dr inż. Magdalena Nakielska[1)*)]
ORCID: 0000-0001-6349-6988
dr inż. Anna Kaczmarek[1)]
ORCID: 0000-0002-9081- 4520
mgr inż. Katarzyna Stefańska[2)]

Indoor microclimate and radon risk

Mikroklimat pomieszczeń a zagrożenie radonowe

DOI: 10.15199/33.2026.08.11

Abstract. This paper pressents the analysis of the relationship between indoor microclimate and radon concentration, and to assess health risks using the examples of Poland and Norway – countries with differing geological and climatic conditions and levels of public awareness. Research and analyses indicate that radon – despite being the second leading risk factor for lung cancer after smoking – remains a little-recognised threat among the general public. In Norway, public awareness of radon is significantly higher, primarily due to the greater scale of the threat and a consistent information policy. The analysis showed that in Norway, due to the specific geological substrate rich in crystalline rocks and the harsh climate favouring limited natural ventilation, higher average radon concentrations are observed in buildings than in Poland. In Poland, on the other hand, a significant factor influencing the variability of radon concentrations is seasonality and the diversity of local ground conditions. In both countries, a strong correlation was demonstrated between microclimate parameters and radon concentration levels – in particular, insufficient ventilation and pressure differences between the interior and the ground facilitate its accumulation. Seasonal variation in radon concentrations has also been demonstrated, with higher values observed during the heating season.
Keywords: radon; indoor microclimate; risk assessment.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę zależności między mikroklimatem pomieszczeń a stężeniem radonu oraz ocenę ryzyka zdrowotnego na przykładzie Polski i Norwegii – krajów o odmiennych warunkach geologicznych, klimatycznych i świadomości społecznej. Badania oraz analizy wskazują, że radon, mimo iż jest drugim po paleniu tytoniu czynnikiem ryzyka raka płuc, pozostaje słabo rozpoznawalnym zagrożeniem wśród społeczeństwa. W Norwegii świadomość społeczna dotycząca radonu jest zdecydowanie większa, co wynika przede wszystkim z większej skali zagrożenia oraz konsekwentnie prowadzonej polityki informacyjnej. Analiza wykazała, że w Norwegii, ze względu na specyficzne podłoże geologiczne bogate w skały krystaliczne oraz surowy klimat sprzyjający ograniczonej wentylacji naturalnej, obserwuje się większe niż w Polsce średnie stężenia radonu w budynkach. Natomiast w naszym kraju istotnym czynnikiem wpływającym na zmienność stężenia radonu jest sezonowość oraz zróżnicowanie lokalnych warunków gruntowych. W obu krajach wykazano silną zależność między parametrami mikroklimatu a stężeniem radonu – w szczególności niewystarczająca wentylacja oraz różnice ciśnienia między wnętrzem a podłożem sprzyjają jego kumulacji. Wykazano również sezonową zmienność stężenia radonu, z większymi wartościami w okresie grzewczym.
Słowa kluczowe: radon; mikroklimat pomieszczeń; ocena ryzyka.

In recent decades, the quality of indoor air has become one of the key areas of research in building structures. This is particularly important because people spend most of their time indoors, where pollutant concentrations can be significantly higher than in the outdoor environment [1 – 3]. Among the factors that shape the microclimate of residential spaces – such as temperature, relative humidity, and the chemical composition of the air – particular attention is drawn to the presence of harmful gases, including natural radionuclides. One of the most significant is radon (Rn-222), a colorless, odorless, and chemically inert noble gas formed as a result of the decay of radium in the Earth's crust [4]. Radon easily migrates from the ground into the interior of buildings, leading to its accumulation in enclosed spaces [1]. Consequently, it is the primary source of natural ionizing radiation in indoor environments and one of the most significant risk factors for lung cancer, second only to tobacco smoking. Figure 1 shows examples of sources of radon infiltration into a residential building.

W ostatnich dekadach jakość powietrza wewnętrznego stała się jednym z kluczowych obszarów badań w obiektach budowlanych. Jest to szczególnie istotne, gdyż człowiek zdecydowaną większość czasu spędza w pomieszczeniach zamkniętych, gdzie stężenia zanieczyszczeń mogą być znacznie większe niż w środowisku zewnętrznym [1 – 3]. Wśród czynników kształtujących mikroklimat pomieszczeń mieszkalnych, takich jak temperatura, wilgotność względna czy skład chemiczny powietrza, szczególną uwagę zwraca obecność gazów szkodliwych, w tym naturalnych radionuklidów. Jednym z najistotniejszych jest radon (Rn-222), bezbarwny, bezwonny i chemicznie obojętny gaz szlachetny powstający w wyniku rozpadu radu w skorupie ziemskiej [4]. Radon łatwo migruje z podłoża gruntowego do wnętrza budynków, prowadząc do jego akumulacji w przestrzeniach zamkniętych [1]. W konsekwencji stanowi on główne źródło naturalnego promieniowania jonizującego w środowisku wewnętrznym oraz jeden z najważniejszych czynników ryzyka rozwoju raka płuc, ustępując jedynie paleniu tytoniu. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe źródła przenikania radonu do budynku mieszkalnego.

