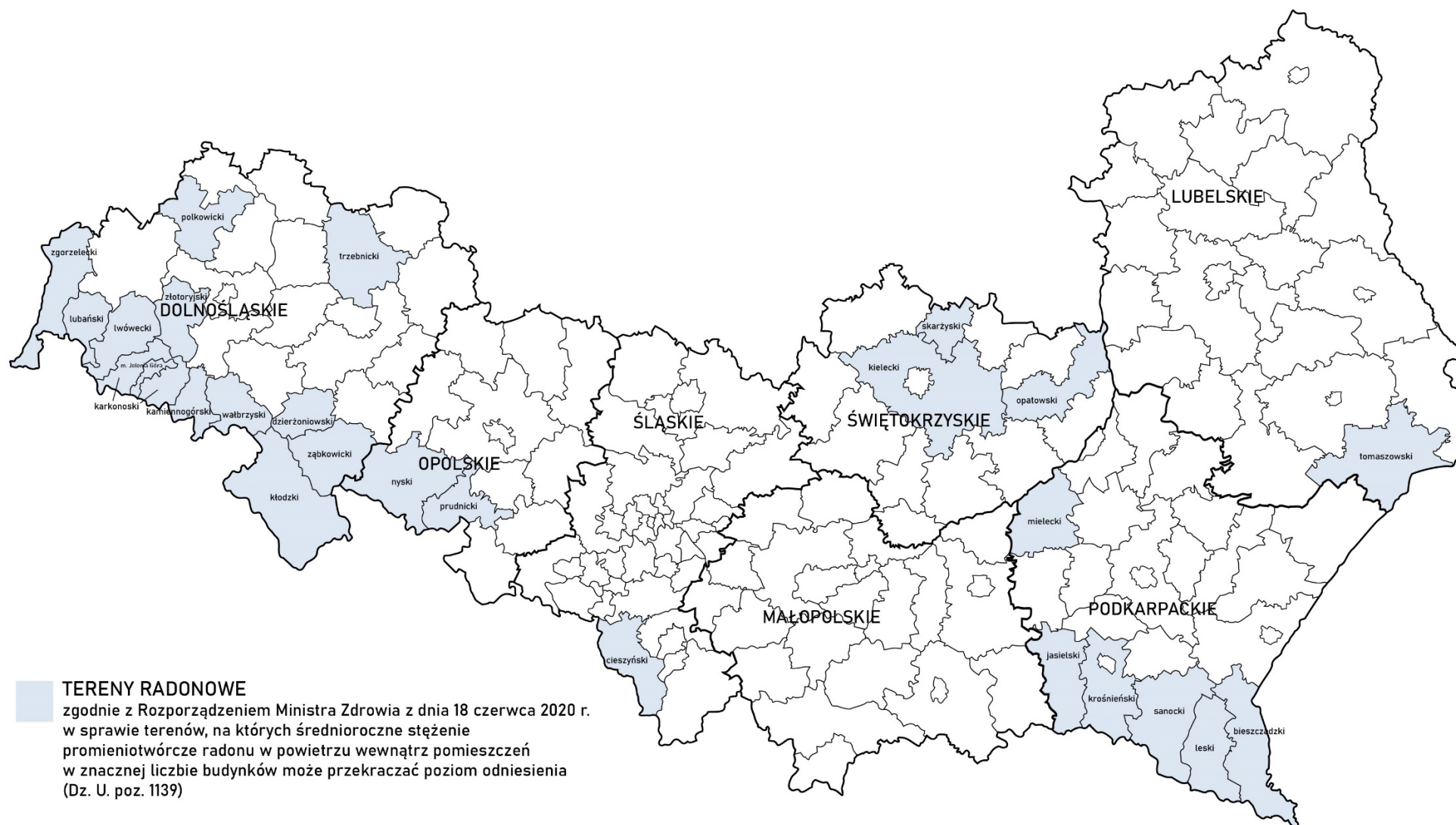
- w województwie śląskim – powiat cieszyński;
- natomiast w województwie świętokrzyskim – powiaty: kielecki, opatowski i skarżyski.

Powiaty wymienione we wspomnianym rozporządzeniu Ministra Zdrowia zostały wytypowane na podstawie kryteriów wskazanych w Krajowym planie działania w przypadku narażenia na radon, który ogłoszony został jako obwieszczenie Ministra Zdrowia¹⁴. Jak określono w tym dokumencie, decyzja o włączeniu określonych terenów do rozporządzenia była związana z:

- stężeniem uranu (U-238) w strukturach geologicznych powyżej 4 g/t (4 ppm = 4 mg/kg). Analizowano mapy rozkładu uranu w Polsce przygotowane przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy;
- wynikami wstępnego monitoringu substancji promieniotwórczych w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Stężenie radonu w badanych ujęciach wody, przekraczające 100 Bq/l (wartość parametryczna), było kluczowym kryterium;
- wynikami badań, takich jak te przeprowadzone w powiecie lubańskim, gdzie zmierzono wysokie stężenia radonu w wodach podziemnych (np. miejscowość Wolimierz, gdzie stężenie radonu w wodzie osiągnęło 816 Bq/l).

Jednak lista powiatów wymieniona w rozporządzeniu nie jest zamknięta. Zgodnie ze wspomnianym obwieszczeniem Ministra Zdrowia z 22 stycznia 2021 r., kolejne tereny, na których należy wykonać pomiary stężenia radonu w budynkach, będą wskazywane we współpracy z instytutami badawczymi oraz Zespołem do spraw krajowego planu działania w przypadku narażenia na radon. Wskazywanie tych terenów opiera się na szczegółowych danych, takich jak informacje od Państwowego Instytutu Geologicznego o budowie geologicznej, dane dotyczące potencjału radonowego w terenach związanych z górnictwem przekazywane przez Główny Instytut Górnictwa oraz dane o możliwościach zwiększonego narażenia z powodu stosowanych materiałów budowlanych, przekazywane przez Instytut Techniki Budowlanej i organy nadzoru budowlanego. Dodatkowo powinno uwzględniać się wyniki pomiarów średniorocznych stężeń radonu, dostarczane przez laboratoria wykonujące te pomiary na zlecenie właścicieli lub użytkowników budynków.

¹⁴ Obwieszczenie Ministra Zdrowia dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy.



Rys. 2 Powiaty określone w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139), źródło: freeimages.com, opracowanie własne autora

1.5 Jak radon przenika do wnętrza budynków i co wpływa na jego koncentrację?

Radon przedostaje się do wnętrza budynków w wyniku procesów zachodzących w glebie, wodzie i materiałach budowlanych. Głównym źródłem radonu w budynkach jest powietrze glebowe, które zawiera ten gaz w wyniku rozpadu radu obecnego w podłożu. Radon przenika do wnętrza przez szczeliny i pęknięcia w fundamentach, nieszczelności wokół rur i kabli, a także przez naturalne podłogi piwnic pozbawione izolacji przeciwwilgociowej. W budynkach z piwnicami występuje szczególnie duże ryzyko, ponieważ ich fundamenty mają bezpośredni kontakt z podłożem glebowym.

Drugim istotnym źródłem radonu jest woda gruntowa. Gaz ten łatwo rozpuszcza się w wodzie, a jego uwalnianie do powietrza zachodzi podczas użytkowania wody. Problem ten dotyczy zwłaszcza budynków korzystających z wód gruntowych w obszarach o wysokiej zawartości uranu w podłożu. Materiały budowlane również mogą być źródłem radonu. Minerały, z których są wykonane, zawierają śladowe ilości radu, który rozpadając się, uwalnia radon, o czym już wspomniano powyżej.

Transport radonu do wnętrza budynków odbywa się głównie na dwa sposoby: przez konwekcję i dyfuzję. Konwekcja, znana również jako efekt kominowy, jest wynikiem różnicy ciśnień między wnętrzem budynku a otaczającą go glebą. Podciśnienie w budynku zasysa powietrze glebowe zawierające radon, szczególnie w zimie, gdy różnice temperatur są największe. Proces ten jest dodatkowo wzmacniany przez działanie wentylatorów, kominków i innych urządzeń generujących podciśnienie. Dyfuzja jest mniej efektywnym procesem, w którym radon przenika przez fundamenty i ściany w wyniku różnicy stężeń gazu po obu stronach przegrody.

Stężenie radonu w budynkach wykazuje zmienność zarówno w ciągu dnia, jak i w różnych porach roku. Nocą, gdy brak wietrzenia ogranicza wymianę powietrza, koncentracja gazu wzrasta. Zimą zamrożone podłoże uniemożliwia migrację radonu do atmosfery, co prowadzi do jego kumulacji wewnątrz budynków.

Drogi przenikania radonu do budynków zilustrowano na rys. 3.

Artykuł Senitkovej i Krausa z 2019 roku¹⁵ dostarcza szczegółowych danych na temat sezonowych wahań stężenia radonu. Z badań przeprowadzonych w Czechach wynika, że najwyższe średnie stężenia radonu w budynkach występują zimą (152,8 Bq/m³) i wiosną (146,0 Bq/m³). W lecie i jesienią koncentracja gazu spada (odpowiednio 58,2 i 54,6 Bq/m³), co jest związane z wyższym współczynnikiem wymiany powietrza (0,7–0,9 wymian na godzinę) w tych porach roku. Badania te pokazują, że krótkoterminowe pomiary radonu, aby reprezentowały średnie roczne stężenie, powinny być wykonywane zimą lub wiosną. Jest to związane z większą stabilnością wyników pomiarowych w tych porach roku w porównaniu do lata i jesieni.

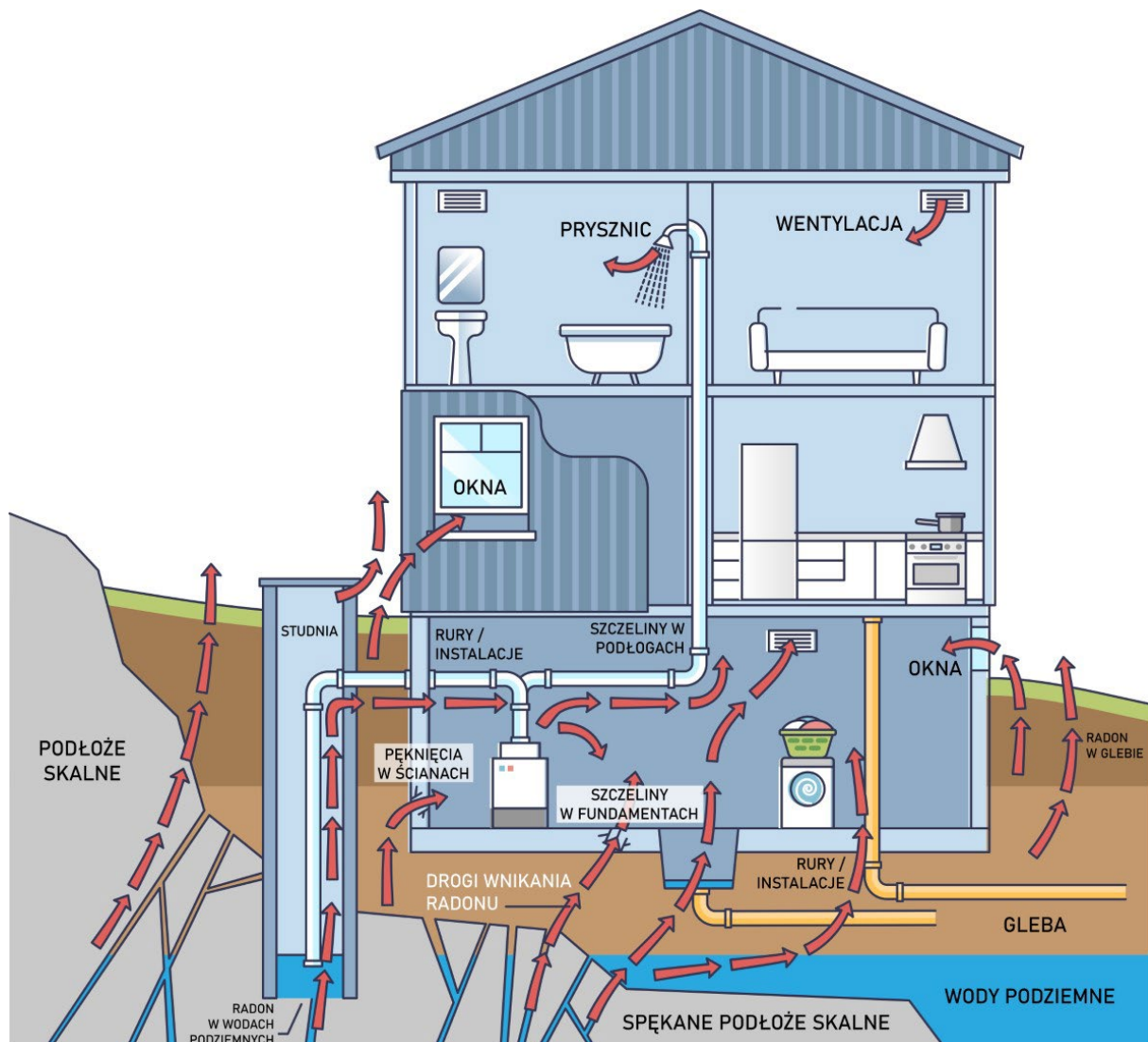
Czynniki wpływające na przenikanie radonu do wnętrza budynków:

- geologia podłoża: rodzaj skał i gleby ma decydujące znaczenie. Obszary z granitami, pegmatytami i łupkami mają wyższy potencjał radonowy. Przepuszczalne gleby, takie

¹⁵ Senitkova, I. J., and Kraus, M. "Seasonal and floor variations of indoor radon concentration". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 221, no. 1 (2019): 012127

jak piaski i żwiry, umożliwiają szybszą migrację gazu, podczas gdy gleby gliniaste stanowią naturalną barierę;

- stan techniczny fundamentów: nieszczelności, takie jak pęknięcia i szczeliny w fundamentach oraz przepusty instalacyjne, znacząco zwiększają możliwość przenikania radonu;
- konstrukcja budynku: budynki z piwnicami lub bez odpowiedniej izolacji przeciwwilgociowej są bardziej narażone na przenikanie radonu. Również strefa zakłócona, czyli wypełnienie wokół fundamentów luźnym materiałem budowlanym, zwiększa ryzyko;
- materiały budowlane: współczesne materiały budowlane mają niewielki wpływ na stężenie radonu, jednak w przeszłości stosowano materiały o podwyższonej promieniotwórczości;
- warunki atmosferyczne: zimą różnice temperatur między wnętrzem a otoczeniem budynku zwiększają efekt kominowy. Ruchy powietrza wokół budynku oraz brak wietrzenia w nocy również sprzyjają kumulacji radonu.



Rys. 3 Sposoby przenikania radonu do budynków
(źródło: iStockPhoto, opracowanie własne autora)

Rozdział 2 Metody detekcji i monitorowania radonu

Aby skutecznie monitorować i oceniać zagrożenie radonem, opracowano różnorodne metody pomiarowe i techniki monitorowania tego gazu szlachetnego. Niniejszy rozdział ma na celu przedstawienie podstawowych zagadnień związanych z detekcją i monitorowaniem radonu w sposób prosty i zrozumiały. Omówimy metody pomiaru, zasady działania różnych typów detektorów, sposoby monitorowania poziomów radonu w budynkach, interpretację wyników oraz znaczenie akredytacji laboratoriów przeprowadzających pomiary.

2.1 Metody pomiaru radonu

Pomiar stężenia radonu i jego pochodnych w powietrzu polega na rejestrowaniu efektów wywołanych przez promieniowanie jonizujące emitowane podczas jego rozpadu. Wyróżnia się dwa typy metod pomiarowych: **pasywne** i **aktywne**^{16,17}.

2.1.1 Metody pasywne

Metody pasywne charakteryzują się tym, że nie wymagają zewnętrznego zasilania ani aktywnego pobierania próbek powietrza. Detektory pasywne rejestrują promieniowanie w sposób ciągły przez określony czas ekspozycji, który może wynosić od kilku dni do kilku miesięcy. Po zakończeniu ekspozycji detektory są analizowane w laboratorium. Najczęściej stosowane metody pasywne obejmują (patrz porównanie w Tabeli 1):

- **detektory śladowe typu CR-39** – używane do długoterminowych pomiarów. Polimerowe płytki w komorach dyfuzyjnych rejestrują ślady cząstek alfa, które następnie są analizowane w laboratorium;
- **detektory z węglem aktywowanym** – stosowane do krótkoterminowych pomiarów. Radon jest absorbowany w węglu, a analiza scyntylacyjna pozwala określić jego stężenie;
- **detektory elektretowe** – urządzenia bazujące na jonizacji powietrza, które pozwalają na prosty i efektywny pomiar średnich stężeń radonu.

Tabela 1 Porównanie pasywnych detektorów radonu¹⁷

Typ detektora	Typowa niepewność [%]	Typowy okres pomiarowy	Koszt
Detektory śladowe typu CR-39	10 – 25	1 – 12 miesięcy	niski
Detektory z węglem aktywowanym	10 – 30	2 – 7 dni	niski
Detektory elektretowe	8 – 15	5 dni – 1 rok	średni

¹⁶ Podgórska, Z. "Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie". Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna 1/2022. Państwowa Agencja Atomistyki, 2022.

¹⁷ H. Zeeb, F. Shannoun (red.). "WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective". World Health Organization, Geneva 2009.

2.1.2 Metody aktywne

Metody aktywne wykorzystują urządzenia wyposażone w komory pomiarowe, które rejestrują zmiany stężenia radonu w czasie rzeczywistym. W aktywnych metodach powietrze może być zasysane przez pompę lub przedostawać się do komory na drodze dyfuzji. Urządzenia te są bardziej zaawansowane technologicznie i pozwalają na monitorowanie dynamicznych zmian stężenia radonu, np. w ciągu doby. Typowe metody aktywne obejmują:

- **monitory z komorą jonizacyjną** – rejestrują jonizację powietrza w wyniku rozpadu radonu;
- **scyntylicyjne komory Lucasa** – wykorzystują siarczek cynku do rejestrowania błysków wywołanych przez cząstki alfa;
- **ciągłe monitory radonu** – urządzenia elektroniczne umożliwiające bieżące monitorowanie stężenia radonu w powietrzu oraz rejestrację danych w czasie rzeczywistym.

2.1.3 Specjalistyczne pomiary

W bardziej zaawansowanych przypadkach, np. w badaniach naukowych lub podczas planowania działań remediacyjnych, stosuje się techniki takie jak:

- **pomiary radonu w powietrzu glebowym** – pozwalają określić potencjalne źródła radonu w budynku;
- **pomiary radonu w wodzie** – wykorzystują techniki scyntylicyjne lub układy zamknięte do analizy odgazowanego powietrza.

2.1.4 Kryteria wyboru metody pomiarowej

Wybór odpowiedniej metody pomiaru radonu zależy od szeregu czynników, takich jak cel pomiaru, typ badanej lokalizacji, warunki środowiskowe oraz dostępne zasoby techniczne i finansowe. Poprawne zaplanowanie pomiarów ma kluczowe znaczenie dla oceny zagrożenia radonem i skutecznego wdrażania środków zaradczych.

W przypadku długoterminowego monitorowania poziomów radonu, które pozwala na ocenę rocznego średniego stężenia, preferowane są detektory pasywne, takie jak detektory śladowe. Te urządzenia cechują się niskim kosztem i niewrażliwością na zmienne środowiskowe, a czas ich ekspozycji wynosi od jednego miesiąca do nawet roku. Są szczególnie użyteczne w domach mieszkalnych, gdzie zmienność sezonowa stężeń radonu ma istotne znaczenie.

W sytuacjach wymagających szybkiego uzyskania wyników, na przykład przy ocenie skuteczności działań remediacyjnych lub w transakcjach nieruchomości, lepszym wyborem są aktywne urządzenia pomiarowe. Monitory ciągłe, wyposażone w komory jonizacyjne, umożliwiają uzyskanie danych w czasie rzeczywistym, co pozwala na dynamiczne śledzenie zmian stężeń radonu w pomieszczeniach. Takie urządzenia są jednak droższe i wymagają źródła zasilania.

Charakterystyka budynku ma istotny wpływ na wybór metody pomiarowej:

- **budynki mieszkalne** – w domach jednorodzinnych zaleca się długoterminowe pomiary pasywne, które są proste w użyciu i zapewniają wiarygodne wyniki. Pomiary dokonuje się w pomieszczeniach przebywania, szczególnie na poziomie styku z gruntem.
- **budynki użytkowe** – w obiektach takich jak szkoły, szpitale czy biura konieczne jest przeprowadzanie pomiarów w wielu lokalizacjach wewnątrz budynku, aby uwzględnić różnice w warunkach użytkowania i wentylacji. W takich przypadkach stosuje się zarówno metody pasywne, jak i aktywne, w zależności od specyfiki badania.

Czynniki środowiskowe, takie jak wilgotność i temperatura, mogą wpływać na dokładność niektórych metod. Na przykład detektory z węglem aktywowanym wymagają kalibracji w warunkach wysokiej wilgotności. Z kolei metody pasywne są mniej podatne na zmienne środowiskowe i mogą być stosowane w różnych warunkach.

Aby zapewnić wysoką jakość wyników, szczególnie w budynkach użyteczności publicznej, zaleca się stosowanie urządzeń zgodnych z odpowiednimi normami technicznymi oraz kalibrowanych w akredytowanych laboratoriach.

2.2 Zasada działania detektorów pasywnych i aktywnych

2.2.1 Detektory pasywne¹⁷

Detektory pasywne działają bez potrzeby zasilania zewnętrznego lub aktywnego pobierania próbek powietrza. Ich główną zasadą działania jest rejestrowanie promieniowania emitowanego przez radon i jego pochodne w sposób ciągły przez określony czas ekspozycji. Przez cały ten okres detektory uśredniają wynik, co czyni je idealnym rozwiązaniem do długoterminowych pomiarów. Po zakończeniu ekspozycji detektory są przesyłane do laboratorium, gdzie przeprowadzana jest analiza wyników. Detektory pasywne cechują się wysoką odpornością na zmienne warunki środowiskowe, co dodatkowo zwiększa ich niezawodność.

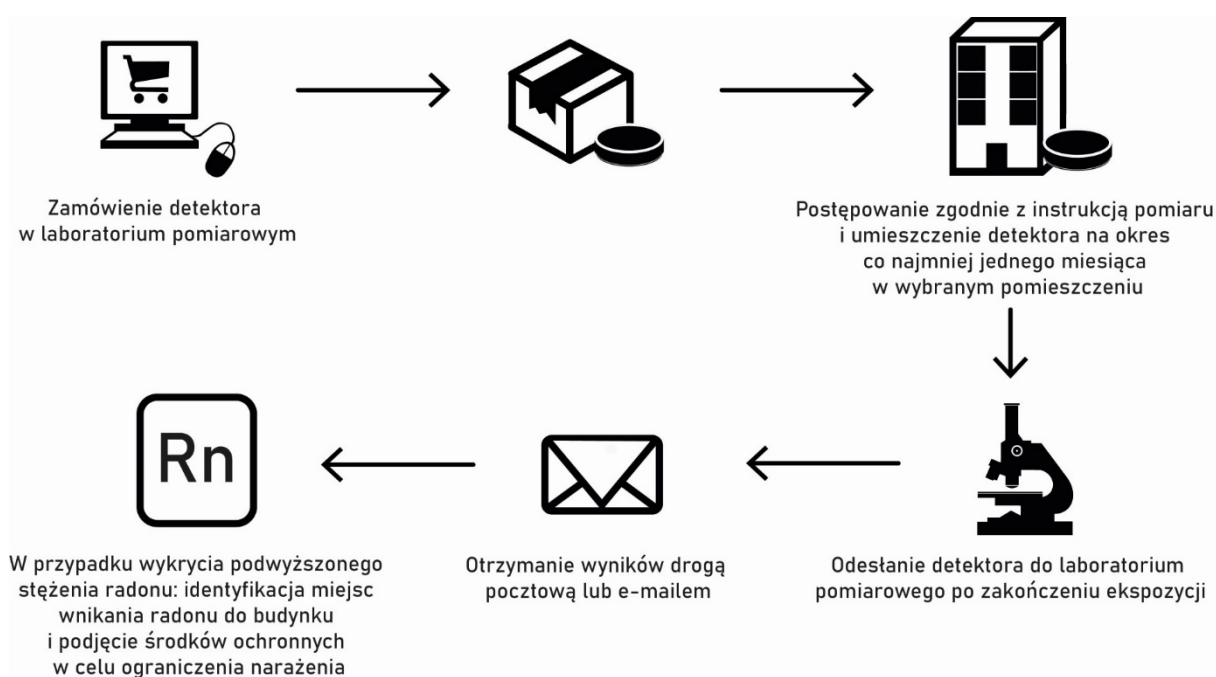
Jednym z najczęściej stosowanych typów detektorów pasywnych są **detektory śladowe typu CR-39** (rys. 1). Detektory te składają się z polimerowej płytki umieszczonej w komorze dyfuzyjnej. Powietrze z radonem dostaje się do wnętrza komory na drodze dyfuzji, a cząstki alfa, powstające podczas rozpadu radonu, pozostawiają mikroskopijne ślady na powierzchni detektora. W laboratorium, poprzez obróbkę chemiczną, ślady te stają się widoczne i są liczone pod mikroskopem. Wynik analizy jest przeliczany na średnie stężenie radonu w czasie ekspozycji. Detektory śladowe są szczególnie cenione za swoją niezawodność, odporność na warunki środowiskowe oraz możliwość prowadzenia pomiarów przez długi czas, nawet do 12 miesięcy.



Rys. 1 Detektor śladowy radonu typu CR-39¹⁸

Aby wykonać pomiar stężenia radonu za pomocą detektorów śladowych typu CR-39, należy rozpocząć od zamówienia detektora w akredytowanym laboratorium pomiarowym – patrz schemat na rys. 2. Detektor dostarczany jest w szczelnie zamkniętym opakowaniu, które chroni go przed wpływem radonu podczas transportu. Po otrzymaniu detektora należy postępować zgodnie z załączoną instrukcją obsługi. Detektor umieszcza się w pomieszczeniu, które ma być monitorowane, na przykład na półce, szafce lub w innym miejscu, z dala od okien, źródeł ciepła i wentylacji. Alternatywnie można zawiesić detektor na sznurku przy suficie lub na ścianie. Detektor, zamknięty w niewielkiej plastikowej obudowie, nie wymaga zasilania, nie emituje światła ani dźwięków, a także nie wymaga obsługi przez cały okres ekspozycji, który wynosi zwykle od jednego do kilku miesięcy. Po zakończeniu pomiaru detektor należy zapakować w oryginalne, szczelne opakowanie i odesłać do laboratorium. Tam przeprowadzana jest analiza zebranych danych, a wyniki są przesyłane użytkownikowi.

¹⁸ Dehnert, Jörg & Guhr, Andreas & Engelhardt, Jörg. (2020). Improvement of a Radon Dosimetry System for Miners by Replacing Reference Dosimeters with Radonproof Boxes Containing Activated Carbon Cartridges. Health Physics. 118. 117-128.



Rys. 2 Schemat postępowania przy wykonywaniu pomiarów stężenia radonu za pomocą detektorów śladowych typu CR-39, źródło: freesvg.org, opracowanie własne autora

Kolejnym rodzajem detektorów pasywnych są **detektory z węglem aktywowanym**, które pochłaniają radon z powietrza. Po zakończeniu ekspozycji w laboratorium część przestrzeni obudowy wypełnia się ciekłym scyntylatorem, najczęściej na bazie ksyłenu, który powoduje desorpcję radonu z węgla do objętości scyntylatora. Następnie detektor jest analizowany w laboratorium w liczniku scyntylacyjnym. Wewnątrz pojemnika pojawiają błyski (tzw. scyntylacje) wywołane przez promieniowanie pochodzące z rozpadu radonu, które następnie zamieniane są na impulsy elektryczne, odpowiednio wzmacniane i zliczane. Liczba zarejestrowanych błysków na podstawie wcześniej przeprowadzonej kalibracji układu przeliczana jest na ekspozycję lub średnie stężenie aktywności radonu w czasie ekspozycji. Te detektory są stosunkowo tanie i łatwe w obsłudze, jednak ich stosowanie ogranicza się do krótkoterminowych pomiarów, ze względu na maksymalny czas ekspozycji wynoszący 96 godzin oraz podatność na wpływ wilgoci i temperatury. Ponadto detektory te muszą być dostarczone do laboratorium do analizy niezwłocznie po ekspozycji z uwagi na krótki czas połowicznego rozpadu radonu i jego krótkożyciowych pochodnych.

Detektory elektretowe, trzeci typ detektorów pasywnych, działają na zasadzie rejestrowania jonizacji powietrza wewnątrz komory pomiarowej. Spadek napięcia na powierzchni elektretu, będącego naładowanym teflonowym dyskiem, wynikający z przyciągania jonów powstałych w wyniku jonizacji powietrza, jest proporcjonalny do stężenia radonu. Elektrety są prostym i efektywnym narzędziem do długoterminowych pomiarów w mieszkaniach i miejscach pracy. Chociaż są bardziej kosztowne niż detektory śladowe czy węgiel aktywowany, ich zaletą jest możliwość szybkiego uzyskania wyników po zakończeniu ekspozycji.

2.2.2 Detektory aktywne¹⁷

W przeciwieństwie do detektorów pasywnych, detektory aktywne rejestrują stężenie radonu w czasie rzeczywistym. Wymagają one zasilania elektrycznego oraz kalibracji, co zwiększa ich precyzję, ale także sprawia, że są bardziej skomplikowane w obsłudze. Dzięki możliwości monitorowania dynamicznych zmian stężenia radonu, detektory aktywne są szczególnie przydatne w analizie wpływu wentylacji, zmian temperatury czy sezonowych wahań stężenia.

Jednym z najbardziej popularnych urządzeń aktywnych są **monitory z komorą jonizacyjną**, które rejestrują ilość jonów powstających w wyniku rozpadu radonu. Komory te mogą działać zarówno w trybie pasywnym (powietrze dostaje się na drodze dyfuzji), jak i aktywnym (powietrze jest zasysane przez pompę). Monitory z komorą jonizacyjną dostarczają danych w czasie rzeczywistym, co umożliwia bieżące śledzenie stężenia radonu i szybkie reagowanie na zmiany warunków środowiskowych. Są szczególnie przydatne w krótkoterminowych badaniach oraz w testach skuteczności działań naprawczych.

Scyntylacyjne komory Lucasa, będące jednym z najstarszych rodzajów detektorów, wykorzystują siarczek cynku aktywowany srebrem (ZnS(Ag)) jako materiał scyntylacyjny. Cząstki alfa, emitowane podczas rozpadu radonu, powodują błyski świetlne wewnątrz komory, które są następnie przetwarzane na impulsy elektryczne. Liczba scyntylacji jest proporcjonalna do stężenia aktywności radonu w próbce. Pomimo ograniczeń wynikających z potrzeby częstego czyszczenia komór (pochodne radonu/toronu osadzają się trwale na ściankach komory Lucasa) oraz ich relatywnie niskiej czułości, komory Lucasa wciąż znajdują zastosowanie w badaniach naukowych.

Innym typem detektorów aktywnych są **elektroniczne monitory czasu rzeczywistego** (rys. 3), które mogą wykorzystywać różne technologie pomiarowe, takie jak scyntylacyjne komory, komory jonizacyjne czy detektory półprzewodnikowe. Te nowoczesne urządzenia charakteryzują się łatwością obsługi, możliwością zapisu danych oraz funkcjami zdalnego monitorowania. Dzięki swojej uniwersalności są często stosowane w mieszkaniach, biurach oraz w trakcie kalibracji innych detektorów. Dodatkową zaletą jest możliwość analizowania zgromadzonych danych w celu identyfikacji trendów i zrozumienia wpływu czynników środowiskowych na stężenie radonu.



Rys. 3 Elektroniczny monitor czasu rzeczywistego do pomiarów stężenia radonu – urządzenie umożliwiające bieżące monitorowanie poziomu radonu w powietrzu, źródło: istockphoto.com

2.3 Inne techniki pomiarowe

2.3.1 Metody pomiaru stężenia radonu w powietrzu glebowym¹⁹

Pomiar stężenia radonu w powietrzu glebowym przeprowadza się poprzez umieszczenie sondy na odpowiedniej głębokości w glebie i pobranie próby powietrza za pomocą pompy. Następnie próbka jest analizowana przy użyciu dedykowanego urządzenia pomiarowego.

W powietrzu glebowym występują znaczące ilości zarówno radonu-222, jak i toronu (radonu-220). Aby rozróżnić te izotopy, stosuje się spektrometryczne metody pomiaru, które pozwalają na identyfikację pochodnych rozpadu na podstawie ich energii. Alternatywnym sposobem eliminacji wpływu toronu jest zastosowanie długiego węża w układzie pomiarowym, co pozwala na jego rozpad przed dotarciem do miernika.

Stężenia radonu w powietrzu glebowym mogą być nawet o trzy rzędy wielkości wyższe niż w atmosferze, dlatego użycie standardowych mierników powietrza atmosferycznego może prowadzić do skażenia komory jonizacyjnej i wzrostu tła pomiarowego. Dedykowane urządzenia pomiarowe dla gleby są w takich przypadkach bardziej odpowiednie. Alternatywą dla aktywnych metod pomiarowych są detektory śladowe, które umieszcza się w specjalnych rurach PVC na głębokości do 80 cm. Po kilku dniach ekspozycji detektory są analizowane w laboratorium, co pozwala uzyskać średni wynik z okresu pomiarowego.

¹⁹ Podgórska, Z. "Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie". *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna* 1/2022. Państwowa Agencja Atomistyki, 2022.

2.3.2 Metody pomiaru stężenia aktywności radonu w wodzie¹⁷

Pomiary aktywności radonu w wodzie przeprowadza się dwiema głównymi metodami: pośrednią i bezpośrednią.

W metodzie pośredniej radon jest odgazowywany z próbki wody do układu zamkniętego z podłączonym miernikiem radonu. Powietrze przepuszcza się przez próbkę wody, co powoduje przejście radonu do fazy gazowej. Następnie, po ustabilizowaniu układu, mierzy się stężenie radonu w powietrzu. Do uzyskania końcowego wyniku konieczne jest uwzględnienie objętości próbki, objętości układu pomiarowego, temperatury oraz czasu, jaki upłynął od pobrania próbki.

Druga metoda wykorzystuje licznik ciekłoscyntylacyjny. Próbkę wody miesza się ze scyntylatorem w specjalnej fiolce i pozostawia na około trzy godziny, aby osiągnąć równowagę promieniotwórczą między radonem a jego pochodnymi. Następnie wykonuje się pomiar scyntylacji, gdzie liczba zarejestrowanych błysków świetlnych jest proporcjonalna do stężenia radonu w wodzie.

2.4 Techniki monitorowania poziomu radonu w nowych budynkach

Nowe budynki stanowią wyjątkowe wyzwanie w zakresie monitorowania poziomu radonu. Choć mogą być zaprojektowane i zbudowane z uwzględnieniem środków zapobiegających wnikaniu radonu, rzeczywiste poziomy gazu wewnątrz pomieszczeń zależą od wielu czynników, takich jak lokalizacja, charakterystyka podłoża, szczelność konstrukcji czy sposób użytkowania budynku. Dlatego monitorowanie poziomu radonu w nowych budynkach ma kluczowe znaczenie, szczególnie na etapie oddawania ich do użytku oraz w pierwszych latach eksploatacji^{20,21}.

2.4.1 Projektowanie prewencyjne i monitorowanie na etapie budowy

Podczas projektowania nowych budynków coraz częściej uwzględnia się środki prewencyjne minimalizujące ryzyko występowania podwyższonych stężeń radonu. Zostaną one omówione w kolejnym rozdziale.

Na etapie budowy przeprowadza się krótkoterminowe pomiary stężenia radonu w glebie wokół fundamentów¹⁷. Sondy pomiarowe umieszczane w glebie umożliwiają identyfikację potencjalnych źródeł radonu. W niektórych przypadkach stosuje się spektrometryczne metody analizy, aby odróżnić radon od toronu, które różnią się czasem połowicznego rozpadu i energią emitowanych cząstek.

2.4.2 Pierwsze pomiary w nowych budynkach

Po zakończeniu budowy kluczowe jest przeprowadzenie pomiarów kontrolnych poziomu radonu w pomieszczeniach. Najczęściej wykorzystuje się do tego detektory pasywne, takie jak detektory śladowe typu CR-39, które pozwalają na uzyskanie średnich wartości stężenia radonu w dłuższym okresie⁵. Tego typu pomiary powinny być wykonywane przez co najmniej miesiąc,

²⁰ International Atomic Energy Agency. *Design and Conduct of Indoor Radon Surveys*. Safety Reports Series No. 98. Vienna: IAEA, 2020.

²¹ Radon-Handbuch Deutschland. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz, 2011.

a zaleca się ich przeprowadzenie w okresie grzewczym (zimowym), kiedy budynki są szczelnie zamknięte, co sprzyja akumulacji radonu.

Pomiary powinny obejmować pomieszczenia znajdujące się w kontakcie z gruntem, takie jak piwnice, oraz inne przestrzenie o największym czasie przebywania. Wyniki pomiarów pozwalają ocenić, czy konieczne są dodatkowe działania prewencyjne lub remediacyjne.

2.4.3 Długoterminowe monitorowanie poziomu radonu

Nowe budynki mogą charakteryzować się zmiennym poziomem radonu w pierwszych latach użytkowania. Dzieje się tak z powodu osiadania fundamentów, zmian w szczelności budynku, a także stopniowego zmniejszania aktywności promieniotwórczej materiałów budowlanych. Dlatego ważne jest długoterminowe monitorowanie poziomów radonu w cyklicznych odstępach czasu.

Do długoterminowego monitorowania stosuje się zarówno detektory pasywne, jak i aktywne. Detektory aktywne, takie jak elektroniczne monitory, są szczególnie przydatne do śledzenia dynamicznych zmian stężenia radonu w budynkach wyposażonych w systemy wentylacyjne lub inne mechanizmy kontrolujące przepływ powietrza. Dane z monitorów mogą pomóc w optymalizacji tych systemów, zapewniając efektywną wymianę powietrza bez strat ciepła⁵.

2.4.4 Specjalistyczne techniki monitorowania

W nowych budynkach często wykorzystuje się specjalistyczne techniki monitorowania, które pozwalają na szczegółowe badanie źródeł radonu i jego rozprzestrzeniania się wewnątrz budynku. Należy do nich m.in. radon-sniffing²² – metoda lokalizacji punktowych źródeł radonu, takich jak nieszczelności w fundamentach czy ścianach, za pomocą urządzeń zasysających powietrze i analizujących jego skład.

2.5. Częstotliwość i metody prowadzenia pomiarów

Regularne i dokładne pomiary poziomu radonu są niezbędne zarówno dla ochrony zdrowia, jak i dla spełnienia wymogów prawnych. W Polsce kwestia częstotliwości oraz metod prowadzenia pomiarów jest regulowana przez ustawę Prawo atomowe¹, które określa zarówno obowiązki właścicieli i użytkowników budynków, jak i standardy techniczne dotyczące pomiarów.

2.5.1 Obowiązki wynikające z ustawy – Prawa atomowego

Zgodnie z ustawą Prawo atomowe, w miejscach pracy zlokalizowanych:

- wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, gdzie średnioroczne stężenie radonu może przekraczać poziom odniesienia 300 Bq/m³,
- pod ziemią (np. w kopalniach czy tunelach),
- w miejscach związanych z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach o wysokim stężeniu radonu,

pracodawcy są zobowiązani do zapewnienia regularnych pomiarów stężenia radonu (Bq/m³) lub stężenie energii potencjalnej alfa produktów rozpadu radonu.

²² Brodhead, Bill. "Use of Sniffers in Radon Mitigation". WPB Enterprises, Inc., <https://www.wpb-radon.com/pdf/Use%20of%20Radon%20Sniffers%2021.pdf>, dostęp: grudzień 2024

Ustawa określa, że poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu w powietrzu wynosi 300 Bq/m³. Ustawa Prawo atomowe definiuje wartość średniorocznego stężenia radonu jako oszacowaną na podstawie pomiarów tego stężenia w okresie nie krótszym niż jeden miesiąc, odpowiadającą średniemu stężeniu radonu w powietrzu w okresie roku kalendarzowego. W przypadku przekroczenia tego poziomu pracodawca musi podjąć działania mające na celu zmniejszenie narażenia pracowników, a także zapewnić ich regularne informowanie o wynikach pomiarów i podejmowanych działaniach. Należy podkreślić, że obowiązek pomiaru dotyczy każdego roku kalendarzowego, niezależnie od wyników poprzednich pomiarów.