[1)] Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[2)] Termoenegi Norge AS
[*)] Correspondence address: magdalena.nakielska@pbs.edu.pl

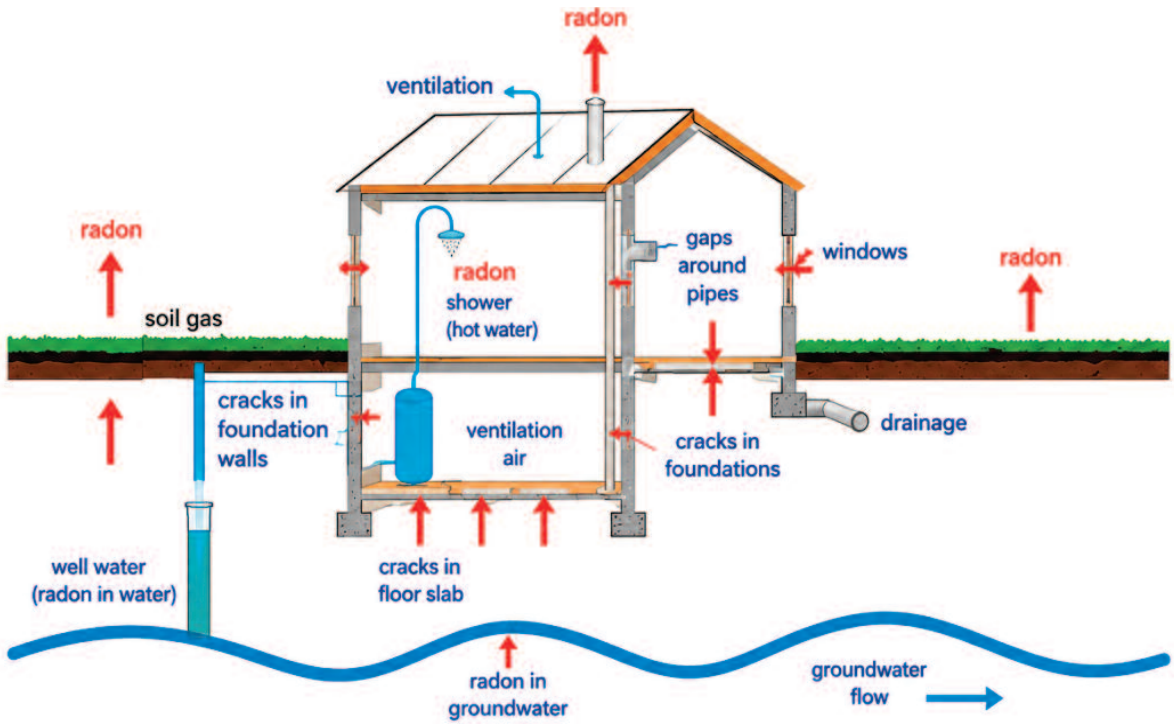

Fig. 1. Source of radon penetration into a residental building crevices and cracs in foundation, leaks in pipes, passing trought the undamaged basement floor, building materials, water used at home [5]
Rys. 1. Źródła przenikania radonu do budynku mieszkalnego: szczeliny i pęknięcia w fundamentach, nieszczelności w rurach, przenikanie przez nieuszkodzoną podłogę piwnicy, materiały budowlane, woda używana w domu [5]

The impact of radon on the microclimate of residential spaces is multifaceted. The concentration of this gas is closely related to indoor environmental parameters, such as ventilation intensity, air temperature, and relative humidity, as well as to the geological and structural conditions of the building [6, 7]. Studies indicate that insufficient air exchange promotes the accumulation of radon, whereas properly designed ventilation systems can significantly reduce its levels indoors. Furthermore, interactions between radon and other indoor chemical compounds, such as carbon dioxide, can affect both occupants' comfort and their health [8 ÷ 10]. Despite an increasing number of studies, the issue of radon's impact on the microclimate of residential spaces remains insufficiently understood, especially in the context of dynamic changes in environmental parameters and the behavior of building occupants. Further analyses are needed that take into account the physical aspects of radon transport and its interactions with ventilation systems and other indoor air pollutants [3]. Effective protection of buildings against radon is typically based on: limiting the inflow of gas from the ground; reducing the pressure of soil gases beneath the building; and effective room ventilation.

One of the countries affected by the risks and effects of radon radiation is Norway. Studies have shown that the average radon concentration in Norwegian homes is approximately twice the calculated global average [11].