Stężenie energii potencjalnej alfa i jego pomiar

Stężenie energii potencjalnej alfa odnosi się do energii emitowanej przez cząstki alfa w wyniku rozpadu pochodnych radonu (Rn-222) w powietrzu. Jest to kluczowy wskaźnik, który pozwala określić rzeczywiste narażenie na promieniowanie alfa w miejscu pracy lub w budynku mieszkalnym. Pochodne radonu, takie jak polon-218, ołów-214 i bizmut-214, w trakcie swojego rozpadu uwalniają cząstki alfa, które przyczyniają się do potencjalnych zagrożeń zdrowotnych, zwłaszcza w przypadku ich inhalacji, o czym można przeczytać więcej w Rozdziale 1. Pomiar stężenia energii potencjalnej alfa odbywa się na dwa sposoby:

1. bezpośrednio – wykorzystuje się specjalistyczne urządzenia, które rejestrują całkowitą energię cząstek alfa emitowanych podczas rozpadu pochodnych radonu. Metoda ta jest stosowana głównie w warunkach laboratoryjnych lub w miejscach pracy o podwyższonym ryzyku narażenia;
2. pośrednio – w tym przypadku stężenie energii potencjalnej alfa można wyliczyć na podstawie stężenia radonu w powietrzu (Bq/m³) oraz równowagi pomiędzy radonem a jego pochodnymi.

2.5.2 Zalecana częstotliwość pomiarów

Zgodnie z wytycznymi Światowej Organizacji Zdrowia (WHO)¹⁷ i Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA)²³, długoterminowe pomiary, trwające 12 miesięcy, są najbardziej wiarygodne dla określenia średniorocznego stężenia radonu. W budynkach o niskim ryzyku zaleca się wykonywanie pomiarów co pięć lat. W obszarach o podwyższonym ryzyku pomiary powinny być realizowane częściej, najlepiej co rok. Pomiary powinny odbywać się w okresie grzewczym, gdy budynki są bardziej szczelne, co sprzyja akumulacji radonu, a tym samym pozwala na uzyskanie bardziej reprezentatywnych wyników.

2.5.3 Metody prowadzenia pomiarów

Pomiary mogą być realizowane przy użyciu różnych metod i urządzeń w zależności od celu badania oraz dostępnych zasobów. Najczęściej stosowane są:

- **długoterminowe pomiary pasywne** – wykonywane za pomocą detektorów śladowych typu CR-39, które zapewniają wiarygodne wyniki średniorocznych stężeń radonu;

²³ Safety Reports Series Nr 98, "Design and Conduct of Indoor Radon Surveys", Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, Wiedeń, 2020

- **krótkoterminowe pomiary aktywne** – wykorzystujące monitory z komorą jonizacyjną lub scyntylacyjne komory Lucasa. Pozwalają one na szybkie uzyskanie wyników, jednak ich interpretacja wymaga ostrożności ze względu na zmienność stężenia radonu w czasie.

Aby zapewnić jakość danych, detektory powinny być umieszczane w reprezentatywnych miejscach, z dala od okien, wentylacji i źródeł ciepła, zgodnie z wytycznymi IAEA i WHO. Kontrola jakości obejmuje również kalibrację urządzeń oraz weryfikację wyników poprzez pomiary podwójne.

2.6 Jak odczytywać i interpretować wyniki pomiarów?

Odczyt i interpretacja wyników pomiarów radonu to kluczowy etap procesu monitorowania, który pozwala na ocenę ryzyka i podjęcie odpowiednich działań prewencyjnych lub naprawczych. Wyniki pomiarów powinny być analizowane z uwzględnieniem kontekstu – lokalizacji, charakterystyki budynku oraz metody pomiarowej.

2.6.1 Jednostki i zakres wyników pomiarów

Wyniki pomiarów stężenia radonu w powietrzu wyrażane są w **Becquerelach na metr sześcienny (Bq/m^3)**, co oznacza ilość rozpadów promieniotwórczych radonu w jednym metrze sześciennym powietrza na sekundę.

W Polsce poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu w powietrzu wynosi **300 Bq/m^3** , zgodnie z ustawą – Prawo atomowe. Wyniki można podzielić na następujące kategorie¹⁷:

- **poniżej 100 Bq/m^3** – stężenie uznawane za niskie, nie wymagające działań.
- **$100\text{--}300 \text{ Bq/m}^3$** – stężenie umiarkowane, które może stanowić ryzyko przy długotrwałej ekspozycji.
- **powyżej 300 Bq/m^3** – stężenie wymagające podjęcia działań prewencyjnych lub naprawczych.

2.6.2. Czynniki wpływające na odczyt i interpretację wyników

Interpretacja wyników wymaga uwzględnienia następujących czynników:

- **metody pomiaru;**
- **warunki środowiskowe:** wilgotność, temperatura i przeciągi mogą wpływać na dokładność wyników;
- **okres pomiaru:** długoterminowe pomiary (co najmniej 3 miesiące) są bardziej reprezentatywne niż krótkoterminowe (2–7 dni), które wymagają korekty sezonowej.

2.6.3 Dawka skuteczna od radonu

Obliczanie dawki skutecznej od radonu jest kluczowe w kontekście oceny narażenia osób przebywających w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy. Dawka skuteczna pozwala na określenie rzeczywistego ryzyka dla zdrowia wynikającego z ekspozycji na promieniowanie alfa emitowane przez radon i jego pochodne. Jest to szczególnie istotne w miejscach pracy,

gdzie może zachodzić konieczność zakwalifikowania pracowników do kategorii A, jeśli dawka skuteczna przekracza określony poziom. Dotyczy to pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy wymienionych w art. 23c ust. 1 pkt 1 Prawo atomowe (np. piwnice, parter na „terenach radonowych”), w których:

- stężenie radonu przekracza 300 Bq/m³,
- dawka skuteczna nie przekracza 6 mSv rocznie.

Dawkę skuteczną E [Sv] od radonu wyznacza się na podstawie prostej zależności:

$$E = C_{\alpha} \cdot t \cdot k$$

gdzie: C_{α} - stężenie potencjalnej energii alfa [J/m³], t – czas narażenia [h], k – współczynnik konwersji [(Sv·m³)/(J·h)]. Wartość współczynnika konwersji różni się w zależności od środowiska narażenia²⁴:

- 1,1 (Sv·m³)/(J·h) dla radonu w budynkach mieszkalnych,
- 1,4 (Sv·m³)/(J·h) dla radonu na stanowiskach pracy,
- 0,5 (Sv·m³)/(J·h) dla toronu na stanowiskach pracy.

Stężenie potencjalnej energii alfa wyznacza się przez pomiar lub obliczenie potencjalnej energii alfa jako całkowitej energii cząstek alfa emitowanych podczas rozpadu pochodnych radonu-222 w szeregu promieniotwórczym aż do ołowiu-210 (z wyłączeniem tego izotopu) oraz rozpadu pochodnych toronu (radon-220) w szeregu promieniotwórczym aż do ołowiu-208, wyrażonej w dżulach (J).

2.6.4 Interpretacja wyników pomiarów w kontekście zdrowotnym oraz procedura postępowania

Ryzyko zdrowotne związane z ekspozycją na radon rośnie proporcjonalnie do poziomu stężenia tego gazu oraz czasu przebywania w środowisku o podwyższonym stężeniu. Długotrwałe narażenie na radon jest jedną z głównych przyczyn raka płuc, szczególnie w przypadku osób narażonych zawodowo lub przebywających przez wiele godzin w pomieszczeniach z wysokim stężeniem tego gazu. Zgodnie z wytycznymi WHO, poziom odniesienia wynoszący 300 Bq/m³ powinien być traktowany jako próg wymagający podjęcia działań prewencyjnych i naprawczych¹⁷.

Wyniki pomiarów należy zawsze interpretować w kontekście czasu przebywania w monitorowanym pomieszczeniu. Wysokie wyniki, przekraczające 300 Bq/m³ w miejscach takich jak sypialnie, biura lub inne pomieszczenia o dużej intensywności użytkowania, wskazują na konieczność podjęcia natychmiastowych działań ograniczających narażenie.

2.6.5 Znaczenie dokumentacji wyników

Pamiętaj o rzetelnym prowadzeniu dokumentacji wyników pomiarów radonu. Każdy pomiar powinien być szczegółowo opisany w raporcie, który zawiera informacje o zastosowanej metodzie pomiarowej, czasie ekspozycji oraz dokładnej lokalizacji (w tym piętro i pomieszczenie), gdzie przeprowadzono pomiary. Wynik stężenia radonu, wyrażony w Bq/m³,

²⁴ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. poz. 1657).

musi być podany wraz z marginesem błędu, co umożliwia precyzyjną interpretację danych. Ważne jest również uwzględnienie warunków środowiskowych podczas pomiaru, takich jak temperatura, wilgotność czy szczelność budynku.

Regularne prowadzenie takiej dokumentacji jest elementem zapewnienia jakości pomiarów oraz monitorowania skuteczności wprowadzonych środków zaradczych. Dokumentacja powinna być przechowywana przez właściciela budynku lub pracodawcę oraz powinna być dostępna na żądanie odpowiednich organów nadzoru czy pracowników.

2.7 Identyfikacja potencjalnych zagrożeń

Identyfikacja potencjalnych zagrożeń jest kolejnym krokiem po wykonaniu pomiarów stężenia radonu i analizie uzyskanych wyników. To etap, który pozwala zrozumieć, jakie czynniki wpływają na obecność radonu w budynku oraz jakie ryzyko niesie jego akumulacja w powietrzu. Na podstawie wyników pomiarów i charakterystyki budynku można oszacować, które obszary i pomieszczenia wymagają interwencji, a także dobrać odpowiednie działania prewencyjne lub remediacyjne.

2.8 Znaczenie akredytacji

Akredytacja odgrywa kluczową rolę w procesie monitorowania i pomiarów stężenia radonu, zapewniając wiarygodność wyników oraz zgodność działań z przyjętymi standardami. Dlatego poszukując laboratorium badającego stężenie radonu w budynkach, warto skupić się na tych, które posiadają adekwatny zakres akredytacji. To formalne potwierdzenie kompetencji laboratorium do prowadzenia określonych badań gwarantuje, że pomiary są realizowane zgodnie z uznanymi normami międzynarodowymi, a ich wyniki można uznać za rzetelne i powtarzalne.

W kontekście pomiarów radonu akredytacja stanowi dowód, że laboratorium działa zgodnie z normą ISO/IEC 17025, która określa wymagania dotyczące kompetencji technicznych laboratoriów badawczych²⁵. Obejmuje to stosowanie skalibrowanych urządzeń, odpowiednio przeszkolony personel oraz przestrzeganie precyzyjnie określonych procedur.

Korzystanie z usług akredytowanych laboratoriów przynosi wiele korzyści użytkownikom. Po pierwsze, gwarantuje, że wyniki pomiarów są wiarygodne, co ma kluczowe znaczenie przy podejmowaniu decyzji dotyczących działań prewencyjnych lub naprawczych. Po drugie, zapewnia zgodność stosowanych metod pomiarowych z międzynarodowymi standardami, co minimalizuje ryzyko błędów i zwiększa pewność co do dokładności wyników. Raporty przygotowane przez akredytowane laboratoria są również bardziej szczegółowe i zawierają informacje, które ułatwiają interpretację wyników, takie jak margines błędu czy warunki środowiskowe podczas pomiaru.

²⁵ International Organization for Standardization. "ISO/IEC 17025 – Testing and Calibration Laboratories".

W Polsce znaczenie akredytacji jest dodatkowo podkreślone w przepisach Prawa atomowego¹ (art. 23d. pkt 4), które wymaga, aby pomiary stężenia radonu w miejscach pracy były realizowane przez laboratoria spełniające określone standardy jakości.

Warto zaznaczyć, że samo zapewnienie pomiarów stężeń radonu stanowi tylko wstępny element realizacji przez kierowników jednostki obowiązków zawartych w art. 23c Prawa atomowego. Poszczególne ustępy tego artykułu określają bowiem dalsze powinności, w zakresie optymalizacyjno-informacyjnym, administracyjnoprawnym (powiadomienie o wykonywaniu działalności związanej z narażeniem), jak i związane z ewentualną koniecznością właściwej, dokonanej z udziałem uprawnionego lekarza i inspektora ochrony radiologicznej, kategoryzacji pracowników do właściwej kategorii narażenia oraz wyznaczenia terenów nadzorowanych lub kontrolowanych.

Pozostaje poza sporem, że powyższe obowiązki, w szczególności w zakresie dokonania przeliczenia stężeń radonu na otrzymane przez pracowników (uczniów, art. 32a w związku z art. 23c ust. 2 ustawy Prawo atomowe) dawki promieniowania jonizującego wykraczają poza kompetencje kierowników jednostek i każdorazowo warto w tym zakresie poddać rozważeniu skorzystanie z usług zewnętrznych w formie „audytu radonowego”.

Rozdział 3 Metody minimalizacji ryzyka związanego z radonem

Stężenie radonu można obniżyć do bezpiecznego poziomu w każdym budynku, niezależnie od wstępnych pomiarów. Skuteczność działań zależy jednak od właściwego doboru strategii w zależności od charakterystyki obiektu i stężenia radonu w jego wnętrzu. **Dwa główne sposoby redukcji radonu to: dostarczenie świeżego powietrza z zewnątrz, co pozwala na jego rozrzedzenie, oraz zapobieganie przedostawaniu się radonu do wnętrza budynku.**

Zarówno w przypadku nowych, jak i istniejących budynków kluczowe jest podejście systemowe, obejmujące strategię pięciu kroków²⁶:

1. **określenie poziomu radonu i warunków środowiskowych** – każdy budynek znajduje się w specyficznym otoczeniu, które wpływa na poziom ryzyka. Ważnym krokiem jest przeprowadzenie dokładnych pomiarów stężenia radonu w budynku, które pozwalają na ocenę stopnia zagrożenia. Pomiar ten powinien być wykonany w okresie grzewczym, kiedy budynki są zamknięte, aby uzyskać najbardziej reprezentatywne wyniki. Dodatkowo, analiza warunków lokalnych, takich jak poziomy radonu w glebie, obecność wód gruntowych czy rodzaj użytych materiałów budowlanych, pozwala na określenie potencjalnych źródeł radonu i jego sposobów przedostawania się do wnętrza;
2. **planowanie działań** – na etapie planowania wiele decyzji może mieć kluczowe znaczenie dla zmniejszenia stężenia radonu, np. unikanie przekształcania piwnic w przestrzeń mieszkalną czy miejsca pracy, właściwe prowadzenie instalacji rurowych i kabli, a także wybór odpowiednich materiałów budowlanych;
3. **uszczelnianie** – jednym z podstawowych działań prewencyjnych jest uszczelnianie konstrukcji budynku, w tym szczelin i przejść instalacyjnych, takich jak rury i kanały wentylacyjne, czy utrzymywanie nadciśnienia w pomieszczeniach. Działania te minimalizują przepływ radonu z gleby do wnętrza;
4. **usuwanie radonu** – gdy radon przedostanie się do budynku, można go skutecznie usuwać za pomocą systemów wentylacyjnych lub systemów odprowadzania radonu spod fundamentów;
5. **monitorowanie** – regularny monitoring poziomu radonu we wnętrzach za pomocą urządzeń pomiarowych jest niezbędny, aby ocenić skuteczność podjętych działań i zapewnić utrzymanie bezpiecznych poziomów.

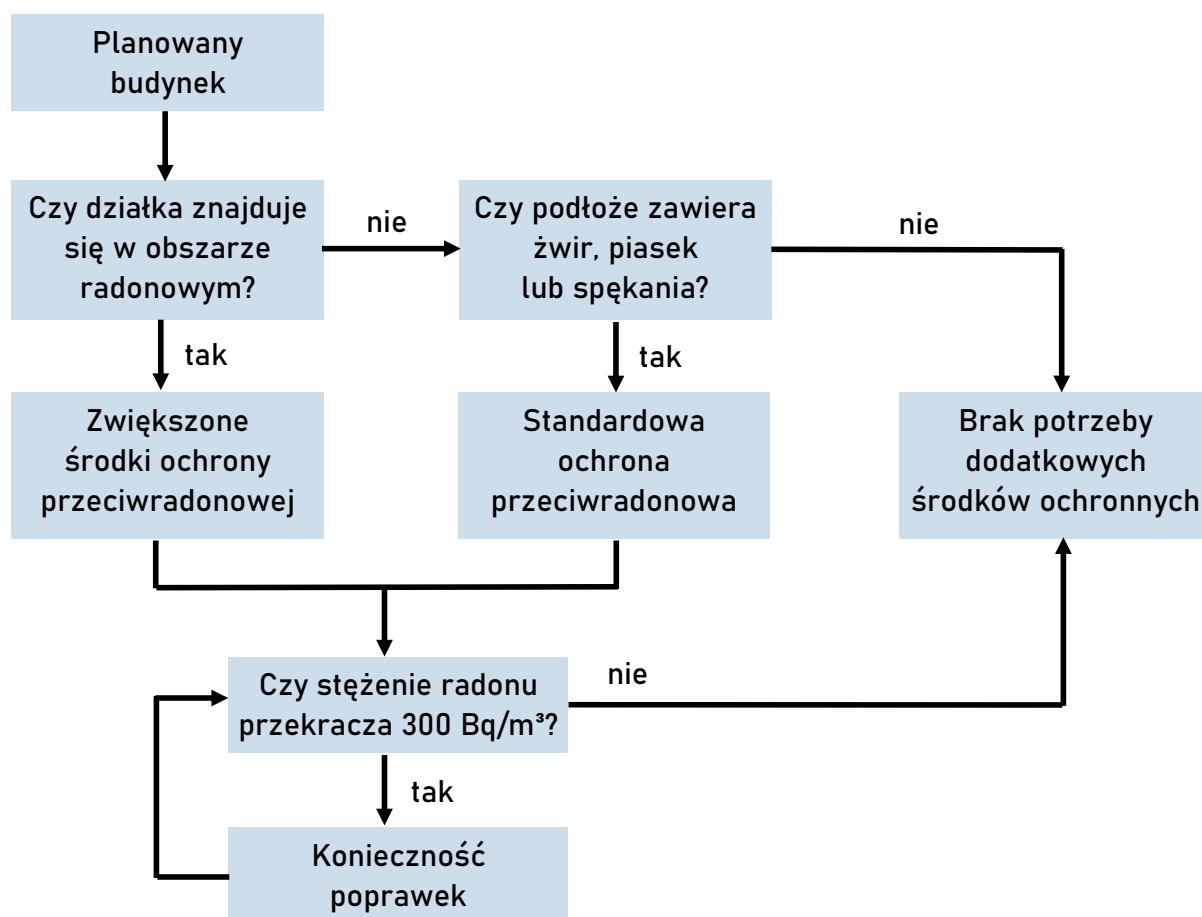
Podczas planowania i zarządzania projektami związanymi z budową nowych budynków lub modernizacją istniejących podejmowane są liczne decyzje mające bezpośredni wpływ na akumulację radonu. Kompleksowe podejście pozwala nie tylko zmniejszyć ryzyko, ale również utrzymać bezpieczne warunki przez cały okres użytkowania budynku.

²⁶ "Swiss Radon Handbook". Radiological Protection Division, Radiological Risk Section. Swiss Federal Office of Public Health. Bern, 2000

3.1 Nowe budynki

3.1.1 Projektowanie budynków w strefach o wysokim poziomie radonu

Projektowanie nowych budynków wymaga wdrożenia systematycznego procesu oceny ryzyka radonowego oraz dostosowania odpowiednich środków ochronnych do lokalnych warunków geologicznych. Diagram (rys. 1) procedury ochrony przeciwradonowej ilustruje kolejne kroki, które należy podjąć, aby zapewnić skuteczną ochronę przed radonem.



Rys. 1 Schemat procedury planowania i wdrażania ochrony przeciwradonowej w nowych budynkach²⁶

Pierwszym krokiem jest ustalenie, czy działka znajduje się w obszarze radonowym. Jeśli tak, konieczne jest zastosowanie zwiększonych środków ochrony przeciwradonowej, takich jak zaawansowane membrany, aktywne systemy odprowadzania radonu oraz szczelne fundamenty. W takich przypadkach działania mają na celu maksymalne ograniczenie przenikania radonu do wnętrza budynku.