Wpływ radonu na mikroklimat pomieszczeń mieszkalnych ma charakter złożony i wieloczynnikowy. Stężenie tego gazu pozostaje w ścisłej zależności od parametrów środowiska wewnętrznego, takich jak intensywność wentylacji, temperatura powietrza czy wilgotność względna, a także od warunków geologicznych i konstrukcyjnych budynku [6, 7]. Badania wskazują, że niewystarczająca wymiana powietrza sprzyja kumulacji radonu, podczas gdy odpowiednio zaprojektowane systemy wentylacyjne mogą istotnie redukować jego poziom w pomieszczeniach. Co więcej, interakcje pomiędzy radonem a innymi związkami chemicznymi w pomieszczeniu, takimi jak dwutlenek węgla, mogą wpływać zarówno na komfort użytkowników, jak i na ich zdrowie [8 ÷ 10]. Pomimo coraz większej liczby badań, problem oddziaływania radonu na mikroklimat pomieszczeń mieszkalnych nadal pozostaje niewystarczająco rozpoznany, zwłaszcza w kontekście dynamicznych zmian parametrów środowiskowych oraz zachowań użytkowników budynków. Konieczne jest prowadzenie dalszych analiz uwzględniających aspekty fizyczne transportu radonu i jego interakcje z systemami wentylacyjnymi oraz innymi zanieczyszczeniami powietrza wewnętrznego [3]. Zazwyczaj skuteczna ochrona budynków przed radonem bazuje na: ograniczeniu napływu gazu z gruntu; zmniejszeniu ciśnienia gazów gruntowych pod budynkiem; skutecznej wentylacji pomieszczeń.

Jednym z krajów dotkniętych zagrożeniami i skutkami promieniowania radonowego jest Norwegia. Badania wykazały, że średnie stężenie radonu w norweskich domach jest ok. dwukrotnie większe niż obliczona średnia światowa [11].

Radon hazards in buildings

In Poland and Norway, the radon hazard varies, mainly due to the geological structure and properties of the subsoil. Norway has some of the highest average radon concentrations in Europe, due to the presence of radium-rich rocks (e.g., alum shale, uranium-bearing granites) and the high permeability of sediments [12]. Additionally, the cool climate promotes the formation of negative pressure inside buildings, which increases radon infiltration from the ground.

Poland also has areas of elevated risk, particularly in mountainous and highland regions (e.g., the Sudetes), where crystalline and uranium-bearing rocks are found. Studies conducted, among other places, in underground facilities (e.g., mines) show significant variability in radon concentrations and a potentially high risk to the health and lives of workers [13].

In Norway, the average radon concentration in residential buildings is approximately 89 Bq/m³, and in about 9% of cases it exceeds the reference level of 200 Bq/m³ [12]. The photograph shows a map of Norway with areas of radon concentration marked (the highest concentrations are indicated in violet and pink).

According to the recommendations of the Norwegian Radiation Protection Authority, remedial measures should be taken when concentrations exceed 100 Bq/m³. In Poland, in accordance with EU directives, current regulations set the reference level for the annual average indoor radon concentration at 300 Bq/m³. Figure 2 shows areas of radon concentration in Poland.

The key to mitigating radon risk is monitoring radon concentrations and implementing technical measures, such as improving ventilation, sealing foundations, and installing ground-depression systems. In Norway, radon potential maps and mandatory measurements in public buildings are widely used, which serves as an example of an effective risk

Zagrożenia radonowe w budynkach

W Polsce i Norwegii zagrożenie radonowe jest różne, co wynika głównie z budowy geologicznej oraz właściwości podłoża. W Norwegii odnotowuje się jedne z największych w Europie średnich stężeń radonu, co wynika z obecności skał bogatych w rad (np. łupki ałunowe, granity uranonośne) oraz dużej przepuszczalności osadów [12]. Dodatkowo chłodny klimat sprzyja powstawaniu podciśnienia w budynkach, co zwiększa infiltrację radonu z gruntu.

W Polsce również występują obszary podwyższonego ryzyka, szczególnie w regionach górskich i wyżynnych (np. Sudety), gdzie występują skały krystaliczne i uranonośne. Badania prowadzone m.in. w podziemnych obiektach (np. kopalniach) wykazują znaczną zmienność stężenia radonu oraz potencjalnie duże zagrożenie zdrowia i życia pracowników [13].

W Norwegii średnie stężenie radonu w budynkach mieszkalnych wynosi ok. 89 Bq/m³, a w ok. 9% przekracza poziom referencyjny – 200 Bq/m³ [12]. Na fotografii przedstawiono mapę Norwegii z zaznaczonymi obszarami koncentracji radonu (największe stężenie zaznaczono kolorem fiolotowym i różowym).

Zgodnie z zaleceniami norweskiego urzędu ds. ochrony radiologicznej, działania zaradcze powinny być podejmowane już przy stężeniu powyżej 100 Bq/m³. W Polsce, zgodne z dyrektywami UE, w obowiązujących przepisach przyjęto, że poziom referencyjny średniorocznego stężenia radonu w pomieszczeniach wynosi 300 Bq/m³. Na rysunku 2 pokazano obszar koncentracji radonu w Polsce.

Podstawowym elementem ograniczania zagrożenia radonowego jest monitoring jego stężenia oraz wdrażanie działań technicznych, takich jak poprawa wentylacji, uszczelnianie fundamentów czy instalacja systemów depresji podłoża. W Norwegii powszechnie stosuje się mapy potencjału radonowego oraz obowiązkowe pomiary w budynkach użyteczności publicznej, co stanowi przykład skutecznej polityki zarządzania ryzykiem. W Polsce działania te są wciąż rozwijane, a klu-

Map of Norway showing areas of high radon concentration [14]
Mapa Norwegii z zaznaczonymi obszarami koncentracji radonu [14]

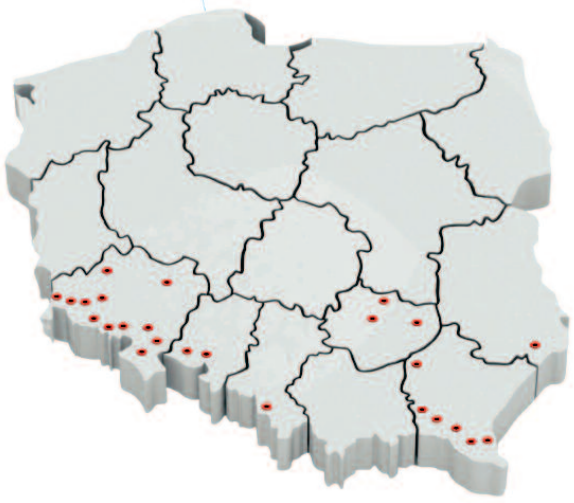

Fig. 2. Areas where the average annual radon concentration in indoor air in a significant number of buildings may exceed the reference level of 300 Bq/m³ [5]
Rys. 2. Obszary, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń może przekraczać poziom odniesienia – 300 Bq/m³ [5]

management policy. In Poland, these efforts are still being developed, and the key challenge remains raising public awareness and implementing systematic monitoring at the national level.

Legal requirements regarding radon: the cases of Poland and Norway

In Norway, regulations concerning radon were implemented more than two decades ago, and the current provisions are set forth in TEK17 [15]. Buildings are required to be designed and constructed in a manner that protects occupants from exposure to elevated radon concentrations that could pose a health risk. First and foremost, it must be ensured that the average annual radon concentration indoors does not exceed 200 Bq/m³. In 2010, detailed requirements were introduced regarding measures to prevent radon from entering newly constructed buildings. At the same time, it was reaffirmed that the maximum permissible annual average radon concentration indoors must not exceed 200 Bq/m³. The guidelines also included the requirement to use a balanced ventilation system, which helps reduce radon concentrations indoors. Government agencies and numerous health care institutions contributed to the development of the document "Nasjonal Radonstrategi" (National Radon Strategy). As a result of implementing the measures contained therein, it was possible to reduce radon concentrations in newly constructed buildings by as much as approximately 50% [16]. In Norway, the basic regulations concerning radiation protection are set forth in the following legal acts:

1. **Regulation No. 840 of June 19, 2017, on Technical Requirements for Buildings** (Building Technical Regulation/TEK17) [15]. The regulations contained in this act specify, in particular, that:

- in buildings containing rooms intended for permanent human occupancy, the average annual radon concentration should not exceed 200 Bq/m³;
- buildings intended for human occupancy must be equipped with a radon barrier separating them from the ground and must be designed in a manner that allows for the use of ground pressure reduction systems (e.g., a subfloor depression), which can be activated when the radon concentration in the indoor air exceeds 100 Bq/m³;
- to limit the inflow of radon from the ground, appropriate structural and installation measures must be implemented, including, among others, sealing layers (radon barriers), subsoil ventilation solutions, and mechanical ventilation systems, in particular balanced ventilation;

2. **Lov om folkehelsearbeid (folkehelseloven)** – Public Health Act [17]. This law defines the municipality's responsibilities regarding public health measures;

3. **Arbeidsmiljøloven** – the Working Environment Act [18]. This law imposes obligations on employers to mitigate risks arising from exposure to radon radiation. In work environments where employees may be exposed to radon, the employer is required to ensure an adequate level of protection;

czowym wyzwaniem pozostaje zwiększenie świadomości społecznej oraz wdrożenie systemowego monitoringu na poziomie krajowym.