Jeżeli działka nie jest klasyfikowana jako obszar radonowy, kolejnym etapem jest ocena właściwości gleby. Podłoże o wysokiej przepuszczalności, takie jak żwir, piasek lub spękania, zwiększa ryzyko migracji radonu. W takich warunkach stosuje się standardowe środki ochrony przeciwradonowej, obejmujące m.in. membrany o umiarkowanej szczelności, drenaże oraz podstawowe uszczelnienia fundamentów.

W przypadku terenów, które nie są obszarami radonowymi, a gleba nie wykazuje szczególnej przepuszczalności, dodatkowe środki ochronne mogą być zbędne. Jednak po zakończeniu budowy, niezależnie od wstępnej klasyfikacji terenu, zaleca się przeprowadzenie pomiarów stężenia radonu we wnętrzach. Jeśli wartości przekraczają poziom 300 Bq/m³ (poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu²⁷), konieczne jest wdrożenie poprawek, takich jak wzmocnienie uszczelnień lub instalacja dodatkowych systemów wentylacyjnych.

Podsumowując, proces projektowania oparty na szczegółowej ocenie ryzyka radonowego i odpowiednim doborze technologii ochronnych pozwala na skuteczne ograniczenie narażenia mieszkańców na radon. Dzięki hierarchii działań przedstawionej w diagramie możliwe jest dopasowanie środków do lokalnych warunków i specyfiki budynku.

3.1.2 Inżynierskie rozwiązania przeciwradonowe w nowym budownictwie^{28,29,30}

Efektywne zapobieganie przenikaniu radonu do wnętrza budynków wymaga integracji zaawansowanych rozwiązań inżynierskich z najlepszymi praktykami budowlanymi. W nowym budownictwie, gdzie środki ochrony mogą być wdrażane na etapie projektowania i budowy, istnieje możliwość skutecznego zarządzania ryzykiem związanym z radonem przy jednoczesnym ograniczeniu przyszłych kosztów naprawczych.

Dobór odpowiednich materiałów budowlanych

Kluczowym elementem ochrony przed radonem jest wybór materiałów o niskiej przepuszczalności gazów, takich jak beton o wysokiej gęstości, cegły ceramiczne czy szczelne bloczki betonowe. Materiały te stanowią barierę dla migracji gazu przez fundamenty i ściany budynku. Dodatkowo, należy unikać stosowania materiałów budowlanych pochodzących z terenów o wysokiej zawartości takich pierwiastków, jak uran czy tor, które mogą być źródłem dodatkowego radonu.

Szczelne fundamenty i połączenia konstrukcyjne

Fundamenty są najczęstszą drogą przenikania radonu do wnętrza budynków. Dlatego szczególny nacisk należy położyć na ich prawidłowe wykonanie i uszczelnienie. Kluczowe aspekty obejmują:

- **szczelne połączenia między płytą fundamentową a ścianami** – szczególnie istotne w przypadku fundamentów betonowych, gdzie nieszczelne złącza mogą stanowić główną drogę przenikania gazu. Wszystkie miejsca łączeń powinny być starannie uszczelnione przy użyciu trwałych, elastycznych materiałów, takich jak masy uszczelniające na bazie silikonu lub akrylu;

²⁷ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277).

²⁸ International Atomic Energy Agency, Protection Against Exposure Due to Radon Indoors and Gamma Radiation from Construction Materials — Methods of Prevention and Mitigation, IAEA-TECDOC-1951, IAEA, Vienna (2021)

²⁹ H. Zeeb, F. Shannoun (red.). "WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective". World Health Organization, Geneva 2009.

³⁰ M. Bartholomäus (red.). "Radon-Handbuch Deutschland". Bundesamt für Strahlenschutz. Salzgitter, 2019

- **zastosowanie pełnych płyt fundamentowych** – w obszarach radonowych zaleca się stosowanie jednolitych płyt fundamentowych o grubości co najmniej 30 cm zbrojonych stalą. Tego rodzaju fundamenty są bardziej odporne na przenikanie gazów niż fundamenty punktowe lub pasmowe. Szczególną uwagę należy zwrócić na dokładne uszczelnienie miejsc styku płyty z pionowymi ścianami fundamentowymi;
- **drenaż i poduszki żwirowe** – w strefach o wysokiej przepuszczalności gleby warto zastosować warstwy żwirowe pod fundamentami, które umożliwiają naturalne odprowadzanie radonu na zewnątrz. Poziomy drenaż można dodatkowo połączyć z pionową warstwą żwirową wokół zewnętrznych ścian fundamentowych, co poprawia wymianę powietrza pod budynkiem i redukuje koncentrację radonu;
- **zabezpieczenie miejsc przejść rur, kabli i innych instalacji technicznych:** każde przejście przez fundamenty stanowi potencjalną drogę infiltracji radonu. W miejscach tych należy stosować szczelne przepusty wykonane z trwałych materiałów oraz elastyczne uszczelki. Zaleca się unikanie nadmiernej liczby takich przejść w fundamentach, a w razie konieczności – grupowanie ich w jednej strefie, co ułatwia uszczelnianie.

Regularne kontrole jakości wykonania fundamentów oraz stosowanie nowoczesnych technologii uszczelniających pozwalają uniknąć problemów związanych z nieszczelnościami, takich jak pęknięcia konstrukcyjne. W miejscach szczególnie narażonych na przenikanie radonu, np. na terenach ze zboczami lub wysokim poziomem wód gruntowych, szczególnie istotne jest zapewnienie szczelności konstrukcji fundamentów oraz ich odpowiedniego wzmocnienia.

Membrany przeciwradonowe

Membrany przeciwradonowe są istotnym elementem ochrony przed migracją radonu do wnętrza budynków. *Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (International Atomic Energy Agency, IAEA)* podkreśla³⁹, że ich właściwe zastosowanie może znacząco obniżyć przenikanie gazu przez fundamenty i przyległe konstrukcje. Membrany te, zwykle wykonane z materiałów takich jak polietylen o dużej gęstości, tworzą barierę fizyczną pomiędzy gruntem a wnętrzem budynku.

Membrany przeciwradonowe powinny charakteryzować się wysoką odpornością na przenikanie gazów, trwałością oraz łatwością instalacji. Membrany muszą być szczelnie łączone na złączach i wokół przejść instalacyjnych, takich jak rury i kable, aby zapobiec powstawaniu nieszczelności.

Grubość membrany nie zawsze jest najważniejszym czynnikiem – liczy się przede wszystkim jej wytrzymałość mechaniczna i łatwość dopasowania do konstrukcji budynku. Cieńsze materiały mogą być bardziej elastyczne i łatwiejsze w montażu, podczas gdy grubsze membrany mogą zapewniać większą trwałość w trudnych warunkach gruntowych. Membrany muszą być odporne na gnienie, kompresję i wysychanie, co jest kluczowe dla długoterminowej ochrony przeciwradonowej. Zaleca się konsultacje z ekspertami na etapie planowania, aby dobrać materiały odpowiednie do lokalnych warunków geologicznych.

Aby zapewnić skuteczność membran przeciwradonowych²⁸:

- należy zastosować zakładki o szerokości co najmniej 300 mm na połączeniach między odcinkami membrany;
- wszystkie połączenia muszą być uszczelniane trwałymi materiałami, które są zgodne z powierzchnią membrany i materiałem konstrukcyjnym fundamentów;
- membrana powinna być zainstalowana na całej powierzchni fundamentów, w tym pod płytą podłogową i wokół ścian fundamentowych.

Jednym z najczęstszych problemów podczas instalacji membran są nieszczelności powstałe na skutek niewłaściwego łączenia membrany wokół przejść instalacyjnych lub w miejscach złożonych konstrukcji fundamentów. W takich przypadkach IAEA zaleca zastosowanie dodatkowych uszczelnaczy oraz kontrolę jakości podczas instalacji itd.

Membrany przeciwradonowe powinny być stosowane w połączeniu z innymi środkami ochrony, takimi jak wentylacja podpodłogowa czy szczelne fundamenty, co pozwala osiągnąć najlepsze wyniki. Takie podejście hybrydowe jest szczególnie skuteczne w rejonach o wysokim stężeniu radonu w glebie.

Systemy wentylacji podpodłogowej

Systemy wentylacyjne to kolejny ważny element w ochronie przed radonem, szczególnie w rejonach o wysokim stężeniu tego gazu w glebie. Istnieją różne technologie wentylacyjne, które mogą być stosowane w nowym budownictwie, wskazując zarówno na ich zalety, jak i ograniczenia. Wentylacja podpodłogowa odprowadza radon spod budynku, zanim przedostanie się on do wnętrza, co czyni ją jedną z najskuteczniejszych metod redukcji stężenia radonu.

Wyróżniamy dwa rodzaje systemów wentylacyjnych.

- **systemy pasywne** – opierają się na naturalnej konwekcji powietrza. Gazy spod fundamentów przemieszczają się przez sieć rur w kierunku atmosfery, dzięki różnicy ciśnień i temperatur. Ich zaletą jest brak konieczności stosowania urządzeń mechanicznych, co oznacza mniejsze koszty instalacji i eksploatacji. Jednak ich efektywność może być ograniczona w przypadku słabej wentylacji naturalnej lub niewystarczającej różnicy ciśnień;
- **systemy aktywne** – wykorzystują wentylatory do wymuszenia przepływu powietrza spod budynku, co pozwala na bardziej efektywne odprowadzanie radonu. Systemy te mogą zmniejszyć stężenie radonu wewnątrz budynku o 90% lub więcej, nawet w rejonach o wysokim stężeniu gazu w glebie. Systemy aktywne wymagają jednak regularnej konserwacji oraz zasilania elektrycznego, co generuje dodatkowe koszty.

IAEA wskazuje kilka kluczowych czynników, które determinują skuteczność systemów wentylacyjnych²⁸, w szczególności są to:

- natężenie przepływu powietrza – im większy przepływ, tym skuteczniejsza redukcja radonu. Zaleca się, aby przepływ był dostosowany do poziomu stężenia radonu oraz wielkości budynku;

- szczelność konstrukcji – systemy wentylacyjne działają najlepiej w budynkach o szczelnych fundamentach, gdzie minimalizowane są niekontrolowane przepływy gazów z gruntu;
- projekt instalacji – wentylacja podpodłogowa powinna być zaprojektowana z uwzględnieniem lokalnych warunków geologicznych oraz charakterystyki budynku.

W praktyce najlepsze rezultaty osiąga się, łącząc systemy wentylacyjne z innymi technologiami, takimi jak membrany przeciwradonowe i szczelne fundamenty.

Prawidłowe prowadzenie instalacji

Instalacje techniczne, takie jak rury kanalizacyjne, wentylacyjne czy elektryczne, często przecinają fundamenty i ściany budynków, tworząc potencjalne drogi infiltracji radonu. Prawidłowe prowadzenie instalacji wymaga:

- stosowania szczelnych przepustów instalacyjnych,
- unikania nadmiernej liczby otworów w fundamentach,
- oraz precyzyjnego uszczelnienia każdej przepusty za pomocą materiałów odpornych na działanie gazów.

Inne środki ochrony przeciwradonowej

Jednym z elementów ochrony przeciwradonowej jest **unikanie podciśnienia w budynkach**, które może zwiększać infiltrację radonu. Podciśnienie powstaje najczęściej na skutek działania wentylatorów w łazienkach, kuchniach czy kominkach bez wystarczającego dopływu świeżego powietrza. Dlatego projektowanie systemów wentylacyjnych powinno uwzględniać równowagę między dopływem a wyciągiem powietrza. W budynkach o wysokim ryzyku **zaleca się stosowanie systemów klimatyzacyjnych z automatyczną wymianą powietrza**, które skutecznie redukują stężenie radonu, o ile są prawidłowo zaprojektowane i regularnie konserwowane. Dobry efekt przynosi też utrzymywanie stałego lekkiego nadciśnienia w pomieszczeniach zagrożonych gromadzeniem się w nich radonu.

Podgrzewane podłogi, choć zapewniają komfort cieplny, **mogą prowadzić do rozszerzania się pęknięć w fundamentach**, zwiększając ryzyko przenikania radonu. W takich przypadkach konieczne jest stosowanie dodatkowych uszczelnień, takich jak folie izolacyjne lub powłoki bitumiczne, które wzmacniają ochronę fundamentów. Izolacje termiczne wnikające w grunt mogą natomiast tworzyć drogi infiltracji gazu. Aby temu zapobiec, należy je starannie uszczelniać lub przerwać w odpowiednich miejscach, aby nie stanowiły kanałów dla radonu.

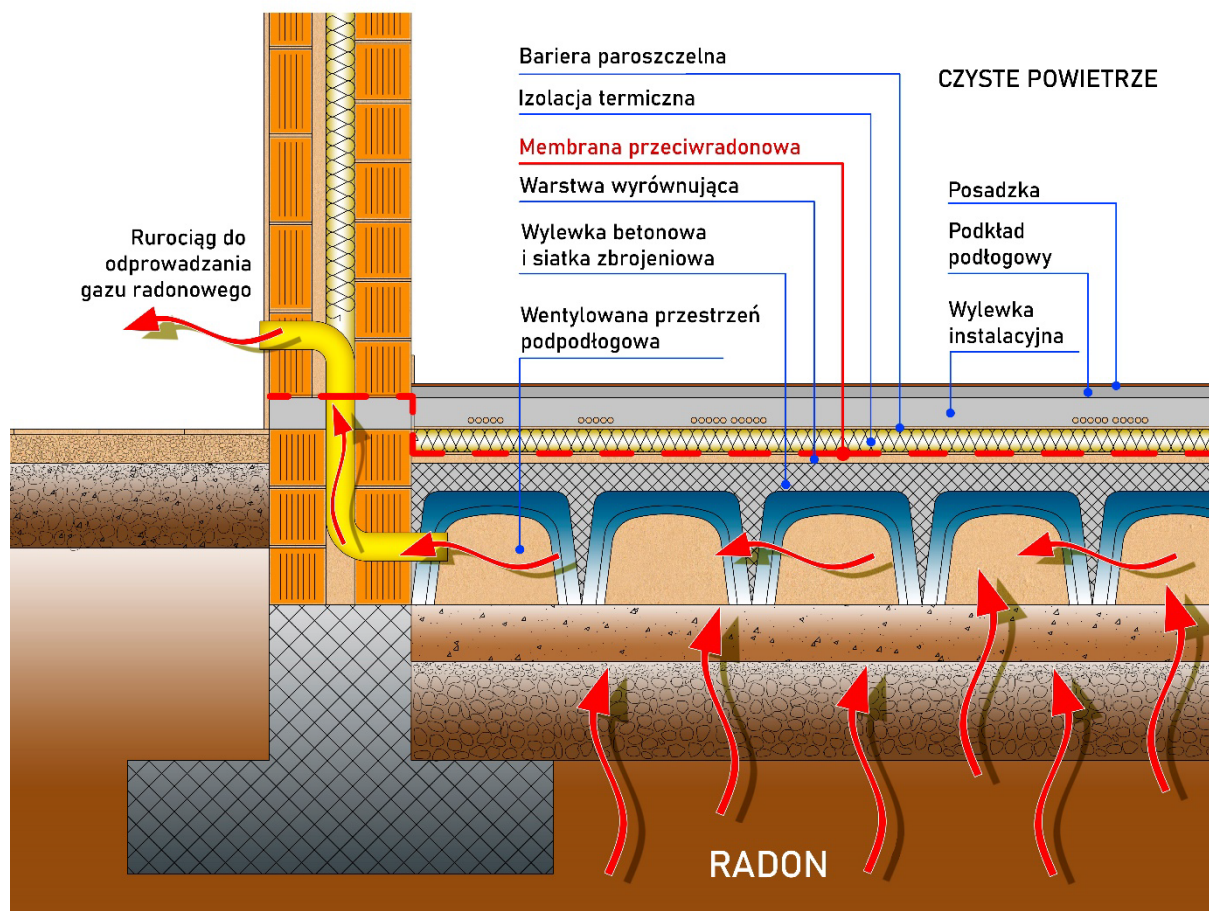
Dodatkowe środki ochronne obejmują **uszczelnianie drzwi i trapdoorów**, zwłaszcza tych prowadzących do piwnic lub innych pomieszczeń o potencjalnie wyższym stężeniu radonu. Drzwi powinny być wyposażone w elastyczne uszczelki oraz mechanizmy automatycznego zamykania, które zapobiegają przedostawaniu się gazu do pomieszczeń mieszkalnych. Ważne jest również **staranne uszczelnianie progów**, aby zapewnić pełną szczelność konstrukcji.

Połączenie technologii

Najlepsze rezultaty w ochronie przed radonem można osiągnąć poprzez zintegrowane podejście, łączące różne technologie, takie jak membrany przeciwradonowe, wentylacja podpodłogowa czy szczelne fundamenty. W nowym budownictwie, gdzie koszty takich

rozwiązań są relatywnie niskie w porównaniu do ich wprowadzania w istniejących budynkach, integracja tych środków jest szczególnie zalecana.

Rys. 2 przedstawia schemat zastosowania różnych technologii ochrony przeciwradonowej w nowym budownictwie. Zintegrowane podejście, obejmujące membrany przeciwradonowe, wentylowaną przestrzeń podpodłogową oraz szczelne fundamenty, pozwala skutecznie ograniczyć przenikanie radonu z gruntu do wnętrza budynku. Połączenie tych technologii zapewnia nie tylko bezpieczeństwo mieszkańców, ale także długotrwałą efektywność ochrony.



Rys. 2 Przekrój fundamentu z zastosowaniem membrany przeciwradonowej, wentylacji podpodłogowej oraz systemów odprowadzających radon, źródło: istockphoto, opracowanie własne autora

3.1.4 Monitorowanie poziomu radonu w nowych budynkach

Monitorowanie poziomu radonu w nowo wybudowanych budynkach jest kluczowym etapem weryfikacji skuteczności zastosowanych środków ochronnych. Nawet najlepsze technologie wymagają potwierdzenia ich efektywności za pomocą pomiarów.

Pierwsze pomiary należy przeprowadzić zaraz po zakończeniu budowy, szczególnie w pomieszczeniach mających kontakt z gruntem, takich jak piwnice, partery czy garaże. Badania te pozwalają ocenić, czy zastosowane środki ochrony przeciwradonowej spełniają

założone normy. Aby uzyskać pełny obraz zmienności stężenia radonu, monitoring powinien obejmować pełny cykl roczny, ponieważ poziom radonu zmienia się w zależności od sezonu – wzrasta zimą, gdy budynki są szczelniej zamknięte, a spada latem przy większej wymianie powietrza.

Monitoring można prowadzić za pomocą detektorów pasywnych, takich jak detektory śladowe, lub urządzeń aktywnych, które zapewniają ciągły pomiar i rejestrację danych. Detektory pasywne są ekonomiczne i łatwe w użyciu, ale nie dostarczają danych w czasie rzeczywistym. Urządzenia aktywne pozwalają na bieżąco analizować poziom radonu, co jest szczególnie przydatne w budynkach o zmiennych warunkach użytkowania.