Uwarunkowania prawne dotyczące radonu na przykładzie Polski i Norwegii

W Norwegii przepisy dotyczące radonu wdrożono ponad dwie dekady temu, a obecne zapisy to TEK17 [15]. Wymaga się, aby budynek został zaprojektowany i wykonany w sposób chroniący mieszkańców przed narażeniem na podwyższone stężenie radonu, które mogłoby stanowić zagrożenie dla ich zdrowia. Należy przede wszystkim uwzględnić, że średnie roczne stężenie radonu w pomieszczeniach nie powinno przekraczać 200 Bq/m³. W 2010 r. wprowadzono szczegółowe wymagania dotyczące środków zapobiegających przenikaniu radonu do nowo wznoszonych budynków. Jednocześnie podtrzymano, że maksymalne dopuszczalne średnioroczne stężenie radonu w pomieszczeniach nie może przekraczać 200 Bq/m³. Wytyczne obejmowały również konieczność stosowania zrównoważonego systemu wentylacji, który umożliwia zmniejszenie stężenia radonu w pomieszczeniach. Organy państwowe oraz liczne instytucje zajmujące się ochroną zdrowia przyczyniły się do opracowania dokumentu „Nasjonal Radonstrategi" (Narodowa Strategia Radonowa). W wyniku wdrożenia działań w nim zawartych, możliwe było zmniejszenie stężenia radonu w nowo wznoszonych budynkach nawet o ok. 50% [16].

W Norwegii podstawowe regulacje dotyczące ochrony radiologicznej zostały określone w następujących aktach prawnych:

1. **Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk** (Byggteknisk forskrift/TEK17) [15]. Regulacje zawarte w tym akcie w szczególności wskazują, że:

- w budynkach zawierających pomieszczenia przeznaczone na stały pobyt ludzi średnioroczne stężenie radonu nie powinno przekraczać 200 Bq/m³;
- budynki przeznaczone na pobyt ludzi muszą być wyposażone w barierę przeciwradonową oddzielającą je od gruntu oraz być zaprojektowane w sposób umożliwiający zastosowanie systemów redukcji ciśnienia w podłożu (np. podposadzkowej depresji), które mogą zostać uruchomione w przypadku, gdy stężenie radonu w powietrzu wewnętrznym przekracza poziom 100 Bq/m³;
- w celu ograniczenia napływu radonu z gruntu należy zastosować odpowiednie środki konstrukcyjne i instalacyjne, w tym m.in. warstwy uszczelniające (bariery radonowe), rozwiązania wentylacji podłoża oraz systemy wentylacji mechanicznej, w szczególności wentylację zrównoważoną;

2. **Lov om folkehelsearbeid (folkehelseloven)** – ustawa o zdrowiu publicznym [17]. Ten akt prawny określa odpowiedzialność gminy za działania dotyczące zdrowia publicznego;

3. **Arbeidsmiljøloven** – ustawa o środowisku pracy [18]. Ten akt prawny nakłada na pracodawcę obowiązki związane z ograniczaniem ryzyka wynikającego z narażenia na promieniowanie radonowe. W środowisku pracy, w którym pra-

4. **Lov om strålevern og bruk av stråling** (strålevernloven) – the Radiation Protection Act [19] – regulates measures to limit radon exposure in public facilities. Pursuant to Regulation No. 928 of December 1, 1995, on health protection in such facilities, when the radon concentration exceeds 100 Bq/m³, remedial measures must be taken to reduce it. Similar requirements apply to residential buildings whose owners do not reside there permanently. In these facilities and rooms, the maximum permissible radon concentration should not exceed 200 Bq/m³.

The legal framework for radon protection in Poland is based on EU Council Directive 2013/59/EURATOM of December 5, 2013 [20], which requires European Union member states to transpose provisions regulating exposure to ionizing radiation, including radon, into national law. The Directive sets out, among other things, requirements for monitoring radon exposure in workplaces (Article 54) and in residential buildings (Article 74), and emphasizes the need to develop national action plans for the long-term management of risks associated with the presence of radon in residential buildings, public buildings, and workplaces (Article 103), taking into account sources of radon infiltration such as soil, building materials, and water [21].

The provisions of the directive were transposed into Polish law by the Atomic Energy Act of November 29, 2020. [22]. On this basis, on January 22, 2022, the National Action Plan on Long-Term Radon Exposure was announced, covering buildings intended for human occupancy, including both residential buildings and workplaces [23]. A key element of this document is the specification of methods for measuring radon concentrations, the rules for financing such measurements, and the assignment of responsibilities to the relevant public administration bodies and specialized entities.

To prevent radon concentrations in buildings from exceeding permissible levels, detailed technical requirements were introduced [24], including:

- the requirement to install moisture barriers on building components in contact with the ground to limit radon penetration;
- the need to ensure adequate ventilation in rooms intended for human occupancy.

It should be emphasized that legal regulations in Poland concerning the monitoring of radon concentrations and the prevention of its penetration into buildings were introduced relatively recently. This stems, among other things, from limited public awareness of the risks associated with radon, which points to the need to intensify information and education efforts. The National Atomic Energy Agency suggests that in many residential buildings in Poland, the average annual radon concentration ranges from 20 to 100 Bq/m³, which corresponds to the levels observed in most Central European countries. These values are considered typical for areas with average radon potential. At the same time, locally – particularly in areas

cownicy mogą być narażeni na obecność radonu, pracodawca zobowiązany jest do zapewnienia odpowiedniego poziomu ochrony;

4. **Lov om strålevern og bruk av stråling** (strålevernloven) – ustawa o ochronie przed promieniowaniem [19] reguluje działania dotyczące ograniczania narażenia na radon w obiektach użyteczności publicznej. Zgodnie z rozporządzeniem z 1 grudnia 1995 r. nr 928 w sprawie ochrony zdrowia w tego typu obiektach, gdy stężenie radonu przekracza poziom 100 Bq/m³, należy podjąć środki zaradcze w celu jego zmniejszenia. Analogiczne wymagania odnoszą się do budynków mieszkalnych, których właściciel nie zamieszkuje na stałe. W wymienionych obiektach i pomieszczeniach maksymalne dopuszczalne stężenie radonu nie powinno przekraczać wartości 200 Bq/m³.

Podstawę regulacji prawnych dotyczących ochrony przed radonem w Polsce stanowi Dyrektywa Rady UE 2013/59/EURATOM z 5 grudnia 2013 r. [20] nakładająca na państwa członkowskie Unii Europejskiej obowiązek wdrożenia przepisów regulujących narażenie na promieniowanie jonizujące, w tym radon, do prawa krajowego. Dyrektywa określa m.in. wymagania dotyczące kontroli narażenia na radon w miejscach pracy (art. 54) i w budynkach mieszkalnych (art. 74) oraz wskazuje konieczność opracowania krajowych planów działań służących zarządzaniu długoterminowym ryzykiem związanym z obecnością radonu w budynkach mieszkalnych, użyteczności publicznej i miejscach pracy (art. 103), uwzględniając źródła jego infiltracji, takie jak grunt, materiały budowlane czy woda [21].

Postanowienia dyrektywy zostały wdrożone do polskiego porządku prawnego przez ustawę – Prawo atomowe z 29 listopada 2020 r. [22]. Na jej podstawie, 22 stycznia 2022 r., ogłoszono Krajowy Plan Działań dotyczący długotrwałego narażenia na radon, obejmujący budynki przeznaczone na pobyt ludzi, zarówno mieszkalne, jak i miejsca pracy [23]. Istotnym elementem tego dokumentu jest określenie metod prowadzenia pomiarów stężenia radonu, zasad ich finansowania oraz przypisanie kompetencji odpowiednim organom administracji publicznej i wyspecjalizowanym jednostkom.

W celu zapobiegania przekroczeniom dopuszczalnego stężenia radonu w budynkach wprowadzono szczegółowe wymagania techniczne [24], w tym:

- obowiązek stosowania izolacji przeciwwilgociowej elementów budynku mających kontakt z gruntem, ograniczającej przenikanie radonu;
- konieczność zapewnienia odpowiedniej wentylacji w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi.

Należy podkreślić, że regulacje prawne w Polsce dotyczące monitorowania stężenia radonu oraz zapobiegania jego przenikaniu do budynków zostały wprowadzone stosunkowo niedawno. Wynika to m.in. z ograniczonej świadomości społecznej w zakresie zagrożeń związanych z radonem, co wskazuje na potrzebę intensyfikacji działań informacyjnych i edukacyjnych. Państwowa Agencja Atomistyki sugeruje, że w wielu budynkach mieszkalnych średnioroczne stężenie radonu w Polsce wynosi 20 – 100 Bq/m³, co odpowiada poziomowi obserwowanemu w większości krajów Europy Środkowej.

with granite, gneiss, and formations rich in uranium and radium – concentrations may be many times higher. In this context, international cooperation plays a significant role. Norway shares its experiences regarding radon protection strategies.

In addition, support at the European level is provided by the European Radon Association (ERA), which works to raise awareness and reduce the risk of radon exposure by supporting specialists, the construction sector, and public institutions throughout Europe.

Summary

The impact of radon has both health and environmental-technical dimensions. A comparison of the regulations in force in Poland and Norway reveals significant similarities resulting from the implementation of international recommendations (including those of the WHO), but also differences in approaches to radon risk management and implementation practices. In both countries, the primary tool for controlling radon exposure is the establishment of reference levels for radon concentration in indoor air. In accordance with the international approach, these levels do not constitute a safety limit, but rather an intervention threshold above which corrective actions are recommended. In Norway, it is recommended to take action starting at a concentration of 100 Bq/m³, while maintaining a maximum value of 200 Bq/m³. These regulations are closely linked to building codes and land-use planning, which translates into a requirement to implement preventive measures in new buildings and a tangible reduction in radon concentrations in the housing stock [25]. In Poland, the regulatory system is also based on reference values consistent with European guidelines; however, the practical implementation of measures to limit radon concentrations is less integrated into the design and operation of buildings.