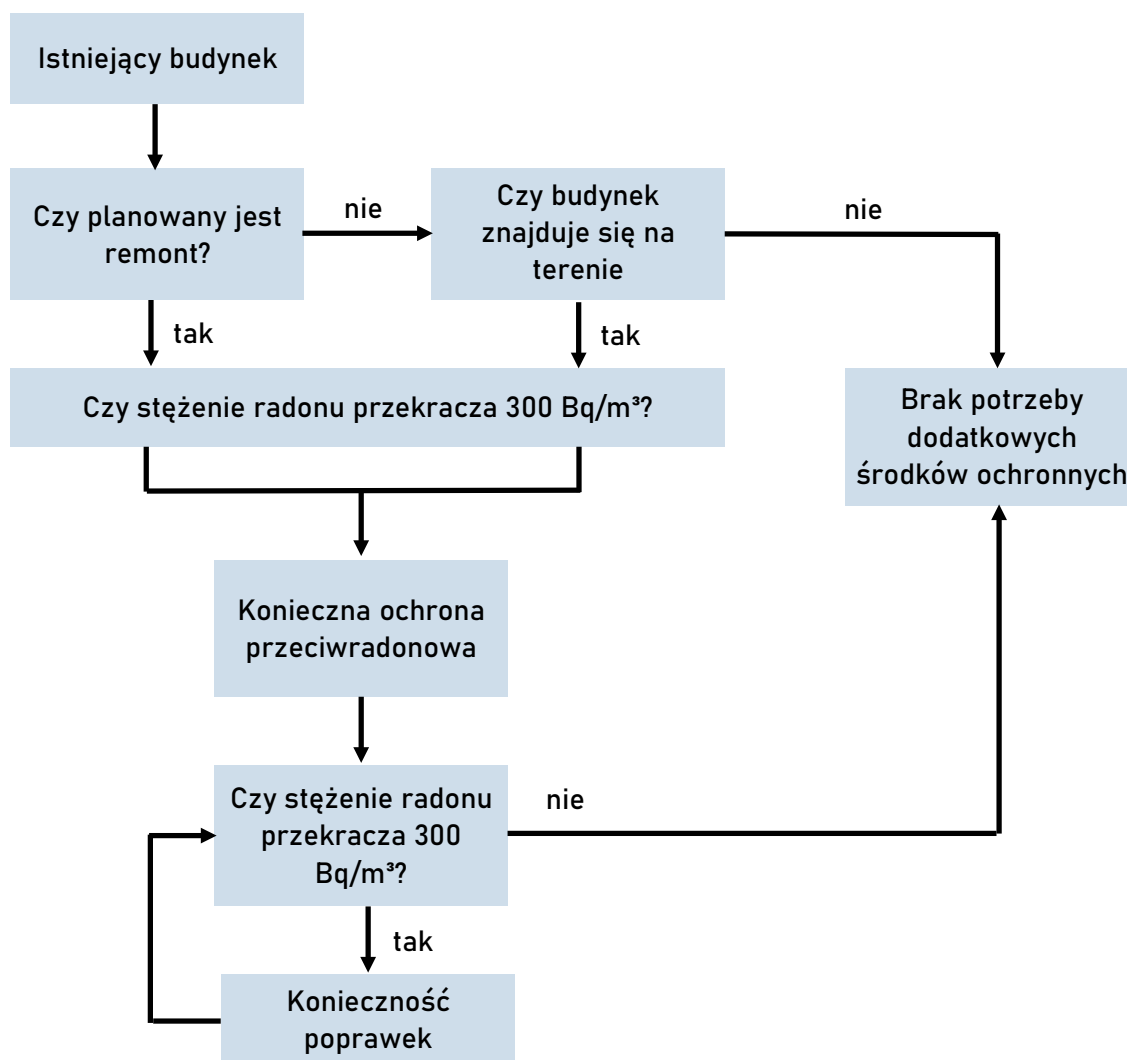
Pierwsze lata użytkowania budynku są kluczowe dla identyfikacji ewentualnych wad konstrukcyjnych i oceny stabilności zastosowanych rozwiązań. Regularny monitoring pozwala również zweryfikować skuteczność systemów wentylacyjnych oraz zidentyfikować sezonowe wahania stężenia radonu. W przypadku wykrycia poziomów przekraczających 300 Bq/m^3 ³¹, należy wdrożyć dodatkowe środki zaradcze.

3.2 Zmniejszanie radonu w budynkach z podwyższonym poziomem radonu

3.2.1 Identyfikacja źródeł radonu i ocena problemu

Zanim przystąpi się do działań mających na celu zmniejszenie stężenia radonu w istniejących budynkach, kluczowe jest precyzyjne określenie źródeł emisji gazu i stopnia zagrożenia. Radon może pochodzić z gleby pod budynkiem, materiałów budowlanych, a w niektórych przypadkach także z wody gruntowej. Szczegółowa identyfikacja problemu pozwala na skuteczny dobór środków zaradczych i długoterminową ochronę mieszkańców. Przykładowy schemat decyzyjny (rys. 3) obejmuje analizę kilku kluczowych elementów: planów remontowych, lokalizacji budynku w obszarze radonowym oraz wyników pomiarów stężenia radonu.

³¹ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277)



Rys. 3 Schemat procedury oceny i planowania działań ochronnych w istniejących budynkach w przypadku podwyższonego poziomu radonu²⁶

Pierwszym krokiem jest ustalenie, czy budynek znajduje się na obszarze o podwyższonym ryzyku radonowym oraz czy planowane są w nim remonty. Jeśli lokalizacja budynku nie wskazuje na obecność podwyższonego ryzyka, a remonty nie są planowane, dalsze działania nie są konieczne. W przeciwnym przypadku należy przeprowadzić pomiary stężenia radonu w celu dokładnej oceny ryzyka.

Profesjonalne pomiary stężenia radonu są kluczowym narzędziem w procesie oceny ryzyka. W pierwszej kolejności wykonuje się krótkoterminowe pomiary, aby sprawdzić, czy poziom radonu przekracza 300 Bq/m³. W przypadku przekroczenia tego progu zaleca się przeprowadzenie długoterminowych pomiarów obejmujących pełen cykl roczny. Detektory pasywne, takie jak detektory śladowe, są preferowane ze względu na ich dokładność i ekonomiczność.

Wyniki pomiarów są podstawą do podejmowania decyzji dotyczących konieczności działań naprawczych:

- **stężenie radonu $> 300 \text{ Bq/m}^3$** – konieczne jest wdrożenie działań ochronnych, takich jak uszczelnienie fundamentów, poprawa systemu wentylacji lub instalacja aktywnych systemów odprowadzających radon;
- **stężenie radonu $\leq 300 \text{ Bq/m}^3$** – nie są wymagane dodatkowe środki ochronne.

Radon w budynkach może pochodzić z gleby pod fundamentami, materiałów budowlanych lub wody gruntowej. Szczególnie w starszych budynkach, które charakteryzują się uszkodzeniami konstrukcyjnymi lub nieszczelnościami, radon łatwo przenika do wnętrza przez szczeliny i pęknięcia. Na obszarach wiejskich radon może również pochodzić z wody gruntowej używanej do celów domowych.

Wysokie stężenia radonu, szczególnie w piwnicach i na parterze budynków, wymagają pilnych działań. Kluczowe jest dobranie metod zaradczych odpowiednich do specyfiki budynku.

3.2.2 Uszczelnianie budynków

Uszczelnianie budynków jest jedną z podstawowych i najskuteczniejszych metod ograniczania przenikania radonu do wnętrza. Polega ono na eliminacji nieszczelności w fundamentach, ścianach i innych elementach konstrukcyjnych, które mogą stanowić drogi infiltracji gazu.

Fundamenty budynku są główną barierą chroniącą wnętrze przed radonem z gleby. Dokładna inspekcja fundamentów pozwala zidentyfikować pęknięcia, szczeliny i inne defekty konstrukcyjne, które mogą stanowić punkty przenikania gazu. W miejscach tych zaleca się stosowanie materiałów takich jak:

- **elastyczne masy uszczelniające** – idealne do wypełniania szczelin i połączeń między elementami konstrukcyjnymi;
- **beton o niskiej przepuszczalności** – stosowany w fundamentach, aby zapobiegać przenikaniu radonu przez strukturę budynku;
- **powłoki polimerowe** – tworzące trwałą barierę ochronną, zwłaszcza w obszarach kontaktu fundamentów z gruntem.

W przypadku ścian szczególną uwagę należy zwrócić na obszary przyziemia, które są w bezpośrednim kontakcie z gruntem. Stosowanie hydroizolacji, dodatkowych powłok ochronnych oraz specjalistycznych tynków ogranicza przepływ gazu do wnętrza budynku.

Przejścia instalacyjne, takie jak rury kanalizacyjne, przewody elektryczne czy wentylacyjne, są częstymi drogami przenikania radonu do wnętrza budynków. Szczelne uszczelnienie tych miejsc jest kluczowe dla skutecznej ochrony, dlatego zaleca się stosowanie:

- **uszczerek wykonanych z materiałów odpornych na przepływ gazów;**
- **specjalnych kołnierzy i manszet uszczelniających**, które tworzą szczelne połączenia wokół rur;
- **elastycznych materiałów do wypełniania szczelin**, takich jak masy poliuretanowe.

Szczególną uwagę należy zwrócić na jakość wykonania uszczelnień. Niedokładne lub niskiej jakości rozwiązania mogą prowadzić do powstawania punktów nieszczelności, które osłabiają skuteczność zastosowanych środków. Należy zwrócić uwagę także na jakość użytych

materiałów. W budynkach narażonych na wysokie stężenia radonu szczególnie polecane są materiały o wysokiej odporności na przepływ gazów, takie jak:

- **powłoki poliuretanowe i epoksydowe** – odporne na starzenie i działanie wilgoci;
- **folie przeciwradonowe** – tworzące barierę ochronną w trudno dostępnych miejscach;
- **cementy specjalistyczne** – stosowane do wypełniania większych pęknięć i ubytków w fundamentach.

Zaleca się stosowanie produktów o wysokiej odporności mechanicznej oraz odporności na działanie czynników zewnętrznych.

Uszczelnianie fundamentów i ścian powinno być stosowane w połączeniu z innymi środkami ochronnymi, takimi jak systemy wentylacyjne czy aktywne systemy odprowadzania radonu spod budynku. Szczelne fundamenty zmniejszają ilość gazu, który musi być usunięty z wnętrza budynku, co pozwala na bardziej efektywne działanie systemów aktywnych.

Uszczelnianie jest relatywnie prostym i niedrogim środkiem zaradczym, który można wdrożyć zarówno w nowych, jak i istniejących budynkach. Jego główną zaletą jest redukcja przenikania radonu u źródła, co zmniejsza potrzebę stosowania kosztownych technologii aktywnych. Ograniczeniem tej metody jest jednak konieczność dokładnego wykonania uszczelnień oraz jej ograniczona skuteczność w budynkach o bardzo wysokim stężeniu radonu lub znacznym stopniu uszkodzeń konstrukcji.

3.2.3 Wentylacja w istniejących budynkach

Wentylacja jest jednym z najczęściej stosowanych środków redukcji stężenia radonu w istniejących budynkach. Polega na wymianie powietrza wewnętrznego, bogatego w radon, na świeże powietrze z zewnątrz, co skutecznie rozcieńcza stężenie gazu w pomieszczeniach. Może być stosowana zarówno jako samodzielna metoda, jak i w połączeniu z innymi środkami.

Wentylacja nadciśnieniowa wprowadza świeże powietrze do wnętrza budynku, podnosząc ciśnienie wewnętrzne względem ciśnienia gruntu. Tworzy to barierę, która ogranicza przepływ radonu z gleby do wnętrza budynku. Metoda ta jest szczególnie skuteczna w budynkach z dobrze uszczelnionymi fundamentami, gdzie kluczowe jest ograniczenie infiltracji radonu przez nieszczelności. Zintegrowanie wentylacji nadciśnieniowej z systemem mechanicznym budynku może jednocześnie poprawić jakość powietrza i komfort cieplny.

Wentylacja wyciągowa, polegająca na usuwaniu powietrza z budynku, jest mniej skuteczna w redukcji radonu. Tworzone przez nią podciśnienie może zwiększać infiltrację gazu z gleby, szczególnie w budynkach o nieszczelnych fundamentach. Niemniej jednak w połączeniu z odpowiednimi uszczelnieniami może przyczynić się do poprawy jakości powietrza i redukcji stężenia radonu, szczególnie w pomieszczeniach takich jak piwnice, gdzie wymiana powietrza jest utrudniona.

Badania przeprowadzone przez Lucchettiego i współautorów, opublikowane w artykule pt. *"Indoor/outdoor air exchange affects indoor radon – the use of a scale model room to develop a mitigation strategy"* w czasopiśmie *Advances in Geosciences* w 2022 roku³², dostarczyły

³² Lucchetti, C., Galli, G., & Tuccimei, P. (2022). Indoor/outdoor air exchange affects indoor radon – the use of a scale model room to develop a mitigation strategy. *Advances in Geosciences*, 57, 81–88.

istotnych informacji na temat skuteczności różnych metod wentylacji. W badaniach wykorzystano skalowaną komorę modelową o wymiarach 62 cm × 50 cm × 35 cm, wykonaną z porowatego materiału bogatego w rad, aby ocenić wpływ różnych sposobów wymiany powietrza na stężenie radonu w pomieszczeniu. Eksperymenty wykazały, że wprowadzanie powietrza z zewnątrz (wentylacja nadciśnieniowa) jest skuteczniejsze od wyciągania powietrza z wnętrza (wentylacja wyciągowa). Przy zastosowaniu nadciśnienia stężenie radonu zmniejszyło się nawet o 89,5% przy przepływie 0,82 litrów/min, podczas gdy w przypadku podciśnienia redukcja wyniosła jedynie 25%. Wyniki te wskazują, że nadciśnienie ogranicza infiltrację radonu z gleby, podczas gdy podciśnienie może prowadzić do zwiększenia migracji gazu do wnętrza budynku.

Naturalna wentylacja, oparta na swobodnym przepływie powietrza przez otwory okienne, drzwi oraz inne nieszczelności konstrukcyjne, może być skuteczna jedynie w określonych warunkach. Jej efektywność zależy od temperatury, wiatru i innych czynników pogodowych, co sprawia, że jest trudna do kontrolowania i nie zapewnia stałej wymiany powietrza. W związku z tym naturalna wentylacja nie jest zalecana jako podstawowa metoda redukcji radonu w budynkach z podwyższonym stężeniem.

Wentylacja najlepiej sprawdza się jako element zintegrowanej strategii przeciwradonowej. Na przykład połączenie wentylacji mechanicznej z uszczelnieniem fundamentów czy aktywnym systemem odprowadzania radonu spod budynku pozwala na znacznie większą skuteczność redukcji stężenia gazu. Tego typu podejście hybrydowe pozwala maksymalizować efektywność każdego z zastosowanych rozwiązań.

Wentylacja, choć skuteczna, ma swoje ograniczenia. Systemy mechaniczne wymagają regularnej konserwacji, co wiąże się z dodatkowymi kosztami eksploatacyjnymi. W chłodnym klimacie nadmierna wentylacja może prowadzić do strat ciepła i zwiększenia kosztów ogrzewania, co należy uwzględnić na etapie projektowania. Ważne jest także dostosowanie intensywności wentylacji do lokalnych warunków geologicznych i klimatycznych, aby zapewnić równowagę między skutecznością redukcji radonu a komfortem użytkowania budynku.

3.2.4 Systemy aktywnego odprowadzania radonu

Systemy aktywnego odprowadzania radonu to jedna z najskuteczniejszych metod redukcji stężenia tego gazu w istniejących budynkach. Ich działanie polega na usuwaniu radonu spod fundamentów lub z wnętrza budynku, zanim zdąży on zgromadzić się w pomieszczeniach. Metoda ta sprawdza się szczególnie w budynkach z wysokimi stężeniami radonu, gdzie inne środki, takie jak wentylacja czy uszczelnianie, okazują się niewystarczające.

Ssanie podpodłogowe (Sub-Slab Depressurization, SSD)

Ssanie podpodłogowe to najczęściej stosowana technologia aktywnego odprowadzania radonu. Polega na instalacji perforowanych rur pod fundamentami budynku, które są połączone z wentylatorem wytwarzającym podciśnienie. Dzięki temu radon jest skutecznie usuwany z gleby i odprowadzany na zewnątrz budynku.

Metoda ta jest szczególnie efektywna w budynkach z płytami fundamentowymi, gdzie instalacja rur jest stosunkowo prosta. W budynkach z piwnicami lub fundamentami

szczelinowymi system SSD również może być zastosowany, jednak wymaga odpowiedniego dostosowania do specyfiki konstrukcji, na przykład instalacji dodatkowych rur w ścianach fundamentowych lub podłogach piwnic.

Systemy odprowadzania radonu z przestrzeni podpodłogowej (Crawl Space Ventilation)

W budynkach z przestrzenią podpodłogową stosuje się systemy, które zapewniają przepływ powietrza między gruntem a podłogą. Istnieją dwa główne typy takich systemów:

- **pasywne** – wykorzystujące naturalną konwekcję powietrza do odprowadzania radonu;
- **aktywne** – wyposażone w wentylatory, które wymuszają przepływ powietrza, znacznie zwiększając efektywność systemu.

Systemy aktywne są znacznie skuteczniejsze i mogą redukować stężenie radonu nawet o 90%. Jednakże wymagają stałego zasilania oraz regularnej konserwacji, co generuje dodatkowe koszty eksploatacyjne.

Systemy odprowadzania radonu z gruntu przylegającego do fundamentów

W budynkach z piwnicami stosuje się rozwiązania polegające na odprowadzaniu radonu z gleby otaczającej ściany fundamentowe. W gruncie wokół budynku instaluje się perforowane rury, które łączą się z wentylatorami, odprowadzającymi gaz na zewnątrz. Dzięki temu radon jest skutecznie usuwany, zanim przeniknie przez ściany fundamentowe do wnętrza budynku.

Zalety, wyzwania i ograniczenia systemów aktywnego odprowadzania radonu

Systemy aktywnego odprowadzania radonu mają wiele zalet, w tym:

- **redukcja stężenia radonu u źródła** – radon jest usuwany z gleby, zanim przeniknie do wnętrza budynku;
- **wszechstronność** – możliwość dostosowania do różnych konstrukcji budynków, w tym tych z płytami fundamentowymi, piwnicami czy przestrzeniami podpodłogowymi;
- **integracja z innymi metodami ochrony** – systemy te mogą być stosowane w połączeniu z uszczelnianiem i wentylacją mechaniczną, co zwiększa skuteczność działań przeciwradonowych.

Pomimo wysokiej skuteczności, systemy aktywnego odprowadzania radonu mają swoje ograniczenia. Są to przede wszystkim:

- **koszty eksploatacyjne** – systemy te wymagają stałego zasilania energią elektryczną, co generuje dodatkowe wydatki;
- **trudności instalacyjne** – instalacja może być utrudniona w starszych budynkach, gdzie dostęp do fundamentów jest ograniczony;
- **konieczność konserwacji** – systemy wymagają regularnych przeglądów i konserwacji, aby zapewnić ich niezawodne działanie przez wiele lat;
- **wpływ na izolację termiczną** – w przypadku systemów podfundamentowych konieczne jest zadbanie o odpowiednią izolację, aby uniknąć strat ciepła w zimnym klimacie.

3.2.4 Inne techniki redukcji radonu

Oprócz wentylacji, uszczelniania i systemów aktywnego odprowadzania, istnieje wiele technik wspierających redukcję stężenia radonu w istniejących budynkach. Są one szczególnie przydatne w sytuacjach, gdy tradycyjne metody okazują się niewystarczające lub gdy wymagane jest uzupełnienie działań przeciwradonowych.

Drenaż i wentylacja podfundamentowa

Jednym z efektywnych rozwiązań wspierających redukcję radonu jest zastosowanie drenażu i wentylacji podfundamentowej. Układanie warstw żwirowych pod fundamentami oraz pionowych warstw wokół budynku umożliwia naturalne odprowadzanie radonu z gleby. W bardziej zaawansowanych systemach stosuje się perforowane rury w warstwach żwirowych, które wspierają kontrolowany przepływ powietrza. W przypadku dużego stężenia radonu, systemy te mogą być wyposażone w wentylatory, co znacznie zwiększa ich efektywność. Drenaż podfundamentowy pełni również funkcję wspierającą w systemach aktywnego odprowadzania radonu.

Zastosowanie barier przeciwradonowych

Membrany przeciwradonowe oraz powłoki ochronne stosuje się jako bariery redukujące przepływ radonu z gleby. Ich instalacja pod istniejącymi fundamentami jest jednak w większości przypadków niemożliwa bez poważnych prac konstrukcyjnych. W budynkach już stojących, barierami przeciwradonowymi można wzmocnić jedynie zewnętrzne powierzchnie fundamentów, co wymaga ich częściowego odkrycia.

Adaptacja konstrukcji budynku

W budynkach z pustymi przestrzeniami podpodłogowymi można wprowadzić zmiany konstrukcyjne, które ograniczają migrację radonu. Wentylacja takich przestrzeni zmniejsza akumulację gazu pod budynkiem. Innym rozwiązaniem jest reorganizacja użytkowania budynku – unikanie przekształcania piwnic na przestrzenie mieszkalne czy miejsca pracy oraz projektowanie barier między pomieszczeniami o podwyższonym stężeniu radonu a częściami przeznaczonymi do pracy czy zamieszkania.

Modyfikacja systemów ogrzewania i izolacji

Podciśnienie w budynkach może zwiększać infiltrację radonu z gleby, dlatego kluczowe jest zapobieganie jego powstawaniu. Należy zapewnić równowagę między wyciągiem a dopływem powietrza w systemach wentylacyjnych oraz unikać stosowania urządzeń generujących podciśnienie, takich jak kominki bez zewnętrznego dopływu powietrza. Dodatkowo izolacja termiczna między pomieszczeniami mieszkalnymi a strefami narażonymi na radon, takimi jak piwnice, może znacząco ograniczyć przenikanie gazu do przestrzeni użytkowych.

3.2.5 Monitorowanie długoterminowe po wdrożeniu działań

Długoterminowe monitorowanie poziomu radonu po wdrożeniu działań naprawczych jest kluczowe dla oceny ich skuteczności oraz zapewnienia bezpieczeństwa mieszkańcom. Regularne pomiary pozwalają na wczesne wykrycie ewentualnych problemów, takich jak spadek efektywności systemów wentylacyjnych lub nieszczelności, które mogą prowadzić do wzrostu stężenia radonu.

Pomiary zaleca się wykonywać w regularnych odstępach czasu – na przykład co rok w pierwszych latach po zakończeniu prac, a później co kilka lat, o ile poziom radonu pozostaje stabilny. Warto także przeprowadzać pomiary po zmianach w konstrukcji budynku, sposobie użytkowania lub warunkach środowiskowych, które mogą wpłynąć na poziom radonu. Szczególnie istotne jest uwzględnienie sezonowych wahań stężenia, które mogą być znaczące w zimie i latem.

Rozdział 4 Akty prawne dotyczące radonu – krajowe i międzynarodowe regulacje

Niniejszy rozdział przedstawia zakres kluczowych aktów prawnych i wytycznych dotyczących radonu, zarówno na poziomie międzynarodowym, jak i krajowym. Omówione zostały dokumenty takie jak Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom, zalecenia Światowej Organizacji Zdrowia (World Health Organization, WHO) oraz publikacje Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (International Atomic Energy Agency, IAEA).

Przybliżono również krajowe regulacje, w tym przepisy ustawy „Prawo atomowe”, które wdrażają wytyczne międzynarodowe. W Rozdziale skoncentrowano się na analizie zakresu wspomnianych regulacji – ich głównych celach, strukturze oraz wymaganiach dotyczących zarządzania ryzykiem związanym z radonem.

4.1 Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom

Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom³³, przyjęta 5 grudnia 2013 roku i opublikowana w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej 17 stycznia 2014 roku, ustanawia podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony zdrowia pracowników, ludności oraz pacjentów przed szkodliwymi skutkami promieniowania jonizującego. Dokument ten zastąpił kilka wcześniejszych aktów prawnych, takich jak dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom, konsolidując przepisy w celu dostosowania ich do współczesnej wiedzy naukowej oraz praktyk (preambuła, punkty 3-7).

Dyrektywa składa się ze 109 artykułów podzielonych na 10 rozdziałów oraz 19 załączników. Wprowadza szczegółowe regulacje dotyczące ochrony przed radonem, który jest uznawany za jedno z najistotniejszych naturalnych zagrożeń zdrowotnych. Ustanawia krajowe poziomy referencyjne dla stężeń radonu w powietrzu w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy, które nie mogą być wyższe niż 300 Bq/m³ (art. 54). Państwa członkowskie mają jednak możliwość dostosowania tych poziomów do lokalnych warunków, pod warunkiem oparcia ich na dowodach naukowych wskazujących na ryzyko zdrowotne związane z długotrwałym narażeniem.

Dyrektywa nakłada obowiązek opracowania i wdrożenia krajowego planu działań, który powinien uwzględniać długoterminowe ryzyko związane z narażeniem na radon w budynkach mieszkalnych, miejscach publicznych i miejscach pracy (art. 103).

Dyrektywa określa również szczególne wymagania dotyczące miejsc pracy, w tym obowiązek regularnych pomiarów stężeń radonu w lokalizacjach zidentyfikowanych jako obszary ryzyka (art. 54). Jeśli mimo podjęcia działań stężenie radonu przekracza poziom referencyjny, pracodawca ma obowiązek zgłosić tę sytuację odpowiednim organom (art. 25). W przypadkach, gdy roczna dawka efektywna dla pracowników przekracza 6 mSv, należy traktować narażenie jako planowane i poddać je szczególnemu nadzorowi (art. 35).

³³ Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w zakresie ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na promieniowanie jonizujące oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L13, 17 stycznia 2014, s. 1-73.

Dyrektywa kładzie nacisk na wdrażanie zasad optymalizacji ochrony radiologicznej. Działania zaradcze powinny być proporcjonalne do poziomu zagrożenia i uwzględniać potencjalne korzyści zdrowotne wynikające z redukcji narażenia. Szczególnie istotne jest zapobieganie przenikaniu radonu do nowych budynków poprzez odpowiednie przepisy budowlane (Załącznik XVIII, pkt 8).

Ważnym aspektem dyrektywy jest edukacja i informowanie społeczeństwa o zagrożeniach związanych z radonem oraz metodach ograniczania jego stężeń (art. 74). Kampanie edukacyjne powinny również podkreślać współzależność między narażeniem na radon a paleniem tytoniu jako czynnikami zwiększającymi ryzyko raka płuc.

4.2 Zalecenia Światowej Organizacji Zdrowia dotyczące radonu

Radon został uznany przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) za istotne zagrożenie dla zdrowia publicznego. WHO podkreśla ścisły związek między długotrwałą ekspozycją na radon a ryzykiem wystąpienia raka płuc, co czyni go drugim najważniejszym czynnikiem ryzyka po paleniu tytoniu. W 2005 roku WHO zainicjowała **Międzynarodowy Projekt Radonowy (International Radon Project, IRP)**³⁴, którego celem była globalna redukcja obciążeń zdrowotnych związanych z narażeniem na radon w budynkach mieszkalnych.

Projekt IRP miał cztery kluczowe cele:

1. identyfikację skutecznych strategii redukcji zdrowotnych skutków ekspozycji na radon;
2. promowanie solidnych opcji politycznych, programów zapobiegania i łagodzenia skutków (w tym monitorowania i oceny programów);
3. podnoszenie świadomości społecznej, politycznej i ekonomicznej na temat konsekwencji ekspozycji na radon;
4. szacowanie globalnych skutków zdrowotnych ekspozycji na radon w oparciu o dostępne dane.

W ramach projektu RP podjęto szereg działań, które miały na celu zmniejszenie obciążeń zdrowotnych związanych z radonem. Kluczowym elementem projektu była organizacja międzynarodowych spotkań ekspertów. Pierwsze z nich odbyło się w 2005 roku i zgromadziło 36 specjalistów z 17 krajów, podczas gdy kolejne miały miejsce w 2006 roku w Genewie oraz w 2007 roku w Monachium. Te wydarzenia pozwoliły na przegląd postępów projektu i skoncentrowanie się na dwóch głównych efektach pracy: „The WHO Report on the Global Burden of Disease (GBD) due to Radon” oraz „WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective”. Spotkania umożliwiły także wymianę doświadczeń między krajami i organizacjami zaangażowanymi w działania związane z radonem.

IRP doprowadził do stworzenia wytycznych dotyczących zapobiegania i redukcji ekspozycji na radon, uwzględniających zarówno koszty, jak i skuteczność poszczególnych działań. Promowano także standaryzację metod pomiarowych, co znacząco poprawiło porównywalność danych dotyczących stężeń radonu na całym świecie.

³⁴ Carr, Z., Shannoun, F., Zeeb, H., and Zielinski, J. M. (2008). World Health Organization's International Radon Project 2005–2008. IRPA 12 International Congress Proceedings. Buenos Aires, Argentina

4.2.1 WHO Handbook on Indoor Radon

Jednym z kluczowych wyników projektu IRP jest „WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective”³⁵, opublikowany w 2009 roku. Podręcznik ten zawiera kompleksowy przegląd zagadnień związanych z radonem, od aspektów epidemiologicznych po metody pomiaru i strategię redukcji jego stężenia. Organizacja zwraca uwagę na konieczność ustanowienia poziomu odniesienia dla radonu w budynkach mieszkalnych na poziomie 100 Bq/m³, a tam, gdzie to nie jest możliwe, na poziomie nieprzekraczającym 300 Bq/m³.

Podręcznik składa się z sześciu rozdziałów, z których każdy rozpoczyna się kluczowymi тезami, przedstawiającymi główne zagadnienia i wnioski dotyczące ochrony przed radonem. Zawiera szczegółowe informacje na temat urządzeń do pomiaru radonu, metod uzyskiwania wiarygodnych wyników oraz procedur zapobiegania przenikaniu radonu do nowych budynków, takich jak odpowiednie izolacje fundamentów. Opisano również techniki redukcji radonu w istniejących konstrukcjach, a także ocenę kosztów i korzyści wynikających z różnych działań zapobiegawczych. Dodatkowo omówiono strategię komunikacji ryzyka oraz organizacyjne aspekty krajowych programów radonowych.

4.2.2 Global Health Observatory (GHO)

WHO stworzyła również platformę **Global Health Observatory**³⁶, umożliwiającą m.in. monitorowanie polityk i regulacji krajowych dotyczących radonu. Platforma zawiera dane o:

- poziomach referencyjnych radonu w różnych krajach,
- narodowych strategiach zapobiegania i redukcji ekspozycji na radon,
- oraz wynikach pomiarów w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy.

GHO wspiera kraje w ocenie skuteczności ich programów i wymianie najlepszych praktyk na poziomie międzynarodowym.

WHO podkreśla, że skuteczna redukcja ryzyka wymaga współpracy międzynarodowej z organizacjami takimi jak IAEA (International Atomic Energy Agency, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej) i UNSCEAR, harmonizacji standardów oraz promowania edukacji publicznej. Długoterminowym celem jest zmniejszenie liczby przypadków raka płuc poprzez efektywne zarządzanie ryzykiem związanym z radonem.

³⁵ H. Zeeb, F. Shannoun (red.). „WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective”. World Health Organization, Geneva 2009.

³⁶ World Health Organization, “The Global Health Observatory. Radon Database”.
<https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/gho-phe-radon-database> (dostęp: grudzień 2024)

4.3. Zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej dotyczące ochrony przed promieniowaniem w kontekście radonu

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA) odgrywa kluczową rolę w promowaniu globalnych standardów ochrony przed promieniowaniem, w tym związanych z ekspozycją na radon. IAEA opracowała szereg dokumentów szczegółowo omawiających zagrożenia związane z radonem, w tym:

- "Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards" (GSR Part 3)³⁷,
- "Protection of the Public Against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation (SSG-32)"³⁸,
- "Protection Against Exposure Due to Radon Indoors and Gamma Radiation from Construction Materials — Methods of Prevention and Mitigation (TECDOC-1951)"³⁹,
- oraz "Design and Conduct of Indoor Radon Surveys"⁴⁰.

IAEA publikuje serię „Safety Standards”, która zawiera podstawowe zasady, wymagania i zalecenia mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego. Dokumenty te służą jako globalny punkt odniesienia w zakresie ochrony ludzi i środowiska oraz przyczyniają się do zharmonizowanego wysokiego poziomu bezpieczeństwa na całym świecie. Dokument **"Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards" (GSR Part 3)**, opracowany wspólnie przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA) oraz organizacje partnerskie, takie jak Światowa Organizacja Zdrowia (WHO), Program Narodów Zjednoczonych ds. Ochrony Środowiska (UNEP) i Międzynarodowa Organizacja Pracy (ILO), określa zasady ochrony przed promieniowaniem i bezpieczeństwa źródeł promieniowania w różnych sytuacjach narażenia. W dokumencie szczególny nacisk położono na działania związane z radonem, uwzględniając zarówno ekspozycję ludności, jak i pracowników w miejscach pracy.

W kontekście radonu GSR Part 3 wskazuje na konieczność ustalania poziomów referencyjnych dla stężeń radonu w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy, z uwzględnieniem lokalnych warunków oraz międzynarodowych standardów. Zobowiązuje także rządy do opracowania strategii zarządzania ryzykiem związanym z radonem, w tym identyfikacji obszarów podwyższonego ryzyka oraz wdrażania skutecznych programów monitorowania i prewencji. Dokument podkreśla znaczenie monitorowania i ograniczania ekspozycji na radon poprzez środki techniczne, takie jak izolacja fundamentów czy poprawa wentylacji, oraz administracyjne, jak przepisy budowlane i wytyczne dotyczące zarządzania ekspozycją.

Zgodnie z *Requirement 50: Public exposure due to radon indoors*, rządy są zobowiązane do gromadzenia informacji na temat stężeń radonu w budynkach mieszkalnych oraz budynkach użyteczności publicznej. Powinny także dostarczać informacje na temat zdrowotnych skutków

³⁷ International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (GSR Part 3). Vienna: IAEA, 2014.

³⁸ International Atomic Energy Agency. Protection of the Public Against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation (SSG-32). Vienna: IAEA, 2015.

³⁹ International Atomic Energy Agency. Protection Against Exposure Due to Radon Indoors and Gamma Radiation from Construction Materials — Methods of Prevention and Mitigation (TECDOC-1951). Vienna: IAEA, 2021.

⁴⁰ International Atomic Energy Agency. Design and Conduct of Indoor Radon Surveys. Vienna: IAEA, 2019.

ekspozycji na radon, w tym zwiększonego ryzyka raka płuc związanego z paleniem tytoniu. Jeśli stężenia radonu są uznawane za zagrożenie dla zdrowia publicznego, rządy mają obowiązek wdrożenia planu działań obejmującego:

- ustalenie poziomu referencyjnego dla radonu w budynkach mieszkalnych i publicznych, przy czym średnia roczna aktywność promieniotwórcza radonu nie powinna przekraczać 300 Bq/m³;
- redukcję stężeń radonu i optymalizację ochrony w celu minimalizacji narażenia;
- nadanie priorytetu działaniom w sytuacjach, w których redukcja stężeń będzie najbardziej efektywna;
- wprowadzenie odpowiednich środków zapobiegawczych w przepisach budowlanych, takich jak zapobieganie przedostawaniu się radonu do nowych budynków.

Rządy są odpowiedzialne za wyznaczenie podmiotów realizujących te działania oraz za określenie, które środki będą obligatoryjne, a które dobrowolne, z uwzględnieniem uwarunkowań społecznych i ekonomicznych.

GSR Part 3 zawiera również szczegółowe wymagania dotyczące ochrony pracowników przed radonem w miejscach pracy. Dozory jądrowe powinny opracować strategie ochrony, w tym ustanowienie poziomu referencyjnego. Pracodawcy są zobowiązani do redukcji stężeń radonu do poziomu możliwie najniższego, ale jeśli mimo podjęcia wszelkich rozsądnych działań poziom radonu przekracza wartość referencyjną, należy stosować zasady ochrony obowiązujące w przypadku planowanych sytuacji narażenia zawodowego.

Dokument GSR Part 3 jest fundamentem dla innych wytycznych IAEA, zapewniając spójne podejście do ochrony ludności przed radonem i innymi naturalnymi źródłami promieniowania, z uwzględnieniem specyficznych warunków regionalnych.

"Protection of the Public Against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation" (SSG-32) to szczegółowy przewodnik opracowany przez IAEA, którego celem jest wsparcie państw członkowskich w ochronie ludności przed narażeniem na radon i inne naturalne źródła promieniowania jonizującego. Dokument ten stanowi uzupełnienie wymagań określonych w **GSR Part 3** i oferuje szczegółowe wytyczne dotyczące ich wdrażania w praktyce.

SSG-32 opiera się na zasadach określonych w publikacji "Fundamental Safety Principles" (IAEA, Principle 10)⁴¹, która stanowi, że „działania ochronne w celu zmniejszenia istniejącego lub nieuregulowanego ryzyka promieniowania muszą być uzasadnione i zoptymalizowane”. W kontekście radonu dokument skupia się na ograniczaniu ekspozycji w budynkach mieszkalnych i miejscach publicznych, takich jak szkoły, przedszkola czy szpitale, gdzie ryzyko narażenia jest największe.

"Protection Against Exposure Due to Radon Indoors and Gamma Radiation from Construction Materials — Methods of Prevention and Mitigation" (TECDOC-1951) skupia się na technicznych aspektach ograniczania narażenia na radon w budynkach. Dokument ten opisuje metody zapobiegania przedostawaniu się radonu do budynków, w tym techniki

⁴¹ Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006)

izolacji fundamentów i wentylacji, a także środki korekcyjne dla istniejących budynków. TECDOC-1951 dostarcza również szczegółowe wytyczne dotyczące oceny materiałów budowlanych pod kątem emisji promieniowania oraz integracji standardów ochrony przed radonem z przepisami budowlanymi. Dokument ten jest szczególnie ważny dla architektów i inżynierów zajmujących się projektowaniem budynków.

"Design and Conduct of Indoor Radon Surveys" to publikacja poświęcona projektowaniu i realizacji badań radonowych w budynkach. W dokumencie przedstawiono wytyczne dotyczące planowania badań, wyboru lokalizacji oraz stosowania odpowiednich technik pomiarowych. Szczególną uwagę powinno zwrócić się na interpretację i komunikację wyników badań do władz oraz opinii publicznej. W publikacji wsparte zostały krajowe organy w opracowywaniu strategii monitorowania stężeń radonu i identyfikacji obszarów wymagających działań zaradczych.

4.4 Przepisy krajowe – ustawa – Prawo atomowe

Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277 z późniejszymi zmianami)⁴² stanowi podstawowy akt prawny regulujący kwestie bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej w Polsce. Dokument ten określa zasady używania źródeł promieniowania jonizującego, zarządzania odpadami promieniotwórczymi, reagowania na zagrożenia radiacyjne oraz ochrony ludności i środowiska przed szkodliwymi skutkami promieniowania.

Ustawa – Prawo atomowe wdraża także międzynarodowe standardy ochrony radiologicznej, w tym regulacje wynikające z Dyrektywy Rady 2013/59/Euratom, która ustanawia podstawowe normy bezpieczeństwa w zakresie ochrony przed promieniowaniem jonizującym. W kontekście radonu w ustawie odniesiono się do monitorowania stężeń tego gazu w środowisku oraz podejmowania działań mających na celu minimalizację ryzyka zdrowotnego wynikającego z ekspozycji na radon.

4.4.1 Przepisy lub wymagania ustawy – Prawo atomowe dotyczące radonu

W ustawie – Prawo atomowe zawarto kilka kluczowych artykułów, które bezpośrednio lub pośrednio dotyczą radonu:

Art. 23b ustala poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu na 300 Bq/m³. Poziom ten dotyczy zarówno miejsc pracy, jak i pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi. Przepis jest zgodny z zaleceniami Dyrektywy 2013/59/Euratom, która wyznacza tę wartość jako maksymalny poziom referencyjny.

Art. 23c określa obowiązki kierowników jednostek prowadzących działalność w miejscach pracy, w których występuje ryzyko przekroczenia poziomu odniesienia radonu. Dotyczy to szczególnie miejsc pracy znajdujących się w piwnicach, na parterze, pod ziemią oraz w zakładach uzdatniania wód podziemnych na terenach o podwyższonym ryzyku. Przepis wymaga prowadzenia pomiarów stężeń radonu lub stężeń energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu. Kierownicy jednostek mają obowiązek

⁴² Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277)

informowania pracowników o wynikach pomiarów, podejmowanych działaniach oraz dawkach promieniowania, a także zapewnienia optymalizacji narażenia. Jeśli dawka skuteczna przekracza 1 mSv rocznie, muszą zostać podjęte dodatkowe działania ochronne. Pracownicy narażeni na dawki większe niż 6 mSv rocznie są klasyfikowani jako pracownicy kategorii A.

Art. 23d wprowadza obowiązek przekazywania informacji o średniorocznym stężeniu radonu przez zbywców lub wynajmujących budynki. Informacje te muszą być oparte na wynikach pomiarów przeprowadzonych przez akredytowane laboratoria, które mają również obowiązek zgłaszania przypadków przekroczenia poziomu odniesienia wojewódzkiemu inspektorowi sanitarnemu.

Art. 23e zobowiązuje Głównego Inspektora Sanitarnego do identyfikacji terenów, na których poziom stężenia radonu może przekraczać poziom odniesienia. Informacje te są regularnie przekazywane Ministrowi Zdrowia. Państwowa Inspekcja Sanitarna prowadzi działania edukacyjne i doradcze w zakresie radonu, w tym informacji o zagrożeniach zdrowotnych oraz technikach ograniczania narażenia.

Art. 23f nakłada na Ministra Zdrowia obowiązek opracowania krajowego planu działania w celu zarządzania długoterminowymi zagrożeniami związanymi z narażeniem na radon. Plan ten obejmuje cele w zakresie ochrony zdrowia publicznego, działania prewencyjne i naprawcze oraz strategię finansowania badań i wdrażania środków ochronnych. Dodatkowo, plan uwzględnia promocję budownictwa zabezpieczonego przed radonem, edukację społeczną oraz strategię komunikacji ryzyka.