Available research findings indicate significant variability in radon concentrations in residential buildings. In this context, the role of occupants and ventilation systems becomes particularly important, as they largely determine the dynamics of changes in the indoor microclimate, including the concentration of radon and co-occurring pollutants [1]. The effectiveness of mitigating radon's impact on the microclimate of residential spaces depends not only on the adopted limit values, but above all on the degree to which they are enforced and integrated into building and environmental policies. The Norwegian model, based on the "as low as reasonably achievable" (ALARA), places greater emphasis on prevention and control as early as the building design stage, whereas in Poland, measures are more often reactive in nature.

Effective management of radon concentrations as a component of the indoor microclimate requires a systematic approach that encompasses legal regulations, technical solutions, and user education. Further research should focus on integrating microclimate parameters into predic-

Wartości te uznawane są za typowe na terenach o przeciętnym potencjale radonowym. Jednocześnie lokalnie, szczególnie na obszarach występowania skał granitowych, gnejsów oraz utworów bogatych w uran i rad, stężenie może być wielokrotnie większe.

W tym kontekście istotną rolę odgrywa współpraca międzynarodowa. Norwegia dzieli się swoimi doświadczeniami dotyczącymi strategii ochrony przed radonem. Dodatkowo wsparcie na poziomie europejskim zapewnia European Radon Association (ERA), która prowadzi działania na rzecz zwiększania świadomości oraz ograniczania ryzyka narażenia na radon, wspierając specjalistów, sektor budowlany oraz instytucje publiczne w całej Europie.

Podsumowanie

Oddziaływanie radonu ma zarówno wymiar zdrowotny, jak i środowiskowo-techniczny. Zestawienie regulacji obowiązujących w Polsce i Norwegii wskazuje na istotne podobieństwa wynikające z implementacji zaleceń międzynarodowych (m.in. WHO), ale również na różnice w podejściu do zarządzania ryzykiem radonowym oraz praktyk wdrożeniowych. W obu krajach podstawowym narzędziem kontroli narażenia na radon jest ustanowienie poziomów referencyjnych jego stężenia w powietrzu wewnętrznym. Zgodnie z podejściem międzynarodowym poziomy te nie stanowią granicy bezpieczeństwa, lecz próg interwencji, powyżej którego zaleca się podjęcie działań naprawczych. W Norwegii zaleca się podejmowanie działań już od stężenia 100 Bq/m³, przy jednoczesnym utrzymaniu wartości maksymalnej wynoszącej 200 Bq/m³. Regulacje te są ściśle powiązane z polityką budowlaną oraz planowaniem przestrzennym, co przekłada się na obowiązek stosowania rozwiązań prewencyjnych w nowych budynkach oraz realną redukcję stężenia radonu w zasobie mieszkaniowym [25]. W Polsce system regulacyjny również bazuje na wartościach referencyjnych zgodnych z wytycznymi europejskimi, jednak praktyczna implementacja środków ograniczających stężenie radonu jest mniej zintegrowana z procesem projektowania i eksploatacji budynków.

Dostępne wyniki badań wskazują na znaczną zmienność stężenia radonu w budynkach mieszkalnych. W tym kontekście rola użytkowników oraz systemów wentylacyjnych staje się szczególnie istotna, gdyż to właśnie one w dużej mierze determinują dynamikę zmian mikroklimatu wewnętrznego, w tym koncentrację radonu i współwystępujących zanieczyszczeń [1]. Skuteczność ograniczania wpływu radonu na mikroklimat pomieszczeń mieszkalnych zależy nie tylko od przyjętych wartości granicznych, ale przede wszystkim od stopnia ich egzekwowania oraz integracji z polityką budowlaną i środowiskową. Norweski model, oparty na zasadzie „as low as reasonably achievable" (ALARA), kładzie większy nacisk na prewencję i kontrolę już na etapie projektowania budynków, podczas gdy w Polsce działania mają częściej charakter reaktywny.

Efektywne zarządzanie stężeniem radonu jako elementem mikroklimatu pomieszczeń mieszkalnych wymaga podejścia systemowego, obejmującego zarówno regulacje prawne, jak i rozwiązania techniczne oraz edukację użytkowników. Dal-

tive models and on evaluating the effectiveness of implemented radon reduction strategies under various climatic and building conditions.

sze badania powinny koncentrować się na integracji parametrów mikroklimatu z modelami predykcyjnymi oraz na ocenie skuteczności wdrażanych strategii redukcji radonu w różnych warunkach klimatycznych i budowlanych.

Received: 02.03.2026
Revised: 18.05.2026
Published: 19.08.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.03.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 18.05.2026 r.
Opublikowano: 19.08.2026 r.

Literature

[1] Szczepanik-Ścislo N, Grządziel D, Mazur J, Kozak K, Schnotale J. Influence of Human Activity on Radon Concentration, Indoor Air Quality, and Thermal Comfort in Small Office Spaces. Sensors, 24 (15), 4949. https://doi.org/10.3390/s24154949.

[2] Kolarz PM, Filipović DM, Marinković BP. Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. Appl Radiat Isot. 2009. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.07.023. Epub 2009 Aug 6. PMID: 19700332].

[3] Olszewski J, Skubalski J. Stężenie radonu w wybranych budynkach mieszkalnych na terenie miasta Łodzi Medycyna Pracy 2011 T. 62 nr 1 s. 31-36.

[4] Dobrzyńska MM, Gajowik A, Wieprzowski K. Radon – occurrence and impact on the health. Rocznik Panstwowego Zakładu Higieny. 2023. DOI: 10.32394/rpzh. 2023.0242.

[5] Zespół do Spraw Informacji i Komunikacji Państwowej Agencji Atomistyki. Jak obniżyć poziom radonu w budynkach. Inżynier Budownictwa. 2023 (https://inzynierbudownictwa. pl/jak-obnizyc-poziom-radonu-w-budynkach/) (18.04.2026).

[6] Keramatollah A, Jafar M, Mahdi G. Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house Journal of Environmental Radioactivity. 2013; Volume 116, pages 166 – 173.

[7] Puskin JS, James AC. Radon exposure assessment and dosimetry applied to epidemiology and risk estimation. Radiation Research. 2006. DOI: 10.1667/RR3308.1. PMID: 16808608.

[8] Field RW. Radon: An Overview of Health Effects. Encyclopedia of Environmental Health, wyd. 2, 467–475 (Elsevier, 2019).

[9] Polednik B, Kozak K, Mazur J, Dudzińska M, Grządziel D. Radon and Its Decay Products in an Air-Conditioned Auditorium in Correlation with Indoor Air Parameters. Indoor Built Environ. 2017; 26, 621 – 630.

[10] Puskin JS, James AC. Radon exposure assessment and dosimetry applied to epidemiology and risk estimation. Radiation Research. 2006. DOI: 10.1667/RR3308.1. PMID: 16808608.

[11] Lecomte J-F, Solomon S, Takala J, Jung T, Strand P, Murith C, Kiselev S, Zhuo W, Shannoun F, Janssens A. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP 2014 Publication 126. Ann. ICRP 43 (3).

[12] Strand T, Lunder Jensen C, Ånestad K, Ruden L, Ramberg GB. High radon areas in Norway. International Congress Series. 2005; https://doi.org/10.1016/j.ics. 2004.10.027.

[13] Grygier A, Skubacz K, Piech A, Sobik-Szołtysek J. Two-year assessment of radon exposure in the underground tourist route in the Historic Silver Mine in Tarnowskie Góry (Poland). Scientific Reports volume 15, Article number: 8828 (2025).

[14] https://miljostatus. miljodirektoratet. no (20.04.2026).

[15] Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift/TEK17). Available from: https://dibk. no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/ (21.04.2026).

[16] Olsen B, Kolstad T, Haanes H, Finne IE. The effect of new building regulations on indoor radon in radonprone municipalities. Raport DSA 2022: 3. Østerås, Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority, Østerås, Norway, 2022.

[17] Lov om folkehelsearbeid (folkehelseloven) 24.06.2011 and Lov om endringer i folkehelseloven m. m. (krav til systematisk og kunnskapsbasert folkehelsearbeid, helsemessig beredskap) 20.06.2025.

[18] Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven) 20.06.2025.

[19] Lov om strålevern og bruk av stråling (strålevernloven) 01.07.2000.

[20] Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM z 5 grudnia 2013 r.

[21] Mazur J, Kozak K. 2020. Nowe regulacje dotyczące stężeń radonu (Rn-222) w budynkach i miejscach pracy w zapisach znowelizowanej ustawy Prawo atomowe. Inżynier i Fizyk Medyczny. 2020; 3 vol. 9, 169-172.

[22] Ustawa – Prawo atomowe z 29 listopada 2020 r. (Dz.U. 2021 poz. 1941).

[23] Obwieszczenie Ministra Zdrowia z 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.

[24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2019 r. poz. 1065, z późn. zm.).

[25] Finne I, Kolstad T, Larsson Bård Olsen M, Prendergast J, Rudjord A. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. Journal of Environmental Radioactivity. 2019; Volume 196, pages 259 – 263.