Art. 23g odnosi się do działań zapobiegających przenikaniu radonu do nowych budynków. Prezes Agencji i Główny Inspektor Sanitarny są odpowiedzialni za organizację kampanii edukacyjnych i informacyjnych, monitorowanie stosowania środków zapobiegawczych oraz opracowanie dobrych praktyk w zakresie ochrony przed radonem w budownictwie.

Ustawa – Prawo atomowe stanowi kluczowy akt prawny w zakresie ochrony przed radonem w Polsce. Poprzez określenie obowiązków dla właścicieli budynków, instytucji publicznych oraz organów nadzorczych, ustawa wspiera skuteczne zarządzanie ryzykiem związanym z radonem. Wprowadzone przepisy umożliwiają kompleksowe monitorowanie i kontrolę stężeń radonu, co przyczynia się do zwiększenia ochrony zdrowia publicznego.

4.5 Krajowe przepisy wdrażające międzynarodowe regulacje dotyczące radonu

W Polsce, zgodnie z wymogami Dyrektywy Rady 2013/59/Euratom, przyjęto krajowe akty prawne, które regulują zagadnienia związane z narażeniem na radon.

4.5.1 Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy

Krajowy plan działania, ogłoszony przez Ministra Zdrowia na podstawie Obwieszczenia z dnia 22 stycznia 2021 r., stanowi najważniejszy dokument strategiczny w walce z zagrożeniami wynikającymi z ekspozycji na radon. Plan powstał w odpowiedzi na zapisy Dyrektywy Rady

2013/59/Euratom i ma na celu stworzenie ram prawnych oraz organizacyjnych dla zarządzania ryzykiem związanym z radonem w budynkach mieszkalnych i miejscach pracy.

Głównym celem Krajowego planu jest ochrona zdrowia ludności poprzez ograniczenie długoterminowego narażenia na radon. Plan wskazuje także narzędzia i metody identyfikacji obszarów o podwyższonym ryzyku występowania radonu, takich jak analiza geologiczna i badania radiologiczne.

Realizacja Krajowego planu opiera się na zaangażowaniu wielu instytucji, w tym Głównego Inspektoratu Sanitarnego oraz Państwowej Agencji Atomistyki. Plan zakłada monitorowanie stężenia radonu w miejscach publicznych oraz w budynkach mieszkalnych, szczególnie na obszarach o wysokim potencjale emisyjnym. Dokument podkreśla również znaczenie edukacji społeczeństwa i podnoszenia świadomości na temat zagrożeń związanych z radonem. Kluczowym elementem Krajowego planu jest promocja technologii redukcji stężeń radonu, takich jak poprawa wentylacji czy zastosowanie izolacji fundamentów w budynkach.

4.5.2 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi

Rozporządzenie to wdraża zapisy Dyrektywy Rady 2013/51/Euratom, która reguluje ochronę zdrowia ludności przed promieniotwórczością w wodzie pitnej. Dokument ten określa limity stężeń radonu w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz procedury monitorowania jakości wody. Obowiązkiem instytucji wodociągowych jest regularne przeprowadzanie pomiarów stężeń radonu oraz podejmowanie działań naprawczych w przypadku przekroczenia ustalonych poziomów odniesienia. Rozporządzenie uwzględnia także edukację konsumentów, zapewniając dostęp do wyników badań wody pitnej.

4.5.3 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139)

Rozporządzenie to koncentruje się na identyfikacji obszarów, gdzie średnioroczne stężenie radonu w powietrzu wewnętrznym może przekraczać poziom odniesienia wynoszący 300 Bq/m³. Na wskazanych terenach prowadzenie pomiarów radonu jest obowiązkowe w miejscach pracy i budynkach publicznych.

Dokładne omówienie polskich aktów prawnych dotyczących radonu znajduje się w Rozdziale 5.

4.6 Ogólne zobowiązania państwowe wynikające z omówionych regulacji

Radon stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia publicznego, co znalazło odzwierciedlenie w licznych regulacjach międzynarodowych i krajowych. Wdrażanie przepisów dotyczących ochrony przed radonem nakłada na państwa członkowskie wiele obowiązków w zakresie monitorowania, prewencji oraz edukacji. Na podstawie omówionych dokumentów można wskazać kluczowe zobowiązania państwowe, które mają na celu ochronę ludności przed długoterminowymi skutkami narażenia na radon.

Międzynarodowe regulacje, takie jak Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom oraz standardy opracowane przez WHO i IAEA, wyznaczają ramy dla krajowych działań w zakresie ochrony przed radonem. Można podsumować, że państwa zobowiązane są do:

1. **ustanowienia poziomów odniesienia:** każde państwo musi określić maksymalne średnioroczne stężenie radonu w powietrzu wewnętrznym, nie wyższe niż 300 Bq/m³, zgodnie z zaleceniami;
2. **opracowania narodowych planów działania:** krajowe plany muszą uwzględniać identyfikację terenów o podwyższonym ryzyku, strategię prewencyjną, a także edukację ludności;
3. **monitorowania stężeń radonu:** regularne pomiary radonu w budynkach mieszkalnych, miejscach pracy oraz w wodzie pitnej są kluczowym elementem zarządzania ryzykiem;
4. **promowania technologii redukcji radonu:** państwa powinny wspierać rozwój i wdrażanie technologii zmniejszających koncentrację radonu w budynkach.

Rozdział 5 Szczegółowe regulacje prawne dotyczące radonu – obowiązki i konsekwencje

Zagadnienia unormowań obowiązków związanych z radonem mają duże znaczenie z polskiej perspektywy. W 2018 r. opublikowano wyniki badań globalnych szacunków śmiertelności z powodu raka płuc, wywołanego przez narażenie na radon w pomieszczeniach. Polska zajmuje w tych statystykach **pierwsze miejsce na świecie**. Kraj nasz cechuje także najwyższe na świecie średnie stężenie radonu w pomieszczeniach (133 Bq/m^3 wobec 38 Bq/m^3 w skali świata)⁴³.

Z dniem 23 września 2019 r. wprowadzono do ustawy – Prawo atomowe (P.a.)⁴⁴ szereg nowych przepisów, m.in., art. 23b-23h.

Zarazem rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia⁴⁵ (dalej: rozporządzenie Ministra Zdrowia) zaliczono do tych terenów obszary czternastu powiatów województwa dolnośląskiego: powiat dzierzoniowski; powiat karkonoski; miasto na prawach powiatu Jelenia Góra; powiat kamiennogórski; powiat kłodzki; powiat lubański; powiat lwówecki; powiat polkowicki; powiat trzebnicki; powiat wałbrzyski; miasto na prawach powiatu Wałbrzych; powiat ząbkowicki; powiat zgorzelecki; powiat złotoryjski, ponadto w województwie lubelskim – powiat tomaszowski, w województwie opolskim: powiat nyski; powiat prudnicki, w województwie podkarpackim: powiat bieszczadzki; powiat jasielski; powiat krośnieński; powiat leski; powiat mielecki; powiat sanocki, w województwie śląskim – powiat cieszyński, w województwie świętokrzyskim: powiat kielecki; powiat opatowski oraz powiat skarżyski. Rozporządzenie to weszło w życie z dniem 31 lipca 2020 r. Obszary wskazane w tym akcie prawnym są dalej określane mianem „terenów radonowych”.

5.1 Poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu (art. 23b P.a.)

Wprowadzonym przepisem art. 23b P.a. ustalono poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w:

1. miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń,
2. pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi

- w wysokości **300 Bq/m^3 (bekereli na metr sześcienny)**.

⁴³ Zob. J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewski, *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon*, „Environmental Health Perspectives” 2018, nr 5, s. 3-4. Por. R. Bobkier, *Ewolucja badań i regulacji prawnych radonu do 1980 r. jako przykład gadamerowskiego „stapiania horyzontów”*. Wstęp do problematyki filozoficznego wymiaru prawa atomowego, „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki 2024, nr 4, s. 37.

⁴⁴ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277). Przedmiotowej nowelizacji dokonano ustawą z dnia 13 czerwca 2019 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej (Dz. U. poz. 1593 z późn. zm.).

⁴⁵ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139).

5.1.1 Poziom odniesienia

Pojęcie „poziomu odniesienia” definiuje art. 3 pkt 26a P.a. jako poziom dawki skutecznej (efektywnej)⁴⁶, dawki równoważnej⁴⁷ lub stężenia promieniotwórczego w przypadku zdarzenia radiacyjnego lub w sytuacji narażenia istniejącego, powyżej którego za niewłaściwe uznaje się dopuszczenie do występowania narażenia. Pojęcie „narażenia” zdefiniowano w art. 3 pkt 15 P.a. jako proces, w którym organizm ludzki podlega napromienieniu promieniowaniem jonizującym: zewnętrznemu lub jest wystawiony na możliwość takiego napromienienia (narażenie zewnętrzne) lub wewnętrznemu lub jest wystawiony na możliwość takiego napromienienia (narażenie wewnętrzne).

W odniesieniu do narażenia na radon – jest nim, w myśl definicji legalnej zawartej w art. 3 pkt 15a P.a., narażenie na pochodne radonu. Zgodnie z tabelą nr 2 załącznika nr 2 do Prawa atomowego, izotopem macierzystym są: Rn-220+, a jego izotopem pochodnym – Po-216 oraz Rn-222+, a jego izotopami pochodnymi – Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214 (krótkożyłowe pochodne radonu: polon, bizmut i ołów).

Poziom odniesienia nie wyznacza więc, w przeciwieństwie do dawki granicznej, wartości, „której, poza przypadkami przewidzianymi w przepisach ustawy, nie wolno przekroczyć” (*vide* definicja dawki granicznej z art. 2 pkt 3 P.a.)⁴⁸, lecz wartość – w przypadku radonu – stężenia promieniotwórczego, po przekroczeniu której konieczne jest podjęcie określonych przepisami Prawa atomowego działań, zapewniających ograniczenie narażenia na radon.

Poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu wyznaczono dla obszaru całej Polski, nie tylko dla „terenów radonowych”.

5.1.2 Pomiary średniorocznego stężenia radonu w powietrzu

Średnioroczne stężenie radonu to w myśl definicji legalnej z art. 3 pkt 47a P.a., wartość stężenia radonu oszacowana na podstawie pomiarów tego stężenia w okresie nie krótszym niż jeden miesiąc, odpowiadająca średniemu stężeniu radonu w powietrzu w okresie roku kalendarzowego. Przepis art. 23b P.a., ustala poziom odniesienia (dopuszczalny poziom stężenia promieniotwórczego, art. 3 pkt 26a P.a.) radonu w powietrzu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi w wysokości 300 Bq/m³ – dla „średniorocznego” stężenia promieniotwórczego radonu – a więc stężenia oszacowanego w sposób określony w wyżej przytoczonej definicji (art. 3 pkt 47a P.a.).

⁴⁶ Dawką skuteczną (efektywną) jest dawka skuteczna (efektywna) określona w załączniku nr 1 do ustawy (art. 3 pkt 6 P.a.). Pkt 3 tego załącznika wskazuje, że jest to suma ważonych dawek równoważnych od zewnętrznego i wewnętrznego napromienienia tkanek i narządów, wyrażona wskazanym w nim wzorem, zaś jednostką dawki skutecznej (efektywnej) jest siwert (Sv).

⁴⁷ W zakresie definicji dawki równoważnej, art. 3 pkt 5 P.a. również odsyła do wskazanego załącznika nr 1, który w pkt 2 określa, że jest to dawka pochłonięta w tkance lub w narządzie, ważona dla rodzaju i energii promieniowania, wyrażona wskazanym w załączniku wzorem. Jednostką dawki równoważnej jest także siwert.

⁴⁸ Por. R. Bobkier, *Problematyka interpretacyjna pojęcia „kontrolowanej działalności zawodowej”*. Rozważania na tle definicji dawki granicznej w Prawie atomowym, „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki 2024, nr 2, s. 14-29.

5.1.3 Miejsce pracy

Przepis art. 23b pkt 1 P.a. ustala poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w „miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń”.

Pojęcie to, stanowiące termin języka prawnego Kodeksu pracy⁴⁹ (dalej: K.p.), nie zostało jednak w nim zdefiniowane.

W judykaturze jako „miejsce pracy” rozumie się bądź stały punkt w znaczeniu geograficznym, bądź pewien oznaczony obszar, strefę określoną granicami jednostki administracyjnej podziału kraju lub w inny dostatecznie wyraźny sposób, w którym ma nastąpić dopełnienie świadczenia pracy⁵⁰.

Jedynym aktem prawnym, który zawiera wyraźne określenie pojęcia „miejsca pracy”⁵¹ jest rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy⁵² (dalej r.o.p.b.h.p.). Jak wskazuje § 2 pkt 7b r.o.p.b.h.p., miejscem pracy jest miejsce wyznaczone przez pracodawcę, do którego pracownik ma dostęp w związku z wykonywaniem pracy.

5.1.4 Pomieszczenia

Pojęcie „pomieszczenia” występuje w przepisach art. 23b pkt 1 P.a. (miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń), art. 23b pkt 2, 23d ust. 1, ust. 3 pkt 2 i ust. 5 P.a. (pomieszczenia przeznaczone na pobyt ludzi).

Pojęcie „pomieszczenia” nie posiada definicji legalnej⁵³. Za najpełniejszą z definicji prezentowanych w literaturze przedmiotu uznać należy tę, zgodnie z którą pomieszczenie to wyodrębniona ścianami lub innymi przegrodami część budynku, w tym zwłaszcza lokal, jak również wchodzące w jego skład izby lub zespół izb⁵⁴.

5.1.5 Pomieszczenia przeznaczone na pobyt ludzi

Art. 23b pkt 2 P.a. przesądza o ustaleniu poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi.

Kolejnym istotnym aktem prawnym jest zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 12 marca 1996 r. w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, które weszło w życie dnia 23 czerwca

⁴⁹ Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1465).

⁵⁰ Wyrok SN z 1.04.1985 r., I PR 19/85, LEX nr 13556; por. M. Piekarski, *Glosa do wyroku SN z dnia 1 kwietnia 1985 r., I PR 19/85*, „Orzecznictwo Sądów Polskich” 1986, nr 3, s. 46; wyrok SN z 26.10.2022 r., II PSKP 11/22, OSNP 2023, nr 9, poz. 94; wyrok NSA z 7.02.2020 r., I OSK 1830/18, LEX nr 3221081; wyrok SN z 11.04.2001 r., I PKN 350/00, OSNP 2003, nr 2, poz. 36..

⁵¹ Zob. M. Tomaszewska, [w:] *Kodeks...*, red. K.W. Baran, wyd. cyt., kom. do art. 29, pkt 10; J. Wiśniewski, *Miejsce...*, wyd. cyt., s. 382.

⁵² Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (t.j. Dz. U. z 2003 r. Nr 169, poz. 1650 z późn. zm.).

⁵³ Zob. J. Kuźmicka-Sulikowska, [w:] *Zobowiązania. Część ogólna. Tom II. Komentarz*, red. P. Machnikowski, Beck, Warszawa 2024, Legalis, kom. do art. 433, nb. 22.

⁵⁴ Zob. P. Rogoziński, *Ograniczenie prawa do rozporządzania i korzystania przez właściciela z lokalu w razie zastosowania wobec niego środka zapobiegawczego z art. 275a K.p.k.*, „Nieruchomości. Kwartalnik Ministerstwa Sprawiedliwości” 2021, nr 1, s. 184.

1996 r. W myśl § 1 pkt 2 tego zarządzenia, pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi są:

- pomieszczenia mieszkalne (§ 1 pkt 2 lit. a *in pr.*);
- pomieszczenia przeznaczone na stały pobyt chorych w budynkach służby zdrowia oraz przeznaczone na stały pobyt dzieci i młodzieży w budynkach oświaty, a także pomieszczenia przeznaczone do przechowywania produktów żywnościowych (§ 1 pkt 2 lit. a);
- pomieszczenia przeznaczone na pobyt ludzi w budynkach użyteczności publicznej inne niż zaliczone powyższej kategorii oraz pomieszczenia pomocnicze w mieszkaniach (§ 1 pkt 2 lit. b).

Aktualnie obowiązujące rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, w przepisie § 4 r.w.t. wyróżnia: pomieszczenia przeznaczone na stały pobyt ludzi, w których przebywanie tych samych osób w ciągu doby trwa dłużej niż 4 godziny (§ 4 pkt 1); pomieszczenia przeznaczone na czasowy pobyt ludzi, w których przebywanie tych samych osób w ciągu doby trwa od 2 do 4 godzin włącznie (§ 4 pkt 2). Natomiast nie uważa się, w myśl § 5 ust. 1 r.w.t., za przeznaczone na pobyt ludzi pomieszczeń, w których: łączny czas przebywania tych samych osób jest krótszy niż 2 godziny w ciągu doby, a wykonywane czynności mają charakter dorywczy bądź też praca polega na krótkotrwałym przebywaniu związanym z dozorem oraz konserwacją maszyn i urządzeń lub utrzymaniem czystości i porządku (§ 5 ust. 1 pkt 1); mają miejsce procesy technologiczne niepozwalające na zapewnienie warunków przebywania osób stanowiących ich obsługę, bez zastosowania indywidualnych urządzeń ochrony osobistej i zachowania specjalnego reżimu organizacji pracy (§ 5 ust. 1 pkt 2); jest prowadzona hodowla roślin lub zwierząt, niezależnie od czasu przebywania w nich osób zajmujących się obsługą (§ 5 ust. 1 pkt 3).

Zważyć trzeba, że *de lege lata* przepis art. 23b pkt 2 P.a. posługuje się szeroką kategorią „pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi”. Skutkiem tego unormowania jest ustalenie w tym przepisie poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu zarówno dla pomieszczeń przeznaczonych na stały, jak i czasowy pobyt ludzi, *ergo* – dla wszystkich pomieszczeń, w których łączny czas pobytu tych samych osób w ciągu doby trwa dłużej, niż dwie godziny.

5.2 Obowiązki kierowników jednostek o charakterze powszechnym

5.2.1 Obowiązek pomiaru stężenia radonu

Norma art. 23c ust. 1 P.a. stanowi:

Kierownicy jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy:

- 1) zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b,
- 2) pod ziemią,

- 3) związane z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b.

– zapewniają w tych miejscach pracy pomiar stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu.

W zakresie znaczenia pojęć „miejsca pracy” i „pomieszczenia” – odsyłam do wywodów, zawartych w części 1 niniejszego opracowania.

Obowiązek zapewnienia pomiarów, o których mowa w art. 23c ust. 1 tiret *in fine* dotyczy:

- miejsc pracy pod ziemią (art. 23c ust. 1 pkt 2) na terytorium całej Polski,
- w pozostałym zakresie – miejsc pracy zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy (art. 23c ust. 1 pkt 1) oraz związanych z uzdatnianiem wód podziemnych – wyłącznie na „terenach radonowych”.

W myśl rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące⁵⁵, oceny takiej dokonuje się dla każdego roku kalendarzowego przez wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego na podstawie pomiarów dozymetrycznych.

Przepis art. 123 ust. 1 pkt 8 *in pr.* P.a. stanowi, że kierownikowi jednostki organizacyjnej, który, w szczególności, nie dopełnia obowiązku kontroli dozymetrycznej – wymierza się karę pieniężną w wysokości do ok. 35 000 zł⁵⁶.

Niezależnie od tej kary pieniężnej dla kierownika jednostki organizacyjnej, za powyższy czyn:

- jednostce organizacyjnej wykonującej działalność związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1b P.a.),
- osobie prowadzącej jednoosobową działalność oraz każdemu ze wspólników spółki cywilnej, wykonującym działalność związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1c P.a.),

wymierza się karę pieniężną w wysokości do ok. 350 000 zł⁵⁷.

Art. 125 ust. 1 P.a. przewiduje **pięcioletni** termin przedawnienia nałożenia kary pieniężnej, co oznacza, że w 2024 r. możliwe jest nałożenie kar za cały okres od daty wejścia w życie przedmiotowych przepisów.

⁵⁵ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. poz. 1657).

⁵⁶ Przepis odnosi się do wysokości nieprzekraczającej pięciokrotności kwoty przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej w roku kalendarzowym poprzedzającym popełnienie czynu, ogłaszanego przez Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego na podstawie art. 20 pkt 1 lit. a ustawy z dnia 17 grudnia 1998 r. o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych.

⁵⁷ Przepisy te odnoszą się do wysokości nieprzekraczającej pięćdziesięciokrotności kwoty przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej w roku kalendarzowym poprzedzającym popełnienie czynu, ogłaszanego przez Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego na podstawie art. 20 pkt 1 lit. a ustawy z dnia 17 grudnia 1998 r. o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych.

Powyższą – i dalej opisane – kary pieniężne, o których mowa w art. 123 P.a., nakłada w formie decyzji administracyjnej (w odniesieniu do miejsc pracy niepodlegających nadzorowi organów nadzoru górniczego) państwowy wojewódzki inspektor sanitarny (art. 124 ust. 1 pkt 2 w zw. z art. 51 ust. 2 pkt 2 P.a.).

5.2.2 Obowiązki optymalizacyjno-informacyjne kierowników jednostek

Kolejny obowiązek kierownika jednostki wynika z art. 23c ust. 2 P.a. – polega na zapewnieniu optymalizacji narażenia pracowników wykonujących pracę we wszystkich miejscach pracy, wymienionych w ust. 1 oraz informowaniu na bieżąco na piśmie takich pracowników o:

- zwiększonym narażeniu na radon,
- wynikach pomiarów stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscu pracy,
- otrzymanych przez nich dawkach promieniowania (oznacza to konieczność dokonania przeliczenia stężeń radonu w konkretnych pomieszczeniach, podawanych w bekerelach na metr sześcienny [Bq/m^3], na dawki promieniowania, wyznaczone w milisiwertach [mSv]),
- oraz działaniach podejmowanych w celu ograniczenia narażenia na radon w miejscu pracy.

W tym miejscu uzupełniającą wskazać trzeba, że Prawo atomowe posiada własne, *suo proprio*, definicje pojęcia „pracownika” i „pracownika zewnętrznego”.

W rozumieniu Prawa atomowego „pracownikiem” jest: pracownik w rozumieniu przepisów Prawa pracy, osoba wykonującą pracę na podstawie innej niż stosunek pracy, jak również osoba wykonującą działalność na własny rachunek, które w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące mogą otrzymać dawki przekraczające wartości dawek granicznych określonych dla osób z ogółu ludności (art. 3 pkt 29 P.a.). Natomiast określenie „pracownik zewnętrzny” oznacza pracownika, zatrudnionego przez pracodawcę zewnętrznego lub wykonującego działalność na własny rachunek, wykonującego dowolną działalność na terenie kontrolowanym lub terenie nadzorowanym, za który nie jest odpowiedzialny ani on, ani jego pracodawca (art. 3 pkt 30 P.a.). Zgodnie z wymogiem z art. 29 ust. 1 P.a., kierownik jednostki organizacyjnej jest obowiązany zapewnić pracownikom zewnętrznym ochronę radiologiczną równoważną ochronie, jaką zapewnia pracownikom zatrudnionym w jednostce organizacyjnej. Ta ostatnia regulacja przesądza, że wszelkie obowiązki, wynikające z przepisu art. 23c P.a., w tym wyżej opisane obowiązki o charakterze optymalizacyjno-informacyjnym, winny być realizowane również na rzecz pracowników zewnętrznych (tzw. „outsourcing pracowników”, „leasing pracowniczy”).

Przepis art. 123 ust. 1 pkt 9 *in pr.* P.a. stanowi, że kierownikowi jednostki organizacyjnej, który, w szczególności, nie udziela informacji lub udziela informacji nieprawdziwej albo zataja prawdę w zakresie ochrony radiologicznej – wymierza się karę pieniężną w wysokości do ok. 35 000 zł.

Podobnie, jak opisano wyżej (*vide* pkt 2.1), za powyższy czyn wymierza się również karę pieniężną w wysokości do ok. 350 000 zł jednostce organizacyjnej wykonującej działalność

związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1b P.a.), osobie prowadzącej jednoosobową działalność oraz każdemu ze wspólników spółki cywilnej, wykonującym działalność związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1c P.a.).

Art. 125 ust. 1 P.a. przewiduje **pięcioletni** termin przedawnienia nałożenia kary pieniężnej, co oznacza, że w 2024 r. możliwe jest nałożenie kar za cały okres od daty wejścia w życie przedmiotowych przepisów.

Istotną regulację zawiera przepis art. 23c ust. 3 P.a. Zgodnie z nim, w przypadku gdy w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 1 (zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na „terenach radonowych”) wynik pomiaru, o którym mowa w ust. 1, wskazuje na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia, o którym mowa w art. 23b, kierownicy jednostek podejmują działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon.

O ile więc w przypadku ogólnej normy z art. 23c ust. 2 P.a. mowa wyłącznie o „zapewnieniu optymalizacji narażenia pracowników”, a więc o działaniu bezskutkowym, o tyle w przypadku chociażby możliwości przekroczenia poziomu odniesienia w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń wymaga ustawodawca już działania cechującego się określonym rezultatem – w postaci „zapewnienia ograniczenia narażenia”.

5.2.3 Powszechność obowiązków z art. 23c ust. 1 i 2 P.a.

Wskazane powyżej obowiązki ciążyą na każdym pracodawcy (kierowniku jednostki), u którego występują miejsca pracy określone w art. 23c ust. 1 pkt 1-3 P.a. Tym samym przeprowadzenie – nie wskazującego na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia – pomiaru w roku poprzednim nie zwalnia kierownika jednostki od przeprowadzenia pomiarów dla kolejnego roku kalendarzowego.

Podobnie – uzyskanie wyniku pomiaru nie wskazującego na przekroczenie poziomu odniesienia nie stanowi przesłanki do zwolnienia kierownika jednostki z obowiązków optymalizacyjno-informacyjnych, o których mowa w art. 23c ust. 2 P.a.

5.3 Następstwa przekroczenia poziomu odniesienia

Jak wyżej wskazano, art. 23c ust. 3 P.a. przesądza, że sama już tylko **możliwość** przekroczenia poziomu odniesienia w miejscach pracy zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na „terenach radonowych” obliuguje kierowników jednostek do podjęcia działań zapewniających ograniczenie narażenia pracowników na radon.

Dalsze jednak konsekwencje przewidział ustawodawca w przypadku, gdy przekroczenie poziomu odniesienia zyskuje walor pewności.

5.3.1 Kwalifikacja pracowników jako pracowników kategorii B

Art. 23c ust. 6 P.a. stanowi, że pracowników wykonujących pracę w miejscach pracy, o których mowa w ust. 1 pkt 1 (zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na „terenach radonowych”), w których – mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji

– stężenie promieniotwórcze radonu przekracza poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b (300 Bq/m³), ale którzy nie są narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 6 mSv, kwalifikuje się jako pracowników kategorii B.

Powyższe oznacza, że procedura zaliczenia pracowników do kategorii B wymaga:

- dokonania pomiaru stężenia radonu (art. 23c ust. 1 tiret *in fine* P.a.),
- wystąpienia takiego wyniku tego pomiaru, który wskaże na **możliwość** przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³ (art. 23c ust. 3 *in pr.* P.a.),
- podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji (działań zapewniających ograniczenie narażenia pracowników na radon, art. 23c ust. 3 *in fine* P.a.),
- dokonania pomiaru średniorocznego stężenia radonu celem weryfikacji, czy nastąpił stan przekroczenia poziomu odniesienia, o którym mowa w art. 23b (*ergo*: wartości stężenia radonu oszacowanej na podstawie pomiarów tego stężenia w okresie nie krótszym niż jeden miesiąc, *vide* art. 3 pkt 47a P.a.).

Podmiotem odpowiedzialnym za zakwalifikowanie pracownika do właściwej kategorii narażenia jest kierownik jednostki organizacyjnej (art. 17 ust. 6 P.a.), który na bieżąco informuje pracownika o wynikach oceny jego narażenia (art. 17 ust. 5b P.a.).

Zgodnie z art. 18 ust. 1 pkt 2 P.a. kierownik jednostki organizacyjnej zobowiązany jest wyznaczyć w tych miejscach pracy, gdzie istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii B, tereny nadzorowane. Przepis § 3 ust. 1 rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych⁵⁸ określa następujące podstawowe wymagania dotyczące terenów nadzorowanych:

- granice terenu nadzorowanego oznacza się znakami ostrzegawczymi, których wzór zawiera załącznik nr 2 do rozporządzenia (§ 3 ust. 1 pkt 1); granice terenu nadzorowanego można oznaczyć tablicami informacyjnymi podającymi rodzaj źródła promieniowania jonizującego, w tym rodzaj substancji promieniotwórczej, oraz związane z nimi zagrożenie (§ 3 ust. 1 pkt 2); znaki ostrzegawcze, o których mowa w pkt 1, a w przypadku skorzystania z możliwości, o której mowa w pkt 2, także tablice informacyjne, umieszcza się przy wejściu na teren nadzorowany; w przypadku wytyczenia tego terenu poza pomieszczeniem zamkniętym umieszcza się je w odstępach nie większych niż 10 m (§ 3 ust. 1 pkt 3);
- dostęp do terenu nadzorowanego i jego opuszczanie przez osoby inne niż pracownicy zatrudnieni na tym terenie podlega rejestracji (§ 3 ust. 1 pkt 4).

Za spełnienie powyższych wymagań jest odpowiedzialny kierownik jednostki organizacyjnej, który podejmuje określone działania, w celu ich wykonania po zasięgnięciu opinii inspektora ochrony radiologicznej i lekarza medycyny pracy (art. 18 ust. 2 P.a.).

⁵⁸ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 722).

5.3.2 Kwalifikacja pracowników jako pracowników kategorii A

Pracowników wykonujących pracę we wszystkich miejscach pracy, o których mowa w art. 23c ust. 1 P.a., którzy mogą być narażeni na otrzymanie dawki skutecznej (efektywnej) większej niż 6 mSv rocznie, kwalifikuje się jako pracowników kategorii A (art. 23c ust. 5 P.a.).

Z uwagi na wyższą wagę zagrożeń zdrowotnych, procedura kwalifikacji pracowników do kategorii A nie wymaga już podjęcia kroków, wymaganych przy kategorii B. Jedyną normatywną przesłanką w tym zakresie jest sama możliwość narażenia pracowników na otrzymanie określonej dawki skutecznej (efektywnej) promieniowania jonizującego.

Pracownicy kategorii A podlegają ocenie narażenia prowadzonej na podstawie systematycznych pomiarów dawek indywidualnych, a jeżeli mogą być narażeni na skażenie wewnętrzne mające wpływ na poziom dawki skutecznej dla tej kategorii pracowników, podlegają również pomiarom skażeń wewnętrznych (art. 17 ust. 3 P.a.). Podobnie jak w przypadku pracowników kategorii B, odpowiedzialny za zakwalifikowanie pracownika do kategorii A jest kierownik jednostki organizacyjnej (art. 17 ust. 6 P.a.).

Skutkiem zakwalifikowania do kategorii A jest konieczność dokonania klasyfikacji medycznej pracownika przez uprawnionego lekarza. Ze względu na zdolność do wykonywania pracy w grupie pracowników kategorii A ustala się następującą klasyfikację medyczną: zdolny, zdolny pod pewnymi warunkami, niezdolny. Pracownik nie może być zatrudniony na określonym stanowisku w kategorii A, jeżeli uprawniony lekarz wydał orzeczenie, że jest on niezdolny do wykonywania takiej pracy (art 17 ust. 7-8 P.a.).

Zgodnie z art. 21 ust. 1 P.a., kierownik jednostki organizacyjnej obowiązany jest prowadzić rejestr dawek indywidualnych otrzymywanych przez pracowników zaliczonych do kategorii A. Centralny rejestr tych dawek prowadzi Prezes Państwowej Agencji Atomistyki (art. 21 ust. 3 P.a.). W myśl § 1 pkt 3 rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 25 maja 2021 r. w sprawie wymagań dotyczących rejestracji dawek indywidualnych⁵⁹, rejestracji takiej podlegają również narażenia o których mowa w art. 23c ust. 5 P.a., a więc pochodzące od radonu.

Pracownicy kategorii A podlegają szczególnemu nadzorowi medycznemu, za który odpowiedzialny jest kierownik jednostki organizacyjnej oraz uprawniony lekarz, któremu zapewnia się dostęp do informacji niezbędnych do wydania orzeczenia o zdolności tych pracowników do wykonywania określonej pracy, łącznie z informacją o warunkach środowiskowych w miejscu pracy (art. 30 ust. 1 P.a.). Nadzór ten obejmuje w szczególności okresowe badania lekarskie przeprowadzane co najmniej raz w roku (art. 30 ust. 2 P.a.). Dokumentacja medyczna, zakładana dla pracownika kategorii A, jest przechowywana do dnia osiągnięcia przez niego wieku 75 lat, jednak nie krócej niż przez 30 lat od dnia zakończenia przez niego pracy w warunkach narażenia (art. 30 ust. 3 P.a.).

Zgodnie z art. 18 ust. 1 pkt 1 P.a. kierownik jednostki organizacyjnej zobowiązany jest wyznaczyć w tych miejscach pracy, gdzie istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii A, tereny kontrolowane. Przepis § 2 ust. 1 rozporządzenia Rady

⁵⁹ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 maja 2021 r. w sprawie wymagań dotyczących rejestracji dawek indywidualnych (Dz. U. poz. 1053).

Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych określa w szczególności następujące wymagania dotyczące terenów kontrolowanych:

- granice terenu kontrolowanego oznacza się znakami ostrzegawczymi, których wzór zawiera załącznik nr 1 do rozporządzenia, oraz tablicami informacyjnymi podającymi rodzaj źródła promieniowania jonizującego, w tym rodzaj substancji promieniotwórczej, oraz związane z nimi zagrożenie; znaki ostrzegawcze i tablice informacyjne, o których mowa w pkt 1, umieszcza się przy wejściu na teren kontrolowany; w przypadku wytyczenia tego terenu poza pomieszczeniem zamkniętym umieszcza się je w odstępach nie większych niż 10 m (§ 2 ust. 1 pkt 1-2);
- dostęp do terenu kontrolowanego, ograniczony przez zastosowanie środków technicznych, w szczególności drzwi, bram lub widocznych blokad, mają: pracownicy zatrudnieni na tym terenie, za zgodą kierownika jednostki organizacyjnej lub upoważnionej przez niego osoby – inne przeszkolone osoby wyposażone w dawkomierze osobiste umożliwiające bezpośrednie określenie dawki od narażenia zewnętrznego otrzymanej w czasie przebywania na tym terenie (§ 2 ust. 1 pkt 3 lit. a, c);
- osoby, o których mowa w pkt 3 lit. a i lit. c, mają dostęp do terenu kontrolowanego i jego opuszczania na podstawie przepustek, kart wstępu lub identyfikatorów, jeżeli udzielono im informacji o zasadach zachowania się na tym terenie (§ 2 ust. 1 pkt 4-4a);
- prace na terenie kontrolowanym prowadzi się zgodnie z instrukcjami pracy odpowiednimi do zagrożenia związanego z występującymi źródłami promieniowania jonizującego oraz wykonywanymi czynnościami, a pracowników wykonujących te prace wyposaża się w środki ochrony indywidualnej odpowiednie do występującego zagrożenia.

Konieczność stosowania **wszystkich** powyższych wymogów nie została przez ustawodawcę wyłączona w odniesieniu do pracowników, zakwalifikowanych do kategorii A na podstawie przepisu art. 23c ust. 5 P.a. w związku z narażeniem na radon.

5.3.3 Powiadomienie w zakresie ochrony radiologicznej

Wykonywanie działalności związanej z narażeniem polegającej na wykonywaniu pracy w miejscach pracy, w których, mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, stężenie radonu wewnątrz pomieszczeń w tych miejscach pracy przekracza poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b (300 Bq/m^3) – wymaga powiadomienia w zakresie ochrony radiologicznej (art. 4 ust. 1a pkt 15 P.a.).

Powiadomienia takie (w miejscach pracy niepodlegających nadzorowi organów nadzoru górniczego) przyjmuje państwowy wojewódzki inspektor sanitarny (art. 5¹ ust. 2 pkt 2 P.a.).

Zachodzi tu więc pewna analogia do, wyżej opisanej, procedury kwalifikacji pracowników do kategorii B, jako że dokonanie powiadomienia wymaga również uprzedniego dokonania pomiaru stężenia radonu, uzyskania wyniku wskazującego na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia, podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji i dokonania pomiaru średniorocznego stężenia radonu. Dopiero gdy, cytując *verba legis*, „mimo podjęcia tych działań”, nastąpił stan przekroczenia poziomu odniesienia, kierownik jednostki organizacyjnej winien dokonać powiadomienia.

Doniosłe w tym zakresie obwarowanie zawiera przepis art. 5¹ ust. 3 P.a. Stanowi on bowiem, że do wykonywania działalności związanej z narażeniem **można przystąpić**, jeżeli w terminie 30 dni od dnia doręczenia powiadomienia właściwy organ nie wniesie, w drodze decyzji administracyjnej, sprzeciwu.

Powyższe unormowania przesądzają, że na czas trwania postępowania administracyjnego, zainicjowanego złożeniem powiadomienia zachodzi konieczność **wyłączenia z eksploatacji tych pomieszczeń**, w których przekroczony jest poziom odniesienia.

Przepis art. 123 ust. 1 pkt 2 P.a. stanowi, że kierownikowi jednostki organizacyjnej, która bez wymaganego powiadomienia wykonuje działalność, o której mowa w art. 4 ust. 1a (działalność związaną z narażeniem polegającą na wykonywaniu pracy w miejscach pracy, w których, mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, stężenie radonu wewnątrz pomieszczeń w tych miejscach pracy przekracza poziom odniesienia 300 Bq/m³) – wymierza się karę pieniężną w wysokości do ok. 35 000 zł.

Podobnie, jak opisano wyżej (*vide* pkt 2.1 i 2.2), za powyższy czyn wymierza się również karę pieniężną w wysokości do ok. 350 000 zł jednostce organizacyjnej wykonującej działalność związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1b P.a.), osobie prowadzącej jednoosobową działalność oraz każdemu ze wspólników spółki cywilnej, wykonującym działalność związaną z narażeniem (art. 123 ust. 1c P.a.).

Art. 125 ust. 1 P.a. przewiduje **pięcioletni** termin przedawnienia nałożenia kary pieniężnej, co oznacza, że w 2024 r. możliwe jest nałożenie kar za cały okres od daty wejścia w życie przedmiotowych przepisów.

5.4 Radon a jednostki systemu oświaty

W myśl art. 32a Prawa atomowego, przepisy art. 10, art. 11, art. 14, art. 17, art. 21, art. 22, art. 23c, art. 26 i art. 29-32 tego Prawa stosuje się odpowiednio do **uczniów**, studentów i praktykantów.

Prawo to, w przeciwieństwie do definicji określenia „pracownik”, nie zawiera własnej definicji określenia „uczeń”.

Powyższe oznacza, że **wszystkie**, wyżej opisane „obowiązki radonowe” muszą być realizowane w przedszkolach, szkołach podstawowych i ponadpodstawowych, biorąc pod uwagę definicje pojęcia „ucznia” zawarte w:

- art. 2 pkt 11 ustawy z dnia 7 września 1991 r. o systemie oświaty (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 2230 z późn. zm.) oraz art. 4 pkt 20 ustawy z dnia 14 grudnia 2016 r. – Prawo oświatowe (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 900 z późn. zm.) – „*należy przez to rozumieć także słuchaczy i wychowanków*”;
- art. 2 pkt 33 ustawy z dnia 27 października 2017 r. o finansowaniu zadań oświatowych (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1400) – *należy przez to rozumieć także słuchacza szkoły dla dorosłych, branżowej szkoły II stopnia i szkoły policealnej oraz dziecko korzystające z wychowania przedszkolnego.*

Tym samym względem tak pojętych „uczniów” zrealizować należy obowiązki o charakterze powszechnym, sprecyzowane w art. 23c ust. 1 i 2 Prawa atomowego, w szczególności:

- zapewnić należy pomiar stężeń radonu (art. 23c ust. 1 P.a.);
- obowiązki optymalizacyjne i informacyjne (art. 23c ust. 2 P.a.), przy czym te ostatnie podlegają, rzecz jasna, wykonaniu względem opiekunów prawnych dzieci.

Natomiast w przypadku wyników pomiarów, wskazujących na możliwość wystąpienia podwyższonych stężeń radonu, art. 32a nakazuje realizację wobec uczniów wszystkich dalszych obowiązków, wynikających z art. 23c ust. 3 i następne Prawa atomowego (*vide* pkt 3).